

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Ботанический сад УрО РАН

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научный руководитель:

Доктор с.-х. наук

Менщиков Сергей Леонидович

Екатеринбург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	10
1.1 Общая дендрологическая характеристика рода <i>Betula</i>	10
1.2 Изучение изменчивости берез.....	11
1.3 Изменчивость химического состава растений и ее зависимость от климата (географическая изменчивость).....	14
1.4 Изменчивость химического состава растений в связи с приспособлением к экстремальным условиям среды.....	15
1.5 Действие воздушных загрязнителей на древесные растения.....	17
1.6 Содержание макроэлементов в растениях и почве.....	18
2. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	20
2.1 Природно-климатическая характеристика района Карабашского медеплавильного завода.....	20
2.1.1 Климат.....	20
2.1.2 Рельеф и почва.....	21
2.1.3 Растительность.....	21
2.1.4 Гидрология.....	21
2.2 Природно-климатическая характеристика Южного Урала.....	21
2.2.1 Климат.....	22
2.2.2 Рельеф.....	23
2.2.3 Гидрология.....	23
2.2.4 Почвы.....	23
2.2.5 Растительность.....	24
2.3 Природно-климатическая характеристика Северного Урала...	24
2.3.1 Климат.....	24

2.3.2 Рельеф.....	25
2.3.3 Гидрология.....	25
2.3.4 Почва.....	25
2.3.5 Растительность.....	26
2.4 Природно-климатическая характеристика Приполярного Урала ..	27
2.4.1 Климат.....	27
2.4.2 Рельеф.....	27
2.4.3 Гидрография.....	27
2.4.4 Почвы.....	28
2.4. 5. Растительность.....	28

3. ОБЪЕКТЫ, МЕТОДИКА И ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ

РАБОТ	29
3.1. Объекты исследований.....	29
3.1.1 Характеристика объектов вблизи АО «Карабашмедь».....	29
3.1.2 Характеристика объектов горных систем.....	32
3.2. Методика исследований.....	40
3.2.1 Методика отбора образцов листьев и почвы.....	40
3.2.2 Методы химического анализа листьев.....	41
3.2.3 Методы химического анализа почвы.....	42
3.2.3 Методы статистического анализа.....	43
3.3. Объем выполненных работ.....	43

4. СОДЕРЖАНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ В ГРАДИЕНТЕ АЭРОТЕХНОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА	44
---	----

5. ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕ И ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗ <i>BETULA PENDULA</i> ROTH И	
---	--

BETULA PUBESCENS EHRLH. ВДОЛЬ ВЫСОТНОГО ГРАДИЕНТА ЮЖНОГО УРАЛА.....	55
5.1 Содержание макроэлементов в листьях белых берез <i>Betula pendula</i> Roth и <i>Betula pubescens</i> Ehrh в высотных поясах Южного Урала.....	55
5.2. Характеристика основных агрохимических показателей почвы горных поясов Южного Урала	70
5.3 Связь содержания элементов в листьях берез и содержания элементов в почве вдоль высотного градиента Южного Урала.....	75
6. ВЛИЯНИЕ ВЫСОТНОГО И ШИРОТНОГО ФАКТОРОВ НА НАКОПЛЕНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ БЕРЕЗ BETULA PENDULA ROTH И BETULA PUBESCENS EHRLH.....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	104
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. *Betula pendula* Roth и *Betula pubescens* Ehrh. являются наиболее распространенными на Урале. Благодаря обширному ареалу вид *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 оценки дифференциации популяции при воздействии на нее данного фактора. Широкое распространение березы позволяет использовать вид в различных климатических и техногенных условиях. Это дает возможность оценить ответ природных популяций двух видов берез на длительное воздействие техногенного фактора. Листья являются чувствительными биомониторами в исследованиях состояния лесов и загрязнения. В условиях техногенного загрязнения, как правило, увеличивается содержание элементов, которые входят в состав выбросов, в результате поглощения растениями через листья [Смит, 1985; Кабата-Пендиас, 1989] и изменения питательного режима почв [Falkengren-Grerup, 1987; Zoetti и др., 1989; Tomlinson, 1991; Лукина, Никонов, 1998].

Одним из подходов к изучению реакций организмов на экологические факторы является изучение особенностей структурно-функциональной организации ассимилирующих органов, которые имеют одну наследственную природу, но формируются в различных климатических зонах.

Изменчивость берез изучалась в разных частях ее ареала [Мамаев, 1973; Махнев, 1975, 1987; Ветчинникова, 2004, и др.]. Тем не менее, исследование внутривидовой изменчивости берез по физиологическим и биохимическим параметрам проводилось значительно меньше. В основном, внимание ученых было направлено на исследование изменчивости популяций по морфологическим показателям. Количественная оценка запасов макроэлементов в лесных экосистемах, остается важной задачей в изучении цикла макроэлементов в системе почва-растение, так как мало что известно об экологических процессах, вызывающих сложные закономерности накопления макроэлементов в растениях.

Поглощение и транспорт минеральных элементов отражают генотипические особенности и условия произрастания растений.

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 «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 «Карабашмедь») и в горных территориях трех климатических зон: вдоль высотного градиента Южного (г.Иремель), Северного (г.Конжаковский Камень) и Приполярного (г.Неройка) Урала.

Методология и методы исследований. В основу исследований положен комплексный подход, который позволяет последовательно выполнить поставленные задачи.

Практическая значимость. Полученные данные можно использовать для оценки устойчивости белых берез к экстремальным природным и техногенным факторам и для разработки рекомендаций при лесовосстановлении в экстремальных условиях среды. А также использования результатов исследования как основу для практического проведения комплексного анализа с точки зрения оценки экологической устойчивости древесных растений.

Использование для диагностики устойчивости древесных видов с целью использования в интродукции в условиях техногенного загрязнения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. С увеличением дефолиации, дехромации и ухудшением санитарного 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 листы.

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.

Уровень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных данных была подтверждена широким спектром многолетней экспериментальной работы с применением научно обоснованных методик, использованием необходимых статистических методов, а также прикладных компьютерных программ для обработки и оценки материала исследования.

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, интерпретацию 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 источника. Работа изложена на 139 страницах, содержит 28 таблиц, 44 рисунка.

Благодарности. Автор глубоко признателен коллективу лаборатории Экологии техногенных растительных сообществ Ботанического сада УрО РАН (вед. науч. сотр., д-р. с-х. наук Меншикову С.Л., стар. науч. сотр., канд. биол. наук Мохначеву П.Е., науч. сотр., канд. биол. наук Завьялову К.Е., стар. науч. сотр., канд. биол. наук Махневой С.Г., стар. науч. сотр. Кузьминой Н.А., стар. инженеру Леонову А.И., стар. инженеру Евстюгину А.А.) и сотрудникам Ботанического сада УрО РАН (науч. сотр. Антипиной Т.Г, канд. биол. наук Мигалиной С.В., канд. с.-х. наук Алесенкову Ю.М.) за помощь в сборе полевых материалов, за ценные советы и обсуждения.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Общая дендрологическая характеристика рода *Betula*

В качестве объекта исследования были выбраны береза повислая *Betula pendula* Roth и береза пушистая *Betula pubescens* Ehrh. Представители рода Береза (*Betula* L.), относящегося к семейству Березовые (*Betulaceae*), порядку Буковые (*Fagales*). Береза имеет большое промышленное и лесоводственное значение. Береза считается неприхотливой, растет практически во всех лесорастительных зонах кроме крайних северных (тундровых) и крайних южных (пустынных и субтропических) местообитаний, но между этими двумя видами существуют значительные различия в предпочтении рельефа местности и влажности почвы. *B. pendula* можно отличить от *B. pubescens* по диплоидному числу хромосом, 28 по сравнению с 56, разделение по морфологии зависит от сочетания изменяющихся характеристик, включая волосатость листьев, появление бородавок на ветвях, шероховатость коры, свисающий вид и, наиболее постоянных, таких как форма листьев. Даты цветения особей в популяции деревьев могут заметно отличаться, однако женские цветки обычно созревают раньше, чем мужские цветки на том же дереве. Пыльца *Betula* spp. может разноситься ветром на значительные расстояния [Pelham и др., 1984]. *Betula pendula* достигает своей верхней границы распространения в горно-лесном поясе горных массивов, в то время как *B. pubescens* sp *pubescens* простирается выше границы *B. pendula*, и сливается с *B. pubescens* ssp *tortuosa* на больших высотах.

Betula pendula Roth. Береза повислая обладает пластичностью, неприхотливостью, способностью расти в различных лесорастительных условиях, произрастает во многих природных зонах страны. Береза повислая обычно лучше всего растет на хорошо дренированных плодородных песчаных почвах (Нунунен и др., 2010). Ареал березы охватывает обширную территорию Европы и Азии. Береза повислая – одна из наиболее светолюбивых среди лиственных пород. В шкале светолюбия древесных пород М.К. Турского она занимает второе место после лиственницы. Береза повислая является почвоулучшающей породой, отличается высокой холодоустойчивостью, благодаря низкой оводненности ее

листьев. Исследования Ю.З. Кулагина [1963] показали, что водный режим березы повислой направлен на повышение ее засухоустойчивости.

Betula pubescens Ehrh. Береза пушистая больше подходит для сухих торфяников и является там более распространенным видом нежели береза повислая. Сфагновые болота чаще всего заселяются березой пушистой. Из-за недостатка основных питательных веществ (фосфора и калия) на торфяниках у березы пушистой возникают проблемы с обеспечением необходимыми минеральными питательными веществами. Растет в лесах по всей Европейской территории России. Приспособлена к болотистым и холодным почвам, поэтому заходит севернее березы повислой, но в степи уступает ей место. Широко распространена в таежной зоне, встречается в зоне тундры, в степной зоне доля меньше. Береза пушистая наиболее производительна в лучших условиях произрастания. Отставание в росте березы пушистой от березы повислой тем больше, чем засушливее лесорастительные условия и, наоборот, чем заболоченнее почвы, тем более угнетается береза повислая, а на торфяно-болотных почвах способна расти только береза пушистая [Кулагин, 1985]. Как правило, березу пушистую относят к влаголюбивым и тенелюбивым породам [Махнев, 1970].

1.2 Изучение изменчивости берез

В настоящее время биологическая изменчивость изучалась на всех уровнях организации жизни [Майр, 1947; Шварц, 1963; Мамаев, 1973; Ветчинникова, 2004]. Уровень популяционной изменчивости обычно является одним из показателей внутривидового разнообразия, изучение которого необходимо для таксономии, познания закономерностей формирования структуры популяций, а, следовательно, и процесса микроэволюции. Род *Betula* отличается сильным полиморфизмом, что связано с полиплоидией, особенности филогении, большим разнообразием экологических условий, в которых произрастают его представители и рядом других еще малоизученных причин. Величина амплитуды варьирования признаков, выраженная через коэффициент вариации (C , %),

указывает на наличие в изучаемых популяциях общих закономерностей изменчивости [Махнев, Мамаев, 1975].

Были проведены исследования химического состава древесных пород [Родин, 1965] показали, что в листьях березы общая сумма элементов не превышает 3,6% , в том числе на долю зольных веществ приходится всего 1,9%. Главнейшие элементы в листьях березы – К и Са, заметна аккумуляция Mg, характерно накопление Mn, что вообще типично для березы. Для растительных сообществ высоких широт характерен суженный биологический круговорот зольных элементов и азота. Это является следствием как ограниченной продуктивности – небольшого ежегодного нарастания, а, следовательно, и поступления в опад, органической массы, так и в целом невысокой зольности растений тундры и лесотундры. Содержание азота, как правило, значительно выше, чем содержание любого зольного элемента, в 3-10 и более раз. В хвойных и смешанных лесах у мелколиственных пород подлеска (береза, ива) листья отличаются более высоким содержанием химических элементов, чем в хвое (4-6%). В листьях накапливается главным образом азот, затем К и Са. Содержание химических элементов в растениях лиственных лесов у березы повислой в листьях содержание азота 2,36% на сухое вещество, сумма элементов 3,18%, среди зольных элементов наибольшее содержание у К и Са и Mg.

Для внутривидовой изменчивости берез установлен ряд закономерностей: 1. Амплитуда изменчивости множественных морфологических признаков имеет определенную тенденцию к возрастанию с повышением уровня организации объекта (отдельный орган, особь, популяция); 2. У разных популяций березы средний уровень изменчивости одинаковых признаков совпадает, но в районах, где условия для видов неблагоприятны, изменчивость признаков усиливается. Такое явление, по-видимому, отражает результат обострения противоречий между генотипом и средой [Махнев, Мамаев, 1975].

По литературным данным, у березы коррелятивные связи содержания золы отмечались для освещенности, богатства почв азотом, термоклиматическим режимом [Кавеленова и др., 2001]. Также обнаружены связи содержания золы и

количеством осадков ($r = -0,63$), среднегодовой температурой ($r = -0,72$) и гидротермическим коэффициентом ($r = 0,78$) у березы пушистой. Максимальное количество золы (до 15%) может присутствовать в листьях растений.

В работах M.Weih и P.S. Karlsson [Weih, Karlsson, 1997] высокогорные и равнинные экотипы *Betula pubescens* показали различие в ответах на различные экспериментальные условия, включая два температурных режима и четыре режима удобрения. Предполагается, что существует компромисс между высокой продуктивностью азота при низкой температуре и прямой ответ продуктивности азота на температуру.

Отмечается тесная связь между скоростью роста и содержанием азота у многих видов [Argen, 1985; Hirose, Kitajima, 1986], включая *Betula pubescens* [Karlsson, Nordell, 1996a]. P.S. Karlsson and K.O. Nordell обнаружили, что концентрация азота в листьях березы горной увеличивается в высотном градиенте [Karlsson, Nordel, 1988, 1996b; Sveinbjornsson и др., 1992]. По отношению к скорости роста, существуют доказательства, что высокогорные экотипы или виды не реагируют на увеличение температуры в отличие от равнинных аналогов [Woodward, 1979], для *Betula pubescens* [Junttila, Nilsen, 1993]. Эта особенность роста высокогорных и равнинных растений отражает особенности скорости фотосинтеза или удлинение листьев [Slatyer, Ferrar, 1977; Korner, Woodward, 1987]. Эти данные показывают частичные аспекты физиологической разницы между растениями, растущими на различной высоте, тем не менее, понимание функциональных взаимосвязей между этими аспектами требуют интеграционный подход.

Изучение всхожести семян *Betula pendula* показало более резкое снижение всхожести семян и скорости прорастания семян на высоте, по сравнению с *B. pubescens* [Holm, 1994]. Плотность саженцев была выше в древостоях *B. pubescens ssp pubescens*, чем в древостоях *B. pendula* и *B. pubescens ssp tortuosa* в горах, вегетативное размножение было примерно в три раза выше для *B. pubescens ssp tortuosa*, что указывает на то, что высотные различия в размножении

среди видов березы отражают их модели распространения в высотном градиенте [Holm, 1994].

1.3 Изменчивость химического состава растений и ее зависимость от климата (географическая изменчивость)

Продуктивность насаждений главным образом зависит от приспособленности растений к определенным почвенно-климатическим условиям. В настоящее время большинство исследования проводятся в условиях вегетативных посадок [Побегайло, 1967], и посвящено в основном действию одного фактора - освещению [Цельникер, Малкина, 1983], влажности [Молчанов, 2005], углекислоты [Мао и др., 2005] или нескольких факторов [Всеволожская и др., 1962].

Географическая (эколого-географическая) изменчивость – результат хорологической дифференциации вида. Популяции обычно сменяют друг друга в широтном или меридиональном направлении. Дендрологи установили проявление этой формы изменчивости в виде географических рас [Мамаев, 1973]. Экологическая изменчивость отражает воздействие на растение определенной констелляции экологических факторов. Уровень популяционной изменчивости обычно является одним из показателей внутривидового разнообразия, изучение которого необходимо для познания закономерностей формирования структуры популяций, а, следовательно, и процесса микроэволюции.

Амплитуда изменчивости зависит от пластичности вида, которая обусловлена его генетической специфичностью [Ветчинникова, 2004]. По своей сути вопрос о климатической изменчивости химизма растений близко стоит к фитогеографии, так как состав химических веществ, определяющих те или иные свойства растений, изменяется с изменением условий местообитания [Дороганевская, 1951].

Изучение содержания химических веществ в лесных растениях больших регионов, как и в растениях вообще, должно проводиться с учетом возможной его изменчивости под влиянием изменяющихся географических условий. Л.Е.

Родиным и Н.И. Базилевичем [1965] отмечено изменение в широтно-зональном плане (когда значительно меняется соотношение тепла и влаги) типов биологического круговорота азота и зольных элементов. Типы химизма они выделяли по преобладающему содержанию в растениях азота, кальция, кремния, хлора и натрия. К северным широтам материков приурочены азотные типы химизма: в тундрах – азотные, в хвойно-таежных и хвойно-лиственных лесах – кальциево-азотные.

Сложность исследования географической изменчивости химического состава растений заключается в том, что практически невозможно изучить в чистом виде влияние общеклиматических факторов или геохимических особенностей района. Таким образом, возникает необходимость изучить кроме географической экологическую, индивидуальную и временную изменчивость химического состава растений.

1.4 Изменчивость химического состава растений в связи с приспособлением к экстремальным условиям среды

Одним из актуальных вопросов является изучение адаптаций, которые обеспечивают жизнедеятельность растительных сообществ при изменении условий окружающей среды. Способность организма сохранять функционирование при изменении внешней среды связана с нормой реакции [Зайцев, 1983] и гомеостазом [Осмоловская, 1998]. Одним из гомеостатических признаков исследователями предлагается соотношение элементов питания (N:P:K) [Лавриченко, 1971; Вильяме и др., 1986; Вахмистров, Воронцов, 1997]. Многими исследователями было показано постоянство соотношения азот:фосфор:калий [Лавриченко, Журбицкий, 1976; Вильяме и др., 1986] на различных видах.

Исследование углеродного обмена, обмена минеральных веществ вересковых кустарничков высокогорья показало, что вересковые кустарнички запасали в большом количестве жиры и крахмал, было резко выражено низкое

содержание золы, реминерализация в этих условиях протекает очень медленно, общий оборот минеральных веществ незначительный [Лархер, 1981].

Также было выявлено, что с увеличением интенсивности света содержание лигнина увеличивалось в листьях *Fagus sylvatica* L. и *Salix cinerea* L., количество полисахаридов клеточной стенки уменьшалось у *Fagus sylvatica* L. При изменении содержания углерода и 45 до 55%, содержание лигнина увеличивалось с 49 до 65,4% в хвое *P. abies* L. [Niinements, 1997].

L.S. Evans, J.R. Seemann обнаружили, что содержание азота обычно коррелирует с содержанием РБФ-карбоксилазы, хлорофилла и скоростью фотосинтеза [Evans, Seemann, 1989]. А.А. Ничипорович [1982] и др. обратили внимание на тесную связь превращения азота в растении с фотосинтезом. При этом фотосинтез не только усиливает скорость восстановления нитратов, образования аминокислот и белков, но также существенно изменяет направленность этого процесса [Андреева, Авдеева, 1969].

Обнаружены закономерности изменения химического состава листьев в зависимости от типа экологической стратегии [Пьянков и др., 2001]. Минимальное содержание органических кислот было обнаружено у тенелюбивых видов с S-типом стратегии, количество минеральных компонентов листа увеличивалось от стресс-толерантов к рудералам.

1.5 Действие воздушных загрязнителей на древесные растения

В последние годы возникла проблема кислотных дождей и закисления природной среды. Основными загрязнителями являются диоксид серы и окислы азота, которые могут выпадать с дождями за сотни и тысячи километров от источников эмиссий [Израэль, 1984]. Кислые осадки оказывают отрицательное влияние на растительность [Ember, 1982; Evans, 1982].

На протяжении нескольких десятилетий объектом исследовательской работы составляли лесные экосистемы вблизи «Карабашского медеплавильного комбината» [Усольцев и др., 2011; Удачин, 2012; Kumar и др., 2019; Бачурина, Залесов, 2020] и почвы [Синявский, Князева, 2016; Кузьмина и др., 2020].

Водоемы территории сильно загрязнились вследствие сброса отходов в пойму р. Сак-Элга [Калабин и др., 2011]. Вследствие работы ведущего комбината города «Карабашского медеплавильного комбината», а также горнорудных предприятий, накопился большой объем различных химических элементов I–III класса опасности – меди, цинка, кадмия, хрома, железа, мышьяка, свинца и др., в концентрациях, которые превышают предельно допустимые санитарные нормы, установленные в Российской Федерации в сотни раз [Шнейдмиллер, Мамедов, 2018]. В 2000 году содержание SO₂ в подфакельной зоне комбината на расстоянии 1 км составило 20 000 мг/м³ [Udachin и др., 2003]. Имеется также ряд данных о том, что устойчивость к некоторым воздушным загрязнителям может быть генетически детерминирована [Гудериан, 1979].

Известно, что воздушные загрязнители попадают в растения главным образом через устьица листа [Гудериан, 1979; Влияние..., 1981]. В результате поглощения их листом, наблюдается, как правило, депрессия фотосинтеза [Николаевский и др., 1971; Илькун, 1978]. Это может приводить к уменьшению размеров листа [Кулагин, 1974]. По мнению В. Лархер [1978], одним из признаков ранней диагностики до видимого повреждения при действии на растения кислых газов является сдвиг pH в тканях в кислую сторону. Ряд других авторов также считают, что эти загрязнители влияют на буферную емкость внутриклеточной среды и изменяют внутриклеточное pH [Илькун, 1978; Nieboer и др., 1984]. Считается, что полученные данные свидетельствуют о возможности адаптации растений к воздушным загрязнителям [Ayozloo, Sell, 1981].

При действии на растения кислых газов отмечается активация дыхания [Николаевский и др., 1971; Илькун, 1978; Гудериан, 1979]. Усиление дыхания обычно сопровождается снижением интенсивности фотосинтеза [Сидорович и др., 1977]. Проникшие в цитоплазму токсические вещества сосредотачиваются в наибольшем количестве в хлоропластах, отрицательно действуя на их структуру и функции [Treshow, 1984]. В хлоропластах наблюдается преимущественное подавление синтеза белков и их распад под действием диоксида серы [Malhotra, Khan, 1980]. Исследования изменчивости морфологических, анатомических,

физиологических и биохимических признаков у клонов ели показало, что имеется явная зависимость между устойчивостью к засухе [Braun, 1977]. Показано, что при сильном подкислении почв наблюдается снижение биомассы тонких корешков в лабораторных опытах при искусственной газации [Ayazloo, Sell, 1981]. Вместе с корнями повреждается и микориза [Ember, 1982].

1.6 Содержание макроэлементов в растениях и почве

Основными условиями, обуславливающие концентрацию макро – и микроэлемента в растениях, А.Л. Ковалевский [1969] называл: 1. содержание элемента в почве; 2. содержание в почвах его форм, которые усваиваются растениями; 3. орган растения и время; 4. вид.

Было показано, что снижение температуры корнеобитаемого пространства уменьшает поглощение и замедляет передвижение питательных элементов в растениях сильнее, чем снижение температуры воздуха. Понижение температуры корнеобитаемого пространства до 10-12 гр. сильнее всего задерживало поглощение растениями фосфора. При снижении температуры почвы, а еще больше почвы и воздуха понижалось содержание белкового азота в листьях. При понижении температуры воздуха накапливался амидный азот и падало содержание нитратов [Крастина, 1964]. При повышенных температурах почвы отмечалось некоторое усиление поступления элементов в растения [Гукова, 1964]. Температура почвы оказывала большое влияние на рост и развитие сельскохозяйственных растений. В условиях севера под влиянием пониженных температур почвы снижается продуктивность растений и вегетационный период. Одной из главных причин, снижающих продуктивность растений на холодной почве, является снижение интенсивности поглощения зольных веществ и азота [Коровин и др., 1964]. В некоторых случаях было обнаружено, что береза имеет несколько более глубокую корневую систему по сравнению с елью [Raavilainen, 1966] и может поглощать питательные вещества из более глубоких горизонтов почвы, тем самым перераспределяя катионы оснований в верхние слои почвы.

По данным С.В. Солдатенкова [1971], с увеличением плодородия почвы увеличивается содержание минеральных веществ в растениях. При этом накопление минеральных веществ сопровождается увеличением концентрации органических кислот, которые выполняют роль химических нейтрализаторов. Азот, и особенно полное минеральное питание на фоне засоления, улучшало условия перезимовки растений. Положительное влияние полного минерального питания на стойкость сеянцев ореха определялось усилением биохимических процессов, принимающих участие в основных окислительно-восстановительных процессах холодного периода года [Полищук, 1964].

Было отмечено, что химический состав листьев зависит от плодородия почвы и условий питания растений в естественной полевой обстановке. Выявлено, что анализы почвы, наблюдение за внешним видом растений и другие методы диагностики позволяют полнее уяснить картину питания растений, и они должны применяться в сочетании с анализом листьев [Магницкий, 1964].

2. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Природно-климатическая характеристика района Карабашского медеплавильного завода

2.1.1 Климат

Карабашский медеплавильный комбинат находится в естественной депрессии (Саймоновской долине). Относительная высота окружающих гор не выше 200-250 м. Природно-климатическая характеристика района Карабашского медеплавильного завода дана в таблице 1. Преобладающее направление ветров – северо - юго-западное и западное. Годичная сумма осадков – 400 мм, в морозный период (XI – XII) – 90 мм, безморозный (IV – X) – 300 мм. Нередко формируется застойно-вихревой или застойный режим, так как город находится в понижении между субмеридиональными увалами [Дзугаев, 2003].

Таблица 1. Природно-климатическая характеристика района Карабашского медеплавильного завода

Лесорастительная зона	Лесная зона Уральской горно-лесной лесорастительной области (по Колесникову, 1969)
Высота над уровнем моря	347 м
Климат	Континентальный
Среднеголетняя температура января	-16,3°C
Среднеголетняя температура июля	+15,7°C
Годовое количество осадков, мм	400 мм

2.1.2 Рельеф и почва

Почвы района: серые горно-лесные, бурые лесные, бурые горно-лесные, горно-подзолистые, оподзоленные глееватые типы. Для почвенного профиля свойственна каменистость и низкая мощность [Залесов и др., 2017]. Почвы

подзолистые горно-таежные [Дзугаев, 2003]. В данном районе характерен главный тип зональных почв – темно-серые лесные и серые, которые характеризуются невысоким содержанием оснований (Ca^{2n} и Mg^{2n}), слабокислой реакцией почвенного профиля (рН 5,8-6,7), содержание гумуса – не больше 4-4,5% [Лонзингер и др., 2015].

2.1.3 Растительность

На территориях Миасского и Кыштымского лесничеств лесистость района – 71,4 и 79,7% [Залесов и др., 2017]. Посадки Ia, I и II классов бонитета составляют 51% площади, покрытой лесом [Залесов и др., 2017]. Преобладающие леса – елово-пихтовые и еловые с примесью можжевельника, рябины, сосны. Первичный рельеф горно-таежный. Вторичные леса – береза, сосна, ель, пихта, осина, лиственница [Дзугаев, 2003].

2.1.4 Гидрология

Город находится в междуречье рек Сак-Элга, Аткус, и Б. Киалим. Подземные воды представлены тремя горизонтами. Нет природных региональных водоупоров, есть гидравлическая связь между горизонтами подземных вод. Два нижних горизонта подземных вод связаны с массивами коренных пород, верхний горизонт – с аллювиальными отложениями долин [Дзугаев, 2003].

2.2 Природно-климатическая характеристика Южного Урала

В таблице 2 дана климатическая характеристика районов исследования. На Приполярном Урале отмечается наибольшее количество осадков за год (583,13 мм), самая низкая среднегодовая температура воздуха ($-3,2^{\circ}\text{C}$), гидротермический коэффициент составляет 2-2,5 и самая низкая сумма активных температур -1200-1500. На Северном Урале снижается количество осадков за год (497,34 мм) и увеличивается температура воздуха ($-0,9^{\circ}\text{C}$). На Южном Урале наиболее теплый и сухой климат (среднегодовая температура воздуха - $+1,2^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков за год – 367,78 мм) (таблица 2).

Таблица 2. Характеристика районов исследования (данные за 10 лет)

Горная система	Приполярный Урал	Северный Урал	Южный Урал
Общее среднее количество осадков за год, мм	585,13 мм	497,34 мм	367,78 мм
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

2.2.1 Климат

На Южном Урале наблюдается выраженная вертикальная поясность на относительно низких высотных уровнях [Шакиров, 2003]. Вторая по высоте гора Южного Урала – Ирмель (1582 м над ур.м.) находится на северо-востоке Белорецкого и Катав-Ивановского районов Челябинской области. Климат континентальный, характеризующийся довольно резкой изменчивостью и непостоянным погодным фоном по отдельным годам. С учетом температурной инверсии, в районе г. Большой Ирмель безморозный период составляет 90 дней (с учетом температурной инверсии он сокращается до 40 - 50 дней). Район характеризуется широким суточным температурным диапазоном (до 20 градусов и более). Среднегодовое количество осадков составляет 800 мм и более [Атлас Республики Башкортостан, 2005]. Снежный покров увеличивается с повышением высоты (на 15-17 см на каждые 100 м) из-за более сильных снегопадов и сильных морозов. Радиационный баланс в Белорецком районе на высотных уровнях 550, 800 и 1580 м соответственно равен 24, 33 и 34 ккал в год на 1 см³ [Хазиев и др., 1995]. Среднегодовая температура почвы в пределах 1-2°С. Сумма осадков за год от 400 до 700 мм. Гидротермический коэффициент от

1,0 до 1,3 [Хазиев и др., 1995]. Средняя температура января $-15,7^{\circ}\text{C}$, средняя температура июля $+12,10^{\circ}\text{C}$ [Шакиров, 2003].

2.2.2 Рельеф

Южная часть Уральского хребта протянулась с юга на север на 600-650 километров. Встречаются кислые осадочные породы – алевриты, конгломераты, алевролиты, песчаники. Распространены доломит и известняк, а также метаморфические породы. Преобладание не полностью выветрившихся первичных минералов является отличительной чертой горных почвообразующих пород региона [Хазиев и др., 1995].

2.2.3 Гидрология

Для Башкортостана горный массив Иремель имеет важное гидроморфологическое значение, так как рядом с ним протекает одна из крупнейших рек области – Белая (Агидель). Самые большие в мире флювиогляциальные болота расположены в межгорных котловинах Южного Урала, имеют мощность торфяных горизонтов в пределах от 50 см до 6 метров [Сулейманов и др., 2013]. Иремель – один из крупнейших гидроцентров, берет начало притоки рек Белая и Юрюзань: Тыгын, Б.Авняр, Тюлюк и др.

2.2.4 Почвы

Основным составом почвенного покрова являются горно-лесные серые и примитивные органогенно-щебнистые почвы [Шакиров, 2003]. Растительные остатки разлагаются медленно благодаря улиматическим условиям горного региона, содержание гумуса в почвах повышено с высокой подвижностью гумусовых соединений. Напряженность почвообразования в лесных экосистемах обеспечивается периодическим переувлажнением - высушиванием - замерзанием - протаиванием мелкозема в результате резких колебаний температуры. Известняковые и доломитовые породы и их элювий, преобладают в западной части региона [Хазиев и др., 1995].

2.2.5 Растительность

По флоро-географическому районированию горных стран [Станюкович, 1973] растительный покров относится к особому зональному типу Южного Урала. По Ирмелю проходят границы двух фитогеографических подрайонов: южных хвойных и подхвойных лесов пихты и елово-пихтовых лесов Камо-Печора-Западного Урала и Южно-Уральского лесостепного сосново-лиственнично-соснового леса [Растительность европейской часть СССР, 1980]. Распределение растительности Южного Урала подчиняется вертикальным зональным и провинциальным закономерностям геоморфологической области, расположенной на стыке субарктической и бореальной зон [Хазиев и др., 1995].

2.3 Природно-климатическая характеристика Северного Урала

2.3.1 Климат

Конжаковский Камень – это гора в южной части Северного Уральского хребта, на территории Свердловской области. 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 центральной части Северного Урала. В районе климат достаточно холодный и влажный, что обусловлено коротким прохладным летом и долгой холодной зимой с ранним снежным покровом [Нагимов и др., 2008]. Климат Кытлымского района достаточно холодный и влажный. Коэффициент гидротермии колеблется от 0,8 до 1,6 [Краткая агроклиматическая характеристика Свердловской области, 1993]. Из-за того, что массив вытянут в широтном направлении на 20 км, его западные и восточные склоны сильно отличаются по степени климатической континентальности [Моисеев и др., 2010].

2.3.2 Рельеф

Камень Конжаковского состоит из ультраосновных интрузий - габбро и перидотитов. Северо-Уральский хребет имеет плоские или округлые вершины и хорошо развитые высокие террасы, из которых местами возвышаются

башнеобразные остатки серицито-кварцевых сланцев. Таким образом, здесь преобладают плосковершинные или куполообразные хребты и массивы независимо от их высоты [Тушинский, Давыдова, 1976]. Восточный склон Урала, который тянется вдоль осевой линии и имеет форму увалистой полосы, расположен восточнее осевой линии и тоже вытянут в меридиональном направлении. Ее ширина составляет около 40 километров [Фирсова, Дедков, 1983].

2.3.3 Гидрология

Многие реки берут начало на Северном Урале и несут воды в Каспийское, Баренцево и Карское моря. Основные реки, стекающие с западного склона хребта, это притоки Камы - Косьва, Яйва, Вишера. Западный склон также берет свое начало от крупнейшей реки северной Европы - Печоры и ее притоков - Унья, Илыча, Подчерья и Щугора. С восточного склона стекает Северная Сосьва и ее левые притоки - Толья, Няйс, Манья, Ятрия и притоки Тавда - Лозьва, Вижай, Ивдель, Сосьва. Озер общей площадью около 36 квадратных километров всего 212, из них 173 расположены в восточном склоне горно-хвойно-лесного пояса на высоте от 200 до 500 метров. На западном склоне 39 озер [Тушинский, Давыдова, 1976].

2.3.4 Почва

В состав почвенного покрова Северного Урала входят также кислые лесные неоподзоленные почвы. Почвы Северного Урала, образующие бурые неоподзоленные профили преимущественно под сосновыми лесами. Почва под сосновым лесом: горно-лесной бурая, горно-лесной бурая. Гумусовый горизонт в этих почвах выражен более отчетливо, чем в лесных почвах Приполярного Урала, однако имеет небольшую мощность. На Северном Урале, преимущественно в его среднегорной части, на верхнем пределе лесов встречаются и типичные горные подзолы. Почвы еловых лесов: горно-лесная торфянисто-глееватая, горно-лесная

элювиально поверхностно глеевая, горно-лесная бурая, горно-лесной подзол [Фирсова, 1983].

Район г. Конжаковский Камень – горные луговые почвы, ниже – горные лесные бурые или горные подзолистые. Горно-тундровый, или альпийский, пояс в пределах описываемой территории выражен не везде. Он характерен для высоких и крупных горных массивов с выположенными вершинами (Конжаковский, Косьвинский Камни и др.) В составе почвенного покрова доминируют горные подзолистые почвы (40%) с большим участием горных лесных бурых (до 20%). Заметно участие горных луговых почв (до 20%) [Гафуров, 2008].

2.3.5 Растительность

Растительность представлена типичными горно-тундровыми фитоценозами с преобладанием мхов, осок и кустарничков. Встречаются ивы, карликовая береза, багульник, голубика. В широтно-зональном плане территория описываемого района расположена в подзоне средней тайги таежной зоны. Таежная растительность представлена еловыми, пихтовыми, реже – сосновыми лесами. Сосновые леса повсеместно приурочены к восточным склонам Уральской горной страны. Встречаются березняки. Травяно-кустарниковый покров разреженный, низкорослый, представлен осокой шаровидной, хвощем лесным, черникой, брусникой, багульником и т.д. В наземном покрове присутствуют зеленые и сфагновые мхи [Гафуров, 2008].

2.4 Природно-климатическая характеристика Приполярного Урала

2.4.1 Климат

Неройка – гора в Приполярном Урале, расположенная на границе Республики Коми и Ханты-Мансийского автономного округа. 1646 метров над уровнем моря. Климат Приполярного Урала континентальный, с суровой холодной зимой. Среднегодовая температура составляет $-3,2^{\circ}\text{C}$, с абсолютным минимумом и максимумом температуры -55°C (январь) и 30°C (июль) соответственно [Атлас Республики Коми..., 1997]. Количество осадков - более

700 мм. Активный вегетационный период - 60 дней [Русанова, Кюхри, 2001]. Продолжительность стабильного снегового покрова составляет 200-240 суток. Лето короткое и прохладное. В год в среднем выпадает около 1500 мм осадков [Долгушин, 1951].

2.4.2 Рельеф

Приполярная осевая зона Урала сложена в основном древнейшими метаморфическими породами протерозоя и нижнего палеозоя [Кеммерих, 1970]. Приполярные Уральские горы имеют ширину 120-150 км и максимальную высоту 1400-1800 м. Рельеф характеризуется глубоким и сложным расчленением с колебаниями относительных высот до 500-1000 м. Линия главного водораздела здесь смещена к востоку относительно орографической оси Урала [Долгушин, 1951]. Рельеф в высокогорьях Приполярного Урала резко рассеченный [Фирсова, 1983].

2.4.3 Гидрография

Приполярный Урал изрезан густой сетью речных долин, ручьев и временных водотоков. Основной водной артерией восточного склона является река Ляпин, которая берет начало с Урала. Для рек западного склона особенно характерно чередование продольных участков долин с поперечными. Питание рек в основном снеговое и дождевое. В верховьях рек очень много озер, но все они имеют небольшие размеры. Реки отличаются непостоянством режима и резкими колебаниями уровня. Реки западного склона значительно полноводнее, сильнее разветвлены и глубже врезаны, чем реки восточного склона [Долгушин, 1951].

2.4.4 Почвы

В Уральском регионе почвообразование развивается на хрящевато-обломочном кислом элювии и элюво-делювии коренных пород [Тимонина,

1980]. По почвенному покрову верхнего таежного пояса можно выделить подзолы иллювиально-гумусовые, буроземы кислые грубогумусовые и подбуры оподзоленные, а переходной полосы гор и тундры подбурами оподзоленными и глееватыми, подзолами иллювиально-гумусовыми карликовыми, дерновыми почвами альпийских лугов. По поймам формируются лугово-аллювиальные почвы, иногда с признаками оглеения и оподзоливания [Русанова, Кюхри, 2001].

2.4.5. Растительность

Территория исследования относится к Камско-Печерско-Западноуральской подпольной области Урало-Западносибирской тайги [Исаченко, Лавренко, 1980]. В верхней части тайги (400-500 м над ур.м.) преобладают смешанные (пихта, береза или лиственница, ель) и пихтовые леса. Под этими группами лесов создаются почвы, в которых преобладают слабо дифференцированные почвы с слабо дифференциальным подзолистым Al-Fe-гумусовым горизонтом. На высоте 500-600 метров над ур.м. растут лиственничные редколесья предтундрового типа с березой извилистой и рябиной в подлеске, ерником, кустарничками, лугово-лишайниково-травянистым покровом. Дрevesтой чистый лиственничный или с небольшой примесью ели и березы пушистой [Фирсова, 1983].

3. ОБЪЕКТЫ, МЕТОДИКА И ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

3.1. Объекты исследований

Исследования проводились в естественных популяциях березы пушистой и березы повислой 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 березы повислой на разном удалении от «Карабашмедь».

3.1.1 Характеристика объектов вблизи АО «Карабашмедь»

Объектами исследования служили естественные древостои березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающие в условиях влияния выбросов АО «Карабашмедь». На рисунке 1 показано расположение пробных площадей на разном удалении от источника загрязнения АО «Карабашмедь».

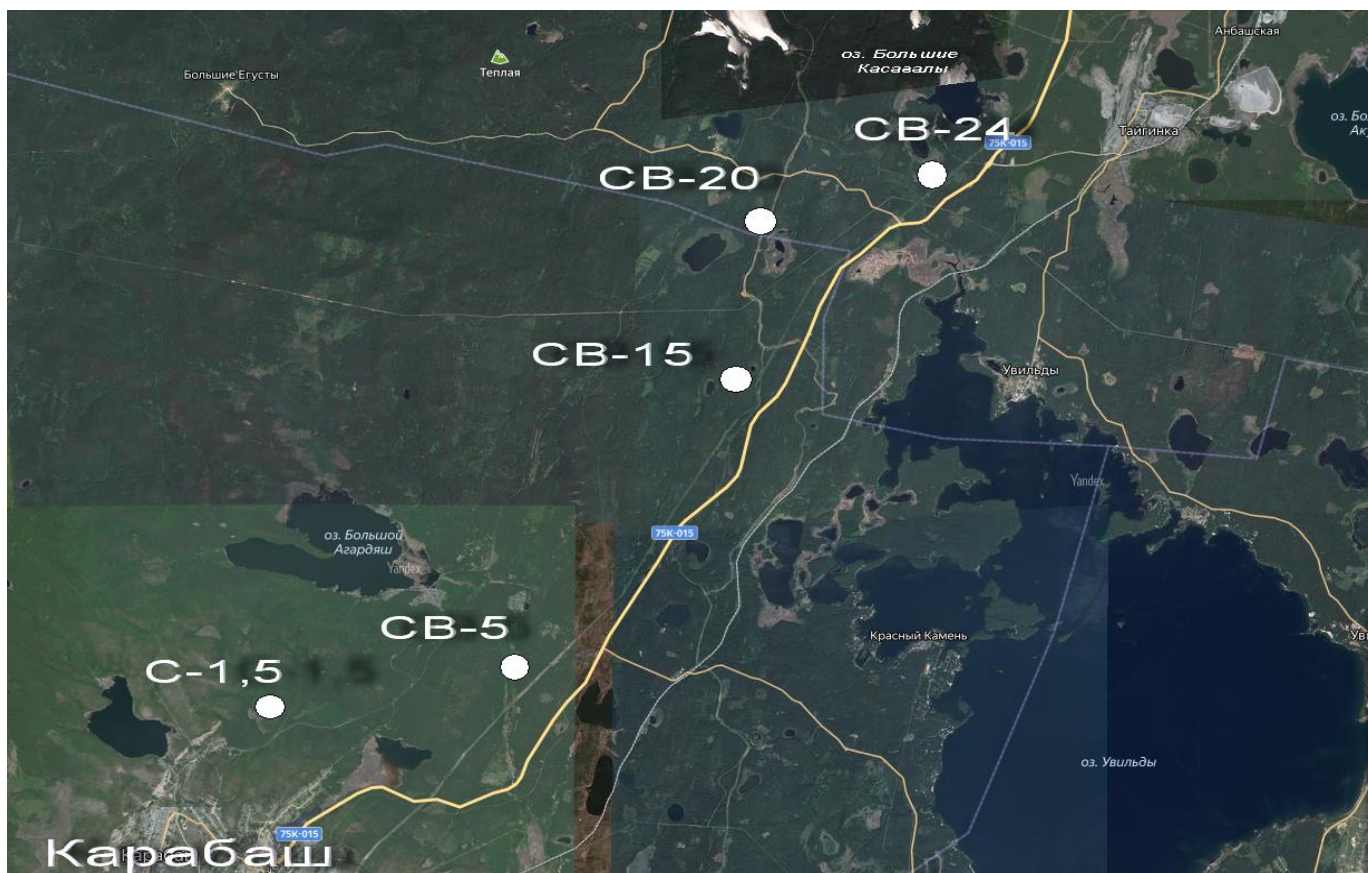


Рис. 1. Расположение пробных площадей на разном удалении от источника загрязнения АО «Карабашмедь».

С учетом преобладающих ветров и рельефа района на различном удалении от источника эмиссии были выбраны загрязненные (С-1,5, СВ-5, СВ-15, СВ-20) и условно чистый (СВ-24) участок березового древостоя, где буквами обозначено направление, цифрами - расстояние от источника загрязнения в километрах). Всего было заложено 5 временных пробных площадей (ВПП) на расстоянии от 1,5 до 24 км в северном и северо-восточном направлениях от комбината (рис. 1). Для исследования был взят один вид берез: береза повислая (*Betula pendula* Roth), так как этот вид доминирует на всех участках. Модельные деревья были взяты из верхнего яруса древостоя. Имеющиеся на четырех загрязненных участках ель и сосна встречаются в подлеске, их состояние на этих участках неудовлетворительное, рост сильно угнетен.

В таблице 3 дана характеристика района исследования: АО «Карабашмедь» расположен в Челябинской области, расположена в подзоне широколиственных лесов на высоте 347 м. над уровнем моря.

Таблица 3. Характеристика района исследования «Карабашмедь»

Субъекты РФ	Челябинская область
Зональное подразделение растительного покрова (по Колесникову)	Подзона южнотаежных сосново-березовых лесов
Координаты	55°28'39.86" с.ш. 60°11'58.45" в.д.
Высота над ур.м.	347 м

В таблице 4 дана характеристика березового древостоя. На ПП на расстоянии 1,5 км от источника выбросов березовые древостои повреждены в наибольшей степени – достоверно увеличиваются 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.

Таблица 4. 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±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 $p < 0,05$				

Характеристика пробных участков:

С-1,5 находится в 1,5 км от источника выбросов в северном направлении на равнине, почва – серая горно-лесная. Характеристика березового древостоя: старовозрастный березняк семенного происхождения разнотравно-злаковый, высота около 20 м, диаметр около 26 см, возраст – 30-50 лет.

СВ-5, СВ-15 характеризуются средним уровнем загрязнения, СВ-20 и СВ-24 – условный фон. Расположены в 5, 15, 20 и 24 км от источника выбросов, заложены в березняках разнотравно-злаковых, полнота древостоя – 0,7-0,8, класс – 7-8. Почва – серая горно-лесная. Высота березового древостоя около 25-32 м, диаметр около 31 см.

По результатам исследования снега и почвы в очаге загрязнения установили, что в снеговой воде содержится большое количество тяжелых металлов – в десятки раз больше, чем в фоне (таблица 5) [Кузьмина и др., 2020]. Показатель рН снизился до 4,2, в контроле – 6,5. Таблица 5 демонстрирует увеличение количества тяжёлых металлов в снеге, в сравнение с фоном [Кузьмина и др., 2020].

Таблица 5. Концентрация тяжелых металлов, поступивших со снегом [по Кузьминой и др., 2020].

Металлы	Расстояние от источника загрязнения		
	1 км	4...5 км	10 км
Fe	в 21 раз	в 11 раз	в 4 раза
Zn	в 37 раз	в 15 раз	в 4 раза
Cu	в 49 раз	в 21 раз	в 6 раз
Pb	в 21 раз	в 11 раз	в 4 раз
Cd	в 90 раз	в 30 раз	в 6 раз

3.1.2 Характеристика объектов горных систем

В таблице 6 дана характеристика районов исследования. Горная вершина Приполярного Урала – г. Неройка (высота 1642 м.) находится на границе Республики Коми и Ханты-Мансийского АО в подзоне редкостойных предлесотундровых лесов. Горный массив Северного Урала – г. Конжаковский Камень (высота 1569 м.) расположен в Свердловской области, в подзоне средней тайги. Горный массив Южного Урала – г. Большой Ирмель (высота 1582 м.) расположен на границе Башкортостана и Челябинской области в подзоне широколиственных лесов.

Таблица 6. Характеристика 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 Ирмель
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

Дифференциация экосистем, а именно почвенного покрова в горах обусловлена законом высотной поясности. В основном, исследователи [Гвоздецкий, 1984; Авессамолова и др, 2002] выделяют высотный пояс в независимый ландшафтный объект, что обуславливает характерные черты растительного и почвенного покрова. В каждом высотном поясе есть свой доминирующий тип растительности, границы которого позволяют определить и границы пояса. 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.

Данные по среднемесячным максимальным и минимальным температурам воздуха и количеству осадков приведены в таблице 7.

Таблица 7. Среднемесячные температуры и осадки в районах исследования (средняя погода по месяцам за 10 лет) (<https://oplao.com/>)

Месяц	Приполярный Урал Метеостанция г.Саранпауль			Северный Урал Метеостанция п.Кытлым			Южный Урал Метеостанция п.Тюлюк		
	Т, °С Мин	Т, °С Макс	Осадки, мм	Т, °С Мин	Т, °С Макс	Осадки, мм	Т, °С Мин	Т, °С Макс	Осадки, мм
Январь	-23.5	-17.2	27.95	-20.1	-13.6	29.81	-18.4	-10.9	8.53
Февраль	-21.8	-14.2	28.46	-18.7	-10.8	27.50	-17.7	-8	10.71
Март	-15.2	-7.3	50.67	-12.2	-4.8	45.59	-11.1	-2.7	24.62
Апрель	-7.8	-1.4	50.96	-4	+2.3	50.52	-1.9	+5.8	28.81
Май	-1.8	+6.5	41.60	+1.9	+12.3	39.96	+4.1	+15.9	42.23
Июнь	+5.4	+15.0	57.36	+7.7	+18.2	55.32	+8.1	+20.6	39.29
Июль	+7.8	+19.2	76.01	+9.4	+20.6	39.40	+9.5	+21.7	65.39
Август	+4.8	+14.9	54.19	+7.1	+17.8	45.42	+8.9	+20.5	54.80
Сентябрь	+1.7	+7.7	60.86	+3.2	+10.3	34.86	+4.2	+13.3	36.49
Октябрь	-5.4	-0.9	69.04	-3	+1.3	55.00	-1.9	+4.1	33.25
Ноябрь	-14.8	-9.4	36.76	-11.1	-6.3	42.60	-8.2	-3.1	13.79
Декабрь	-19.9	-14.4	31.27	-17.1	-11.6	31.36	-14.6	-8.5	9.87

На Приполярном Урале наблюдается наибольшее количество осадков с марта по октябрь – в марте – 50,67 мм, в июле – 76,01 мм, в октябре – 69,04 мм, на Северном Урале максимальное количество осадков в июне – 55,32 мм и в октябре – 55,00 мм. Южный Урал отличается наименьшим количеством осадков в

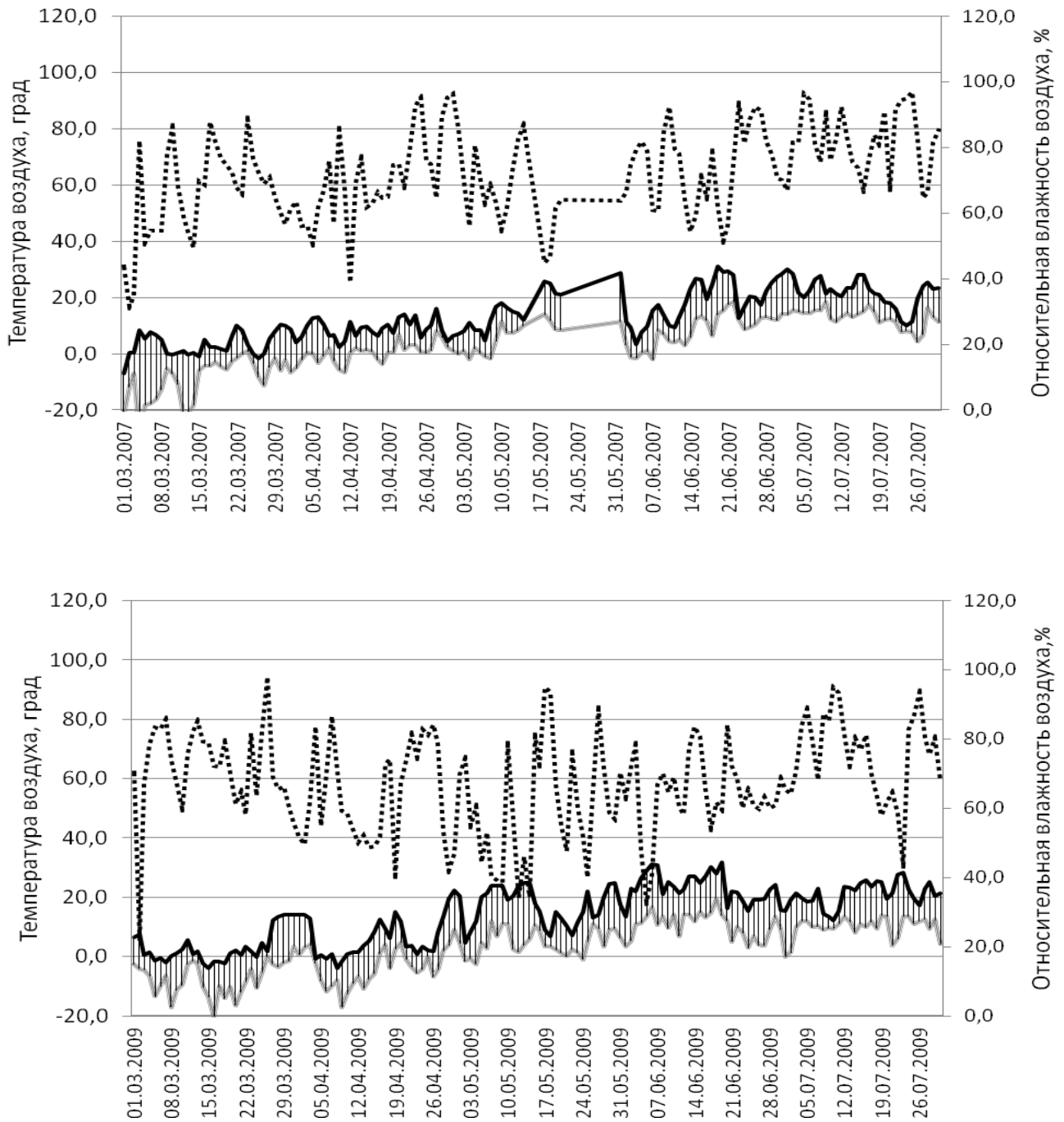
зимний период – около 10 мм, в то время как в Приполярном и Северном Урале количество осадков зимой около 30 мм. Plusовые температуры на Приполярном Урале наблюдаются с мая (+6,5°C) по сентябрь (+7,7°C), на Северном и Южном Урале – с апреля по октябрь.

Южный Урал

Метеорологические условия с 01 марта 2007 года до 30 июля 2007 года и с 01 марта 2009 года по 30 июля 2009 года представлены на рисунке 2. Данные были предоставлены метеостанцией города Катав-Ивановска (Катав-Ивановского района Челябинской области), 54°45' с. ш. 58°12' в. д., высота 477 над уровнем моря. Средняя влажность за этот период в 2007 году – 72%, в 2009 году – 67%, отличия достоверны между двумя годами. Температура воздуха (минимальная и максимальная) между годами достоверно не отличалась ($p > 0.05$). При этом в 2009 году отмечены продолжительные заморозки (температура воздуха около -20°C) до конца апреля. В 2007 году температура около 0°C держалась до середины апреля. Таким образом, 2007 год отличался от 2009 года повышенной влажностью воздуха, температура воздуха между годами не отличалась, хотя в 2009 году заморозки длились дольше, чем в 2007 году.

Листья *B. pubescens* были отобраны на северном склоне г. Большой Ирмель, в контроле (высота 483 м н.у.м.) (на расстоянии 19 км от подножия горы, соответствующей лесорастительной зоне), на нижней (высота 556 м н.у.м.) и верхней (высота 887 м н.у.м.) границах горно-лесного пояса, в подгольцовом поясе (высота 1136 м н.у.м.) и тундровом поясе (высота 1310 м н.у.м.), *B. pendula* в контроле и на нижней и в верхней границах горно-лесного пояса.

Зона горной тундры занимает самую высокую часть массива (1250-1582 м над ур.м.). Температура почвы на глубине 10 см в верхней части лесотундрового экотона массива Ирмель по сравнению со средней и нижней отличается на целые градусы как в летние ($1,5-3^{\circ}\text{C}$), так и в зимние ($3-5^{\circ}\text{C}$) месяцы [Горчаковский, 1966].



..... относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли

_____ максимальная температура воздуха (градусы Цельсия) за прошедший период (не более 12 часов)

_____ минимальная температура воздуха (градусы Цельсия) за прошедший период (не более 12 часов)

Рис.2. Максимальные и минимальные температуры воздуха и относительная влажность воздуха за сутки в период с 01 марта по 15 июля 2007 и 2009 годов по данным метеостанции города Катав-Ивановск.

В лесотундровой зоне распространены ель сибирская *Picea obovata* Ledeb., береза извилистая *Betula tortuosa* Ledeb., из кустарниковой растительности распространены можжевельник сибирский (*Juniperus sibirica* Burgsd), ива сизая (*Salix glauca* L.). Высота ствола *Betula tortuosa* – 3,4 м, диаметр – 8-10 см. Состав древостоя – 2Е+1БИ (БИ – береза извилистая)

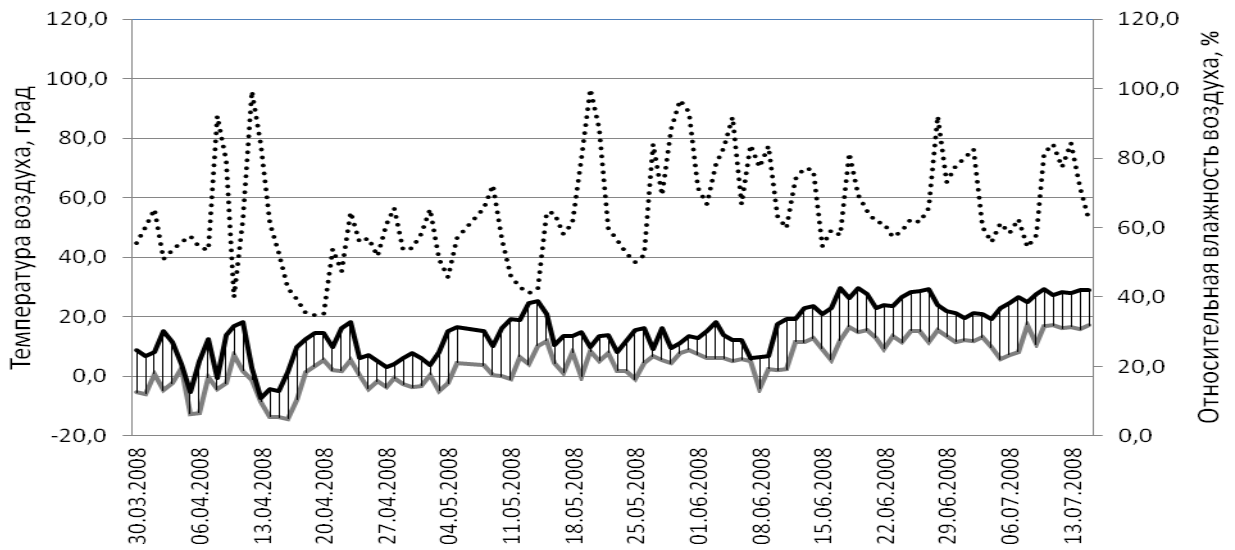
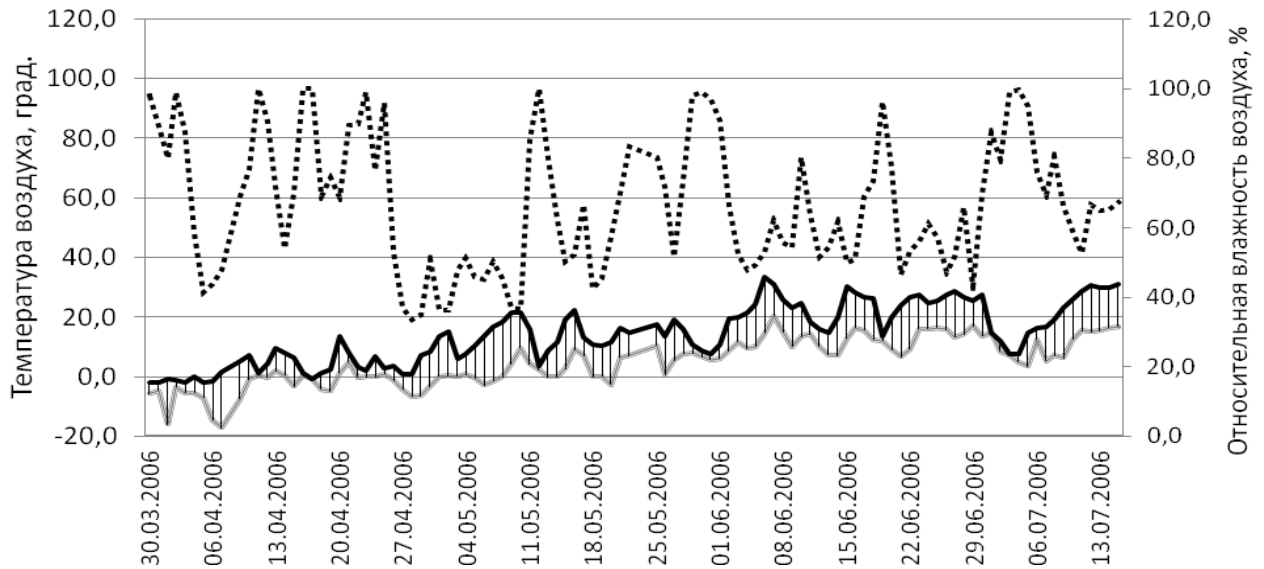
Подгольцовый пояс начинается с высоты 1100 до 1325 м над ур.м. Флора подгольцового пояса представляет собой смену и взаимопроникновение лесных и луговых фитоценозов. Высота ствола *Betula pubescens* – 20-24 м, диаметр – 21-25 см. Состав древостоя – 2Е+1Б В подгольцовом поясе массива выделены мелколесья и редколесья. На нижней полосе подгольцового пояса древостои формируют еловые и березово-еловые редколесья, верхнюю формируют еловые мелколесья и березовые криволесья.

Северный Урал

Листья *B. pubescens* были отобраны в контроле (высота 207 м н.у.м.), на нижней (высота 423 м н.у.м.) и верхней (высота 555 м н.у.м.) границах горно-лесного пояса, в подгольцовом (высота 830 м н.у.м.) и тундровом (высота 1117 м н.у.м.) поясах, *B. pendula* в контроле и на нижней и в верхней границах горно-лесного пояса.

Метеорологические условия с период 30 марта 2006 года до 30 июля 2006 года и с 30 марта 2008 года по 30 июля 2008 года представлены на рисунке 3. Данные были предоставлены метеостанцией города Серов (город на севере Свердловской области), 59°35' с. ш. 60°34' в. д., высота 133 над уровнем моря. Средняя температура в 2006 году за этот период составила 9,9°C, в 2008 году – 10,1°C. Средняя влажность за этот период в 2006 году – 66,5%, в 2008 году – 64,5%, отличия не достоверны между двумя годами. Температура воздуха (минимальная и максимальная) и влажность между годами достоверно не отличалась ($p > 0.05$, критерий Стьюдента). При этом в 2008 году в начале вегетационного периода отмечены плюсовые температуры до +15°C уже в конце марта и продолжительные заморозки (-14,5°C) в середине апреля, температура

ниже 0°C до начала мая и в начале июня. В 2006 году отмечались непродолжительные заморозки в начале апреля (около 17°C), а температура чуть выше 0°C установилась в середине апреля.



..... относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли

_____ максимальная температура воздуха (градусы Цельсия) за прошедший период (не более 12 часов)

_____ минимальная температура воздуха (градусы Цельсия) за прошедший период (не более 12 часов)

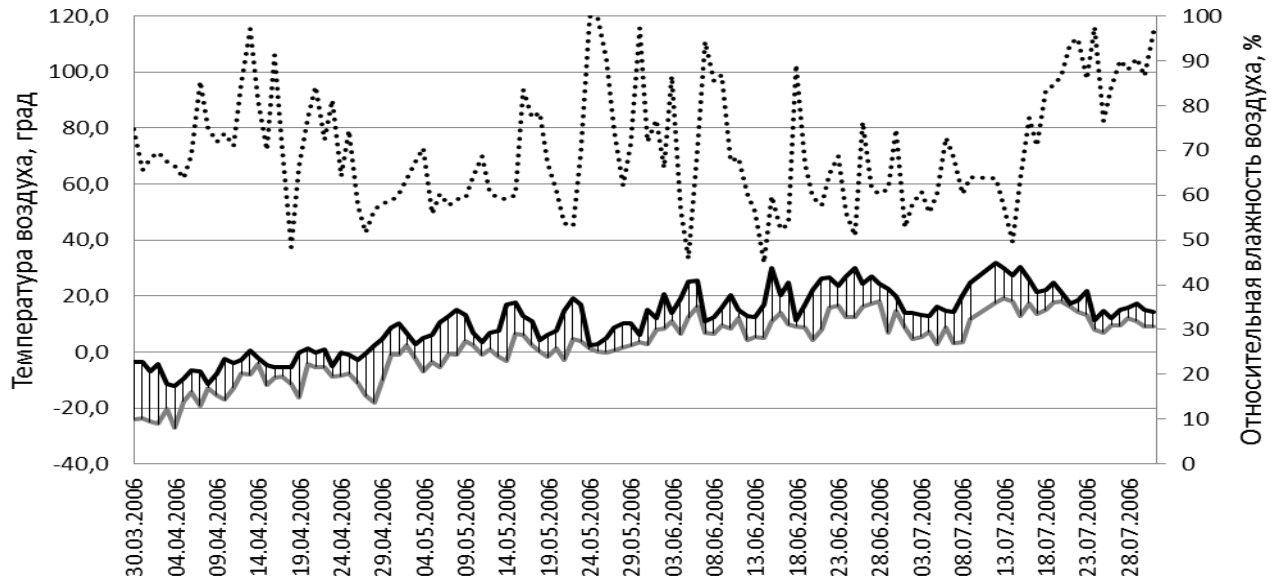
Рис.3. Максимальные и минимальные температуры воздуха и относительная влажность воздуха за сутки в период с 30 марта по 15 июля 2006 и 2008 годов по данным метеостанции города Серов.

Для горного леса характерны хвойные тайги, в которых преобладает ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.). Изредка – сосна обыкновенная или пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), сибирский кедр – *Pinus sibirica* Rupr. Встречаются березняки (чаще из березы пушистой). Лесные массивы этой местности представляют собой ельники, из числа которых преобладают ельники ягодниково-зеленомошные.

Пояс подгольцовый простирается на высоте от 800 до 1000 м. Пояс представлен горными лугами, которые расположены в верхней части куртин сомкнутых лесов. Наиболее часто встречающийся в горах вид - это береза пушистая, которая является близкородственным видом, сменяющей ее в березы извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb.). В горах на высоте от 1000 метров находится горно-тундровый пояс. Высота ствола березы извилистой – 2,7м. Состав 2Е+Б Горные подзолистые почвы формируются на склонах различной крутизны на высотах, не превышающих 400-600 м, свойственных для пониженной части Среднего Урала [Гафуров, 2008].

Приполярный Урал

Листья *B. pubescens* отбирались в контроле (высота 202 м н.у.м.), в горно-лесном (высота 563 м. н.у.м.), в подгольцовом (высота 713 м. н.у.м.), и тундровом (высота 720 м. н.у.м.), поясах, *B. pendula* в контроле. Погодные условия с период 30 марта 2006 года до 30 июля 2006 года представлены на рисунке 4. Данные были предоставлены метеостанцией города Саранпауль (Ханты-Мансийский автономный округ, Муниципальный район Берёзовский), координаты 64°15'36" с. ш. 60°54'30" в. д., высота 32м над уровнем моря. Средняя влажность воздуха за этот период составила 70,8%, температура – 2.6°C. Заморозки до –30°C наблюдались в начале апреля, до –20°C до конца апреля, температура выше 0°C установилась только в конце мая.



..... относительная влажность (%) на высоте 2 метра над поверхностью земли

_____ максимальная температура воздуха (градусы Цельсия) за прошедший период (не более 12 часов)

_____ минимальная температура воздуха (градусы Цельсия) за прошедший период (не более 12 часов)

Рис. 4. Максимальные и минимальные температуры воздуха и относительная влажность воздуха за сутки в период с 30 марта по 15 июля 2006 и 2008 годов по данным метеостанции города Саранпaulь.

Верхняя граница горно-тундровой зоны находится в районе высоты 680-760 м. По большей части встречаются – *Avenella flexuosa* L., *Juncus filiformis* L., *Carex arctisibirica* Jurtz., *Festuca ovina* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Phyllodoce coerulea* L. Доминанты травяно-кустарничкового яруса *Vaccinium uliginosum* L., *Ledum decumbens* Ait., *Empetrum hermaphroditum* L. Подлесок в основном представлен березой карликовой или *B.nana*, высота которой не превышает 2-4 м. На высотах 540-550 метров в горной части горно-лесного пояса, который расположен на высоте 580-620 метров над уровнем моря, произрастают лиственничник воронично-чернично-зеленомошный. Общая сомкнутость древесного яруса составляет 0,4-0,5, высота основного полога 12-14 м, состав 10Л+Е. В напочвенном зеленые мхи преобладают в этой группе, встречается *Polytrichum commune* Hedw.

3.2. Методика исследований

3.2.1 Методика отбора образцов листьев и почвы

Пробные площадки были заложены в четырех горных поясах и контроле горных систем из трех растительных зон, а также в градиенте загрязнения АО «Карабашмедь». Для исследования были собраны образцы листьев и почвы. Растительный материал был собран в 4 горных поясах и контроле трех горных профилей: в 2006 и 2008 годах – г. Конжаковский Камень, в 2007 и 2009 годах - г. Большой Ирмель, в 2006 – году г. Неройка. В качестве контроля для Южного Урала был выбран участок леса, типичный для подзоны южной тайги в 20 км от вершины г. Б. Ирмель, для Северного Урала - участок леса, типичный для подзоны средней тайги в 25 км от вершины г. Конжаковский Камень, для Приполярного Урала - участок леса, типичный для подзоны предлесотундровых лесов в районе города Саранпауль. 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 укороченных побегов (брахибластов) с нижней трети кроны с южной экспозиции. Как известно, березы формируют два типа побегов [Macdonald, Mothersill, 1983; 1984], в это исследование были включены только листья с коротких побегов, так как они образуют основную часть полога у взрослых деревьев и имеют одинаковый возраст из-за синхронного распускания листьев весной. Длинные побеги растут и дают новые листья в течение всего лета.

Для изучения индивидуальной изменчивости, один образец брался с одного дерева, всего было отобрано по 15 деревьев каждого вида со всех горных поясов и по 10 деревьев 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 листвы) и дехромация (изменение окраски) крон деревьев [Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов европейской части России по программе ICP-Forests, 1995].

3.2.2 Методы химического анализа листьев

Образцы листьев весом около 20 гр. были собраны в бумажные пакеты и были высушены сначала при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу до воздушно-сухого состояния. Сухие образцы были растерты при помощи лабораторной мельницы. Перед началом всех химических анализов растертые образцы дополнительно сушились в сушильном шкафу и оставлены остывать в эксикаторе до постоянной массы.

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 (спектофотор NovAA-300), содержание фосфор – спектрофотометрическим методом с молибденовой синью [Проведение биохимического анализа растительных образцов, 1979]. В качестве метода определения серы использовали метод ЦИНАО [1999] [Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения, 1999], основанный на извлечении серы из растительного сырья путем озоления его смесью азотно-хлорной и хлорной кислот, перевод в сульфаты и определении методом ЦИНАО в виде взвеси сульфата бария турбидиметрическим методом.

Химические анализы проводились в двукратной повторности, брался средний результат, если разница между двумя повторностями была больше 10%, проводился дополнительный анализ.

Соотношение NPK рассчитывалось как доля азота, фосфора и калия в общей сумме элементов. Результаты пересчитывались в соотношение элементов.

Показатель вариации (C_v) характеризует степень изменчивости признаков в зависимости от их уровня в шкале С.А. Мамаева [1973], в которой уровень изменчивости очень низкий при $C < 7\%$, низкий – $C = 8-12\%$, средний при $C = 13-20\%$, повышенный при $C = 21-30\%$, высокий при $C = 31-40\%$, очень высокий при $C > 40\%$.

3.2.3 Методы химического анализа почвы

Почвы отбирались по общепринятым методикам [ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84]. Почвенные образцы были взяты на каждом высотном поясе, были взяты по 5 образцов с каждого генетического горизонта почвы на всю глубину почвенного профиля. Количество точечных проб соответствовало ГОСТ 17.4.3.01-83. Почву сушили до воздушно-сухого состояния при $+105^\circ\text{C}$ до постоянного веса, размельчали и пропускали через сито с сеткой ячейки 1 мм. Веточки, шишки и т.д. были удалены вручную из образцов. Содержание легкогидролизуемого азота в почве определяли по методу Корнфилда [Шконде, 1972]. Определение легкогидролизуемого азота по Корнфилду основано на гидролизе органических соединений почвы раствором гидроксида натрия. Определяли содержание обменных форм магния, натрия и кальция после экстракции 1N азотной кислотой [Воробьева, 1998] с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра (спектофотометр повАА-300). Обменная кислотность (pH_{sc}) 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 таблице «Наставление по выращиванию посадочного материала» [1998].

3.2.3 Методы статистического анализа

С помощью пакета программ Microsoft Excel 2007 и методики статистического анализа в программе ПО STATISTICA 10, была проведена работа по анализу полученного экспериментального материала (StatSoft, Inc).

Полученные результаты были статистически обработаны с применением методов, используемых в лесном хозяйстве и биологии [Зайцев, 1984; Лакин, 1990].

Проводили статистический анализ в целях определения среднего арифметического значения варьирующего признака, степени его варьирования и показателя точности. Затем, исходя из поставленных задач, оценивали достоверность различия однородных признаков. Использовался критерий Стьюдента для определения достоверных различий между двумя группами; двухфакторный и трехфакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим определением с помощью критерия Фишера (НЗР) и Тьюки для определения различий между тремя и более группами. 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.

3.3. Объем выполненных работ

За время проведения исследований было отобрано 360 образцов листьев березы пушистой, 195 образцов листьев березы повислой, 125 почвенных образцов. Было проведено более 3300 измерений химических анализов листьев и более 1000 измерений почвенных анализов.

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

Целью исследования было установить зависимость содержания макроэлементов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) от жизненного состояния древостоя в градиенте аэротехногенных выбросов «Карабашского медеплавильного комбината».

Было изучено содержание макроэлементов (азота, фосфора, калия, кальция, магния, серы) в листьях березы повислой на разном удалении от комбината «Карабашмедь».

Характеристика состояния древостоя на разном удалении от источника загрязнения «Карабашмедь» показана на рисунке 5. Как видно из рисунка 5, участок, приближенный к источнику загрязнения (С-1,5), характеризуется наибольшей поврежденностью. На этом участке сильно повышены дефолиация и дехромация (более 60%) и категория состояния (более 2,5).

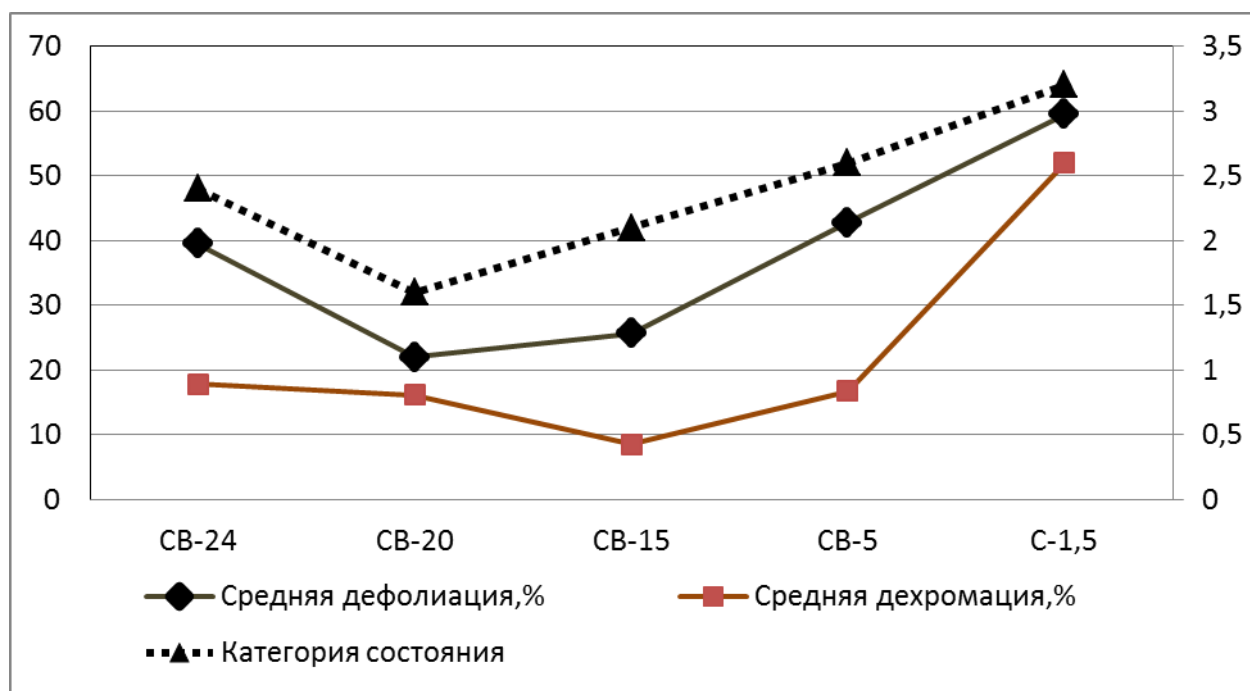


Рис. 5. Характеристика жизненного состояния (дефолиация, дехромация и категория состояния) древостоя березы повислой на разном удалении от Карабашмедь

Содержание общего азота в листьях варьирует между пробными площадями. Наименьшие значения в контроле – $21,2 \pm 0,9$ мг/г (СВ-24) и в зонах приближенных к источнику выбросов – $21,4 \pm 0,6$ мг/г (С-1,5 и СВ-5) и достоверно не отличаются (рис. 6). Обнаружено наибольшее содержание общего азота в листьях в СВ-20 и СВ-15 ($24,6 \pm 0,7$ и $24,4 \pm 0,7$ мг/г соответственно), что достоверно отличается от СВ-24, СВ-5 и С-1,5 ($p > 0,05$).

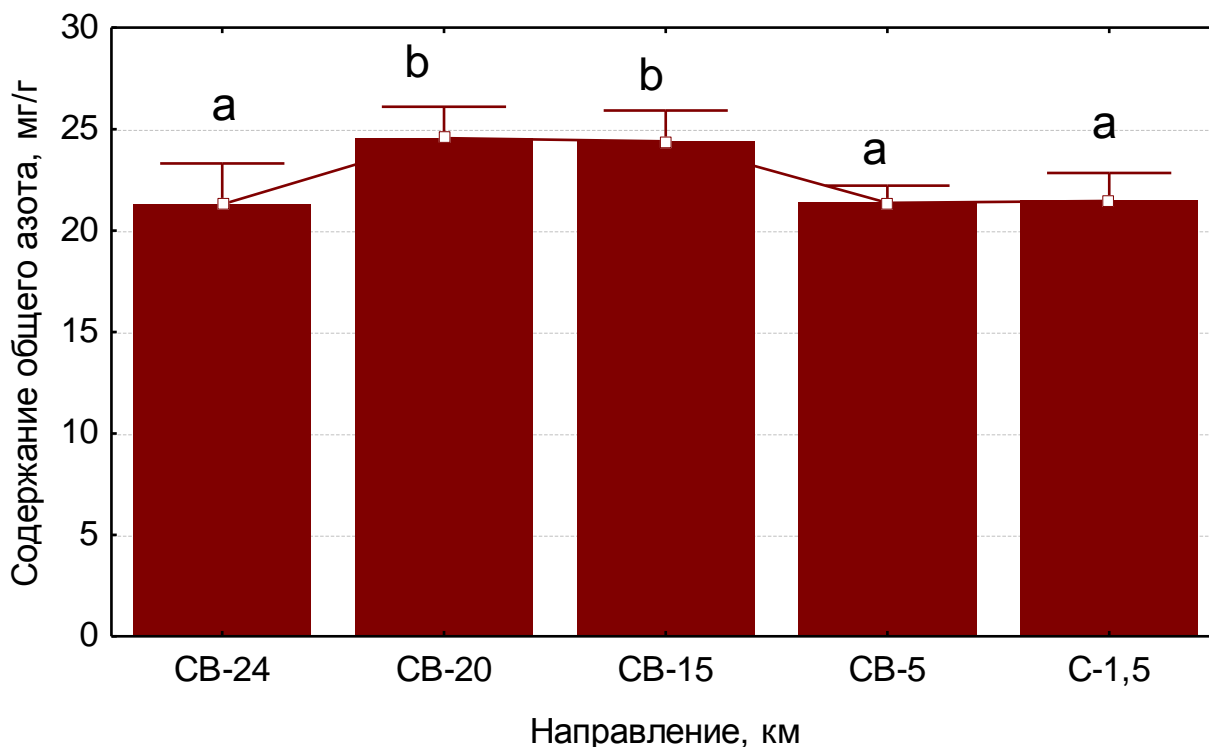


Рис. 6. Содержание общего азота в листьях *B. pendula* на различном расстоянии от Карабашского медеплавильного комбината. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

Найдена отрицательная корреляция содержания азота от степени дефолиации и категории состояния ($r = -0,50$ и $r = -0,48$ соответственно, $p < 0,05$) (рис. 7 и таблица 8). На рисунке 7 показана зависимость содержания общего азота в листьях от степени дефолиации листы. Таким образом, содержание общего азота в листьях уменьшается с увеличением дефолиации и ухудшением категории состояния дерева.

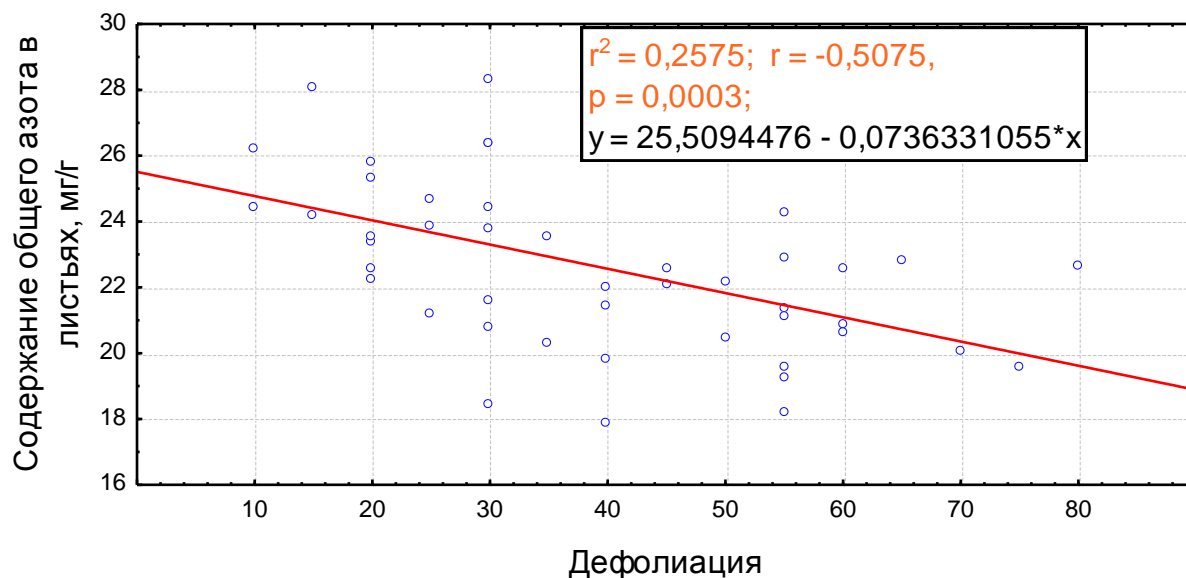


Рис. 7. Зависимость содержания общего азота в листьях *V. pendula* от дефолиации в градиенте воздействия «Карабашмедь»

Содержание калия в листьях в зоне сильного загрязнения на С-1,5 снижалось на 35% по сравнению с контролем (рис. 8), составляло $8,7 \pm 0,5$ мг/г и достоверно отличалось от СВ-24, СВ-15 и СВ-5. В контроле (СВ-24) содержание калия составляло $12,7 \pm 1,0$ мг/г, в СВ-5 содержание калия было $14,9 \pm 1,3$ мг/г, в СВ-15 – $12,6 \pm 1,3$ мг/г, в СВ-20 – $11,5 \pm 1,6$ мг/г. Отличия между СВ-24, СВ-20, СВ-15, СВ-5 статистически не достоверны ($p > 0,05$).

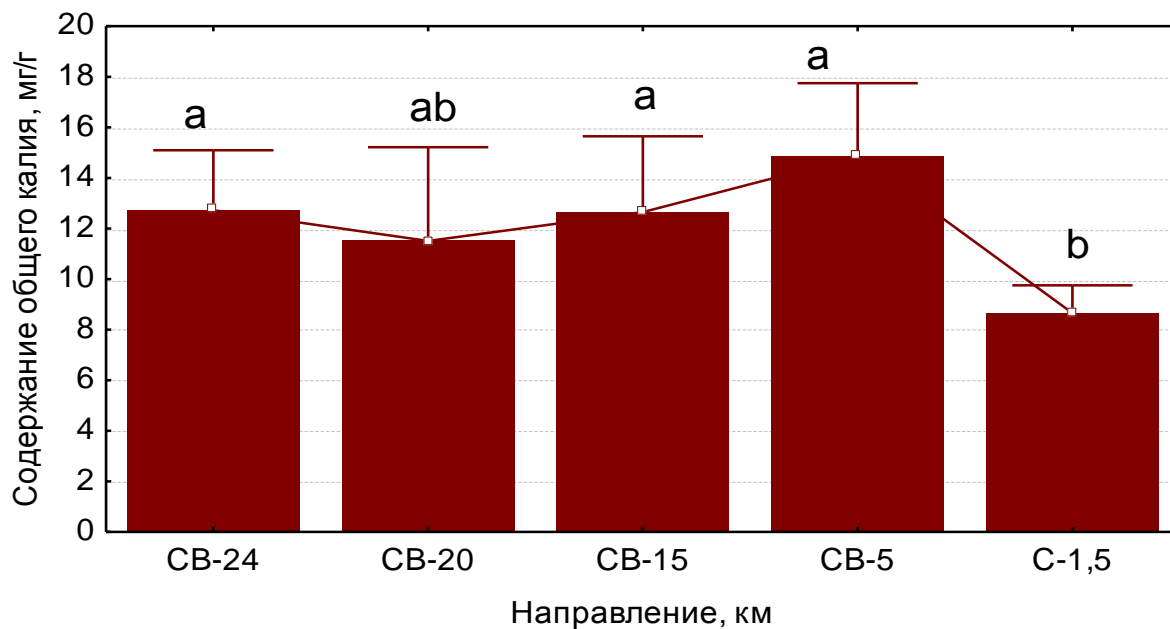


Рис. 8. Содержание общего калия в листьях *V. pendula* на различном расстоянии от Карабашского медеплавильного комбината. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

Найдена отрицательная корреляция содержания калия в листьях березы повислой с дехромацией листы ($r = -0,32$, $r^2 = 0,1039$, $p < 0,05$) (рис. 9, табл. 8), т.е. с увеличением дехромации листы березы повислой, содержание общего калия в листьях понижалось.

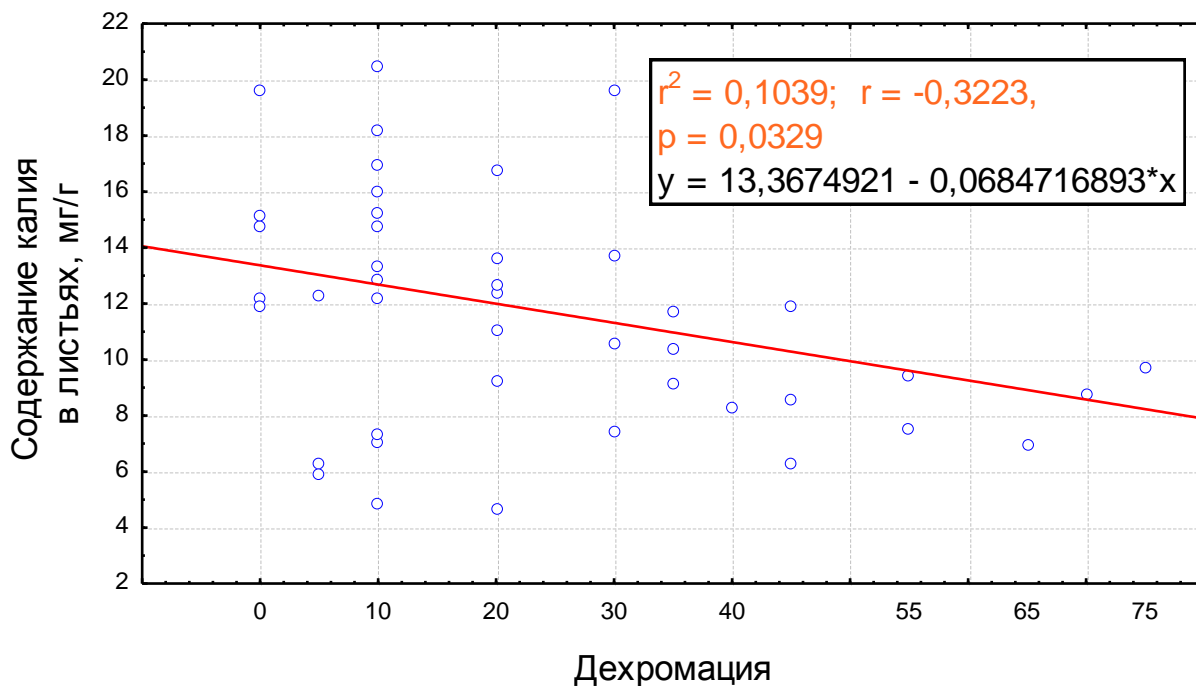


Рис. 9. Зависимость содержания общего калия в листьях *B.pendula* от дехромации в градиенте воздействия «Карабашмедь»

Содержание фосфора в листьях снизилось на 15% в пробных площадях, ближайших к источнику загрязнения (СВ-5 и С-1,5) по сравнению с контролем (СВ-24) (рис. 10), достоверно отличаясь от СВ-24 и СВ-15 ($p < 0,05$). Содержание общего фосфора в листьях березы повислой на СВ-24 – $7,4 \pm 0,4$ мг/г, что достоверно не отличается от СВ-15 ($7,2 \pm 0,4$ мг/г) ($p > 0,05$). Содержание общего фосфора в листьях берез на пробных площадях, ближайших к источнику загрязнения СВ-5 – $6,4 \pm 0,2$ мг/г, на С-1,5 – $6,3 \pm 0,3$ мг/г. Найдена отрицательная корреляция содержания фосфора и дефолиации листы ($r = -0,304$, $r^2 = 0,092$, $p < 0,05$) (рис. 11, табл. 8), т.е. с увеличением дефолиации уменьшается содержание фосфора в листьях березы повислой. Теснота связи между содержанием общего фосфора в листе и дефолиацией и категорией состояния не обнаружена ($p > 0,05$).

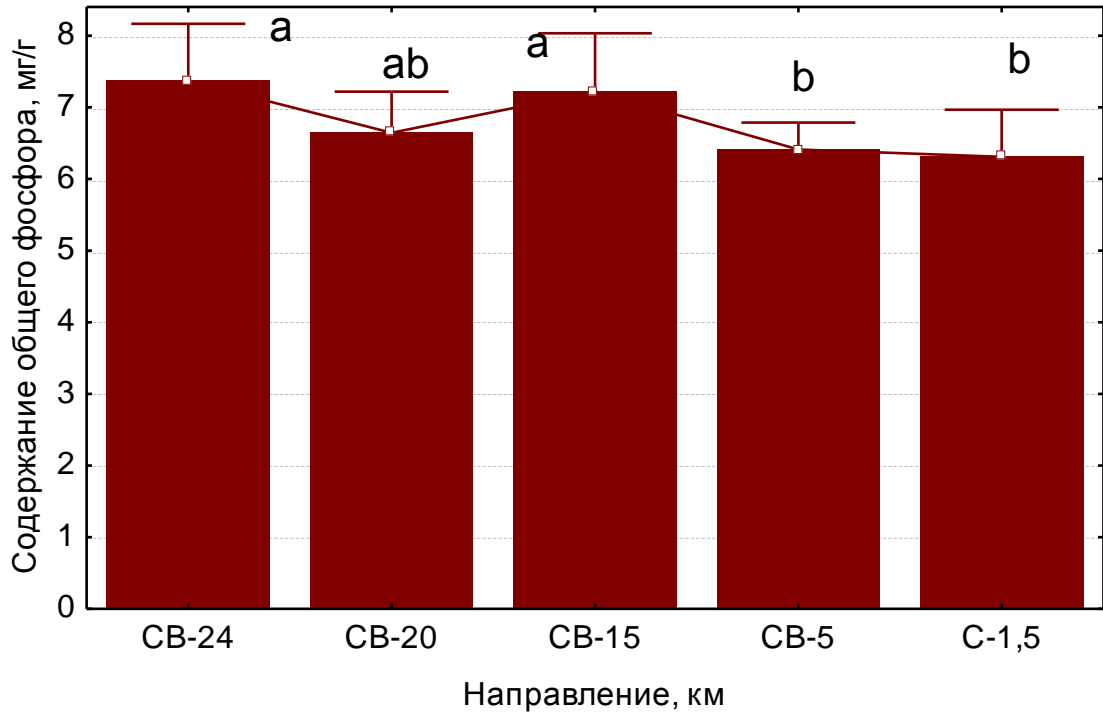


Рис. 10. Содержание общего фосфора в листьях *V. pendula* на различном расстоянии от Карабашского медеплавильного комбината. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

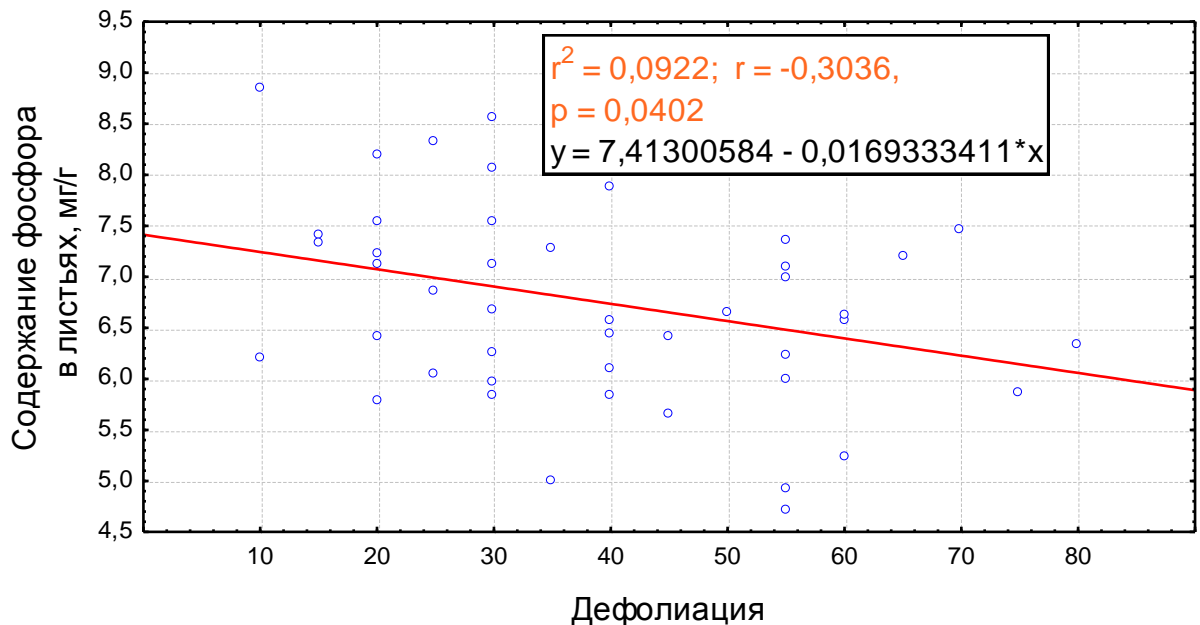


Рис.11. Зависимость содержания общего фосфора в листьях *V.pendula* от дефолиации в градиенте воздействия «Карабашмедь»

Содержание серы увеличивалось на 35% ($p < 0,05$) на ПП, ближайшем к источнику загрязнения по сравнению с другими ПП и достигло $2,65 \pm 0,18$ мг/г (рис. 10), что достоверно отличается от остальных пробных площадей. На пробных площадях СВ-24, СВ-20, СВ-15, СВ-5 содержание серы в листьях березы повислой изменялось от $1,71 \pm 0,14$ мг/г до $1,9 \pm 0,16$ мг/г и статистически значимых отличий между этими ПП найдено не было ($p > 0,05$).

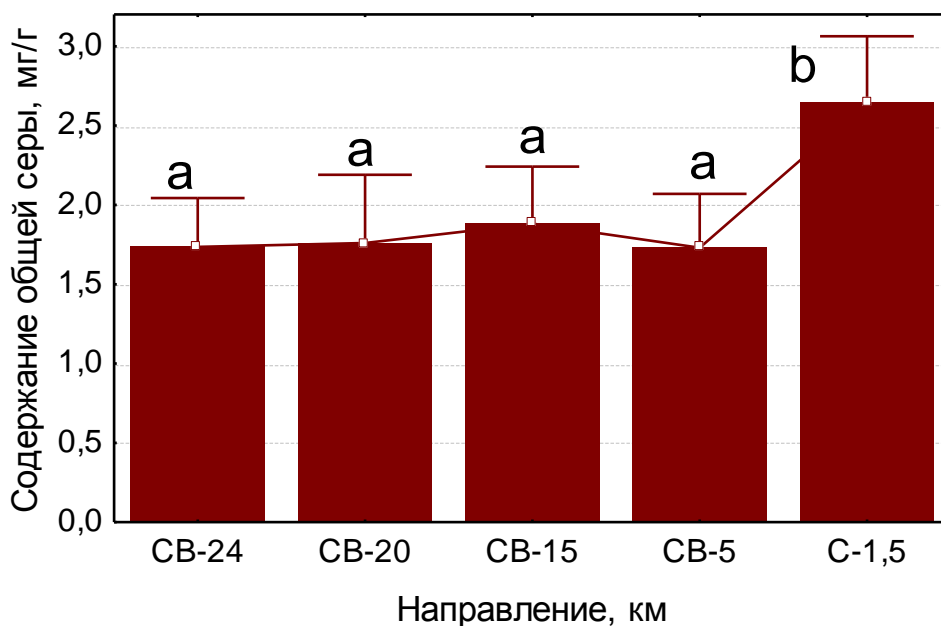


Рис 10. Содержание серы в листьях *B. pendula* на различном расстоянии от Карабашского медеплавильного комбината. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

Также обнаружена положительная корреляция содержания серы с дехромацией листы ($r = 0,30$, $p < 0,05$) (рис. 11, табл. 8), т.е. содержание серы в листе увеличивалось в поврежденных выбросами сернистого газа древостоях березы, что также визуально проявлялось в пожелтении листьев и, следовательно, увеличении дехромации.

Таким образом, с увеличением дехромации листы, содержание калия уменьшается, а серы увеличивается, с увеличением дефолиации снижается содержание азота и фосфора.

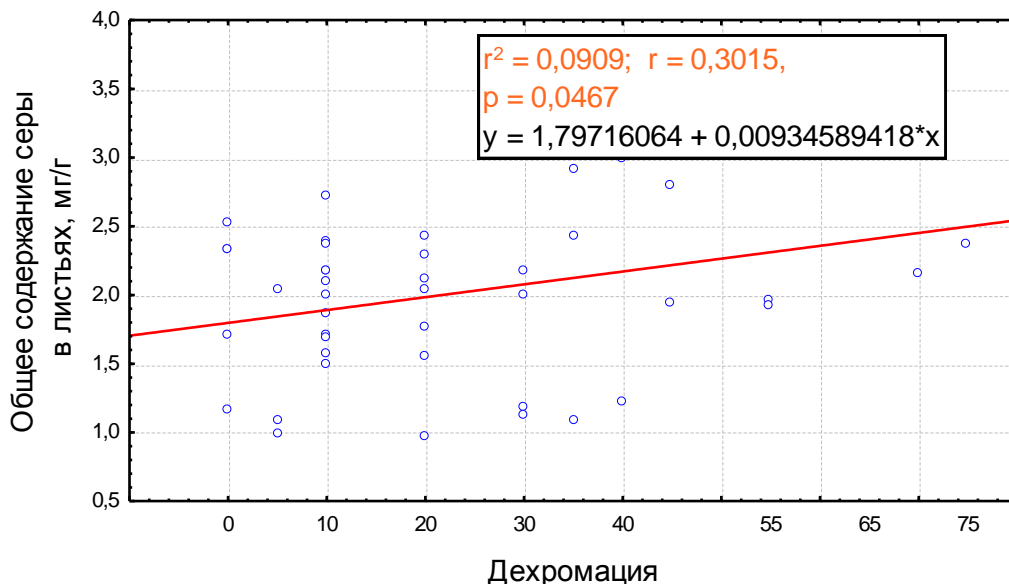


Рис.11. Зависимость содержания серы в листьях *B.pendula* от дехромации в градиенте воздействия «Карабашмедь»

Наиболее важный на наш взгляд параметр, отражающий жизненное состояние березового древостоя, это суммарное содержание биофильных элементов – азота, фосфора и калия (N+P+K). На ПП, наиболее поврежденном диоксидом серы (С-1,5), концентрация биофильных элементов на 16% ниже и достоверно отличается от других ПП (рис. 12).

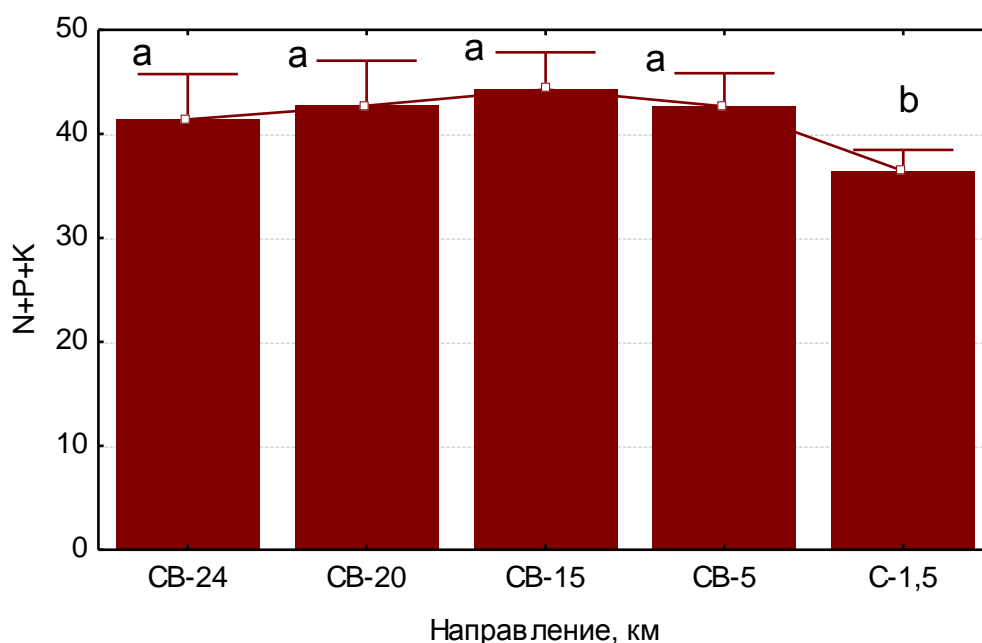


Рис 12. Содержание суммы N+P+K в листьях *B. pendula* на различном расстоянии от Карабашского медеплавильного комбината. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев

Также данный параметр зависит от жизненного состояния древостоя (рис. 13, табл. 8) – 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.

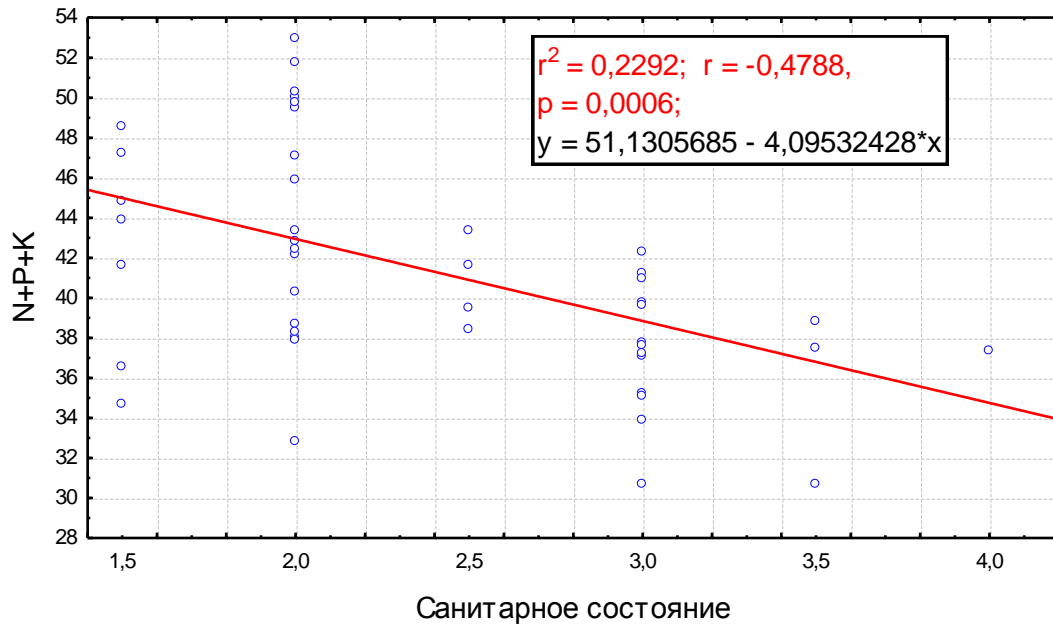


Рис.13. Зависимость суммы N+P+K в листьях *V.pendula* от дехромации в градиенте воздействия «Карабашмедь»

Содержание кальция на пробных площадях СВ-24, СВ-20 и С-1,5 достоверно не отличается, достигает значения $8 \pm 0,9$ мг/г (рис. 14). Содержание кальция в листьях наименьшее на пробных площадях СВ-15 ($5,5 \pm 0,5$ мг/г) и СВ-5 ($5,8 \pm 0,3$ мг/г) и достоверно отличается от других пробных площадей ($p < 0,05$). Содержание магния в контроле (СВ-24) повышено в 2,5 раза по сравнению с другими пробными площадями (СВ-20, СВ-5 и С-1,5) и достигает $6,4 \pm 0,5$ мг/г. Содержание магния в листьях на СВ-20 – $4,1 \pm 0,2$ мг/г, на СВ-5 – $3,7 \pm 0,2$ мг/г, на С-1,5 – $3,6 \pm 0,3$ мг/г.

Не обнаружено зависимости содержания магния и кальция в листьях березы повислой от дефолиации, дехромации и категории состояния дерева ($p > 0,05$) (табл. 8), что означает, что содержание кальция и магния не связано с жизненным состоянием дерева.

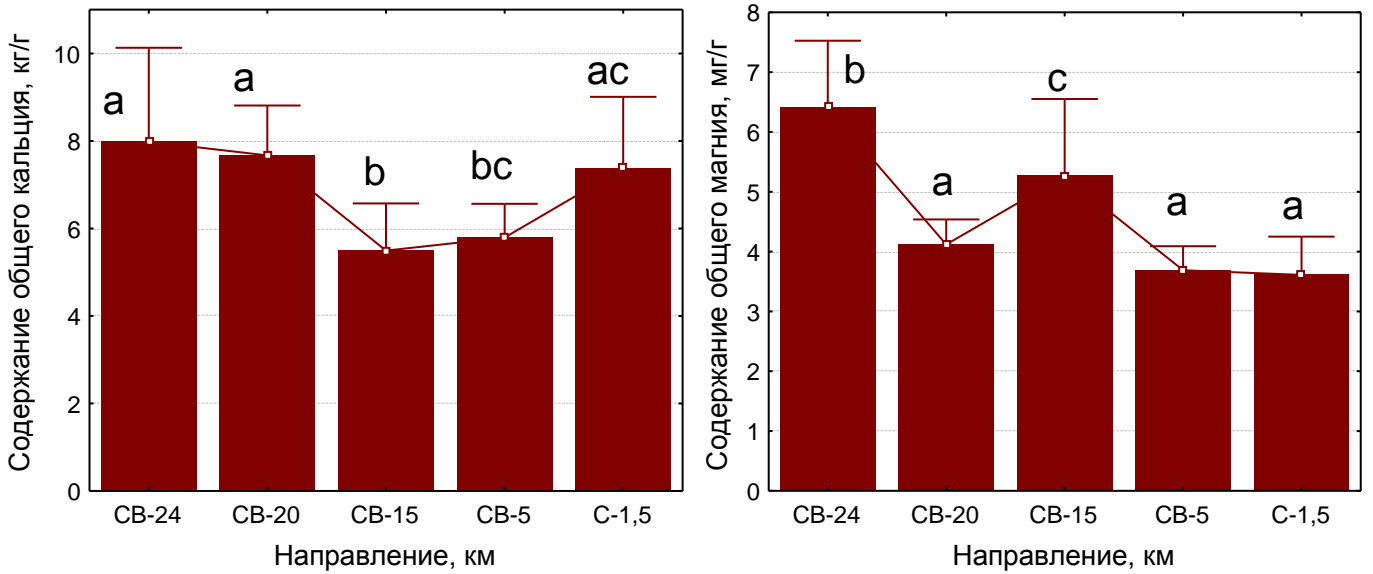


Рис. 14. Содержание общего кальция и магния в листьях *B. pendula* на различном расстоянии от Карабашского медеплавильного комбината. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Таблица 8. 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
N+P+K	-0,46*	-0,40*	-0,46*

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

Преобладающий элемент питания в листве – азот, на его долю приходится 22-24 мг/г, на втором месте – калий (9-15 мг/г), на долю 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. По данным Т.А. Сухаревой [2004], в условиях сильного техногенного загрязнения в хвое преобладающими макроэлементами становятся азот и калий.

По мнению исследователей [Кулагин, 1985], березы пушистая и повислая в природных условиях сформировали оксифильность и относительную нетребовательность к почвенному плодородию, поэтому их поселение и рост на загрязненных территориях сдерживается не особенностями почвенно-грунтовых условий, а загазованностью воздуха. По литературным данным, фотосинтез в условиях хронического загрязнения воздуха диоксидом серы значительно лимитирован пониженным содержанием хлорофилла в большую часть вегетационного сезона [Васфилов, 1988]. О деградирующем действии диоксида серы на хлорофилл свидетельствуют результаты лабораторных экспериментов [Николаевский, 1971; Илькун, 1978; Melhotra, Khan, 1980]. Низкое содержание хлорофилла в листьях берез в условиях хронического загрязнения воздуха диоксидом серы может быть обусловлена как непосредственным разрушительным (деградирующим) действием на хлорофилл, так и опосредованно через депрессию синтеза хлорофилла [Grill и др., 1981], которая может быть обусловлена общим снижением функционирования фотосинтеза в листе за счет снижения содержания хлорофилла.

Проведенное исследование показало, что при загрязнении воздуха диоксидом серы, общее содержание макроэлементов в листьях снижалось. На сильное повреждение листьев березы диоксидом серы на ПП С-1,5 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. При этом

общее содержание азота значительно не менялось, а калия и фосфора снижалось. Также, литературные данные указывают на то, что загрязняющие факторы (выбросы автотранспорта, промышленные выбросы, световое загрязнение) приводят к снижению содержания основных групп биологически активных веществ в листьях берез [Ханина, 2015]. В результате дисперсионного и корреляционного анализов установили, что снижение 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 NPK 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 берез *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 высотного фактора на содержание макроэлементов в листьях.

Береза пушистая в тундровом и подгольцовом поясах аккумулирует в среднем на 30% азота больше по сравнению с низинными популяциями (контроль) (рис. 15). 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 поясе и тундровом соответственно. При этом статистический анализ показал, что содержание азота в верхних поясах достоверно не изменяется за два года ($p > 0.05$). Отличия были статистически достоверны между всеми точками высотного ряда, за исключением подгольцового и тундрового поясов ($p < 0.05$) (рис. 20).

Содержание общего азота в листьях *B. pendula*, также как и у *B. pubescens*, повышалось по мере увеличения высоты произрастания. У березы повислой наибольшая концентрация общего азота была отмечена в горнолесном поясе – $25,3 \pm 0,8$ мг/г, в контроле – $20 \pm 0,74$ мг/г в 2007, в 2009 году в содержание азота контроле увеличивалось с $22,3 \pm 0,69$ мг/г до $31,9 \pm 0,75$ мг/г в горнолесном поясе. Были найдены достоверные отличия между всеми поясами в 2009 году и между контролем и горно-лесным поясом в 2007 году ($p < 0.05$).

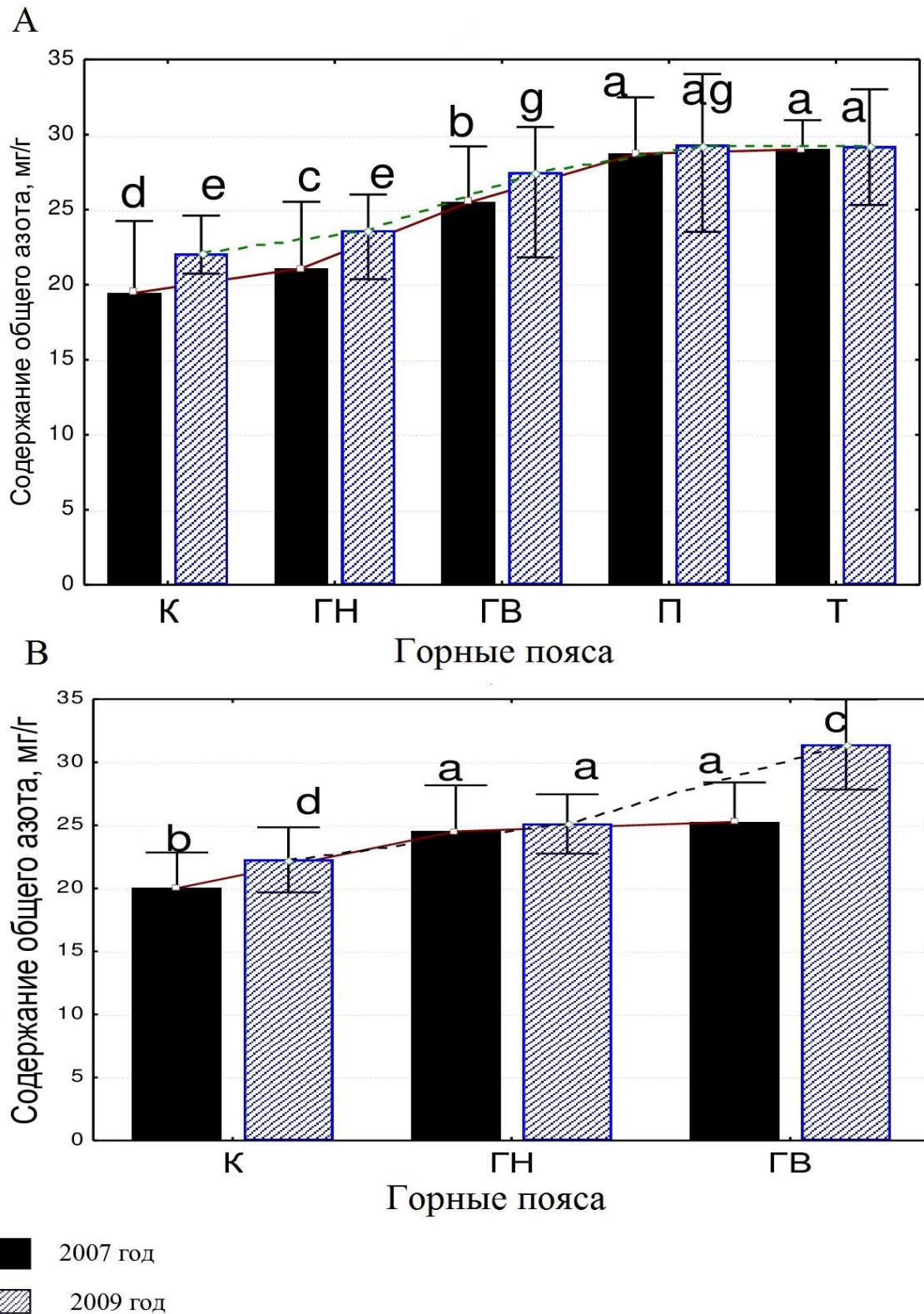


Рис.15. Содержание общего азота в листьях *V. pubescens* (A) и *V. pendula* (B) вдоль высотного градиента г.Большой Иремель. К – контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

В 2009 году содержание азота в листьях березы пушистой превышал 2007 год в контроле и горно-лесном поясе ($p < 0.05$), в подгольцовом и тундровом поясах отличия между годами не достоверны. У березы повислой достоверные отличия найдены в контроле и верхней границе горно-лесного пояса.

Сравнивая два вида, можно увидеть, что содержание азота у двух видов не отличается, достоверные отличия найдены только в горно-лесном поясе, где содержание азота у березы повислой выше, чем у березы пушистой ($p < 0.05$).

Результаты дисперсионного анализа подтвердили влияние вида, года и пояса на содержание общего азота в листьях берез ($F > F_{0.05}$, $p < 0.005$). Наибольшее влияние оказал горный пояс ($\eta^2 = 40,3\%$), год $\eta^2 = 10,3\%$ и вид $\eta^2 = 3,7\%$ (табл. 9).

Таблица 9. Влияние горного пояса, года и вида берез на содержание общего азота в листьях берез вдоль высотного градиента г.Большой Ирмель (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Источник изменчивости	Дисперсия SS	Степени свободы df	Варианса MS	Критерий Фишера F	p	Сила влияния η^2 , %
вид	110,3	1	110,3	15,08	0,000149	3,7
год	310,3	1	310,3	42,42	0	10,3
пояс	1210,5	2	605,2	82,74	0	40,3
вид*год	5,6	1	5,6	0,77	0,381463	0,2
вид*пояс	32,7	2	16,4	2,24	0,109829	1,1
год*пояс	64,7	2	32,4	4,42	0,013428	2,1
вид*год*пояс	57,9	2	28,9	3,96	0,020947	1,9
Погрешность	1214,2	166	7,3			40,4
Итого	3006,2					100

Содержание общего фосфора в листьях березы пушистой также увеличивалось в верхних поясах (рис. 16). Минимальные значения за оба года обнаружены в контроле – $5,61 \pm 0,65$ мг/г в 2007 году и $4,5 \pm 0,33$ мг/г в 2009 году, максимальные – в 2007 году в тундровом и подгольцовом поясах $7,78 \pm 0,36$ мг/г и $7,67 \pm 0,33$ мг/г, в 2009 году в нижней границе горно-лесного пояса $7,05 \pm 0,24$ мг/г и подгольцовом $6,89 \pm$ мг/г.

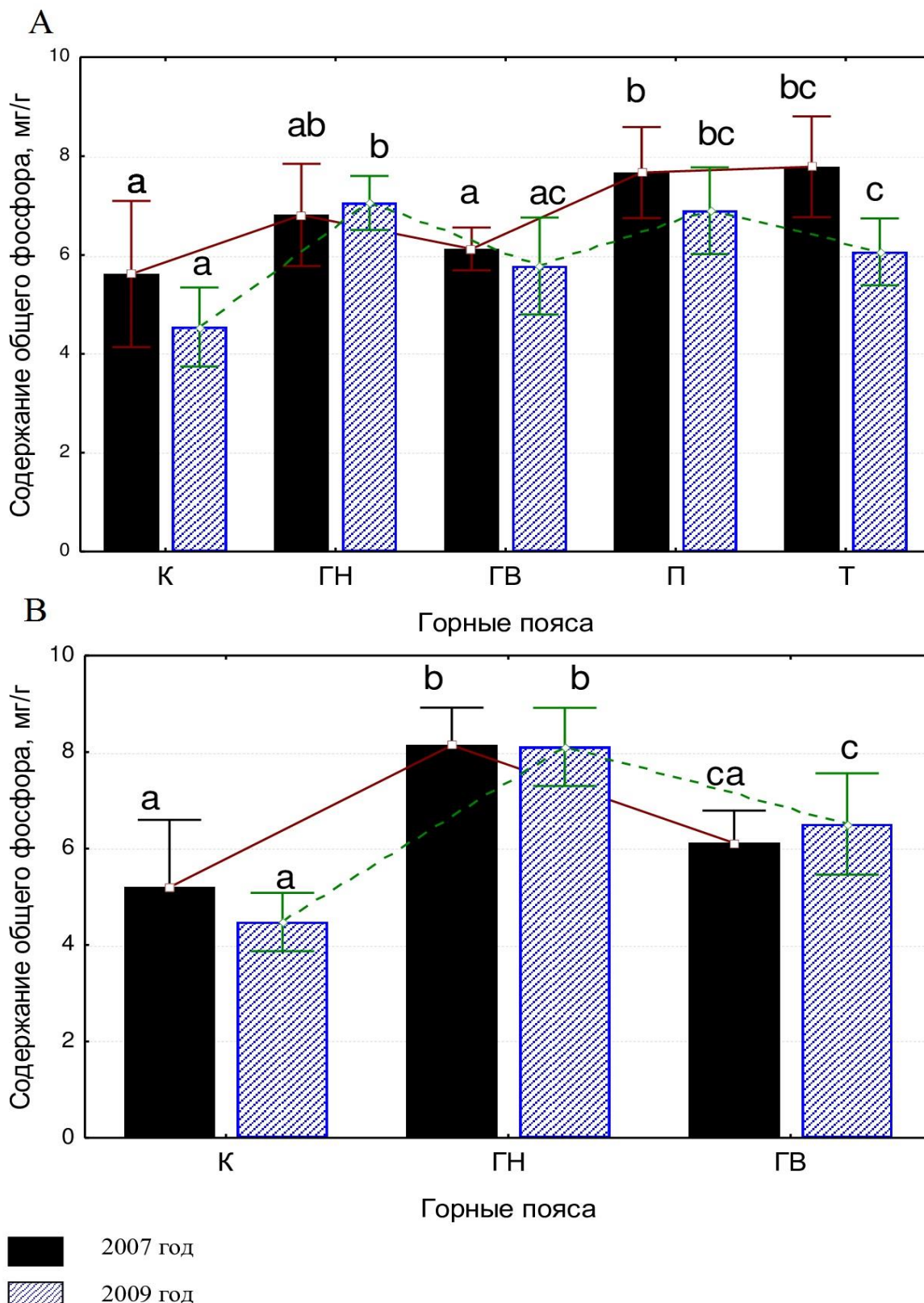


Рис.16. Содержание общего фосфора в листьях *V. pubescens* (А) и *V. pendula* (Б) вдоль высотного градиента г.Большой Иремель. К – контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Содержание фосфора в листьях в 2007 году превышало 2009 год, но достоверные отличия между двумя годами обнаружены только в тундровом поясе ($p < 0.05$). Содержание фосфора в листьях березы повислой также было минимальным в контроле – $5,2 \pm 0,62$ мг/г в 2007 году и $4,48 \pm 0,27$ мг/г в 2009 году, а максимальным за два года в нижней границе горно-лесного пояса – $8,1 \pm 0,34$ мг/г. Статистически значимых отличий между годами не обнаружено.

В контроле и верхней границе горно-лесного пояса не обнаружено достоверных отличий между видами за оба года ($p > 0,05$), отличия между видами по общему содержанию фосфора найдены только на нижней границе горно-лесного пояса также за оба года, при этом содержание фосфора в листьях березы повислой превышает этот показатель у березы пушистой.

Дисперсионный анализ не подтвердил влияние года и вида на содержание общего фосфора ($F < F_{0.05}$, $p > 0.005$). Сила влияния пояса была оценена в 38,9% (табл. 10).

Таблица 10. Влияние горного пояса, года и вида берез на содержание общего фосфора в листьях берез (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Источник изменчивости	Дисперсия SS	Степени свободы df	Варианса MS	Критерий фишера F	p	Сила влияния η^2 , %
Пояс	132,241	2	66,121	38,752	0	38,6
Год	1,947	1	1,947	1,141	0,287848	0,6
Вид	5,717	1	5,717	3,351	0,069939	1,7
Пояс*год	6,182	2	3,091	1,812	0,168314	1,8
Пояс*вид	10,398	2	5,199	3,047	0,051599	3,0
Год*вид	0,55	1	0,55	0,323	0,571207	0,2
Пояс*год*вид	1,317	2	0,658	0,386	0,680771	0,4
Погрешность	184,275	108	1,706			53,8
Итого	342,627					100

Содержание общего калия в листьях березы пушистой значительно варьировало между годами (рис. 17). В 2007 году содержание калия увеличивалось в верхних поясах – подгольцовом ($5,69 \pm 0,33$ мг/г) и тундровом ($3,62 \pm 0,22$ мг/г), что в 2,4 и 1,6 раз превышает контроль ($2,57 \pm 0,45$ мг/г).

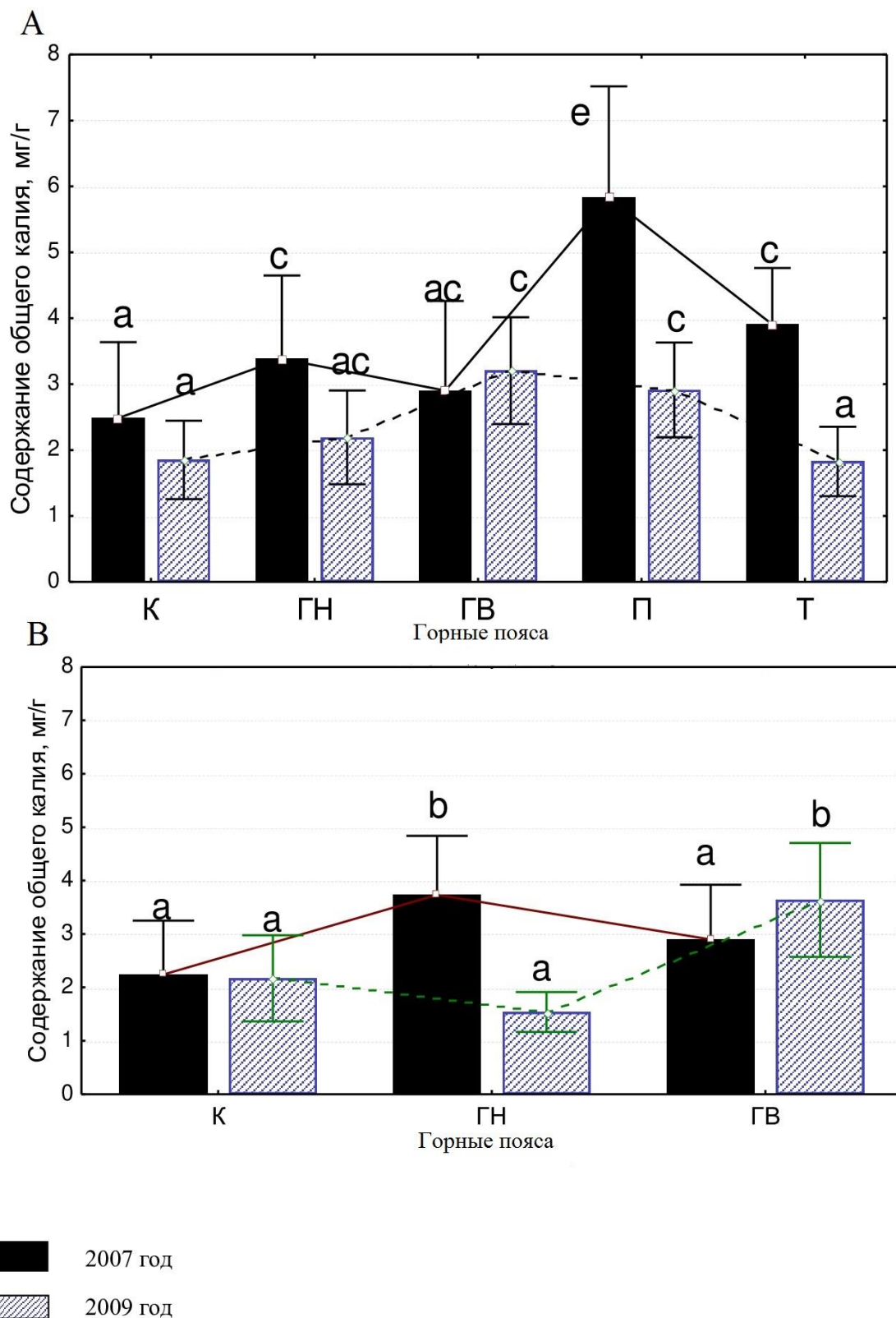


Рис. 17. Содержание общего калия в листьях *V. pubescens* (А) и *V. pendula* (В) вдоль высотного градиента г.Большой Ирмель. К – контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Нижние пояса (контроль и горно-лесной пояс) статистически различаются от верхних (подгольцового и тундрового) ($p < 0.05$). Содержание калия в листьях березы повислой также значительно варьировало между поясами и по годам. Максимальное значение обнаружено на нижней границе в 2007 году ($3,38 \pm 0,32$ мг/г) и на верхней границе в 2009 ($3,64 \pm 0,28$ мг/г). В контроле и на верхней границе за оба года достоверных отличий не было ($p > 0,05$). В контроле содержание калия в 2007 и 2009 годах – $2,15 \pm 0,39$ мг/г, на верхней границе – $2,9 \pm 0,32$ мг/г в 2007 году, и $3,64 \pm 0,28$ мг/г в 2009 году.

Подтверждено влияние пояса и года на содержание общего калия ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$). Содержание калия не зависит от вида берез ($F < F_{0.05}$, $p > 0.05$). При этом, наибольшее влияние оказала высотная поясность ($\eta^2 = 11,4\%$) (табл. 11).

Таблица 11. Влияние горного пояса, года и вида берез на содержание общего калия в листьях берез (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Источник изменчивости	Дисперсия SS	Степени свободы df	Варианса MS	Критерий фишера F	p	Сила влияния η^2 , %
Пояс	27,441	2	13,721	14,262	0,000002	11,4
Год	11,32	1	11,32	11,767	0,000763	4,7
Вид	0,049	1	0,049	0,051	0,822452	0,02
Пояс*год	37,003	2	18,501	19,232	0	15,4
Пояс*вид	0,993	2	0,496	0,516	0,597844	0,4
Год*вид	0	1	0	0	1	0
Пояс*год*вид	5,59	2	2,795	2,906	0,057539	2,3
Погрешность	157,771	164	0,962			65,7
Итого	240,167					100

Питание деревьев зависит от довольно экстремальных изменений погодных условий в течение вегетационного периода. С.О. Тамм [1951] показали, что концентрации фосфора в березе листья довольно стабильными в течение большей части вегетационного периода, в то время как концентрация калия значительно колеблется.

С увеличением высоты над уровнем моря в листьях *B. pubescens* концентрация магния уменьшалась на 40-60%, снижаясь от контроля до подгольцового и горно-тундрового поясов (рис. 18).

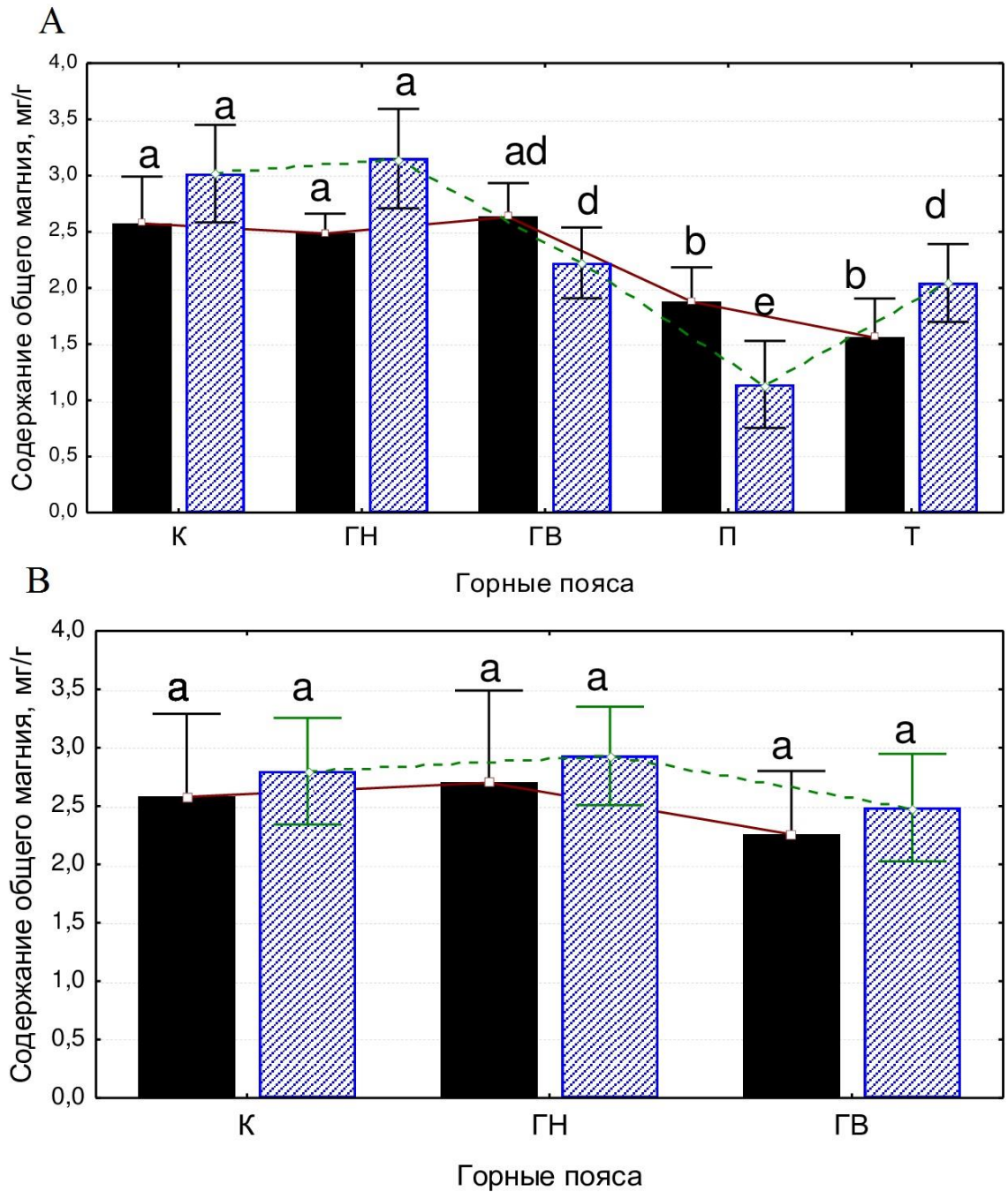


Рис. 18. Содержание общего магния в листьях *B. pubescens* (А) и *B. pendula* (В) вдоль высотного градиента г.Большой Иремель. К – контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

За два года наблюдения тренд не изменился. В 2009 году этот параметр также был максимальным в контроле ($3,01 \pm 0,19$ мг/г) и нижней границе горно-лесного пояса ($3,15 \pm 0,21$ мг/г) и минимальным в подгольцовом ($1,14 \pm 0,18$ мг/г) и тундровом ($2,04 \pm 0,16$ мг/г). В 2007 году содержание магния в контроле ($2,49 \pm 0,29$ мг/г) и горно-лесной зоне ($2,39 \pm 0,07$ и $2,46 \pm 0,11$ мг/г) достоверно отличалось от подгольцового пояса ($1,82 \pm 0,09$ мг/г) и тундры ($1,88 \pm 0,13$ мг/г). Таким образом, содержание магния с высотой снизилось в 1,6 раз в 2007 году и в 2,8 раз в 2009 году.

У березы повислой наблюдается незначительное снижение содержание магния с высотой, однако отличия между поясами достоверны только в 2009 году между верхней и нижней границами горно-лесного пояса. Достоверных отличий между видами в каждой точке высотного ряда не обнаружено ($p > 0,05$). Достоверные отличия между годами отмечены только для березы пушистой. Отличия достоверны для нижней границы, подгольцового пояса и тундры ($p < 0,05$).

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%. Вид не влиял на содержание магния в листьях, так же как на содержание калия и фосфора (табл. 12).

Таблица 12. Влияние горного пояса, года и вида берез на содержание общего магния в листьях берез (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Источник изменчивости	Дисперсия SS	Степени свободы df	Варианса MS	Критерий фишера F	p	Сила влияния η^2 , %
Пояс	5,895	2	2,947	7,836	0,00056	7,8
Год	2,362	1	2,362	6,28	0,013176	3,1
Вид	0,133	1	0,133	0,354	0,552424	0,2
Пояс*год	2,41	2	1,205	3,204	0,043109	3,2
Пояс*вид	0,079	2	0,039	0,105	0,900549	0,1
Год*вид	0,001	1	0,001	0,002	0,96743	0,001
Пояс*год*вид	2,428	2	1,214	3,227	0,042164	3,2
Погрешность	62,436	166	0,376			82,4
Итого	75,744					100

Содержание кальция в листьях березы пушистой варьировало по годам и высотам (рис. 19). В 2007 году достоверные отличия обнаружены только между контролем и горно-лесным поясом и подгольцовым ($p < 0.05$). Нет достоверных отличий между контролем и тундрой ($p > 0.05$). Максимальное содержание кальция в 2009 году найдено в контроле, и достоверно снижается с высотой, достигая минимальных значений в подгольцовом поясе ($3,73 \pm 0,28$ мг/г). Погодичная изменчивость также выражена, достоверные отличия найдены в контроле и подгольцовом поясе ($p < 0.05$).

Результаты трехфакторного дисперсионного анализа не подтвердили влияние пояса, года и вида на содержание кальция в листьях берез ($F < F_{0.05}$, $p > 0.05$) (табл. 13).

Таблица 13. Влияние горного пояса, года и вида берез на содержание общего кальция в листьях берез (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Источник изменчивости	Дисперсия SS	Степени свободы df	Варианса MS	Критерий фишера F	p	Сила влияния η^2 , %
Пояс	3,51	2	1,755	1,932	0,148056	2,0
Год	0,441	1	0,441	0,486	0,486896	0,3
Вид	0,934	1	0,934	1,029	0,311924	0,5
Пояс*год	10,658	2	5,329	5,867	0,003455	6,2
Пояс*вид	0,594	2	0,297	0,327	0,721363	0,3
Год*вид	4,016	1	4,016	4,421	0,037012	2,3
Пояс*год*вид	2,663	2	1,332	1,466	0,233778	1,5
Погрешность	149,862	165	0,908			86,8
Итого	172,678					100

По данным исследования, в 2009 году содержание кальция в листьях березы повислой не менялось с высотой, различия между высотами были статистически не значимы ($p > 0.05$). Никаких различий между двумя видами в содержании кальция не обнаружено, за два года во всем диапазоне высот содержание кальция у двух видов не отличается.

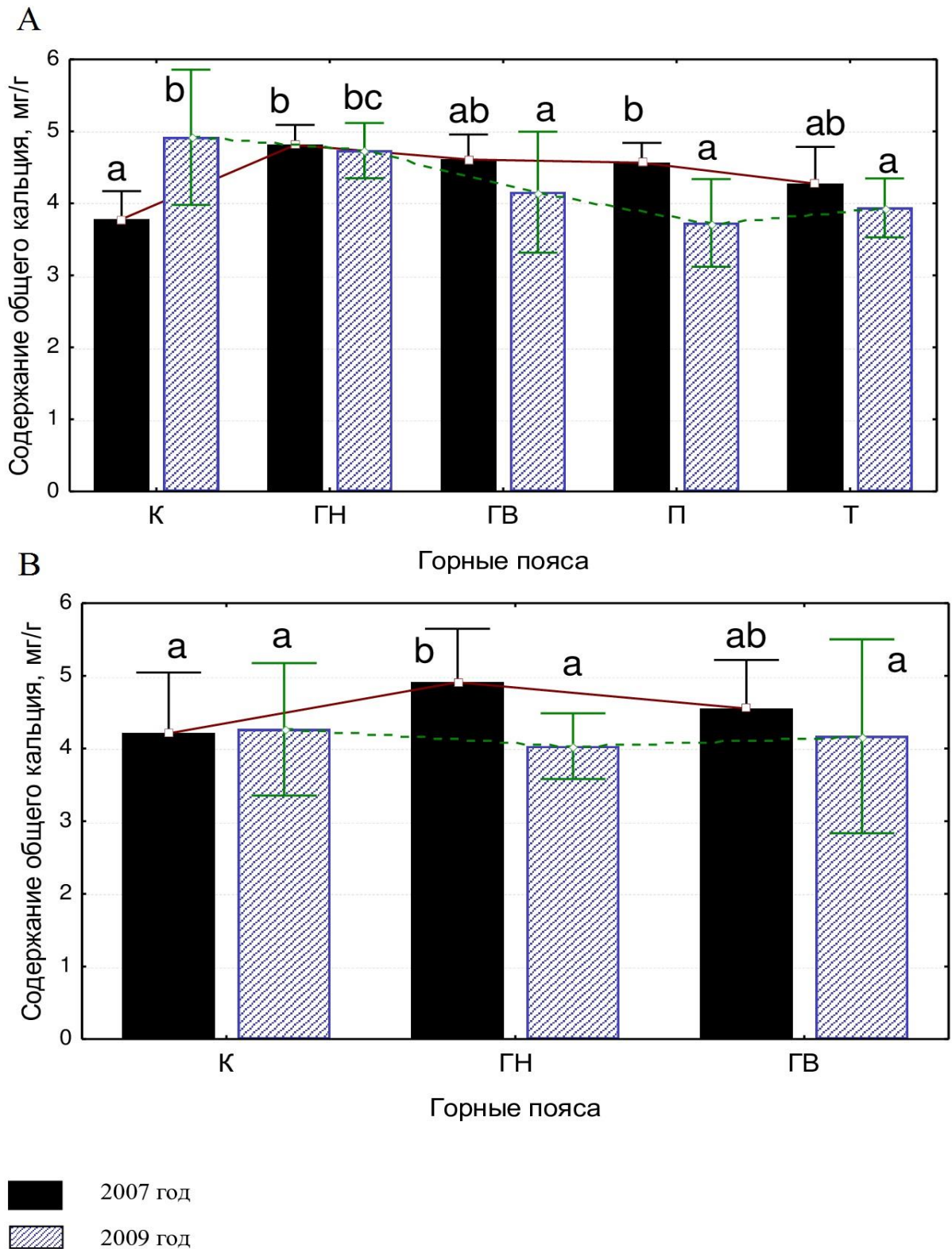


Рис.19. Содержание общего кальция в листьях *B. pubescens* (А) и *B. pendula* (В) вдоль высотного градиента г.Большой Иремель. К – контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Содержание натрия значительно варьировало внутри экотопа (рис. 20). Обнаружена самая высокая индивидуальная изменчивость среди изученных макроэлементов ($CV > 20\%$) [Мамаев, 1973]. Индивидуальная изменчивость (уровень варьирования внутри экотопа) превышала внутривидовую изменчивость. Индивидуальная изменчивость варьировала от 40% до 70%. Достоверных отличий не обнаружено ни между видами, ни между годами и высотными поясами (рис. 20).

Результаты трехфакторного дисперсионного анализа не подтвердили влияние пояса, года и вида на содержание натрия в листьях берез ($F < F_{0.05}$, $p > 0.05$) (табл. 14).

Таблица 14. Влияние горного пояса, года и вида берез на содержание общего натрия в листьях берез (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Источник изменчивости	Дисперсия SS	Степени свободы df	Варианса MS	Критерий фишера F	p	Сила влияния η^2 , %
Пояс	1,7324	2	0,8662	0,7825	0,459054	0,9
Год	0,4161	1	0,4161	0,3758	0,540729	0,2
Вид	0,4153	1	0,4153	0,3752	0,54109	0,2
Пояс*год	4,2787	2	2,1394	1,9325	0,148209	2,4
Пояс*вид	0,0781	2	0,0391	0,0353	0,965341	0,04
Год*вид	0,0016	1	0,0016	0,0014	0,969772	0,000
Пояс*год*вид	0,7351	2	0,3676	0,332	0,717973	0,4
Погрешность	173,8025	157	1,107			95,8
Итого	181,4598					100

Различия между особями и различные реакции отдельных деревьев дают сложную модель, в которой различия в природных условиях, различия между генотипами и их взаимодействия влияют на химический состав и, следовательно, на устойчивость берез. Наши результаты показывают, что в естественном березовом древостое варибельность химического состава высока, что дает хорошие возможности для адаптации популяций к различным воздействиям окружающей среды.

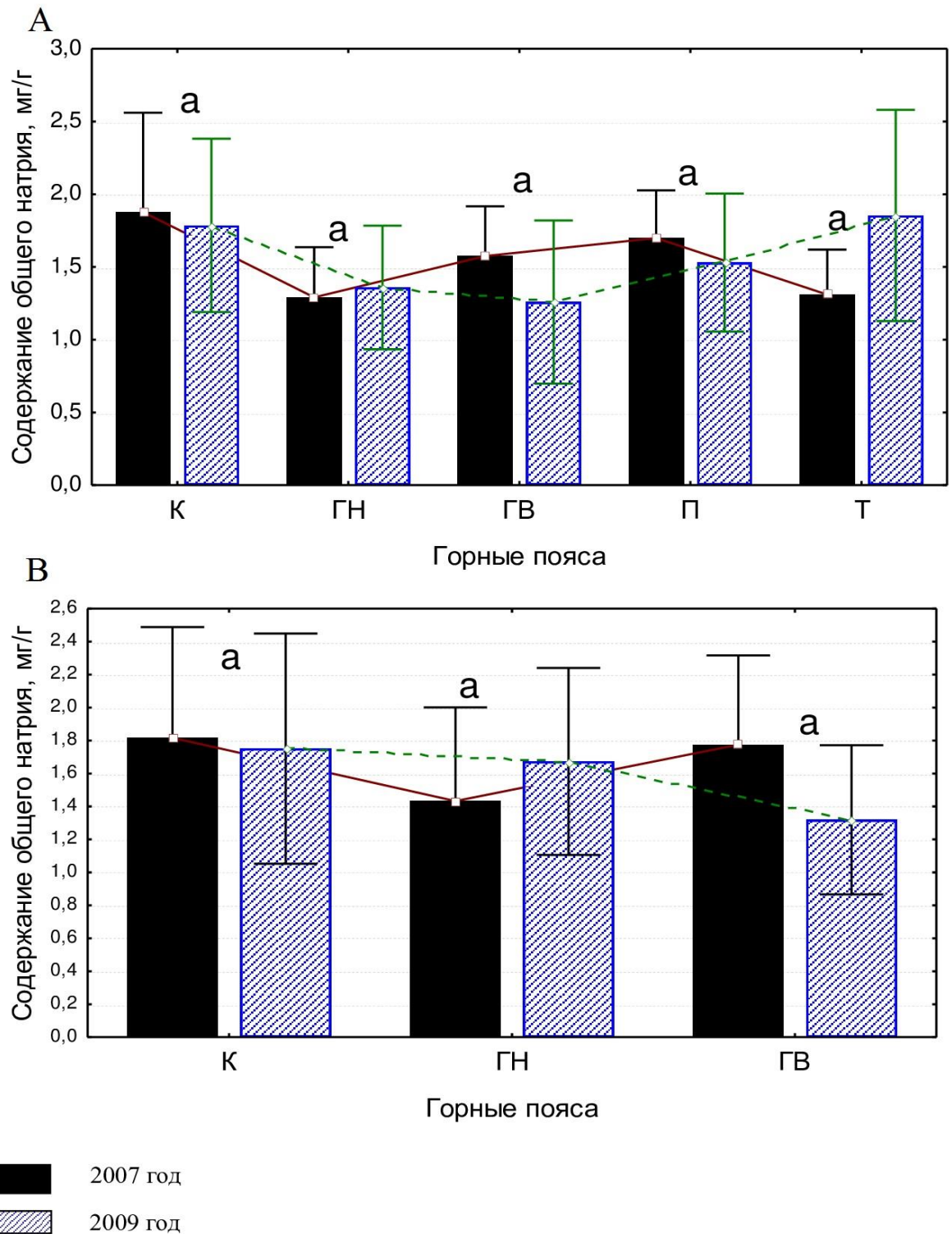


Рис. 20. Содержание общего натрия в листьях *V. pubescens* (А) и *V. pendula* (Б) вдоль высотного градиента г.Большой Иремель. К – контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

P.L. Marshall и K. Jahraus [1987] рассчитали коэффициенты вариации от 10 до 17% для N, P, K и от 40 до 75% для Fe, Zn и Cu. Рассчитанные нами коэффициенты вариации содержания элементов в листьях берез (уровень индивидуальной изменчивости) показали следующее. В листьях березы пушистой наибольшим размахом изменчивости характеризуется содержание натрия, калия и магния (коэффициенты вариации содержания натрия варьируют от 34,9 до 93,7%, калия – от 22,3 до 54,9%, магния – от 9,2 до 61,3%). Коэффициент вариации содержания азота у березы пушистой изменялся от 7,6 до 11%, березы повислой от 9,1 до 14,9%, что характеризуется низким и средним уровнем изменчивости [Мамаев, 1973]. Была также рассчитана индивидуальная изменчивость содержания элементов питания в листьях березы повислой: азота – 9,1 - 14,9% (средний уровень), магния – 14,1 - 30,4% (повышенный), фосфора – 13,5 - 37,5% и кальция – 11,2 - 41,3% (высокий), калия – 24,3 - 56,9% и натрия – 56 - 116,1% (очень высокий) (табл. 15 и 16).

Таблица 15. Коэффициенты вариации содержания макроэлементов в листьях *B. pendula* вдоль высотного градиента г. Б. Ирмель

Пояс	Год	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %	Кальций, %	Магний, %	Натрий, %
Контроль	2007	14,2	37,5	56,9	22,5	28,6	70,9
	2009	11,6	18,9	37,1	21,4	16,3	66,0
Нижняя граница горно- лесного пояса	2007	14,9	13,5	30,1	16,1	30,4	77,0
	2009	9,5	14,0	24,3	11,2	14,4	58,7
Верхняя граница горно- лесного пояса	2007	12,4	15,4	42,9	16,0	14,1	56,0
	2009	9,1	22,6	29,3	41,3	18,5	116,1

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

Таблица 16. Коэффициенты вариации содержания макроэлементов в листьях *B. pubescens* вдоль высотного градиента г. Б. Ирмель

Пояс	Год	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %	Кальций, %	Магний, %	Натрий, %
Контроль	2007	10,7	36,8	54,9	16,8	37,1	61,4
	2009	10,6	24,6	32,1	33,1	24,9	73,4
Нижняя граница горно-лесного пояса	2007	10,9	21,2	46,6	10,7	9,2	53,7
	2009	8,2	10,8	32,4	14,6	25,3	93,7
Верхняя граница горно-лесного пояса	2007	10,4	9,9	42,9	12,9	16,5	37,1
	2009	9,2	23,7	25,3	36,5	25,6	66,3
Подгольцовый	2007	9,2	16,8	22,3	10,3	20,0	34,9
	2009	10,1	17,8	24,7	29,5	61,3	53,8
Горно- тундровый	2007	7,6	18,3	23,3	24,2	26,5	49,8
	2009	11,0	15,6	28,8	18,0	29,4	67,9

Результаты показывают, что воздействие окружающей среды по-разному изменяет количество макроэлементов в отдельных деревьях. Таким образом, приспособленность и устойчивость отдельного дерева по отношению к другим деревьям в той же популяции зависят от конкретных условий конкретного года. Известно, что на химический состав березы влияют как абиотические, так и биотические факторы [Lavola, 1998]. В нашем исследовании явная количественная разница между двумя годами может быть связана с тем фактом, что эти два года различались по влажности: 2009 год был более сухим, чем 2007 год, температура воздуха между годами не отличалась, хотя в 2009 году заморозки длились дольше, чем в 2007 году.

5.2. Характеристика основных агрохимических показателей почвы горных поясов Южного Урала

Изучение химических свойств почв горных территорий позволяет сделать определенные выводы об уровне их плодородия. Были проанализированы образцы корнеобитаемого слоя почв пяти горных поясов г. Большой Ирмель.

В пределах региона Южного Урала вертикально-поясная дифференциация почвенного покрова определяется наличием трех высотных почвенных поясов: 1) высокогорных горно-тундровых, горно-луговых, горных лесо-луговых почв (на высотах 1200-1600 м); 2) горно-лесных почв среднегорий и низкогорий (на высотах 600-1200 м); 3) горно-лесных и лесостепных почв низкогорий и Зилаирского плато (400-600 м). Кроме этих поясов выделяются межпоясные почвы котловин, речных долин и остепненных склонов [Хазиев и др., 1995]. Характеристика почвенного профиля представлена в табл. 17.

Таблица 17. Характеристика почвенного профиля массива г.Б.Ирмель

Горный пояс	Название почвы	Горизонты	Глубина каждого горизонта
Контроль	Горно-лесные серые почвы	A0 A1 A2B BC CD	0-1 1-5 5-9 9-32 32 и ниже
Нижняя граница горно-лесного пояса	Горно-лесные серые почвы	A0 A1 A2 BC	0-0,5 0,5-07 07-30 30 и ниже
Верхняя граница горно-лесного пояса	Горно-лесные серые почвы	A0 A1 A2 BC	0-0,5 0,5-10 10-35 35 и ниже
Подгольцовый	Горные лесо-луговые	A0 A1A2 AB BC	0-5 см 5-15 см 15-24 см 24 см и ниже
Горно-тундровый	Горно-тундровые торфянистые почвы	A0 A+B D	0-10 см 10-20 см 20 см и ниже

Анализ почвенных образцов показал, что обеспеченность почв азотом высокая во всех горных поясах (более 15 мг/100г почвы) [Наставление по выращиванию посадочного материала, 1998], в горно-лесном поясе достоверно ниже ($28,8 \pm 2,4$ мг/100г почвы и $27,7 \pm 1,9$ мг/100г почвы), чем в вышележащих поясах (в подгольцовом – $43,8 \pm 2,7$ мг/100г почвы и в тундре – $47,9 \pm 4,2$ мг/100г почвы (рис. 21). 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.

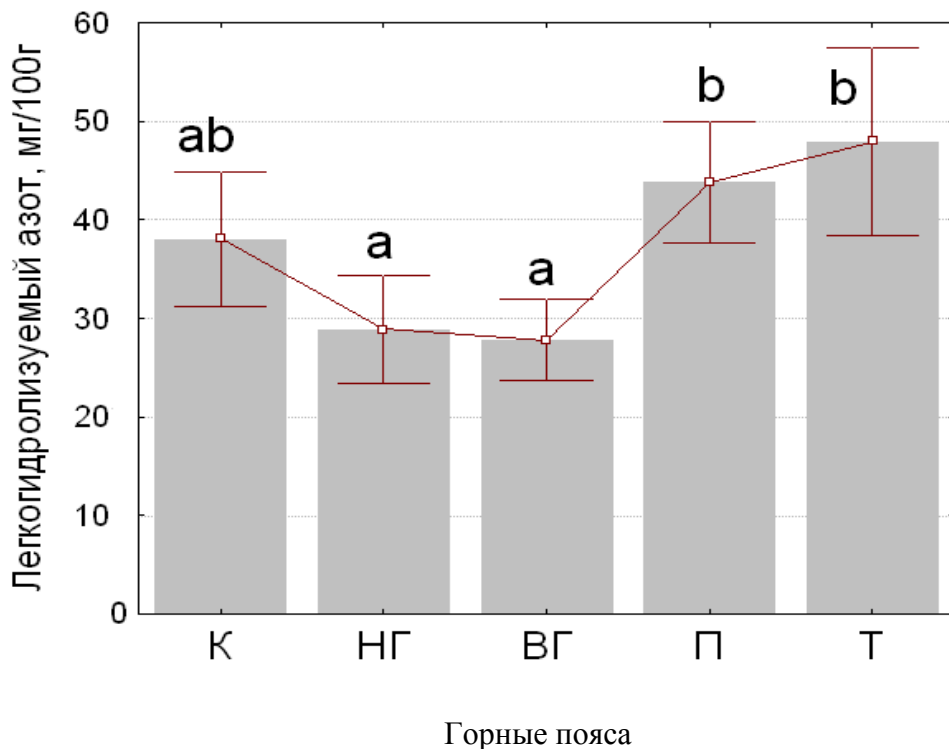


Рис. 21. Содержание легкогидролизуемого азота в почве вдоль высотного градиента г.Б.Ирмель. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, n=15. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Анализ кислотности почвы показал, что почвы г. Б. Ирмель в контроле среднекислые (pH=4,6), в горно-лесном поясе сильнокислые (pH=4,5 и pH=4,4), в подгольцовом и тундре очень сильнокислые – pH=3,7 и pH=3,5 соответственно (pH<4) [Наставление по выращиванию посадочного материала, 1998] (рис. 22).

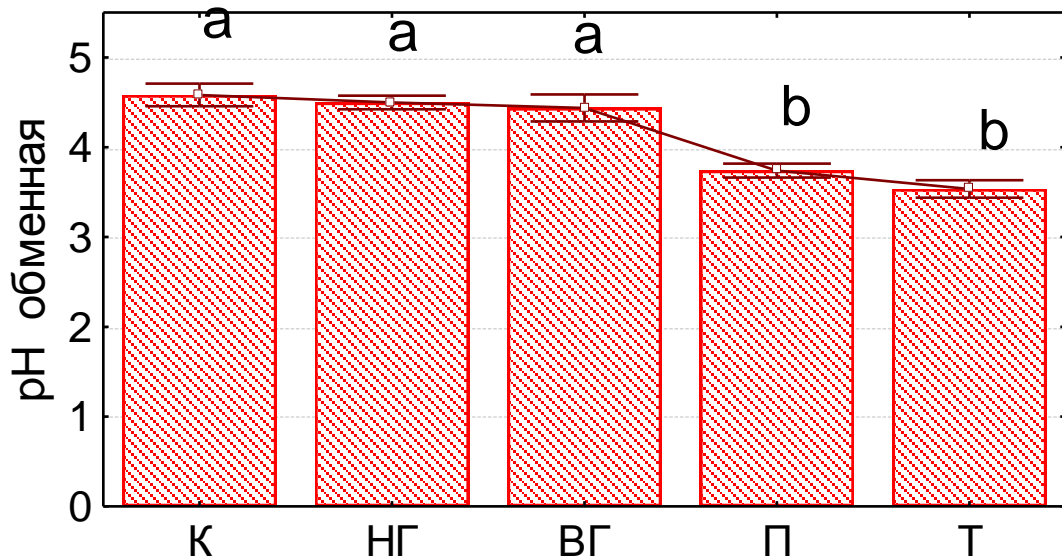


Рис. 22. Степень кислотности ($pH_{\text{кис}}$) почв вдоль высотного градиента г.Б.Иремель. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Степень обеспеченности почвы калием высокая во всех участках (рис. 23). Статистический анализ показал, что содержание калия в почве во всех горных поясах достоверно не отличается. Содержание калия в среднем около 17 мг/100 гр и колеблется от 13 до 20 мг/100гр в разных поясах.

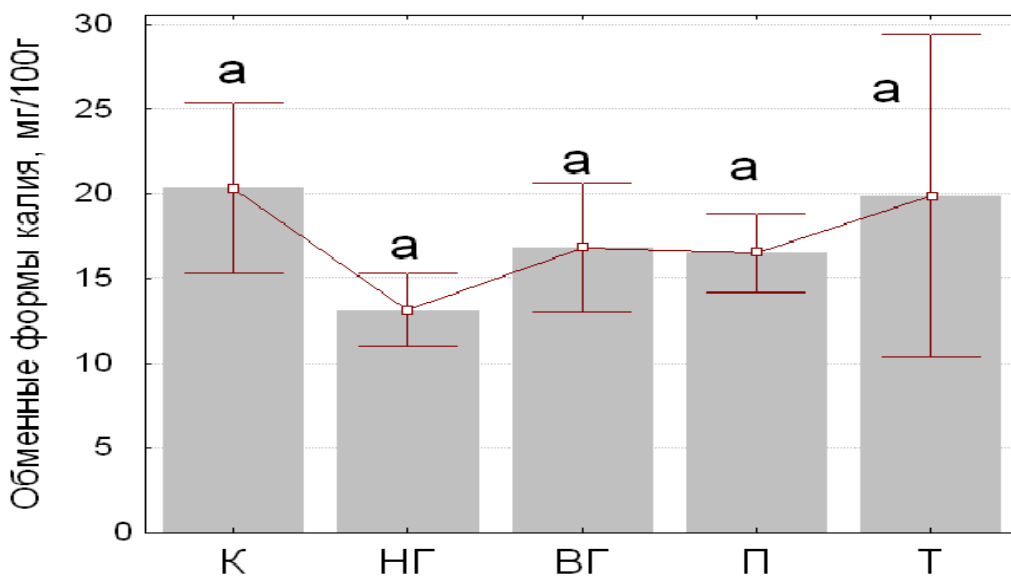


Рис. 23. Содержание обменных форм калия в почве вдоль высотного градиента г.Б.Иремель. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Обеспеченность фосфором низкая на верхней границе горно-лесного пояса ($8,1 \pm 1,4$ мг/100г почвы), на нижней границе, подгольцовом и тундре на среднем уровне ($14 \pm 0,6$ мг/100г почвы на нижней границе, в подгольцовом $17,5 \pm 3,2$ мг/100г почвы, в тундре $12,2 \pm 3,3$ мг/100г почвы), и в контроле высокая ($20,1 \pm 2,3$ мг/100г почвы) (рис. 24).

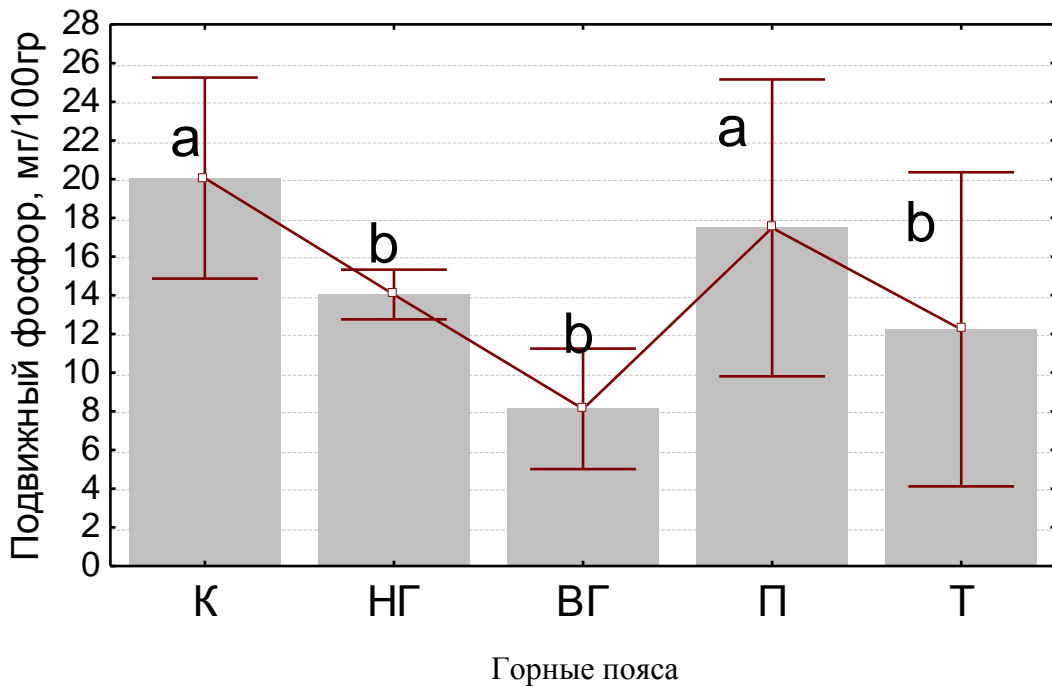


Рис. 24. Содержание подвижного фосфора в почве вдоль высотного градиента г.Б.Иремель. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Содержание магния в почве в контроле в несколько раз выше, чем в других поясах и уменьшается к тундровому поясу (рис. 25). В контроле содержание обменных форм магния 1434 ± 132 мг/кг и снижается к тундре до 94 ± 2 мг/кг.

Содержание обменных форм кальция в почве снижается в несколько раз от контроля до верхних поясов. В контроле – 4073 ± 384 мг/кг, в верхней границе горно-лесного пояса – 959 ± 193 мг/кг в тундре – $98,5 \pm 23$ мг/кг (рис. 26). От контроля до верхних поясов содержание обменных форм кальция в почве снижается в 13-40 раз.

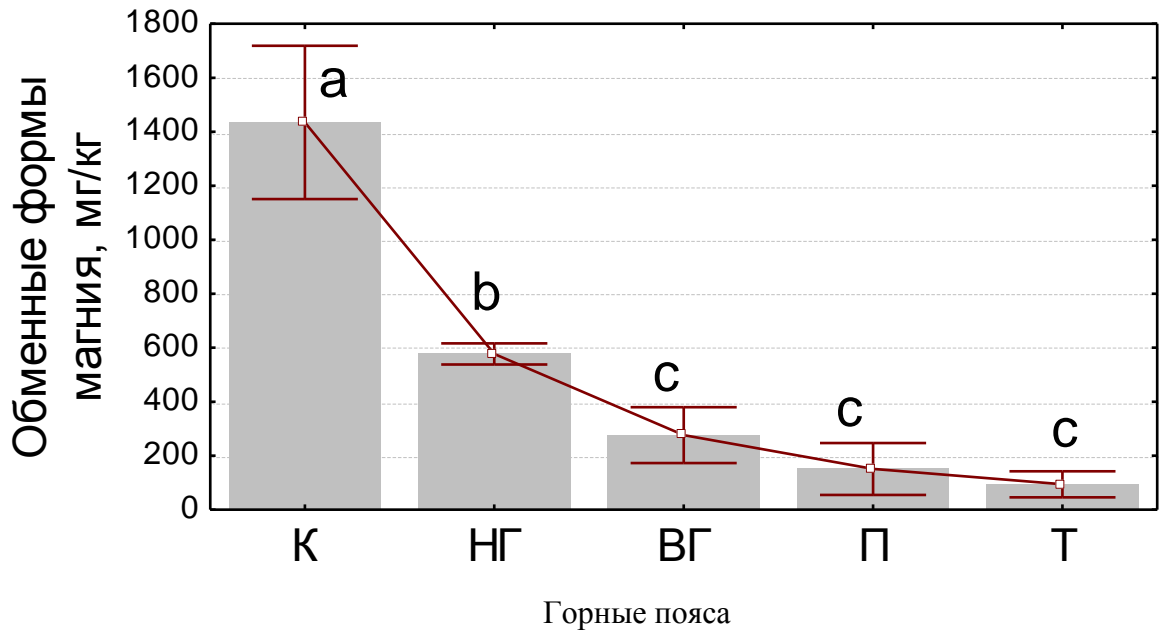


Рис. 25. Содержание обменных форм магния в почве вдоль высотного градиента г.Б.Иремель. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

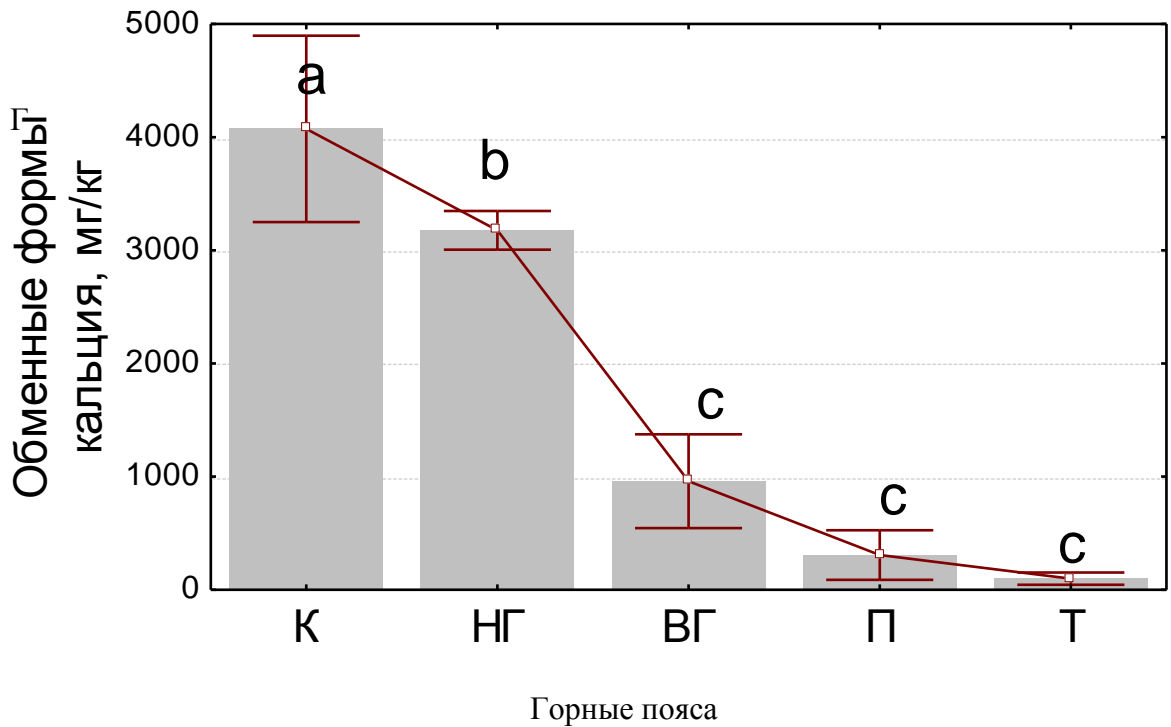


Рис. 26. Содержание обменных форм кальция в почве вдоль высотного градиента г.Б.Иремель. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

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) (рис. 27).

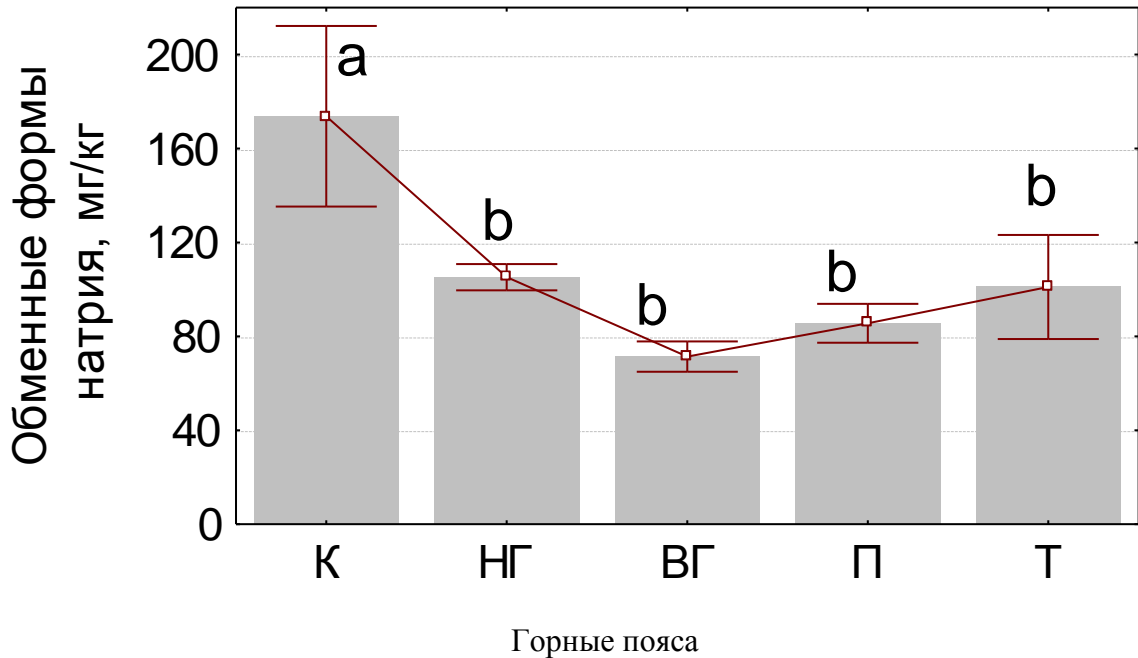


Рис. 27. Содержание обменных форм натрия в почве вдоль высотного градиента г.Б.Иремель. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

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. Промерзание почвы может привести к увеличению содержания азота (N), фосфора (P) и концентрации углерода (C) в почвенных растворах, что потенциально приводит к усиленной потере питательных веществ, подкислению почвенного раствора и истощению катионов оснований из почв [Mitchell и др., 1996]. Почвы тундрового пояса характеризуются очень сильной кислотностью, высокой обеспеченностью легкогидролизуемым азотом и калием, средней обеспеченностью подвижными формами фосфора и низким содержанием кальция и магния.

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

С помощью показателя накопления можно объяснить факторы увеличения или снижения содержания элементов в растениях и приобретать сведения о содержании усвояемых веществ в почвах, поступающие в растения [Митрофанов, 1982]. Характеризует разницу содержания элемента питания в растении и в почве.

Были проведены исследования по интенсивности поглощения макроэлементов у двух видов берез в горных поясах Южного Урала, расположенных на территории массива г. Б.Иремель. Показатели накопления макроэлементов в листьях березы повислой и березы пушистой были определены по соотношению концентрации вещества в листьях к таковому в корнеобитаемом слое почвы (концентрация вещества в листьях в мг/г сухого веса, деленный на концентрацию вещества в почве). Для вычисления среднего содержания макроэлемента в почве, было найдена концентрация данного вещества во всех почвенных генетических горизонтах и рассчитано среднее значение

Полученные данные свидетельствуют, что интенсивность поглощения макроэлементов двумя видами берез существенно варьирует. Самые низкие коэффициенты накопления элементов обнаружены в контроле. Повышение коэффициентов поглощения азота, фосфора и калия происходило в высотном градиенте, достигнув максимальных значений в верхней границе горно-лесного пояса, а затем снижалось на верхней границе произрастания в тундровом поясе (табл. 18). Для фосфора разница между содержанием элемента в почве и растении была в 75 раз, а для калия – в 22 раза.

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. Таким образом, используя корреляционный анализ, не было выявлено достоверно значимой связи содержания азота в почве и листьях берез ($r^2 = 0,282$, $p > 0,05$) (рис. 28).

Таблица 18. Коэффициенты поглощения (КП) макроэлементов в листьях *B. pubescens* вдоль высотного градиента г. Ирмель

Горный пояс	КП азота	КП фосфора	КП калия	КП кальция	КП магния	КП натрия
Контроль	58,1	22,7	9,1	1,2	2,1	8,2
Горно-лесной, нижняя граница	81,6	50,2	17,9	1,6	5,9	17,7
Горно-лесной, верхняя граница	98,9	66,7	19,1	4,3	8,0	17,6
Подгольцовый	67,0	38,8	18,7	12,5	7,8	19,2
Горно-тундровый	62,1	49,6	9,2	40,0	21,7	21,3

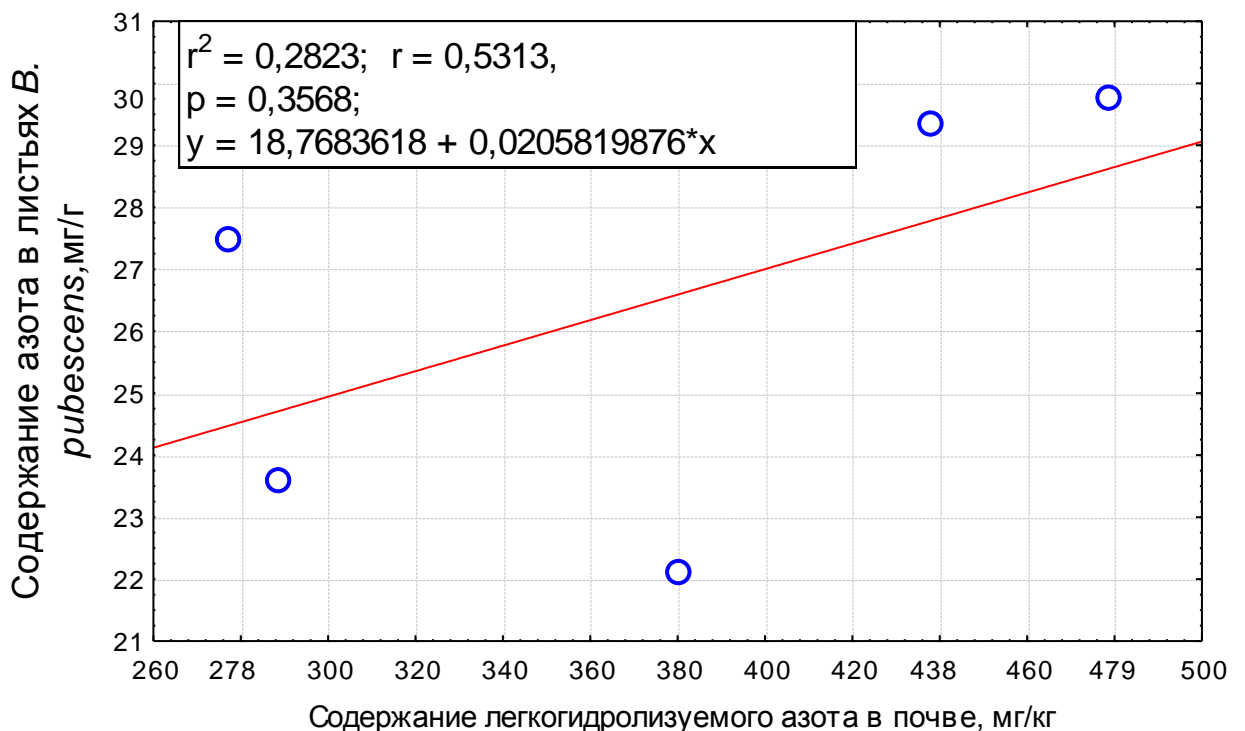


Рис. 28. Зависимость содержания общего азота от содержания легкогидролизуемого азота в почве

В почве концентрация подвижного фосфора снижается более чем в 2 раза от контроля к горно-лесному поясу и увеличивается в подгольцовом поясе, в то время как содержание фосфора в листе увеличивается на 27-38% в горном и

тундровом поясах по сравнению с контролем. Самый высокий показатель поглощения в горно-лесном поясе – 76 у березы пушистой (табл. 18) и 66 у березы повислой (табл. 19).

Таблица 19. Коэффициенты поглощения (КП) макроэлементов в листьях *B. pendula* вдоль высотного градиента г. Ирмель

Горный пояс	КП азота	КП фосфора	КП калия	КП кальция	КП магния	КП натрия
Контроль	58,5	22,3	10,7	1,0	2,0	10,1
Горно-лесной, нижняя граница	87,1	57,8	12,5	1,4	5,4	17,0
Горно-лесной, верхняя граница	115,1	75,1	21,6	4,7	9,0	26,1

По результатам корреляционного анализа не обнаружено зависимости между содержанием подвижного фосфора в почве и содержанием фосфора в листьях ($r^2 = 0,06$, ($p > 0.05$)) (рис. 29).

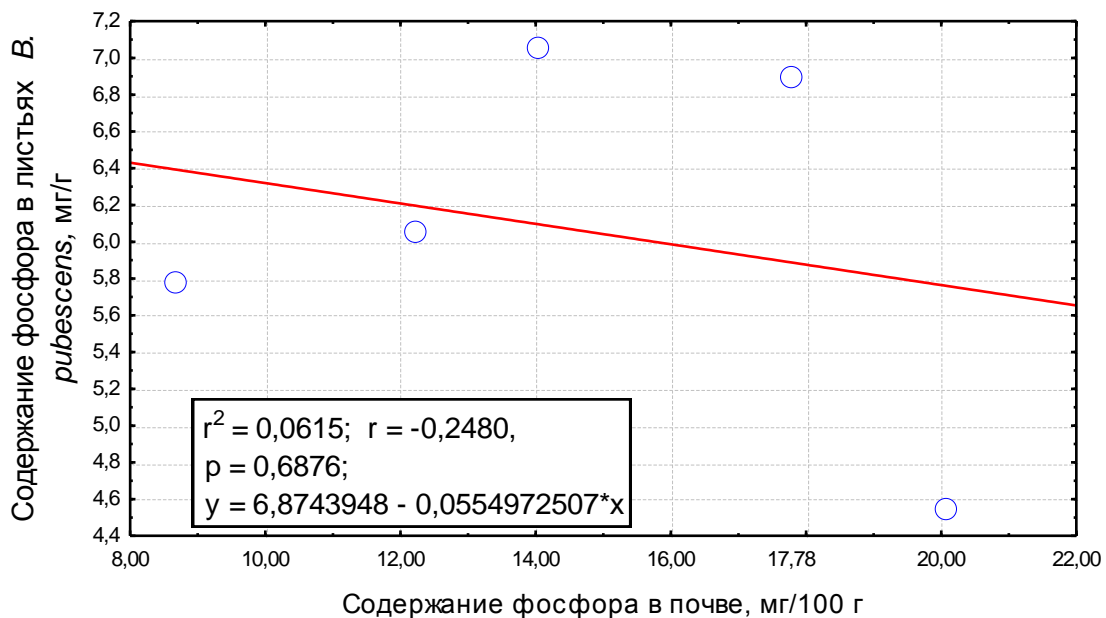


Рис. 29. Зависимость содержания общего фосфора от содержания подвижных форм фосфора в почве

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. Корреляционный анализ не показал связи содержание общего калия в листьях берез и почвы ($r^2 = 0,16$, $p > 0,05$) (рис. 30). В итоге, коэффициент поглощения калия в горно-лесном поясе повышался по сравнению с контролем, а затем снижался до уровня контроля в подгольцовом и тундровом поясах (табл. 18).

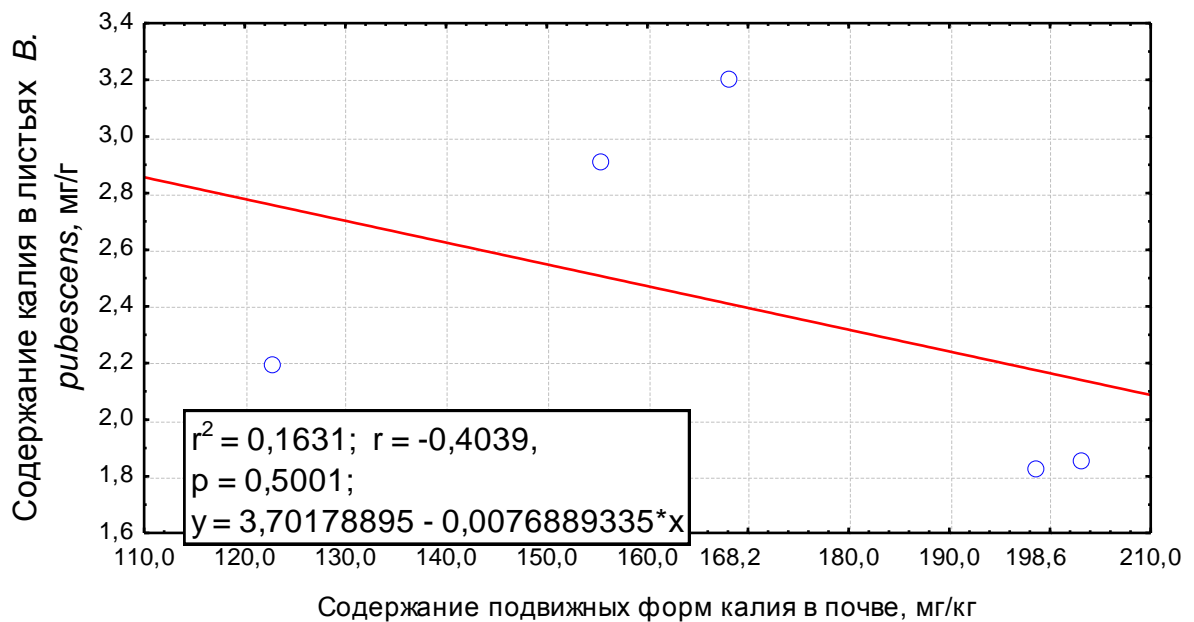


Рис. 30. Зависимость содержания общего калия от содержания подвижных форм калия в почве

Содержание кальция в листьях березы пушистой с высотой произрастания снижалось на 20% с 5 до 4 мг/г, в то время как концентрация подвижных форм кальция в почве снижалась более чем в 8-10 раз, а коэффициент поглощения элемента вырос с 2 до 40. При этом корреляционный анализ показал положительную зависимость содержания кальция в почве и в листьях ($r^2 = 0,95$, $p < 0,0005$) (рис. 31).

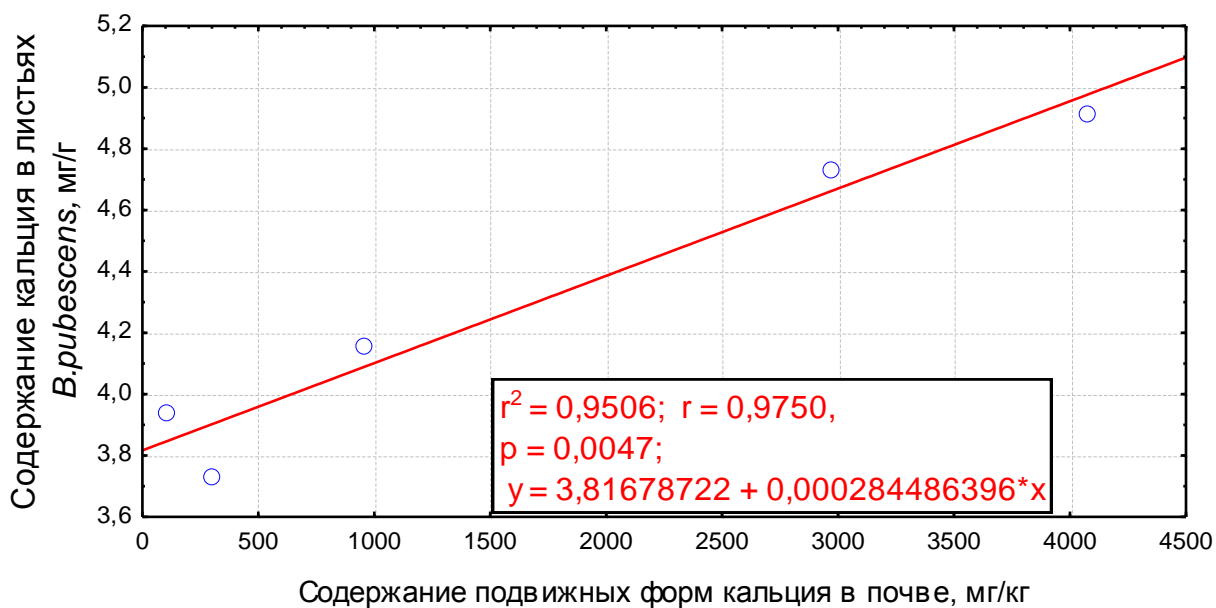


Рис. 31. Зависимость содержания общего кальция от содержания подвижных форм кальция в почве

Содержание магния в листьях березы пушистой 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, а коэффициент поглощения элемента вырос с 2,5 до 22. Корреляционный анализ не показал связь содержания магния в листьях и в почве ($r^2 = 0,47$, $p > 0,05$) (рис. 32).

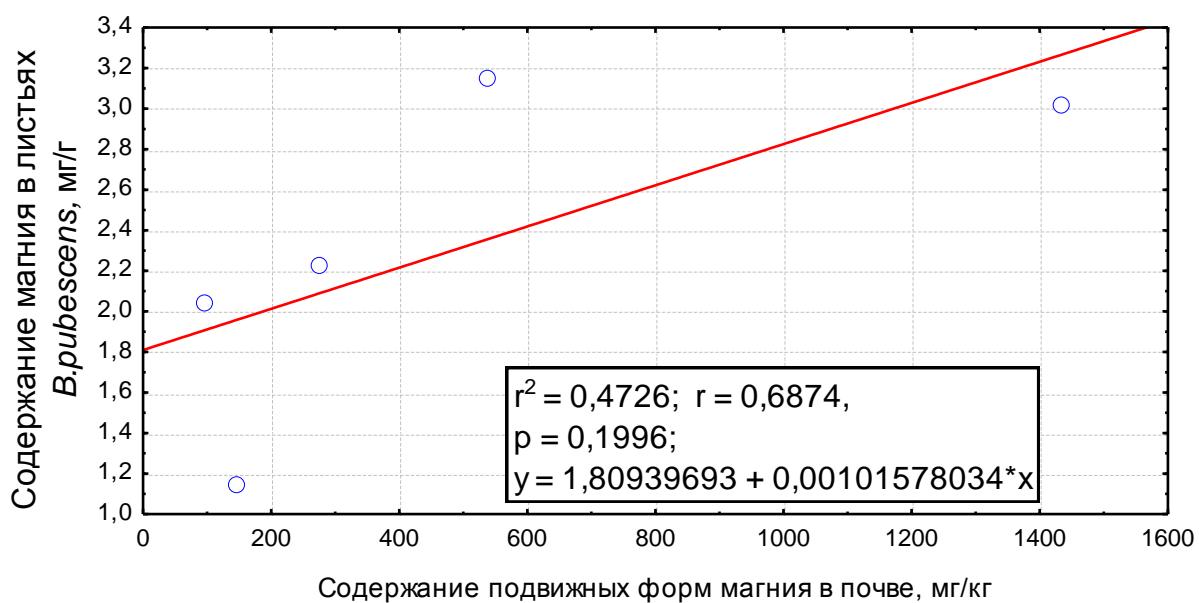


Рис. 32. Зависимость содержания общего магния от содержания подвижных форм магния в почве

Таким образом, не обнаружена статистически значимая зависимость содержания азота в листьях от содержания легкогидролизуемого азота в почве ($r=0,531$, $p<0.05$) Однако в литературе показано тесное взаимодействие содержания легкогидролизуемого азота в почвенных горизонтах и в растениях [Соколовский, Забелло, 1982].

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. Не смотря на значительное снижение содержание магния и кальция в почве (в несколько раз), содержание этих элементов в листьях берез снижается в гораздо меньшей степени. На основании изучения поглотительной способности двух разных видов березы можно сделать вывод о наличии у них лимита поглощения азота и фосфора, магния и калия в листьях растений, не зависящих от содержания подвижных форм этих веществ в почве. Это говорит о способности растений регулировать химический состав независимо от количества в почве элемента, т.е. преобладании генетического фактора в накоплении элементов питательных веществ.

В данном исследовании показано, что на холодных горных почвах основным лимитирующим фактором является недостаток подвижных соединений кальция и магний в почве. При снижении содержания в почве магния и кальция, содержание этих элементов в листьях берез уменьшается в значительно меньшей степени. Вероятно, существует механизм избирательного поглощения элемента двумя видами берез, который позволяет накапливать элементы в определенном диапазоне.

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 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.

Были выявлены различия между видами в высотном градиенте. Результаты показывают, что концентрация отдельных макроэлементов листьев березы имеет различные закономерности. Различия двух видов проявляются в противоположной направленности накопления макроэлементов вдоль высотного градиента.

Концентрация азота в листьях березы пушистой Северного Урала увеличивалась в градиенте повышения горной поясности от контроля к тундре. За два года исследования тенденция повторялась, не смотря на значительные различия за два года. Общее содержание азота в листьях березы пушистой в 2006 году повышалось от $22,04 \pm 0,78$ мг/г в контроле до $30,65 \pm 1,46$ мг/г в тундре (рис. 33).

Сравнивая содержания азота за два года, в 2008 году было отмечено повышенная концентрация азота по сравнению с 2006 годом. Вероятно, на содержание азота повлияли погодные условия вегетационного периода, так как в 2008 году наблюдались продолжительные заморозки ($-14,5^{\circ}\text{C}$) в середине апреля, температура ниже 0°C до начала мая и в начале июня, что привело к увеличению содержания общего азота в листьях.

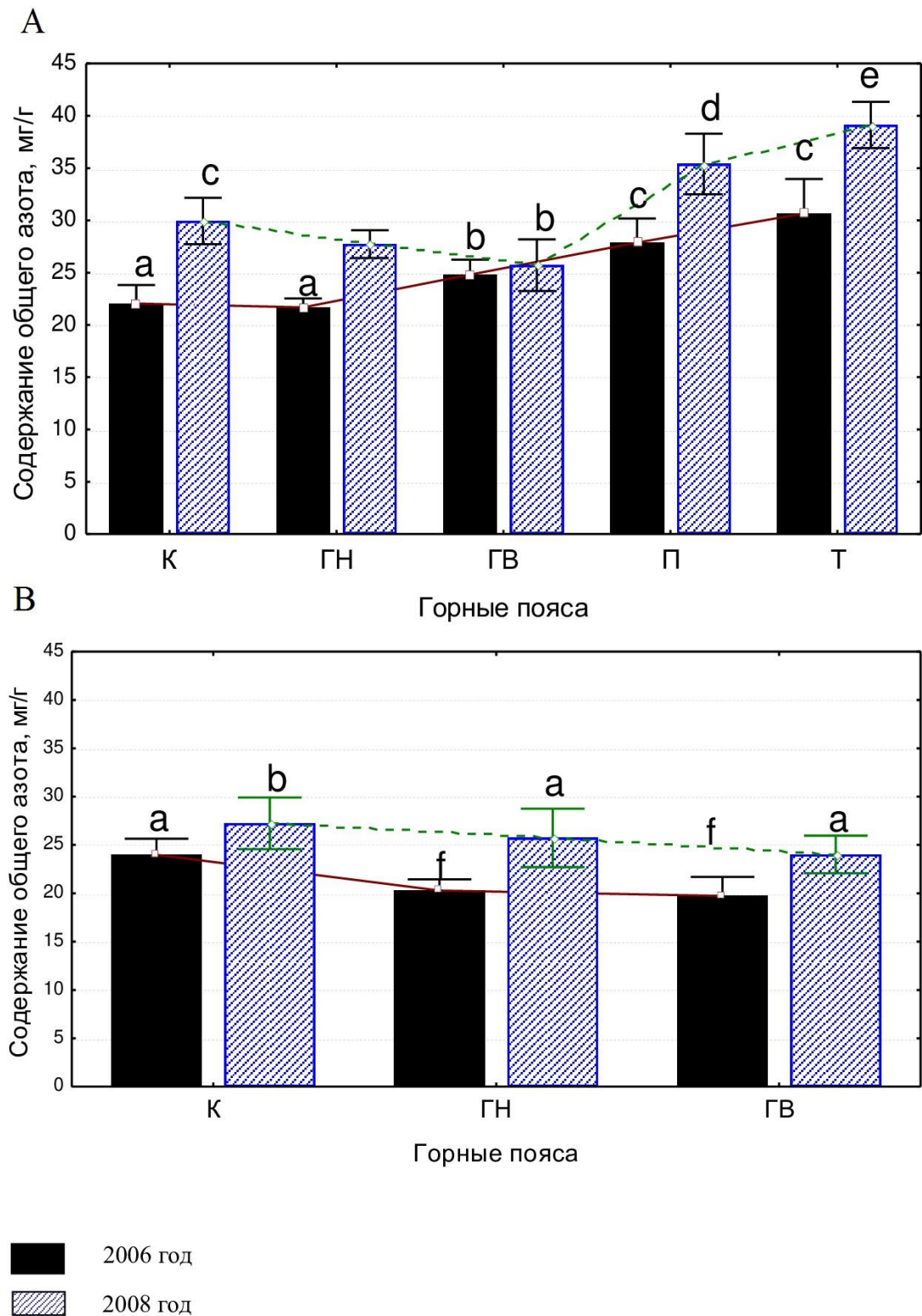


Рис. 33. Содержание общего азота в листьях *B. pubescens* (А) и *B. pendula* (Б) вдоль высотного градиента г.Конжаковский Камень. К – контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Содержание азота в листьях березы пушистой увеличивалось в верхних границах Приполярного Урала – в горно-лесном, подгольцовом и тундре, по сравнению с контролем ($p < 0.05$) на 11, 16, 11% соответственно (рис. 34). Достоверных отличий между верхними горными поясами не обнаружено. Сравнивая два вида, данный параметр у двух видов находится на одном уровне в контроле и достоверно не отличается, $27,32 \pm 0,82$ мг/г у березы пушистой и $28,6 \pm 0,7$ мг/г у березы повислой (рис. 34).

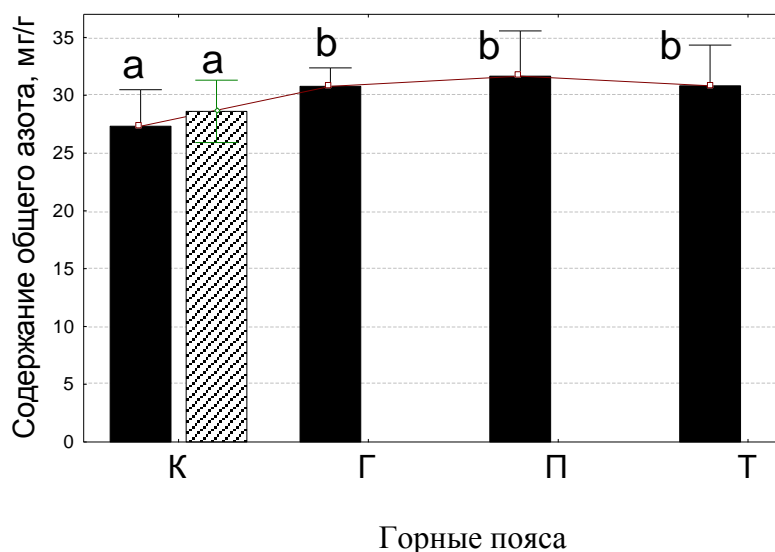


Рис. 34. Концентрация общего азота в листьях березы пушистой в горных поясах г.Неройка. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Сравнивая две горы, можно обнаружить, что в листьях березы с Северного Урала (г. Конжаковский Камень) содержание азота значительно меньше в контроле и горно-лесном поясе по сравнению с Приполярным Уралом (г. Неройка). Среднее значение г. Конжаковский камень в контроле – $22,04 \pm 0,78$ мг/г, в горно-лесном поясе, нижней границе – $21,68 \pm 0,38$ мг/г верхней границе – $24,81 \pm 0,63$ мг/г (рис. 33), а г. Неройка - в контроле – $27,32 \pm 0,82$ мг/г, в горно-лесном поясе $30,78 \pm 0,41$ мг/г (рис. 34). Однако на верхней границе содержание азота г. Конжаковский Камень приближается к значению г. Неройка. В подгольцовом поясе г. Конжаковский Камень среднее содержание азота в листьях составляло $27,88 \pm 1,02$ мг/г в тундровом $30,65 \pm 1,46$ мг/г, г. Неройка в

подгольцовом поясе – $32,61 \pm 0,83$ мг/г, в тундровом – $30,82 \pm 0,91$ мг/г. Таким образом не выявлено достоверных отличий между горами на верхнем пределе распространения – в тундре ($p < 0.05$).

Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания общего азота от высотного и широтного факторов ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$) (табл. 32). Сила влияния обоих факторов примерно одинакова, высотного фактора – 25% и широтного – 20,6% (табл. 20).

Таблица 20. Влияние высотного и широтного факторов на содержание азота в листьях березы пушистой (дисперсионный анализ (двухфакторная схема))

Фактор	SS	Степени - свободы	MS	F	p	Сила влияния η^2 , %
Широтный	455,21	1	455,21	46,346	0	20,6
Высотный	551,91	3	183,97	18,73	0	25,0
Высотный*широтный	198,67	3	66,22	6,742	0,00034	8,9
Ошибка	1001,84	102	9,82			45,4
Итого	2207,63					100

По сравнению с березой пушистой, у березы повислой концентрация азота, фосфора, кальция и магния в листьях уменьшалась до верхней границы произрастания вида (горно-лесного пояса) (рис. 33). Сравнивая два года, можно отметить, что за оба года сохранялся тренд снижения концентрации общего азота в листьях березы повислой, и повышение в листьях березы пушистой. В 2008 году общий уровень общего азота в высотных поясах был выше, чем в 2006 году.

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 (рис. 35). Снижается в горно-лесном поясе и тундре на 15%, в горно-лесном поясе – $6,56 \pm 0,22$ мг/г, в тундре – $6,41 \pm 0,3$ мг/г.

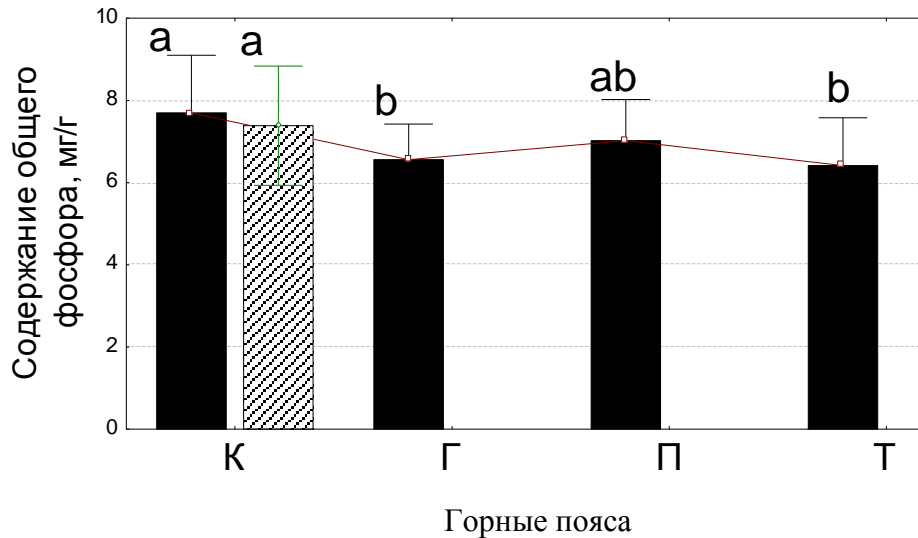


Рис. 35. Содержание общего фосфора в листьях березы пушистой в горных поясах г.Неройка. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Дисперсионный анализ не выявил влияния ни высотного, ни широтного факторов на содержание общего фосфора в листьях берез ($F < F_{0.05}$, $p > 0.05$) (табл. 21).

Таблица 21. Влияние высотного и широтного факторов на содержание фосфора в листьях березы пушистой (дисперсионный анализ (двухфакторная схема))

Фактор	SS	Степени свободы	MS	F	p	Сила влияния η^2 , %
Высотный	7,979	3	2,66	2,224	0,090181	5,9
Широтный	2,292	1	2,292	1,917	0,169414	1,7
Высотный*широтный	9,205	3	3,068	2,566	0,058963	6,8
Ошибка	115,979	97	1,196			85,6
Итого	135,455					100

По данным исследования, наибольшая концентрация фосфора в листьях березы пушистой Северного Урала в 2008 году была обнаружена в тундровом поясе ($11,89 \pm 0,45$ мг/г), что достоверно выше контроля ($9,08 \pm 0,43$ мг/г), нижней ($10,64 \pm 0,31$ мг/г) и верхней ($6,78 \pm 0,26$ мг/г) поясов (рис. 36). Уровень содержания

фосфора был выше и статистически отличался ($p < 0,05$) в 2008 году по сравнению с 2006 годом.

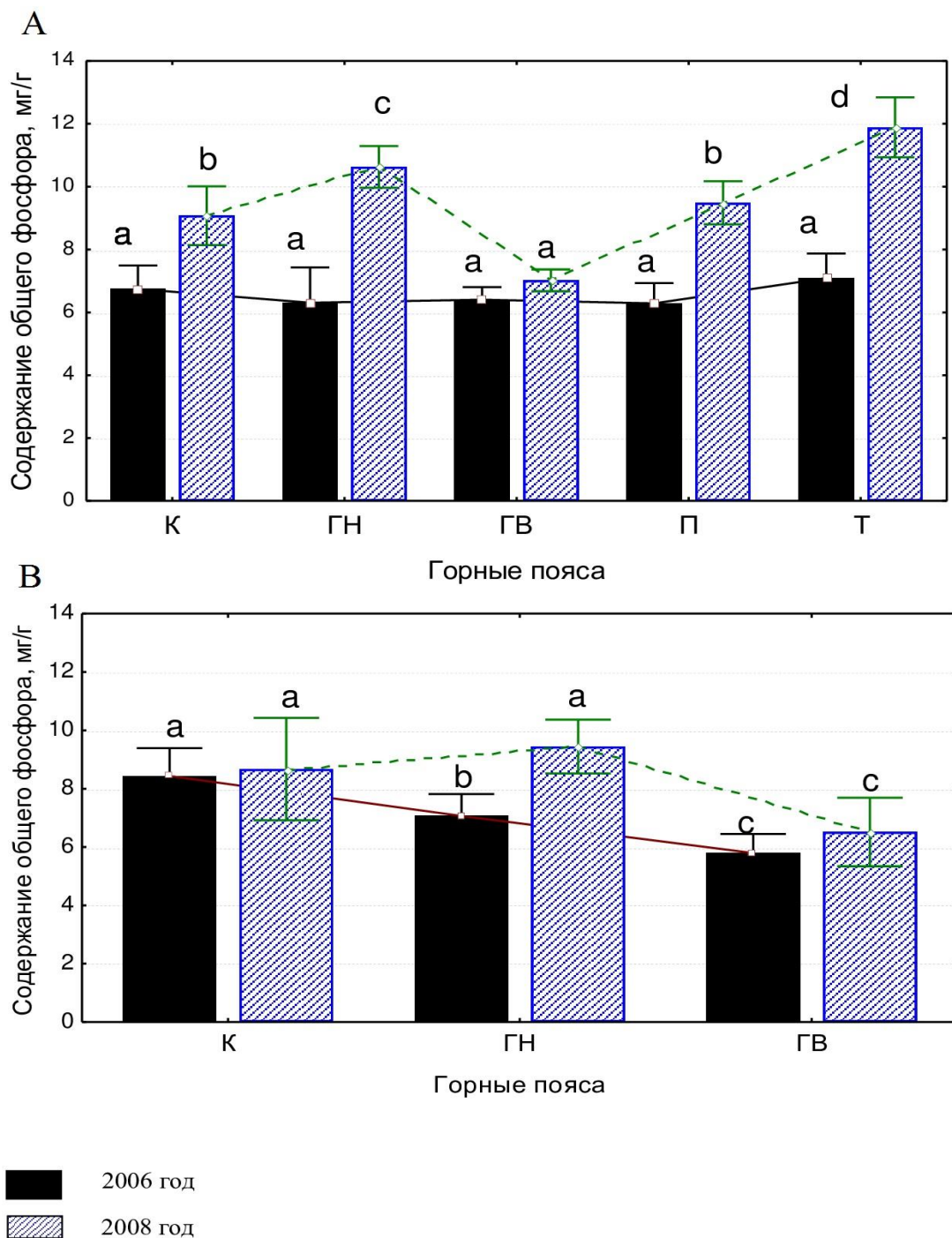


Рис.36. Содержание общего фосфора в листьях *B. pubescens* (А) и *B. pendula* (Б) вдоль высотного градиента г.Конжаковский Камень. К – контроль, ГН - нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Содержание общего калия в листьях берез Приполярного Урала варьировало между горными поясами, повышаясь в горно-лесном поясе на 33% по сравнению с контролем (рис. 37). Содержания общего калия в листьях берез Приполярного Урала было выше в горном поясе на 33% по сравнению с контролем. В сравнении со Средним Уралом, содержание калия в листве берез, собранных на Приполярном Урале повышено на 30-40% (рис. 38). 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. Содержания калия в 2006 году оказалось ниже и статистически отличалось от 2008 года.

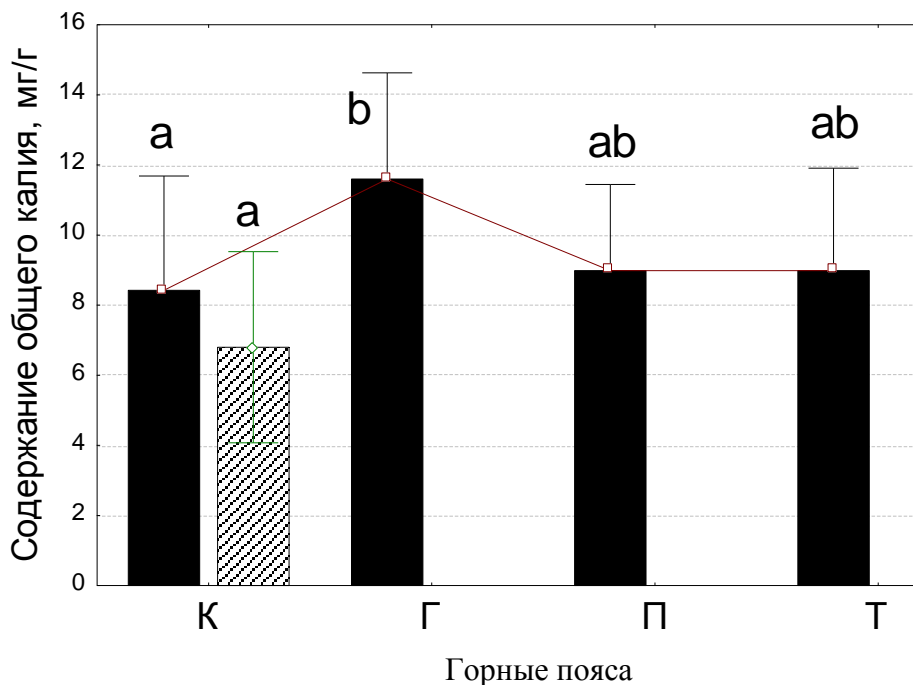


Рис. 37. Концентрация общего калия в листьях березы пушистой в горных поясах г.Неройка. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания калия в листьях от широтного фактора ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$), сила влияния оценена в 40%. Высотный фактор не оказал значительного влияния ($F < F_{0.05}$, $p > 0.05$) на содержание калия в листьях берез (табл. 22).

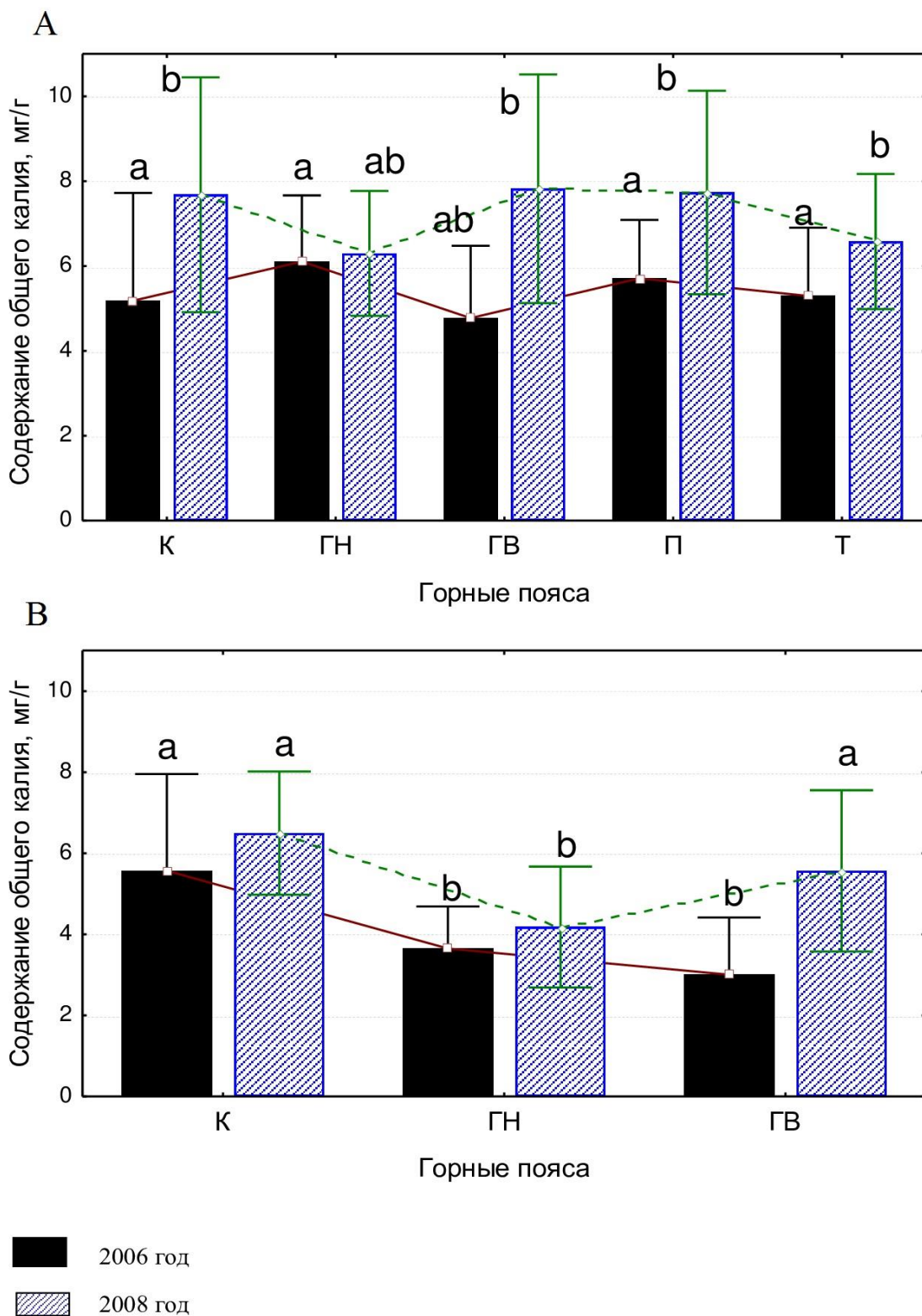


Рис. 38. Содержание общего калия в листьях *V. pubescens* (A) и *V. pendula* (B) вдоль высотного градиента г.Конжаковский Камень. К – контроль, ГН - нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Таблица 22. Влияние высотного и широтного факторов на содержание калия в листьях березы пушистой (дисперсионный анализ (двухфакторная схема))

Фактор	SS	Степени свободы	MS	F	p	Сила влияния η^2 , %
Высотный	36,691	3	12,23	2,2856	0,085876	4,8
Широтный	307,072	1	307,072	57,3868	0	40,0
Высотный* широтный	32,39	3	10,797	2,0177	0,118903	4,2
Ошибка	390,617	73	5,351			50,9
Итого	766,77					100

Содержание общего кальция в листьях берез Приполярного Урала снижалось с высотой произрастания, и достоверно отличалось от контроля ($p < 0.05$) (рис. 39). Максимальное содержание в контроле ($5,03 \pm 0,45$ мг/г) на 44% превышает содержание в подгольцовом поясе и на 34% в тундре. Отличия между двумя видами не достоверны в контроле ($p < 0.05$). На Северном Урале содержание кальция в листьях березы повислой уменьшалось от контроля до верхних поясов на 19,2 и 31,7% и у березы пушистой на 38,6 и 45,5% в 2006 и 2008 годах соответственно (рис. 40).

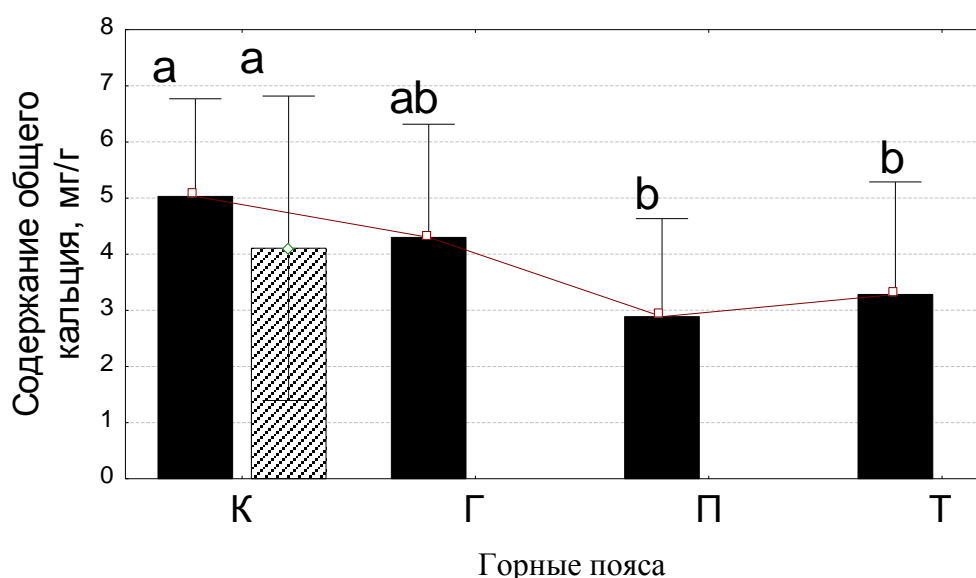


Рис. 39. Концентрация общего кальция в листьях березы пушистой в горных поясах г.Неройка. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

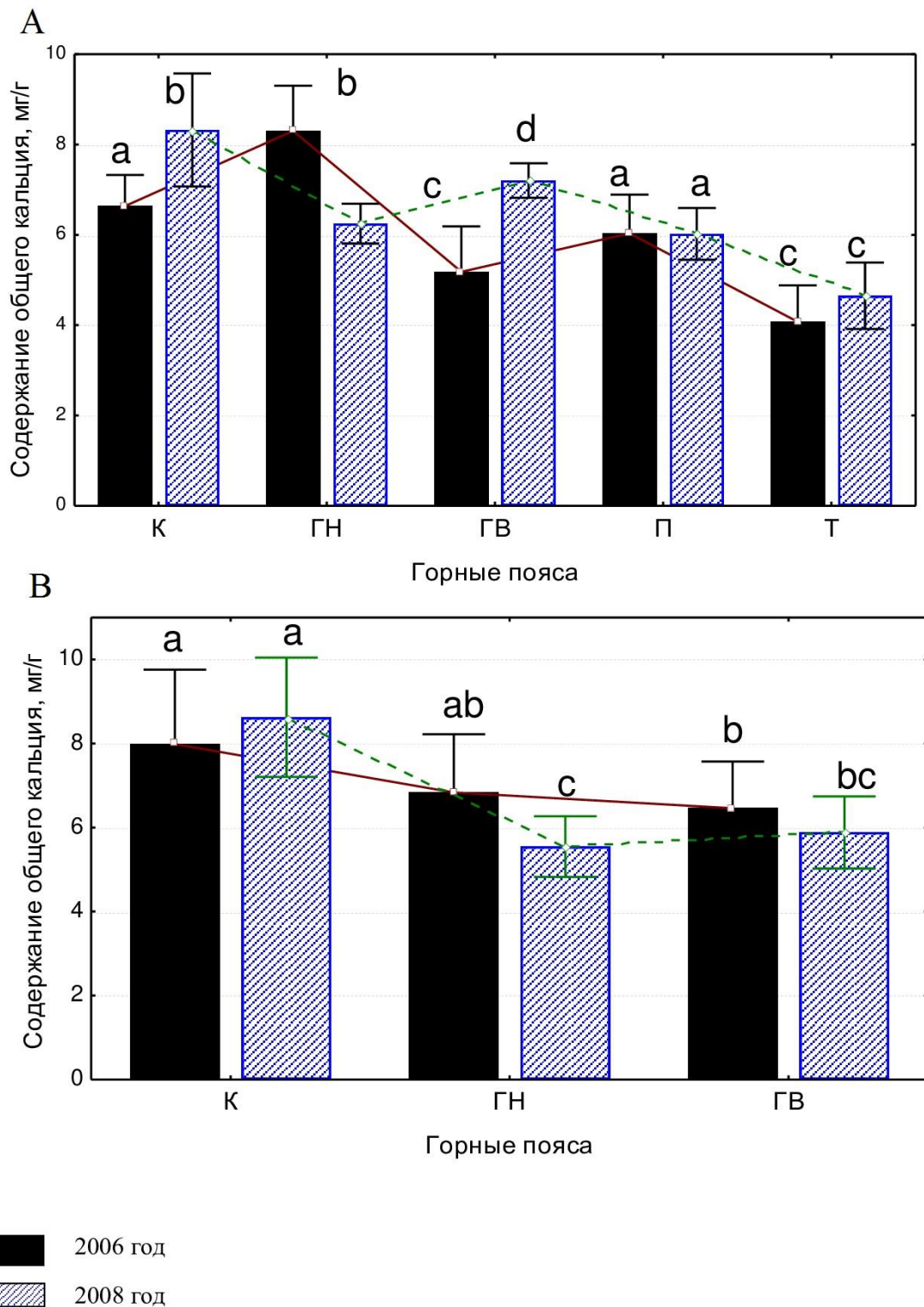


Рис. 40. Содержание общего кальция в листьях *V. pubescens* (A) и *V. pendula* (B) вдоль высотного градиента г.Конжаковский Камень. К-контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания кальция в листьях, как от высотного, так и широтного факторов ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$). Сила влияния широтного фактора была наибольшей - $\eta^2 = 20,3\%$, высотного – $\eta^2 = 14,6\%$ (табл. 23).

Таблица 23. Влияние высотного и широтного факторов на содержание кальция в листьях березы пушистой (дисперсионный анализ (двухфакторная схема))

Фактор	SS	Степени - свободы	MS	F	p	Сила влияния η^2 , %
Высотный	71,831	3	23,944	7,7924	0,000102	14,6
Широтный	99,907	1	99,907	32,514	0	20,3
Высотный* широтный	18,24	3	6,08	1,9787	0,122163	3,7
Ошибка	301,127	98	3,073			61,3
Итого	491,105					100

Содержание общего магния в листьях берез Приполярного Урала также снижалось с увеличением величины произрастания (рис. 41). При этом достоверные отличия найдены только между контролем и подгольцовым поясом ($p < 0.05$). Содержание магния в подгольцовом поясе снизилось на 37% по сравнению с контролем. Горно-лесной пояс и тундровый не отличались достоверно от остальных поясов ($p > 0.05$).

Содержание магния в листьях березы пушистой Северного Урала увеличивалось к тундровому поясу, в 2006 году – $5,11 \pm 0,19$ мг/г, в 2008 году – $7,33 \pm 0,19$ мг/г. В контроле содержание магния составило в 2006 году – $4,15 \pm 0,15$ мг/г, в 2008 году – $6,16 \pm 0,20$ мг/г (рис. 42). Содержание магния в листьях в тундровом поясе увеличилось на 17% в 2006 и 2008 годах. Содержание магния в листьях березы повислой достоверно не отличалось от березы пушистой (рис. 30), за исключением верхней границы горно-лесного пояса, где содержание магния в 2006 году было значительно ниже, чем в остальных точках и достоверно отличалось от березы пушистой. В 2008 году содержание магния также было больше, чем в 2006 году.

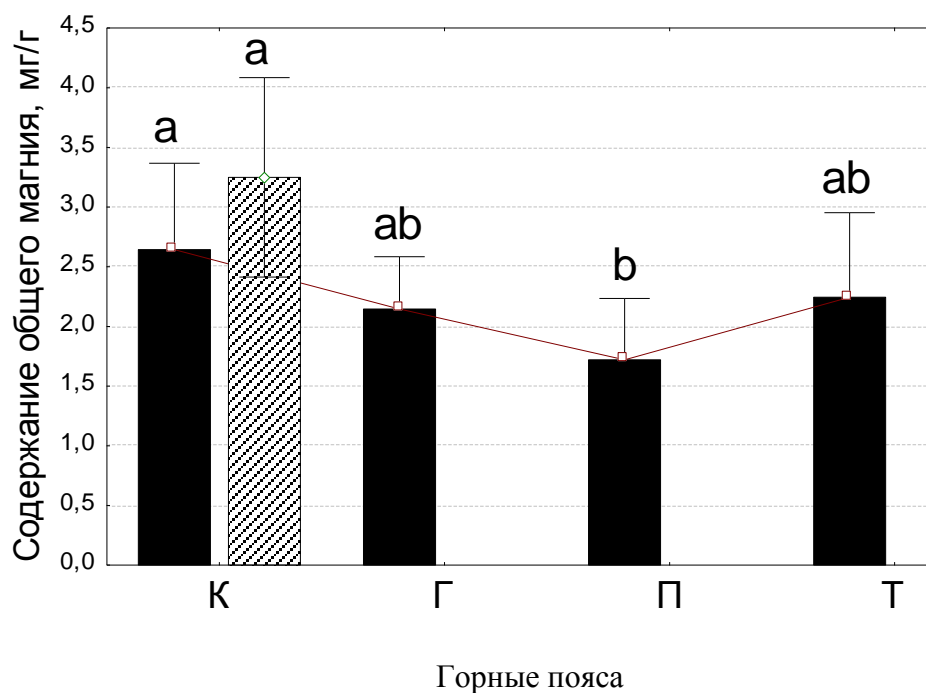


Рис. 41. Концентрация общего магния в листьях березы пушистой в горных поясах г.Неройка. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Дисперсионный анализ показал влияние широтного фактора на содержание магния в листьях ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$), сила влияния оценена в 71,4% (табл. 24).

Таблица 24. Влияние высотного и широтного факторов на содержание магния в листьях березы пушистой (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Фактор	SS	Степени - свободы	MS	F	p	Сила влияния η^2 , %
Высотный	3,2602	3	1,0867	2,377	0,076422	1,9
Широтный	117,7501	1	117,7501	257,502	0	71,4
Высотный* широтный	8,6338	3	2,8779	6,294	0,000709	5,2
Ошибка	35,2104	77	0,4573			21,3
Итого	164,8545					100

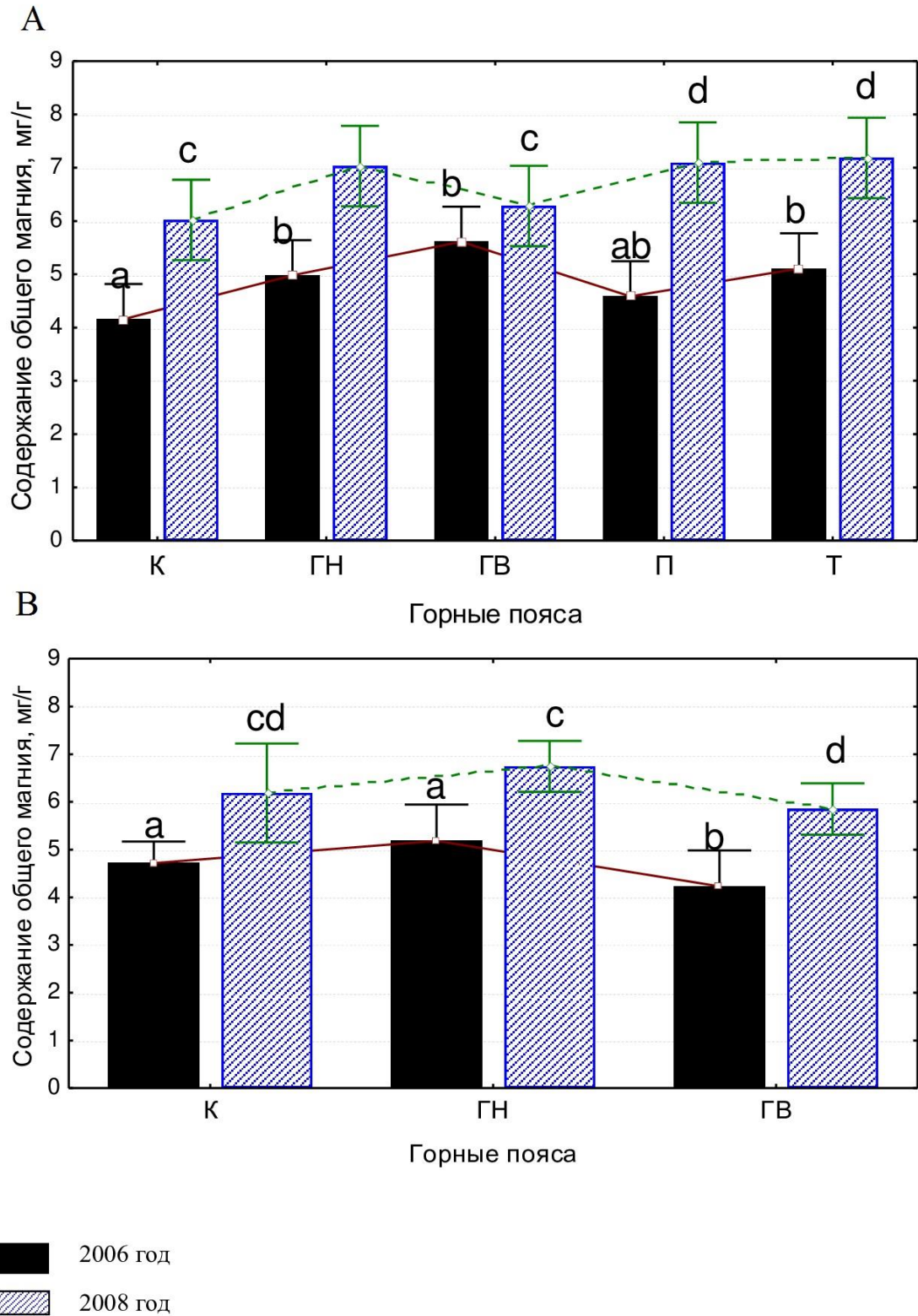


Рис.42. Содержание общего магния в листьях *B. pubescens* (А) и *B. pendula* (Б) вдоль высотного градиента г.Конжаковский Камень. К-контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Содержание общего натрия в листьях не изменялась между горными поясами, достоверные отличия не найдены ни между видами, ни между поясами ($p > 0.05$) (рис. 43, 44). Содержание натрия в листьях берез двух видов достоверно не изменялось вдоль высотного градиента Приполярного и Северного Урала, варьировало от 1,2 до 2,7 мг/г. Не было найдено отличий ни между видами, ни между поясами и двумя годами. При этом уровень индивидуальной изменчивости был очень высок – до 70% в некоторых поясах.

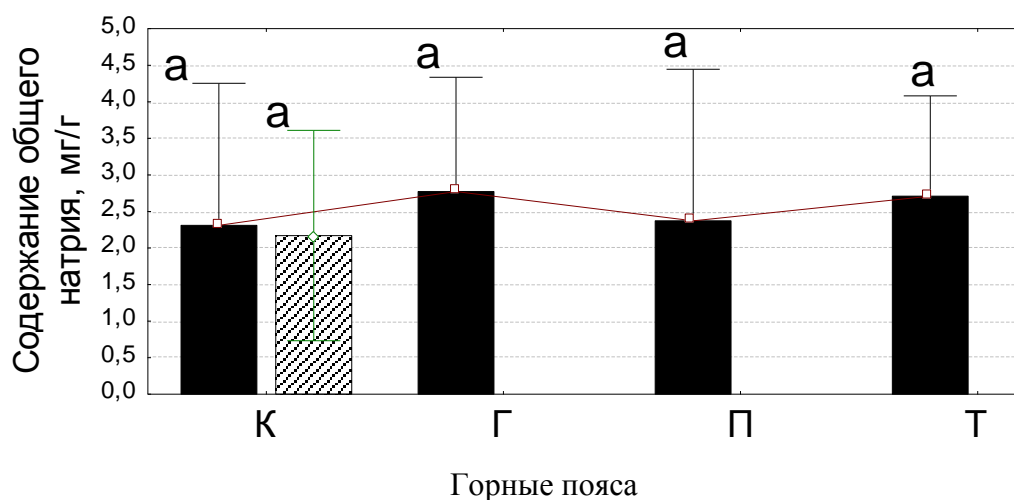


Рис. 43. Концентрация общего натрия в листьях березы пушистой в горных поясах г.Неройка. К-контроль, Г - горно-лесной пояс, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Дисперсионный анализ показал зависимость содержания натрия от широтного фактора ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$), $\eta^2 = 14,8\%$ (табл. 25).

Таблица 25. Влияние высотного и широтного факторов на содержание натрия в листьях березы пушистой (дисперсионный анализ (трехфакторная схема))

Фактор	SS	Степени свободы	MS	F	p	Сила влияния η^2 , %
Высотный	1,7195	3	0,5732	0,3915	0,759487	1,3
Широтный	19,7322	1	19,7322	13,4763	0,000447	14,8
Высотный* широтный	0,3368	3	0,1123	0,0767	0,972412	0,3
Ошибка	111,2809	76	1,4642			83,6
Итого	133,0694					100

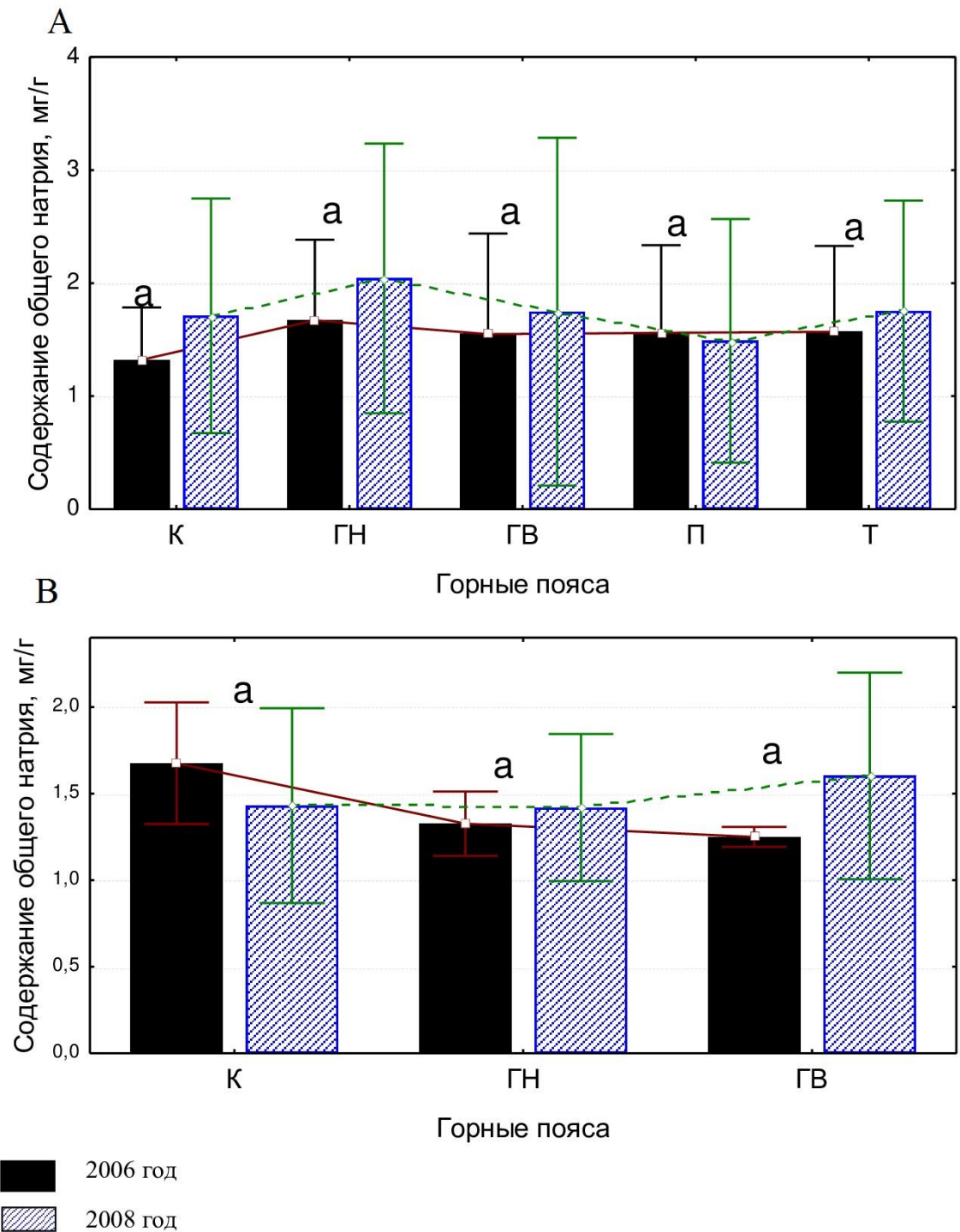


Рис. 44. Содержание общего натрия в листьях *B. pubescens* (А) и *B. pendula* (В) вдоль высотного градиента г.Конжаковский Камень. К-контроль, ГН – нижняя граница горно-лесного пояса, ГВ – верхняя граница горно-лесного пояса, П – подгольцовый, Т – тундра. Разные буквы над столбцами обозначают статистически значимые отличия, F-критерии Фишера при 5%-м уровне значимости, $n=15$. Вертикальные линии обозначают стандартное отклонение (SD), индивидуальную изменчивость из 15 деревьев.

Коэффициенты вариации содержания макроэлементов показаны в таблицах 26, 27 и 28. Среди изученных макроэлементов, наименьший уровень индивидуальной изменчивости найден для азота (5,2 - 11,4%), который характеризуется низким уровнем изменчивости, уровень изменчивости содержания фосфора – средний (13,2 - 18,1%), уровень изменчивости содержания калия, кальция, магния и натрия – очень высокий (более 40%).

Таблица 26. Коэффициенты вариации содержания макроэлементов в листьях *B. pubescens* вдоль высотного градиента Приполярного Урала

Пояс	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %	Кальций, %	Магний, %	Натрий, %
Контроль	11,6	17,5	47,3	34,6	27,3	298,9
Горно-лесной	5,2	13,2	26,1	46,9	65,9	189,0
Подгольцовый	9,9	14,3	27,4	60,5	62,0	362,0
Горно-тундровый	11,4	18,1	40,3	75,4	48,3	91,4

У березы пушистой наименьшим размахом индивидуальной изменчивости и характеризуется азот, коэффициенты вариации варьируют от 5,5 по 17,3% и магний - от 7,6 до 17,8% (табл. 27). Уровень индивидуальной изменчивости содержания фосфора менялся от 8,7 до 24,9%, калия от 24,1 до 49%, кальция от 11,3 до 27,8%. Индивидуальная изменчивость содержания натрия была от 35 до 71% и характеризуется очень высоким уровнем по шкале Мамаева [Мамаев, 1973]. Расчеты показывают, что уровень индивидуальной изменчивости содержания кальция в листьях березы пушистой в 2006 году составил 11-28 и 11-24% в 2008 году (табл. 30), а у березы повислой от 17 до 22% в 2006 году и от 15 до 30% в 2008 году (табл. 31).

У березы повислой также наименьшие коэффициенты вариации обнаружены для азота (от 5,7 до 11,7%) и магния (от 8,3 до 17,8%), фосфора (от

9,8 до 20,2%). Коэффициенты вариации содержания калия варьировал от 28,4 до 47%, кальция от 15,2 до 29,4%, натрия от 6,4 до 58,8% (табл. 28).

Таблица 27. Коэффициенты вариации содержания макроэлементов в листьях *V. pubescens* вдоль высотного градиента Северного Урала

Пояс	Год	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %	Кальций, %	Натрий, %	Магний, %
Контроль	2006	11,2	15,6	49,0	14,6	34,9	11,2
	2008	13,4	18,6	36,0	20,2	40,3	12,3
Нижняя граница горно-лесного пояса	2006	5,5	24,9	25,6	16,8	42,6	17,8
	2008	8,6	11,3	29,0	11,9	30,3	10,8
Верхняя граница горно-лесного пояса	2006	8,0	8,7	35,7	27,2	57,5	12,8
	2008	17,3	14,6	38,5	11,3	74,6	7,6
Подгольцовый	2006	11,6	14,3	24,1	19,9	49,8	12,0
	2008	14,8	13,1	34,8	14,8	70,3	15,5
Горно- тундровый	2006	15,1	15,3	30,4	27,8	48,4	11,5
	2008	10,2	14,5	24,2	24,4	37,5	10,0

Таблица 28. Коэффициенты вариации содержания макроэлементов в листьях *V. pendula* вдоль высотного градиента Северного Урала

Пояс	Год	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %	Кальций, %	Натрий, %	Магний, %
Контроль	2006	7,0	11,3	42,9	22,2	29,3	9,6
	2008	9,8	20,2	36,5	15,8	58,8	16,5
Нижняя граница горно- лесного пояса	2006	5,7	10,7	28,4	20,3	19,6	14,6
	2008	11,7	9,8	35,7	29,4	38,5	8,3
Верхняя граница горно- лесного пояса	2006	10,5	11,3	47,0	17,2	6,4	17,8
	2008	8,1	18,0	35,7	15,2	50,3	10,2

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.

Таким образом, 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 ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$). Сила влияния обоих факторов примерно одинакова, 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 ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$), сила влияния оценена в 40%. Содержание общего кальция снижалось с высотой произрастания, и достоверно отличалось от контроля. Содержание общего магния также снижалось с увеличением величины произрастания. Дисперсионный анализ показал влияние широтного фактора на содержание магния в листьях ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$), сила влияния оценена в 71,4%. Двухфакторный дисперсионный анализ показал зависимость содержания кальция в листьях, как от высотного, так и широтного факторов ($F > F_{0.05}$, $p < 0.05$). Сила влияния широтного фактора была наибольшей - $\eta^2 = 20,3\%$, высотного – $\eta^2 = 14,6\%$.

Была выявлена различная тенденция изменения макроэлементного состава фотосинтетического аппарата двух видов берез с увеличением высоты произрастания, что возможно связано с экологическими особенностями двух видов берез. Сравнительное изучение макроэлементного состава листьев березы пушистой и повислой в разных географических условиях показало, что снижение

содержания макроэлементов в листьях *B. pendula* с увеличением высоты над уровнем моря может быть связано с экологическими особенностями вида. Поскольку береза повислая не произрастает в подгольцовом и тундровом поясе, в силу экологических особенностей вида, мы предполагаем, что это также выражается в характеристиках химического состава листьев. Вероятно, пониженная температура почвы не влияет на поглощающую способность *B. pubescens*, так как концентрация азота увеличивается, в то время как фосфор и калий не изменяются, а кальций уменьшается. *B. pubescens* - менее требовательный к теплу и свету вид, чем *B. pendula* [Курец, 2006]. Можно предположить, что адаптивные возможности *B. pubescens* также находятся в достаточном поглощении почвенных минералов в неблагоприятных условиях высокогорья, что позволяет этому виду распространяться в более высокие зоны, по сравнению с *B. pendula*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили всесторонне 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 химических механизмов адаптации к неблагоприятным условиям окружающей среды. Кроме того, эти результаты очень ценны как основа для практического применения при лесовосстановлении в экстремальных районах, 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 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 NPK в листьях берез в условиях аэротехногенного загрязнения.

2. Таким образом, были найдены изменения макроэлементного 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 обеспеченностью 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. На основании изучения поглотительной способности двух разных видов березы можно сделать вывод о наличии у них лимита поглощения азота, фосфора, магния и калия в листьях растений, не зависящих от содержания подвижных форм этих элементов в почве. 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. преобладании 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. Таким образом, 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 обоих факторов примерно одинакова, 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 была наибольшей - $\eta^2=20,3\%$, 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Авессамолова, И.А. Горные ландшафты: структура и динамика / И.А. Авессамолова, М.Н. Петрушина, В.А. Хорошев. - М.: Изд-во МГУ, 2002. - 158 с.

Андреева, Т.Ф. Влияние азотного питания на фотосинтетическую активность и биосинтез белка / Т.Ф. Андреева, Т.А. Авдеева // Минеральные элементы и механизм фотосинтеза. – Кишинев, 1969. – С. 51-60.

Атлас Республики Башкортостан / гл. ред. И. М. Япаров, Отв. ред.: Н. И. Островская и др. – Уфа: Омская картогр. ф-ка: Роскартография, 2005. – 419 с.

Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / под ред. А. И. Таскаева. - М.: ДиК; Дрофа. - 1997. - 116 с.

Бачурина, А.В. Оценка состояния окружающей среды по показателю флуктуирующей асимметрии / А.В. Бачурина, С.В. Залесов // Актуальные проблемы лесного комплекса. - 2020. - № 56. - С. 98–103.

Беляев, А.Б. Листовая диагностика продуктивности древесных пород / А.Б. Беляев, Д.И. Щеглов // Вестник ВГУ, серия: Химия. Биология. Фармация. – 2012. – №2. – С. 125-131.

Васфилов, С.П. Внутрипопуляционная изменчивость белых берез в условиях воздушного загрязнения: диссертация на соискание ученой степени канд. биол. наук / С.П. Васфилов – Свердловск, 2002. – 196 с.

Вахмистров, Д.Б. Избирательная способность растений не направлена на обеспечение их максимального роста / Д.Б. Вахмистров, В.А. Воронцов // Физиология растений. - 1997. - Т. 44, №3. - С. 404-412.

Ветчинникова, Л.В. Береза: вопросы изменчивости (морфофизиологические и биохимические аспекты) / Л.В. Ветчинникова. – Москва, 2004. – 183 с.

Вильяме, М.В. Оптимизация соотношения N:P:K в питательной смеси для песчаной культуры ячменя / М.В. Вильяме, Г. Шарма, Б.А. Ягодин, Д.Б.

Вахмистров // Физиология и биохимия культурных растений. - 1986. - Т. 18, № 3. - С. 222-231.

Влияние загрязнений воздуха на растительность: Причины. Воздействие. Ответные меры / Под ред. Х.-Г. Десслера. – М.: Лес. Пром-ть, 1981. – 184 с.

Воробьева, Л.А. Химический анализ почв / Л.А. Воробьева. - М.: МГУ, 1998. – 272 с.

Всеволожская, Г.К. Влияние минерального питания и влажности почвы на транспирацию сеянцев древесных пород / Г.К. Всеволожская, А.И. Побегайло, А.Е. Самсонова // Физиология древесных растений. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 81-92.

Гафуров, Ф.Г. Почвы Свердловской области / Ф.Г. Гафуров. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2008. – 396 с.

Гвоздецкий, Н.А. Ландшафты СССР / Н.А. Гвоздецкий. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985. – 320 с.

Горчаковский, П.Л. Лесная растительность подгольцового пояса Урала / П.Л. Горчаковский // Сборник трудов по лесному хозяйству. – Свердловск, 1954. – Вып 2. – С. 15-65.

Горчаковский, П.Л. Закономерности снегонакопления в горах Северного Урала и водоохранная роль высокогорных лесов / П.Л. Горчаковский // Тр. Урал, лесотехнич. ин-та. – 1959. – Вып. 16. – С 115-127.

Горчаковский, П.Л. Флора и растительность высокогорий Урала / П.Л. Горчаковский. – Свердловск: Ин-т биологии УФ АН СССР, 1966. – 270 с.

ГОСТ 17.4.4.02-84 Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2008. – 3 с.

ГОСТ 17.4.3.01-83 Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к отбору проб. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 3 с.

ГОСТ Р 54650-2011 ПОЧВЫ Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. – Москва: Стандартиформ, 2013. – 12 с.

ГОСТ 26487-85 Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО (с Поправкой). – М.: Издательство стандартов, 1985. – 6 с.

Григорьев, А.А. Влияние изменения климата на динамику верхней древесной растительности в горах Приполярного Урала / А.А. Григорьев, П.А. Моисеев, З.Я. Нагимов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 12 (74). – С. 34-40.

Гудериан, Р. Загрязнение воздушной среды / Р. Гудериан. – М.: Мир, 1979. – 200 с.

Гукова, М.Н. Значение температуры для азотного питания бобовых растений / М.Н. Гукова // Сб. Роль минеральных элементов в обмене веществ и продуктивности растений. – М, 1964. – С. 66-73.

Дзугаев, М.Д. Карабаш – город «Экологического бедствия» / М.Д. Дзугаев // Вестник Челябинского государственного университета. Серия: Право. – 2003. – №2(6). – С. 92-97.

Димо, В.Н. Тепловой режим почв СССР / В.Н. Димо. – М.: Колос, 1972. – 360 с.

Долгушин, Л.Д. Некоторые особенности рельефа, климата и современной денудации в Приполярном Урале / Л.Д. Долгушин. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 207 с.

Дороганевская, Е.А. О связи географического распространения растений с их обменом веществ / Е.А. Дороганевская – М., 1951. – 47 с.

Жангуров, Е.В. Характеристика почв и растительного покрова высотных поясов хребта Малды-Нырды (Приполярный Урал) / Е.В. Жангуров, Ю.А. Дубровский, А.А. Дымов / Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2012. – Вып. 4(12). – С. 40-48.

Завадский, К.М. Структура вида / К.М. Завадский // Современные проблемы эволюционной теории. – Л., 1967. – С. 196-242.

Зайцев, Г.Н. Оптимум и норма в интродукции растений / Г.Н. Зайцев. – М.: Наука, 1983. – 269 с.

Зайцев, Г.Н. Математика в экспериментальной ботанике: учебное пособие / Г.Н. Зайцев. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 288 с.

Залесов, С.В. Состояние лесных насаждений, подверженных влиянию промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь», и реакция их компонентов на проведение рубок обновления / С.В. Залесов, А.В. Бачурина, С.В. Бачурина. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. – 277 с.

Израэль, Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.

Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения / Г.М. Илькун. – Киев: Наук.думка, 1978. – 246 с.

Исаченко, Т.И. Ботанико-географическое районирование / Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко // Растительность европейской части СССР. – Л.: Наука, 1980. – С. 10–20.

Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

Кавеленова, Л.М. К специфике содержания зольных веществ в листьях древесных растений в городской среде в условиях лесостепи (на примере Самары) / Л.М. Кавеленова, А.Г. Здетовская, А.Я. Огневенко // Журнал Химия растительного сырья. – 2001. – №3. – С. 85-90.

Калабин, Г.В. Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния / Г.В. Калабин, А.В. Титова, А.В. Шаров // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – № 3 (53). – С. 65–70.

Кеммерих, А.О. Приполярный Урал. Путеводитель / А.О. Кеммерих. – Москва: Издательство «Физкультура и спорт», 1970. – 158 с.

Ковалевский, А.Л. Микроэлементы в растениях. / Отв. ред. А.Л. Ковалевский. – Улан-Удэ: АН СССР. Сибирское отделение. Бурятский филиал. Бурятский институт естественных наук. Труды, 1969. – 171 с.

Колесников, Б.П. Леса СССР: Леса Челябинской области / Б.П. Колесников. – М.: Наука, 1969. – Т. 4. – 257 с.

Коровин, А.И. Влияние температуры почвы в онтогенезе растений на поглощение ими фосфора и азота / А.И. Коровин, З.Ф. Сычева, Т.А. Барская // Сб. Роль минеральных элементов в обмене веществ и продуктивности растений. – М., 1964. – С. 311-316.

Кошкина, Н.Б. Возобновление ели сибирской в экотоне верхней границы леса массива Иремель / Н.Б. Кошкина, П.А. Моисеев, А.В. Горяева. – Экология. – 2008. – №2. – С. 93-102.

Крастина, Е.Е. Роль внутренних и внешних факторов в суточном ритме синтеза аминокислот корнями подсолнечника / Е.Е. Крастина // Роль минеральных элементов в обмене веществ и продуктивности растений. – М., 1964. – С. 53-59.

Краткая агроклиматическая характеристика Свердловской области. – Екатеринбург, 1993. – Ч.1. – 250 с.

Кузьмина, Н.А. Аккумуляция тяжелых металлов в снеговой воде, почве и состоянии березовых древостоев в условиях техногенного загрязнения / Н.А. Кузьмина, П.Е. Мохначев, С.Л. Менщиков // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2020. – Т. 24. № 6. – С. 73–82.

Кулагин, Ю.З. Экология березы бородавчатой и березы пушистой в связи с особенностями их водного режима / Ю.З. Кулагин // Труды Института биологии УФАН СССР. – Свердловск, 1963. – Вып. 35. – С. 7-75.

Кулагин, Ю.З. Древесные растения и промышленная среда / Ю.З. Кулагин. – М.: Наука, 1974. – 125 с.

Кулагин, Ю.З. Эколого-лесоводственные особенности березы повислой и березы пушистой на промышленных отвалах / Ю.З. Кулагин // Лесоведение. – 1985. – №4. – С.136-142.

Курец, В.К. Лабораторная оценка фотосинтетической активности в сеянцах древесных растений / В.К. Курец, С.Н. Дроздов // Лесоведение. – 2006. – № 3. – С. 57-78.

Лавриченко, В.М. Соотношение элементов питания в растениях как видовое генотипическое понятие / В.М. Лавриченко // Вестник с-х науки. – 1971. – № 7. – С.129-134.

Лавриченко, В.М. Соотношение элементов питания в растениях как видовое генотипическое явление / В.М. Лавриченко, З.И. Журбицкий // Агрехимия. – 1976. – № 9. – С. 135-141.

Лакин, Г.Ф. Биометрия: учебное пособие для биологических специальностей вузов / Г.Ф. Лакин. – Москва: Высшая школа, 1990. – 352 с.

Лархер, В. Экология растений / В. Лархер. – М.: Мир, 1978. – 384 с.

Лархер, В. Цели, методы и результаты фитоэкологических исследований в горных экосистемах Тирольских Альп / В. Лархер // Ботанический журнал. – 1981. – Т. 66, Вып. 8. – С. 1114-1135.

Лонзигер, А.В. Техногенно-загрязненные земли г.Карабаша и способы из рекультивации / А.В. Лонзигер, Г.Ф. Манторова, Костин А.М. // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2015. – №4.– С. 37-40.

Лукина, Н.В. Питательный режим лесов Северной тайги: природные и техногенные аспекты / Н.В. Лукина, В.В. Никонов // Апатиты. Издательство Кольского научного центра РАН, 1998. – 316 с.

Магницкий, К.П. Химический состав листьев – показатель условий питания растений / К.П. Магницкий // Сб. Физиологические обоснования системы питания растений. – М. – 1964. – С. 305-317.

Майр, Э. Систематика и происхождение видов с точки зрения зоолога / Э. Майр. – Москва: Государственное издательство иностранной литературы, 1947. – 504 с.

Мамаев, С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений / С.А. Мамаев. – М., 1973. – 284 с.

Мао, Ц.-Ж. Морфотропный эффект удвоенной концентрации СО₂ в воздухе: подавление образования устьиц у растущих листьев березы (*Betula platyphylla* Suk.) / Ц.-Ж. Мао, Я.-Ж. Ванг, С.-В. Ванг, П.Ю. Воронин // Физиология растений. – 2005. – Т.52., №2. – С. 198-202.

Махнев, А.К. Закономерности географической изменчивости вегетативных органов березы // А.К. Махнев / Вопросы географической изменчивости растений на Урале. – Свердловск, 1970. – С. 36-60.

Махнев, А.К. О внутривидовой изменчивости и систематике видов *Betula* Ляпинского Урала / А.К. Махнев, Ю.Ф. Рождественский // Ботанический журнал. – 1973. – Т. 58. – С. 1107-1127.

Махнев, А.К. Внутривидовая изменчивость березы на Урале в связи с проблемами систематики рода / А.К. Махнев, С.А. Мамаев // Закономерности внутривидовой изменчивости лиственных древесных пород. – Свердловск, 1975. – С. 67-77.

Махнев, А.К. Внутривидовая изменчивость и популяционная структура берез / А.К. Махнев. – М., 1987. – 128 с.

Медведев, С.С. Физиология растений / С.С. Медведев – СПб: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2004. – 336 с.

Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов европейской части России по программе ICP-Forests (методика ЕЭК ООН). – Москва, 1995. – 42 с.

Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения. – Москва: ЦИНАО, 1999. – 5 с.

Митрофанов, Д.П. Химический состав лесных растений Сибири / Д.П. Митрофанов. – М: Наука, 1977. – 215 с.

Митрофанов, Д.П. Интенсивность поглощения элементов питания лесообразующими породами Сибири / Д.П. Митрофанов // Проблемы физиологии и биохимии древесных растений. – 1982. – С. 46.

Моисеев П.А. Влияние изменений климата на формирование поколений ели сибирской в подгольцовых древостоях Южного Урала / П.А. Моисеев, М.

Вандермеер, А. Риглинг, И.Г. Шевченко // Экология. – 2004 . – №3. – С. 163-171.

Моисеев, П.А. Изменения климата и динамика древостоев на верхнем пределе их произрастания в горах Северного Урала / П.А. Моисеев, А.А. Бартыш, З.Я. Нагимов // Экология. – 2010. – № 6. – С. 432–443.

Молчанов, А.Г. Фотосинтетическая продуктивность дубового древостоя в различных условиях окружающей среды и водообеспеченности / А.Г. Молчанов // Физиология растений. – 2005. – Т. 52, №4. – С. 522-531.

Нагимов, З.Я. Структура и фитомасса березовых древостоев на верхней границе леса в условиях Северного Урала / З.Я. Нагимов, П.А. Моисеев, И.В. Рахманов, А.А. Григорьев // Лесной вестник. – 2008. – №3. – С. 61-67.

Наставление по выращиванию посадочного материала древесных и кустарниковых пород в лесных питомниках Уральского региона. – Москва, 1998. – 176 с.

Николаевский В.С. Анатомо-морфологические и физиолого-биохимические основы газоустойчивости растений / В.С. Николаевский, В.Н. Цодихова, В.В. Фиргер, А.Т. Мирошникова, В.В. Сулова, В.П. Галеева // Газоустойчивость растений. – Пермь, 1971. – С. 5-54.

Никонова, Н.Н. Изучение пространственной структуры растительного покрова на основе картографической модели / Н.Н. Никонова, Т.В. Фамелис, М.И. Шарафутдинов // Структура, продуктивность и динамика растительного покрова. – Свердловск, 1990. – С. 82-88.

Никонова, Н.Н. Дифференциация высокогорной растительности массива Ирмель (Южный Урал) / Н.Н. Никонова, Т.В. Фамелис, М.И. Шарафутдинов // Экология. – 1992. – № 2. – С. 23-35.

Ничипорович, А.А. Физиология фотосинтеза и продуктивность растений / А.А. Ничипорович // Физиология фотосинтеза. – М.: Наука, 1982. – С. 7-33.

Новицкая, Ю.Е. Особенности физиолого-биохимических процессов в хвое и побегах ели в условиях Севера / Ю.Е. Новицкая. – Л., 1971. – 116 с.

Оберман, Н.Г. Мерзлые породы и криогенные процессы Восточно-Европейского сектора субарктики / Н.Г. Оберман // Почвоведение. – 1998. – № 5. – С. 540–550.

Осмоловская, Н.Г. Особенности ионного гомеостатирования у гликофитных растений / Н.Г. Осмоловская // Вестник СПбУ. – 1998. – Сер. 3, Вып. 2, № 10. – С. 78-84.

Побегайло, А.И. Фотосинтез семян тополей при различных условиях минерального питания / А.И. Побегайло // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса. – М.: Наука. – 1967. – С. 261-269.

Полищук, Л.К. Особенности обмена веществ семян грецкого ореха при различных условиях корневого питания / Л.К. Полищук // Роль минеральных элементов в обмене веществ и продуктивности растений. – М., 1964. – С. 186-193.

Придача, В.Б. Соотношение N:P:K как гомеостатический показатель функционального состояния хвойных растений в разных экологических условиях: автореф. дис. ... канд. биол. наук / В.Б. Придача – Петрозаводск, 2002. – 24 с.

Проведение биохимического анализа растительных образцов: практические рекомендации / Под ред. М.И. Касаткиной. – Л., 1979. – 24 с.

Прокушкин, С.Г. Минеральное питание сосны / С.Г. Прокушкин. – Новосибирск, 1982. – 190 с.

Пьянков, В.И. Характеристика химического состава листьев растений бореальной зоны с разными типами экологических стратегий / В.И. Пьянков, Л.А. Иванов, Х. Ламберс // Экология. – 2001. – №4. – С. 243-251.

Растительность Европейской части СССР. – Л.: Наука, 1980. – 429 с.

Родин, Л.Е. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара / Л.Е. Родин, Н.И. Базилевич. – М., 1965. – 253 с.

Русанова, Г.В. Почвы – граница леса и горной тундры Приполярного Урала / Г.В. Русанова, П. Кюхри // Почвоведение. – 2001. – №4. – С. 409–417.

Сидорович Е.А. Об адаптации растений к газообразным сернистым токсикантам / Е.А. Сидорович, Н.В. Гетко, Ж.А. Рупасова // Антропогенотолерантность наземных биоценозов и прикладная экология. – Таллин, 1977. – С. 150-152.

Синявский, И.В. Тяжелые металлы в системе «почва – растение – человек» в промышленных городах горнолесной зоны Южного Урала / И.В. Синявский, Т.Г. Князева // Агропродовольственная политика России. – 2016. – № 4(52). – С. 59–62.

Смит У.Х. Лес и атмосфера / У.Х. Смит. – М.: Прогресс, 1985. – 430 с.

Соколовский, И.В. Содержание элементов питания в дерново-подзолистых почвах и хвое сосновых насаждений / И.В. Соколовский, К.Л. Забелло // Проблемы физиологии и биохимии древесных растений. – 1982. – С. 61.

Солдатенков, С.В. Биохимия органических кислот растений / С.В. Солдатенков. – Л., 1971. – С. 142.

Станюкович, К.В. Растительность гор СССР / К.В. Станюкович. – Душанбе: Изд-во «Дониш», 1973. – 416 с.

Сулейманов, Р.Р. Характеристика почвенного покрова природного парка «Иремель» / Р.Р. Сулейманов, И.М. Габбасова, И.К. Хабиров, Е.В. Абакумов, Р.М. Халитов, А.Ф. Нигматуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 3 (4). – С. 1440-1443.

Сухарева, Т.А. Химический состав и морфометрические характеристики хвои ели сибирской в условиях воздушного промышленного загрязнения: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Т.А. Сухарева – Петрозаводск, 2004. –18 с.

Тимонина, Р.Г. Петрология метаморфических пород Приполярного Урала / Р.Г. Тимонина. – Л., 1980. – 104 с.

Тушинский, Г.К. Физическая география СССР / Г.К. Тушинский, М.И. Давыдова. – М., 1976. – 543 с.

Удачин, В.Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук / В.Н. Удачин – Томск, 2012. – 48 с.

Усольцев, В.А. Продуктивность ассимиляционного аппарата деревьев вблизи медеплавильных заводов Урала / В.А. Усольцев, А.В. Борников, А.С. Жанабаева, Е.Л. Воробейчик, А.И. Колтунова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2011. – № 3 (31). – С. 67–70.

Фирсова, В.П. Почвы высоких широт горного Урала / В.П. Фирсова, В.С. Дедков. – Свердловск, 1983. – 93 с.

Хазиев, Ф.Х. Почвы Башкортостана. Эколого-генетическая и агропроизводственная характеристика. Том 1 / Ф.Х. Хазиев, А.Х. Мукатанов, И.К. Хабиров, Г.А. Кольцова, И.М. Габбасова, Р.Я. Рамазанов. Уфа: «Гилем», 1995. – 384 с.

Ханина, Л.Г. Функциональные группы видов и микрогруппировки лесного напочвенного покрова для моделирования его динамики / Л.Г. Ханина, М.В. Бобровский, В.Э. Смирнов, И.С. Грозовская, М.С. Романов, Н.В. Лукина, Л.Г. Исаева // Математическая биология и биоинформатика. – 2015. – Т.10, №1. – С. 15-33.

Цельникер, Ю.Л. Влияние возраста дерева на структуру и функцию фотосинтетического аппарата дуба черешчатого / Ю.Л. Цельникер, И.С. Малкина // Физиология растений. – 1983. – Т.20. – С. 349–354.

Шакиров, А.В. Природно-климатическое районирование территории республики Башкортостан / А.В. Шакиров // Вестник Башкирского университета. – 2003. – № 1. – С. 45-48.

Шварц, С.С. Внутривидовая изменчивость млекопитающих и методы ее изучения / С.С. Шварц // Зоол. журн. – 1963. – Т. 42, Вып. 3. – С. 417-433.

Шконде, Э.И. О применимости метода Конфилда для определения потребности почв в азотных удобрениях / Э.И. Шконде // Агрохимическая служба. – 1972. – С. 56-59.

Шнейдмиллер, Н.Ф. Особенности развития малых городов России в условиях экологического кризиса на примере города Карабаш Челябинской области / Н.Ф. Шнейдмиллер, Г.Р. Мамедов // Вестник Кемеровского

государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. – 2018. – № 3. – С. 183–190.

Argen, G.I. Theory for growth of plants derived from the nitrogen productivity concept / G.I. Argen // *Physiol Plant.* – 1985. – pp. 17-28.

Ayozloo, M. Studies on the tolerance to sulphur dioxide of grass populations in polluted areas. Identification of tolerant populations / M. Ayozloo, J.N.Sell // *New Phytol.* – 1981. – V.88, № 2. - P. 203-222.

Braun, G. Uber Ursachen der Immissionsresistenz bei Fichte und Folgerungen fur die Resisenzzuchtung / G. Braun // *Forstwiss. Cbl.* – 1977. – Bd. 96. №1. S. 62-67.

Chapin, F. Stuart III. The Ecology and Economics of Storage in Plants / F. Stuart Chapin III, Ernst-Detlef Schulze, Harold A. Mooney // *Annual Review of Ecology and Systematics.* – 1990 – Vol. 21– pp. 423-447.

Ember, L.R. Acid rain implicated in forest dieback / L.R. Ember // *Chem. and Eng. News.* – 1982. – V. 60, № 47. – P. 25-26.

Evans L.S. Biological effects of acidity in precipitation of vegetation: A review / L.S. Evans // *Environ. and Exp. Bot.* – 1982. – V.22, № 2. – P. 155-169.

Evans J.R. The Allocation of Protein Nitrogen in the Photosynthetic Apparatus: Cost, Consequences, and Control / J.R. Evans, J.R. Seemann // *Towards a Broad Understanding of Photosynthesis.* – 1989. – pp. 183-205.

Falkengren-Grerup U. Long-term changes in pH of forest soils in southern Sweden / U. Falkengren-Grerup // *Environ. Pollut.* – 1987. – Vol. 43. – P. 79—90.

Grill, D. Notes of the chlorophyll-content in fumigated spruce needles / D. Grill, J.Polz, Esterbauer H. // *Arch. Ochr.srodow.* – 1981. – №2-4. – P. 59-62.

Hynynen J. Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in Northern Europe / J. Hynynen, P. Niemistű, A. Viherд-Aarnio, A. Brunner, S. Hein, P. Velling // *Forestry.* – 2010. – Vol. 83. – P. 103–119.

Holm S. Reproductive patterns of *Betula pendula* and *B. pubescens* coll. along a regional altitudinal gradient in northern Sweden / S. Holm // *Environmental Science Ecography.* – 1994. – V. 17. – P. 60-72

Hirose, T. Nitrogen uptake and plant growth. 1. Effect of nitrogen removal on growth of *Polygonum cuspidatum* / T. Hirose, K. Kitajima // *Ann. Bot.* – 1986. – V. 58, № 4. – pp. 479-486.

Junttila, O. Growth and development of northern forest trees as affected by temperature and light / O. Junttila, J. Nilsen // In: J. Alden et al. (eds) *Forest development in cold climates.* – Plenum, New York. – 1993. – pp 43-57.

Karlsson, P.S. Intraspecific variation in nitrogen status and photosynthetic capacity within mountain birch populations / Karlsson P.S, Nordel K.O. // *Holarct Ecol.* – 1988. – №11. – pp. 293-297.

Karlsson, P.S. Effects of soil temperature on nitrogen economy and growth of mountain birch near its presumed low temperature distribution limit / P.S. Karlsson, K.O. Nordell . – *Ecoscience.* – 1996. – pp.183-189.

Karlsson, P.S. Relationships between nitrogen economy and performance in the mountain birch (*Betula pubescens ssp. tortuosa*) / P.S. Karlsson, M. Weih // *Ecol. Bull.* – 1996. – pp. 71-78.

Korner, C. The dynamics of leaf extension in plants with diverse altitudinal ranges. II. Field studies in *Poa* species between 600 and 3200 m altitude / C. Korner, F.I. Woodward // *Oecologia.* – 1987. – pp. 279- 283.

Kumar, A. Toxic metal(loid)s contamination and potential human health risk assessment in the vicinity of century-old copper smelter, Karabash, Russia / A. Kumar, Tripti, M. Maleva, I. Kiseleva, S.M. Kumar, M.Morozova // *Environ Geochem Health.* – 2020. – №12. – P. 4113-4124.

Lavola, A. Accumulation of flavonoids and related compounds in birch induced by UV-B irradiance / A Lavola // *Tree Physiol.* – №18. –1998. – P. 53–58.

Macdonald, A.D. Shoot development in *Betula papyrifera*. 1. Short-shoot organogenesis / A.D. Macdonald, D.H. Mothersill // *Can J Bot.* – 1983. – pp. 3049–3065.

Macdonald, A.D. Shoot development in *Betula papyrifera*. III. Long-shoot organogenesis / A.D. Macdonald, D.H. Mothersill, J.C. Caesar // *Can J Bot.* – 1984. – pp. 437–445.

Malhotra, S.S. Effect of sulphur dioxide and other air pollutants acid phosphatase activity in pine seedlings / S.S. Malhotra, A.A. Khan // *Biochem und Physiol. Plants.* – 1980. – Bd. 175. - №3. – S. 228-236.

Marshall, P.L. Sample size for foliar analysis of coastal Douglas-fir / P.L. Marshall, K. Jahraus // *Canadian Journal of Forest Research.*– 1987. – № 17. – P. 1240-1245.

Mitchell M.J. Climatic control of nitrate loss from forested watersheds in the Northeast United States / Mitchell M.J., Driscoll C.T., Kahl J.S., Likens G.E., Murdoch P.S., Pardo L.H. // *Environ. Sci. Tech.* – 1996. – № 30. – P. 2609–2612.

Nieboer E. Modification of plant cell buffering capacities by gaseous air pollutants / E. Nieboer, J.D. McFarlane, D.H.S. Richardson // *Gaseous air pollutants and plant metabolism.* – London e.a., 1984. – P. 313-330.

Niinements U. Distribution patterns of foliar carbon and nitrogen as affected by tree dimensions and relative light conditions in the canopy of *Picea abies* / U. Niinements // *Trees.* – 1997. – T. 11. – pp. 144-154.

Paavilainen, E. On the relationships between the root systems of white birch and Norway spruce and the ground water table / E Paavilainen // *Commun. Inst. For. Fenn.* – 1966. – 62. – p. 15.

Pelham J. Variation in, and reproductive capacity of *Betula pendula* and *B. pubescens* / J. Pelham, J. W. Kinnaird, A. S. Gardiner, F. T. Last // *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences* , V. 85 , Issue 1-2: *Birches.* – 1984. – P. 27 – 41.

Slatyer, R.O. Altitudinal variation in the photosynthetic characteristics of snow gum, *Eucalyptus pauciflora* Sieb. ex Spreng. II. Effects of growth temperature under controlled conditions / R.O. Slatyer, P.J. Ferrar // *Plant Physiol.* – 1977. – pp. 289-299.

Sveinbjomsson, B. Nutrient relations of mountain birch growth at and below the elevational tree-line in Swedish Lapland / B. Sveinbjomsson, O. Nordell, H. Kauhanen // *Funct Ecol.* – 1992. – pp. 213-220.

Tamm, C.O. Seasonal variation in composition of birch leaves/ C.O. Tamm // *Physiol. Plant.* – 1951. – V.4. – P. 461–469.

Tomlinson, G.H. Nutrient disturbances in forest trees and the nature of the forest decline in Quebec and Germany / G.H. Tomlinson // Zoetl H.W. and Huettl R.F. (Editors). *Management of nutrition in forests under stress.* Kluwer Academic Publishers. – 1991. – P. 61-74.

Treshow, M. Epilogue: a biochemical overview / M. Treshow // *Gaseous air pollutants and plant metabolism.* – London e.a., 1984. P. 425-437.

Zoetl, H.W. Nutritional disturbance and historical changes in declining forest / H.W. Zoetl, R.F. Huettl, S. Fink, C.H. Tomlinson, J. Wisiewski // *Water Air and Soil Pollution.* – 1989. – Vol. 48. – P. 87—109.

Udachin, V.N. Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia / V.N. Udachin, B.J. Williamson, O.W. Purvis, B. Spiro, W. Dubbin, R.J. Herrington, I.Mikhailova // *Sust. Devel.*, 2003. – V. 11. – pp. 1–10.

Weih, M. Growth and nitrogen utilisation in seedlings of mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa*) as related to plant nitrogen status and temperature: a two-year study / Martin Weih, P.Staffan Karlsson // *Ecoscience.* – 1997. – pp. 365-373.

Weih, M. Growth response of altitudinal ecotypes of mountain birch to temperature and fertilization / Weih Martin and P. Staffan Karlsson. // *Oecologia.* – 1999. – 119. – pp. 16-23.

William, H.M. Effect of SO₂ on sexual reproduction in *Lepidium virginicum* L. originating from region with different SO₂ concentrations / H.M. William // *Bot. Gaz.* – 1979. – V. 140, №3. – P. 299-303.

Woodward, F.I. The differential temperature responses of the growth of certain plant species from different altitudes. I. Growth analysis of *Phleum alpinum* L., *P. bertolonii* D.C., *Sesleria albicans* Kit. And *Dactylis glomerata* L. / F.I. Woodward // *New Phytol.* – 1979. – pp. 385-395.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1. Однофакторный дисперсионный анализ содержания макроэлементов в листьях березы повислой районе «Карабашмедь»

Элементы	SS	Степени свободы	MS	F	p
N	116,02	4	29,00	6,525	0,000314
P	9,218	4	2,305	2,695	0,042633
K	205,208	4	51,302	3,4633	0,015016
Mg	57,650	4	14,413	10,1374	0,000006
Ca	51,942	4	12,985	3,2212	0,020812
S	6,2198	4	1,5549	5,7145	0,000831
Na	4,4528	4	1,1132	1,2605	0,299508
N+P+K	362,26	4	90,57	3,572	0,012972
%N	569,9	4	142,5	4,417	0,004262
%P	49,04	4	12,26	3,159	0,022649
%K	667,50	4	166,88	4,0081	0,007272

Таблица 2. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в районе «Карабашмедь»

ПП	Показатель	Азот, мг/г	Фосфор, мг/г	Кальций, мг/г	Калий, мг/г	Магний, мг/г
СВ-24	Среднее	21,29	7,37	7,99	12,73	6,41
	Стандартное отклонение	2,81	1,11	3,00	3,31	1,56
	Коэффициент вариации	0,13	0,15	0,38	0,26	0,24
СВ-20	Среднее	24,56	6,64	7,67	11,51	4,12
	Стандартное отклонение	2,17	0,80	1,59	5,18	0,59
	Коэффициент вариации	0,09	0,12	0,21	0,45	0,14
СВ-15	Среднее	24,40	7,22	5,50	12,65	5,27
	Стандартное отклонение	2,12	1,13	1,50	4,19	1,80
	Коэффициент вариации	0,09	0,16	0,27	0,33	0,34
СВ-5	Среднее	21,37	6,41	5,79	14,86	3,69
	Стандартное отклонение	1,19	0,53	1,08	4,03	0,56
	Коэффициент вариации	0,06	0,08	0,19	0,27	0,15
С-1,5	Среднее	21,46	6,31	7,38	8,66	3,61
	Стандартное отклонение	1,93	0,92	2,28	1,54	0,89
	Коэффициент вариации	0,09	0,15	0,31	0,18	0,25

Таблица 3. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в районе «Карабашмедь»

ПП	Показатель	Натрий, мг/г	Сера, мг/г	N+P+K	% азота	% фосфора	% калия
СВ-24	Среднее	1,78	1,74	41,39	51,80	17,86	30,34
	Стандартное отклонение	0,54	0,43	6,09	5,59	1,70	5,62
	Коэффициент вариации	0,30	0,25	0,15	0,11	0,10	0,19
СВ-20	Среднее	2,12	1,76	42,71	58,24	15,76	25,99
	Стандартное отклонение	1,26	0,60	6,05	7,08	2,52	8,94
	Коэффициент вариации	0,59	0,34	0,14	0,12	0,16	0,34
СВ-15	Среднее	2,54	1,88	44,27	55,55	16,36	28,08
	Стандартное отклонение	1,41	0,50	4,99	6,18	2,32	6,91
	Коэффициент вариации	0,55	0,27	0,11	0,11	0,14	0,25
СВ-5	Среднее	1,74	1,73	42,64	50,52	15,12	34,36
	Стандартное отклонение	0,50	0,47	4,47	5,04	1,39	5,91
	Коэффициент вариации	0,29	0,27	0,10	0,10	0,09	0,17
С-1,5	Среднее	1,85	2,65	36,42	58,98	17,27	23,75
	Стандартное отклонение	0,56	0,58	2,85	4,02	1,69	3,72
	Коэффициент вариации	0,30	0,22	0,08	0,07	0,10	0,16

Таблица 4. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Б. Ирмель (данные за 2009 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Магний	Натрий
Контроль	среднее, мг/г	22,27	4,48	2,17	4,26	2,80	1,75
	стандартное отклонение	2,58	0,84	0,81	0,91	0,46	1,16
	коэффициент вариации	0,12	0,19	0,37	0,21	0,16	0,66
	ошибка средней	0,69	0,27	0,22	0,24	0,12	0,32
Горно-лесной, нижняя граница	среднее, мг/г	25,15	8,11	1,54	4,03	2,93	1,67
	стандартное отклонение	2,38	1,13	0,37	0,45	0,42	0,98
	коэффициент вариации	0,09	0,14	0,24	0,11	0,14	0,59
	ошибка средней	0,61	0,36	0,10	0,12	0,11	0,26
Горно-лесной, верхняя граница	среднее, мг/г	31,95	6,51	3,64	4,52	2,49	1,86
	стандартное отклонение	2,90	1,47	1,07	1,87	0,46	2,17
	коэффициент вариации	0,09	0,23	0,29	0,41	0,19	1,16
	ошибка средней	0,75	0,38	0,28	0,48	0,12	0,56

Таблица 5. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Б. Ирмель (данные за 2009 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее	28,91	76,70	15,57	7,73
	стандартное отклонение	3,46	2,78	2,63	2,35
	коэффициент вариации	0,12	0,04	0,17	0,30
	ошибка средней	1,04	0,84	0,79	0,71
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	35,12	72,26	23,10	4,64
	стандартное отклонение	3,10	2,59	2,45	1,06
	коэффициент вариации	0,09	0,04	0,11	0,23
	ошибка средней	0,80	0,67	0,63	0,27
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	42,17	75,87	15,27	8,85
	стандартное отклонение	3,42	3,45	2,37	2,40
	коэффициент вариации	0,08	0,05	0,16	0,27
	ошибка средней	0,88	0,89	0,61	0,62

Таблица 6. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Б. Иремель (данные за 2009 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Магний	Натрий
Контроль	среднее, мг/г	22,08	4,55	1,85	4,92	3,02	1,43
	стандартное отклонение	2,33	1,12	0,59	1,63	0,75	1,05
	коэффициент вариации	0,11	0,25	0,32	0,33	0,25	0,73
	ошибка средней	0,60	0,34	0,15	0,42	0,19	0,27
Горно-лесной, нижняя граница	среднее, мг/г	23,58	7,05	2,19	4,73	3,15	1,74
	стандартное отклонение	1,92	0,76	0,71	0,69	0,80	1,63
	коэффициент вариации	0,08	0,11	0,32	0,15	0,25	0,94
	ошибка средней	0,50	0,24	0,18	0,18	0,21	0,42
Горно-лесной, верхняя граница	среднее, мг/г	27,45	5,78	3,21	4,16	2,22	1,26
	стандартное отклонение	2,53	1,37	0,81	1,52	0,57	0,83
	коэффициент вариации	0,09	0,24	0,25	0,37	0,26	0,66
	ошибка средней	0,65	0,35	0,21	0,39	0,15	0,22
Подгольцовый	среднее, мг/г	29,34	6,90	2,91	3,73	1,14	1,53
	стандартное отклонение	2,97	1,23	0,72	1,10	0,70	0,82
	коэффициент вариации	0,10	0,18	0,25	0,30	0,61	0,54
	ошибка средней	0,77	0,32	0,19	0,28	0,18	0,21
Горно-тундровый	среднее, мг/г	29,76	6,06	1,83	3,94	2,04	2,15
	стандартное отклонение	3,26	0,95	0,53	0,71	0,60	1,46
	коэффициент вариации	0,11	0,16	0,29	0,18	0,29	0,68
	ошибка средней	0,84	0,24	0,14	0,18	0,16	0,38

Таблица 7. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Б. Ирмель (данные за 2009 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее	27,66	77,20	16,39	6,41
	стандартное отклонение	2,52	2,47	3,29	1,93
	коэффициент вариации	0,09	0,03	0,20	0,30
	ошибка средней	0,67	0,66	0,88	0,52
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	33,23	71,69	21,27	7,04
	стандартное отклонение	2,68	2,15	1,92	1,89
	коэффициент вариации	0,08	0,03	0,09	0,27
	ошибка средней	0,69	0,55	0,50	0,49
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	37,48	75,96	15,35	8,68
	стандартное отклонение	2,66	3,47	2,90	1,90
	коэффициент вариации	0,07	0,05	0,19	0,22
	ошибка средней	0,69	0,90	0,75	0,49
Подгольцовый	среднее	38,48	74,55	17,93	7,52
	стандартное отклонение	4,23	3,17	2,25	1,38
	коэффициент вариации	0,11	0,04	0,13	0,18
	ошибка средней	1,09	0,82	0,58	0,36
Горно-тундровый	среднее	36,52	78,24	16,60	5,17
	стандартное отклонение	2,52	2,61	2,18	1,54
	коэффициент вариации	0,07	0,03	0,13	0,30
	ошибка средней	0,65	0,67	0,56	0,40

Таблица 8. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Б. Ирмель (данные за 2007 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Магний	Натрий
Контроль	среднее, мг/г	20,01	5,20	2,15	4,34	2,62	2,04
	стандартное отклонение	2,87	1,95	1,23	0,98	0,75	1,44
	коэффициент вариации	0,14	0,38	0,57	0,23	0,29	0,71
	ошибка средней	0,74	0,62	0,39	0,31	0,24	0,46
Горно-лесной, нижняя граница	среднее, мг/г	24,52	8,14	3,39	4,85	2,44	1,61
	стандартное отклонение	3,66	1,09	1,02	0,78	0,74	1,24
	коэффициент вариации	0,15	0,13	0,30	0,16	0,30	0,77
	ошибка средней	0,94	0,35	0,32	0,25	0,24	0,39
Горно-лесной, верхняя граница	среднее, мг/г	25,27	6,11	2,91	4,71	2,09	2,02
	стандартное отклонение	3,13	0,94	1,25	0,76	0,29	1,13
	коэффициент вариации	0,12	0,15	0,43	0,16	0,14	0,56
	ошибка средней	0,81	0,24	0,32	0,20	0,08	0,29

Таблица 9. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Б. Ирмель (данные за 2007 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее	27,56	73,97	18,55	7,49
	стандартное отклонение	4,69	7,48	4,62	3,21
	коэффициент вариации	0,17	0,10	0,25	0,43
	ошибка средней	1,25	2,00	1,23	0,86
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	36,02	67,75	22,71	9,55
	стандартное отклонение	3,70	5,49	2,74	2,91
	коэффициент вариации	0,10	0,08	0,12	0,30
	ошибка средней	0,95	1,42	0,71	0,75
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	34,43	74,13	17,61	8,26
	стандартное отклонение	4,59	4,01	2,66	2,56
	коэффициент вариации	0,13	0,05	0,15	0,31
	ошибка средней	1,19	1,04	0,69	0,66

Таблица 10. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Б. Ирмель (данные за 2007 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Магний	Натрий
Контроль	среднее, мг/г	19,46	5,62	2,57	4,03	2,49	2,25
	стандартное отклонение	2,16	2,07	1,41	0,68	0,92	1,38
	коэффициент вариации	0,11	0,37	0,55	0,17	0,37	0,61
	ошибка средней	0,56	0,65	0,45	0,21	0,29	0,44
Горно-лесной, нижняя граница	среднее, мг/г	21,50	6,81	3,15	4,66	2,39	1,33
	стандартное отклонение	2,34	1,45	1,46	0,50	0,22	0,71
	коэффициент вариации	0,11	0,21	0,47	0,11	0,09	0,54
	ошибка средней	0,60	0,46	0,46	0,16	0,07	0,23
Горно-лесной, верхняя граница	среднее, мг/г	25,19	6,12	2,14	4,47	2,46	1,57
	стандартное отклонение	2,62	0,61	0,92	0,58	0,41	0,58
	коэффициент вариации	0,10	0,10	0,43	0,13	0,17	0,37
	ошибка средней	0,68	0,16	0,24	0,15	0,11	0,15
Подгольцовый	среднее, мг/г	28,43	7,67	5,69	4,68	1,83	1,88
	стандартное отклонение	2,61	1,29	1,27	0,48	0,37	0,66
	коэффициент вариации	0,09	0,17	0,22	0,10	0,20	0,35
	ошибка средней	0,67	0,33	0,33	0,12	0,09	0,17
Горно-тундровый	среднее, мг/г	28,14	7,78	3,62	4,40	1,88	1,35
	стандартное отклонение	2,14	1,42	0,84	1,06	0,50	0,67
	коэффициент вариации	0,08	0,18	0,23	0,24	0,26	0,50
	ошибка средней	0,55	0,37	0,22	0,27	0,13	0,17

Таблица 11. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Б. Ирмель (данные за 2007 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее	27,87	71,05	19,86	9,10
	стандартное отклонение	3,33	8,85	5,20	4,39
	коэффициент вариации	0,12	0,12	0,26	0,48
	ошибка средней	0,89	2,37	1,39	1,17
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	31,44	68,61	21,52	9,87
	стандартное отклонение	3,87	5,14	2,37	3,81
	коэффициент вариации	0,12	0,07	0,11	0,39
	ошибка средней	1,22	1,63	0,75	1,20
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	32,97	74,82	18,86	6,32
	стандартное отклонение	3,42	2,44	3,20	2,27
	коэффициент вариации	0,10	0,03	0,17	0,36
	ошибка средней	0,88	0,63	0,83	0,59
Подгольцовый	среднее	42,47	67,70	18,94	13,36
	стандартное отклонение	3,33	2,51	1,46	2,46
	коэффициент вариации	0,08	0,04	0,08	0,18
	ошибка средней	0,86	0,65	0,38	0,64
Горно-тундровый	среднее	39,27	71,13	19,68	9,19
	стандартное отклонение	1,19	4,17	3,76	1,92
	коэффициент вариации	0,03	0,06	0,19	0,21
	ошибка средней	0,31	1,08	0,97	0,49

Таблица 12. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2008 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Натрий	Магний
Контроль	среднее, мг/г	27,24	8,67	7,07	8,33	2,10	6,31
	стандартное отклонение	2,67	1,75	2,58	1,32	1,23	1,04
	коэффициент вариации	0,10	0,20	0,36	0,16	0,59	0,17
	ошибка средней	0,71	0,47	0,69	0,35	0,33	0,28
Горно-лесной, нижняя граница	среднее, мг/г	25,73	9,44	4,18	4,99	1,78	6,87
	стандартное отклонение	3,02	0,92	1,49	1,47	0,69	0,57
	коэффициент вариации	0,12	0,10	0,36	0,29	0,39	0,08
	ошибка средней	0,78	0,24	0,39	0,38	0,18	0,15
Горно-лесной, верхняя граница	среднее, мг/г	24,02	6,52	5,57	5,69	2,07	6,00
	стандартное отклонение	1,94	1,17	1,99	0,86	1,04	0,61
	коэффициент вариации	0,08	0,18	0,36	0,15	0,50	0,10
	ошибка средней	0,50	0,30	0,51	0,22	0,27	0,16

Таблица 13. Результаты статистической обработки содержание макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2008 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее, мг/г	42,98	63,74	20,15	16,11
	стандартное отклонение	5,72	4,41	2,71	3,62
	коэффициент вариации	0,13	0,07	0,13	0,23
	ошибка средней	1,53	1,18	0,72	0,97
Горно-лесной, нижняя граница	среднее, мг/г	39,36	65,26	24,05	10,69
	стандартное отклонение	2,89	4,30	2,32	4,05
	коэффициент вариации	0,07	0,07	0,10	0,38
	ошибка средней	0,75	1,11	0,60	1,05
Горно-лесной, верхняя граница	среднее, мг/г	36,11	66,67	18,06	15,27
	стандартное отклонение	2,75	4,99	3,11	4,77
	коэффициент вариации	0,08	0,07	0,17	0,31
	ошибка средней	0,71	1,29	0,80	1,23

Таблица 14. Результаты статистической обработки содержание макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2008 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Натрий	Магний
Контроль	среднее, мг/г	29,94	9,08	7,68	8,03	2,22	6,17
	стандартное отклонение	4,00	1,69	2,77	1,62	0,90	0,76
	коэффициент вариации	0,13	0,19	0,36	0,20	0,40	0,12
	ошибка средней	1,03	0,44	0,71	0,42	0,23	0,20
Горно-лесной, нижняя граница	среднее, мг/г	27,73	10,63	6,03	6,06	2,72	7,18
	стандартное отклонение	2,39	1,20	1,75	0,72	0,82	0,77
	коэффициент вариации	0,09	0,11	0,29	0,12	0,30	0,11
	ошибка средней	0,62	0,31	0,45	0,19	0,21	0,20
Горно-лесной, верхняя граница	среднее, мг/г	25,71	6,78	8,00	7,06	2,28	6,39
	стандартное отклонение	4,45	0,99	3,08	0,80	1,70	0,48
	коэффициент вариации	0,17	0,15	0,38	0,11	0,75	0,08
	ошибка средней	1,15	0,26	0,79	0,21	0,44	0,12
Подгольцовый	среднее, мг/г	35,40	9,48	7,43	5,83	2,35	7,24
	стандартное отклонение	5,22	1,24	2,59	0,86	1,65	1,12
	коэффициент вариации	0,15	0,13	0,35	0,15	0,70	0,16
	ошибка средней	1,35	0,32	0,67	0,22	0,43	0,29
Горно-тундровый	среднее, мг/г	39,13	11,89	6,58	4,39	2,60	7,33
	стандартное отклонение	3,99	1,72	1,59	1,07	0,97	0,73
	коэффициент вариации	0,10	0,14	0,24	0,24	0,37	0,10
	ошибка средней	1,03	0,44	0,41	0,28	0,25	0,19

Таблица 15. Результаты статистической обработки содержание макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2008 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее	46,70	64,29	19,39	16,31
	стандартное отклонение	4,85	6,89	2,85	5,18
	коэффициент вариации	0,10	0,11	0,15	0,32
	ошибка средней	1,25	1,78	0,74	1,34
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	44,39	62,61	23,98	13,41
	стандартное отклонение	4,25	3,45	2,00	3,08
	коэффициент вариации	0,10	0,06	0,08	0,23
	ошибка средней	1,10	0,89	0,52	0,79
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	40,48	63,48	17,02	19,51
	стандартное отклонение	4,81	6,96	3,64	6,15
	коэффициент вариации	0,12	0,11	0,21	0,32
	ошибка средней	1,24	1,80	0,94	1,59
Подгольцовый	среднее	52,31	67,71	18,22	14,07
	стандартное отклонение	7,11	3,94	1,81	4,21
	коэффициент вариации	0,14	0,06	0,10	0,30
	ошибка средней	1,84	1,02	0,47	1,09
Горно-тундровый	среднее	57,59	67,99	20,63	11,38
	стандартное отклонение	5,35	3,67	2,23	2,32
	коэффициент вариации	0,09	0,05	0,11	0,20
	ошибка средней	1,38	0,95	0,57	0,60

Таблица 16. Результаты статистической обработки содержание макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2006 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Натрий	Магний
Контроль	среднее	22,04	6,74	5,19	6,64	1,32	4,16
	стандартное отклонение	2,48	1,05	2,54	0,97	0,46	0,47
	коэффициент вариации	0,11	0,16	0,49	0,15	0,35	0,11
	ошибка средней	0,78	0,33	0,80	0,31	0,15	0,15
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	21,68	6,31	6,11	8,30	1,67	4,98
	стандартное отклонение	1,19	1,57	1,56	1,40	0,71	0,89
	коэффициент вариации	0,06	0,25	0,26	0,17	0,43	0,18
	ошибка средней	0,38	0,50	0,49	0,44	0,23	0,28
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	24,81	6,40	4,77	5,18	1,55	5,61
	стандартное отклонение	1,99	0,56	1,70	1,41	0,89	0,72
	коэффициент вариации	0,08	0,09	0,36	0,27	0,57	0,13
	ошибка средней	0,63	0,18	0,54	0,45	0,28	0,23
Подгольцовый	среднее	27,88	6,28	5,71	6,03	1,56	4,58
	стандартное отклонение	3,23	0,90	1,38	1,20	0,78	0,55
	коэффициент вариации	0,12	0,14	0,24	0,20	0,50	0,12
	ошибка средней	1,02	0,29	0,43	0,38	0,25	0,17
Горно-тундровый	среднее	30,66	7,09	5,30	4,07	1,57	5,11
	стандартное отклонение	4,62	1,09	1,61	1,13	0,76	0,59
	коэффициент вариации	0,15	0,15	0,30	0,28	0,48	0,12
	ошибка средней	1,46	0,34	0,51	0,36	0,24	0,19

Таблица 17. Результаты статистической обработки содержание макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2006 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее	33,97	65,21	19,936	14,85
	стандартное отклонение	3,582	7,221	3,0914	6,318
	коэффициент вариации	0,105	0,111	0,1551	0,425
	ошибка средней	1,133	2,284	0,9776	1,998
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	34,09	63,79	18,437	17,77
	стандартное отклонение	2,742	3,963	4,0361	3,414
	коэффициент вариации	0,08	0,062	0,2189	0,192
	ошибка средней	0,867	1,253	1,2763	1,079
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	35,99	69,01	17,814	13,18
	стандартное отклонение	2,423	4,419	1,2855	4,421
	коэффициент вариации	0,067	0,064	0,0722	0,335
	ошибка средней	0,766	1,397	0,4065	1,398
Подгольцовый	среднее	39,87	69,87	15,818	14,32
	стандартное отклонение	3,687	4,264	2,1847	3,101
	коэффициент вариации	0,092	0,061	0,1381	0,217
	ошибка средней	1,166	1,348	0,6909	0,981
Горно-тундровый	среднее	43,05	71,08	16,656	12,26
	стандартное отклонение	4,587	5,628	3,1239	3,232
	коэффициент вариации	0,107	0,079	0,1876	0,264
	ошибка средней	1,451	1,78	0,9879	1,022

Таблица 18. Результаты статистической обработки содержание макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2006 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Натрий	Магний
Контроль	среднее	23,98	8,44	5,57	7,99	1,68	4,72
	стандартное отклонение	1,67	0,95	2,39	1,77	0,49	0,45
	коэффициент вариации	0,07	0,11	0,43	0,22	0,29	0,10
	ошибка средней	0,53	0,30	0,76	0,56	0,16	0,14
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	20,29	7,07	3,65	6,83	1,33	5,18
	стандартное отклонение	1,17	0,75	1,04	1,39	0,26	0,76
	коэффициент вариации	0,06	0,11	0,28	0,20	0,20	0,15
	ошибка средней	0,37	0,24	0,33	0,44	0,08	0,24
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	19,75	5,79	3,00	6,46	1,25	4,23
	стандартное отклонение	2,07	0,65	1,41	1,11	0,08	0,75
	коэффициент вариации	0,10	0,11	0,47	0,17	0,06	0,18
	ошибка средней	0,65	0,21	0,45	0,35	0,03	0,24

Таблица 19. Результаты статистической обработки содержания макроэлементов в листьях березы повислой в высотных поясах горы Конжаковский Камень (данные за 2006 г.)

Горные пояса	Статистич. параметры	Сумма N+P+K	Азот, %	Фосфор, %	Калий, %
Контроль	среднее	37,98	63,30	22,26	14,44
	стандартное отклонение	2,98	4,12	2,30	5,54
	коэффициент вариации	0,08	0,07	0,10	0,38
	ошибка средней	0,94	1,30	0,73	1,75
Горно-лесной, нижняя граница	среднее	31,00	65,47	22,77	11,76
	стандартное отклонение	1,88	1,94	1,74	3,22
	коэффициент вариации	0,06	0,03	0,08	0,27
	ошибка средней	0,59	0,61	0,55	1,02
Горно-лесной, верхняя граница	среднее	28,55	69,22	20,47	10,31
	стандартное отклонение	2,81	3,14	2,96	4,31
	коэффициент вариации	0,10	0,05	0,14	0,42
	ошибка средней	0,89	0,99	0,94	1,36

Таблица 20. Результаты статистической обработки содержание макроэлементов в листьях березы пушистой в высотных поясах Приполярного Урала

Горные пояса	Статистич. параметры	Азот	Фосфор	Калий	Кальций	Магний	Натрий
Контроль	среднее	27,33	7,75	7,75	5,03	2,64	0,82
	стандартное отклонение	3,16	1,36	3,67	1,74	0,72	2,44
	коэффициент вариации	0,12	0,17	0,47	0,35	0,27	2,99
	ошибка средней	0,82	0,35	0,95	0,45	0,19	0,63
Горно-лесной	среднее	30,78	6,56	11,60	4,30	1,16	1,05
	стандартное отклонение	1,59	0,87	3,03	2,02	0,76	1,98
	коэффициент вариации	0,05	0,13	0,26	0,47	0,66	1,89
	ошибка средней	0,41	0,22	0,78	0,52	0,20	0,51
Подгольцовый	среднее	32,61	7,02	8,98	2,89	1,06	0,61
	стандартное отклонение	3,22	1,00	2,46	1,75	0,66	2,19
	коэффициент вариации	0,10	0,14	0,27	0,60	0,62	3,62
	ошибка средней	0,83	0,26	0,64	0,45	0,17	0,57
Горно-тундровый	среднее	30,82	6,41	8,29	2,87	1,84	2,03
	стандартное отклонение	3,52	1,16	3,34	2,16	0,89	1,86
	коэффициент вариации	0,11	0,18	0,40	0,75	0,48	0,91
	ошибка средней	0,91	0,30	0,86	0,56	0,23	0,48