

На правах рукописи



Сухарева Татьяна Алексеевна

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ХВОИ ЕЛИ СИБИРСКОЙ В УСЛОВИЯХ
ВОЗДУШНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

03.00.16-экология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Петрозаводск
2004

Работа выполнена в Институте проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра Российской академии наук

Научные руководители

доктор биологических наук.

Лукина Наталья Васильевна

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук, профессор

Бобкова Капитолина Степановна

доктор биологических наук, профессор

Кищенко Иван Тарасович

Ведущая организация Ботанический институт им.Комарова РАН

Защита состоится "17" июля 2004 г. в 14 час. мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.190.01 при Петрозаводском государственном
университете по адресу: 185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск,
пр.Ленина, 33, ауд. 326 теоретического корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПетрГУ.

Автореферат разослан "14" августа 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Крупень И.М.

200.5 - 4

885522

15790

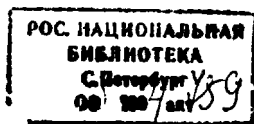
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время воздушное промышленное загрязнение является антропогенным фактором, вызывающим крупномасштабные изменения функционирования бореальных лесов. Поступление из атмосферы загрязняющих веществ вызывает дигрессионную сукцессию лесов, основными стадиями которой являются стадии дефолирующих лесов, техногенного редколесья и пустоши (Лукина, Никонов, 1998). Аэротехногенное загрязнение приводит к нарушению основных звеньев биологического круговорота, прежде всего поглощения элементов растениями. Оно оказывает как прямое влияние на формирование химического состава ассимилирующих органов растений (фолиарное поглощение загрязняющих веществ, выщелачивание элементов питания из растительных тканей), так и косвенное воздействие через почву, в результате которого нарушается снабжение растения питательными веществами из-за повышения кислотности почвы и накопления в ней загрязняющих веществ.

Снижение содержания и дефицит элементов питания является одним из важных неблагоприятных факторов, обуславливающих снижение утилизации продуктов фотосинтеза на ростовые процессы и интенсификацию формирования вторичных метаболитов - фенолов.

Изучению параметров минерального питания древесных растений в условиях воздушного промышленного загрязнения посвящено много работ отечественных и зарубежных авторов. В то же время изучению содержания вторичных метаболитов, в частности фенолов, до настоящего времени уделялось недостаточно внимания, хотя имеются предпосылки к тому, что вещества вторичного метаболизма, называемые еще стрессовыми метаболитами, рационально использовать как индикаторы физиологического состояния древесных растений (Рощина, Рощина, 1989). Комплексные исследования питательного режима растений, параметров их роста и содержания в них фенолов в условиях воздушного промышленного загрязнения не проводились.

Ель (*Picea obovata* Ledeb.) является одним из доминирующих лесообразователей в бореальной зоне и формирует леса на северном пределе распространения, в том числе на Кольском полуострове. Исследование состояния ели сибирской в условиях воздушного промышленного загрязнения с изучением взаимосвязей между минеральным питанием, ростовыми процессами и накоплением вторичных метаболитов (фенолов) до сих пор не проводилась.



Ассимилирующие органы играют роль регуляторного звена в функционировании растительного организма и весьма чувствительны к изменению условий произрастания. На основе химического состава ассимилирующих органов древесных растений может быть выявлен дефицит или токсичность элементов для растений (Ильин, 1991; Zoetl, Huettl, 1991) и проведена диагностика состояния лесного фитоценоза. Поэтому исследование состояния ели в условиях воздушного промышленного загрязнения может быть проведено на основе детального изучения биохимического состава и параметров ростовых процессов ее ассимилирующих органов.

Целью исследований явилось изучение взаимосвязей между параметрами минерального питания, показателями ростовых процессов и накоплением вторичных метаболитов (фенолов) в хвое ели сибирской на Кольском полуострове в процессе дигрессионной сукцессии, вызванной воздушным промышленным загрязнением.

Задачи исследования:

1. выявление особенностей возрастной и внутрисезонной динамики аккумуляции элементов минерального питания в хвое ели сибирской в фоновых условиях и в процессе дигрессионной сукцессии;
2. выявление особенностей возрастной динамики аккумуляции фенолов в хвое ели сибирской в фоновых условиях и в процессе дигрессионной сукцессии;
3. определение изменений в продолжительности жизни и степени поврежденности хвои в процессе дигрессионной сукцессии;
4. изучение морфометрических характеристик (длины и массы) хвои ели как параметров ростовых процессов;
5. выявление взаимосвязей между параметрами минерального питания, показателями ростовых процессов и накоплением вторичных метаболитов (фенолов) в хвое ели в процессе дигрессионной сукцессии;
6. оценка возможности использования содержания элементов питания, фенолов и морфометрических характеристик для диагностики состояния ели в условиях техногенного стресса.

Научная новизна:

- обнаружен нелинейный характер изменений в содержании элементов минерального питания и фенолов в хвое ели сибирской в процессе дигрессионной сукцессии лесов, обусловленной воздушным промышленным загрязнением;
- обнаружен нелинейный характер изменений морфометрических характеристик хвои ели в процессе дигрессионной сукцессии лесов;
- установлено, что одной из основных причин снижения интенсивности ростовых процессов и накопления вторичных метаболитов (фенолов) в хвое ели сибирской в условиях воздушного промышленного загрязнения

является дефицит элементов минерального питания (магний, кальций, фосфор);

- изучена внутрисезонная динамика содержания фенолов в хвое ели сибирской в природных условиях и в процессе дигрессионной сукцессии;
- установлена зависимость параметров минерального состава и морфометрических характеристик хвои от порядка ветвления побега;
- для оценки жизненного состояния хвойных древесных растений предложен коэффициент роста, который представляет собой отношение массы хвои к ее длине;

Практическая значимость. Результаты исследований по содержанию элементов питания и фенолов в хвое ели, а также ее продолжительность жизни и морфометрические характеристики в условиях разной степени воздушного загрязнения рационально использовать для оценки состояния ели при проведении экологического мониторинга. Отношение массы хвои к ее длине (коэффициент роста хвои), а также отношение азота белкового к небелковому возможно рассматривать как информативные диагностические параметры состояния ели.

Защищаемые положения.

- В процессе дигрессионной сукцессии ельников содержание элементов питания в хвое ели изменяется нелинейно: содержание магния и кальция возрастает, а содержание азота (белкового и небелкового), калия и алюминия снижается по сравнению с фоном на начальных стадиях сукцессии, тогда как на стадиях затухающей дефолиации и техногенного редколесья наблюдаются обратные закономерности. Это связано с изменением концентраций элементов в почвах и почвенных водах, а также проявлением антагонистических взаимоотношений между элементами питания.
- В процессе дигрессионной сукцессии ельников содержание фенолов в хвое ели и морфометрические характеристики хвои изменяются нелинейно: содержание фенолов снижается, а длина и масса хвои возрастает по сравнению с фоном на начальной стадии сукцессии, тогда как на стадии затухающей дефолиации и техногенного редколесья обнаруживаются обратные закономерности.
- Снижение интенсивности ростовых процессов и накопление вторичных метаболитов (фенолов) в хвое ели сибирской в условиях воздушного промышленного загрязнения связаны с дефицитом элементов минерального питания (магний, кальций, фосфор).
- Концентрация в хвое элементов питания зависит от возраста побегов: в фоновых условиях, чем выше порядок побега, тем больше в хвое концентрируются подвижных элементов (P, K), и меньше - малоподвижных (Ca, Mn); в условиях

воздушного загрязнения с увеличением порядка возрастает содержание Fe, Al, а также Ni, Си и S.

- Коэффициент роста хвои, представляющий собой отношение массы хвои к ее длине, а также отношение азота белкового к небелковому являются информативными диагностическими параметрами состояния ели.

Апробация работы. Результаты исследований представлены и обсуждены на: втором политехническом симпозиуме "Молодые ученые - промышленности Северо-Западного региона" (Санкт-Петербург, 2001); III-региональной научной конференции "Естественнонаучные проблемы Арктического региона" (Мурманск, 2002); международной молодежной конференции "Экология-2003" (Архангельск, 2003); конференции "Современные методы эколого-геохимической оценки состояния и изменений окружающей среды" (Новороссийск, 2003); конференции "Сбалансированное природопользование на примере освоения минеральных ресурсов" (Апатиты, 2003); III-VI научно-практических конференциях КФ ПетрГУ (Апатиты, 2000; 2001; 2002; 2003); международной конференции "Экологические проблемы северных регионов и пути их решения" (Апатиты, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ.

Структура и объем работы. В структуру диссертации входит: введение, 7 глав, выводы и список литературы. Работа изложена на 229 страницах машинописного текста, содержит 57 таблицы и 8 рисунков. Список цитируемой литературы включает 266 наименования, в том числе 126 на иностранных языках.

Благодарности. Выражаю искреннюю благодарность своему научному руководителю Н.В. Лукиной за всестороннюю и неоценимую помощь в работе, ценные советы и замечания, а также за подаренную мне возможность прикоснуться к удивительному миру науки. Особые слова признательности И.Л. Фуксман и **В.В. Никонову** за ценные рекомендации в процессе выполнения работы. Огромная благодарность всем сотрудникам лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера за помощь в проведении полевых и аналитических работ, а также сотрудникам аналитической лаборатории Института леса (г. Петрозаводск) за выполнение химического анализа по определению содержания общих фенолов в хвое. Кроме того, данная работа была бы невозможна без постоянной поддержки моих любимых родителей - мамы Гали и папы Лёши, безграничное внимание, участие и понимание которых помогли мне преодолеть все трудности и завершить задуманное.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1

Химический состав и морфометрические характеристики ассимилирующих органов ели и сосны в условиях атмосферного загрязнения

Накопленные в литературе данные о функционировании и состоянии хвойных пород в условиях промышленного воздушного неоднозначны. Влияние атмосферного загрязнения затрагивает различные стороны метаболических реакций хвойных растений. В таких условиях обычно наблюдается повышение содержания элементов, входящих в состав выбросов, которые поступают в растения в результате фоллиарного поглощения (Смит, 1985; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989) и нарушения питательного режима почв (Falkengren-Grerup, 1987; Zoettl et al., 1989; Tomlinson, 1990; Лукина, Никонов, 1998). Содержание таких важнейших элементов питания, как кальций, магний, марганец снижается в процессе их выщелачивание из листьев кислыми осадками (Смит, 1985; Abrahamsen et al., 1976; Galloway, Cowling, 1978; Abrahamsen, 1984; Zoettl, Huettl, 1991). Сведения по изменению содержания азота в зависимости от степени аэротехногенного воздействия противоречивы. В ряде работ отмечается увеличение общего и белкового азота в условиях загрязнения (Кудашова, 1998; Теребова, 2002), другие, напротив, указывают на снижение концентрации белкового азота и одновременное увеличение доли небелкового азота в хвое (Рожков, Михайлова, 1989; Михайлова и др., 1998, 2000). В многочисленных работах по изучению элементного состава хвои рассматривается изменение концентраций макроэлементов и некоторых тяжелых металлов, преобладающих в составе выбросов, тогда как концентрации широкого ряда рассеянных элементов остаются малоизученными.

В условиях аэротехногенного воздействия происходит усиление синтеза фенольных соединений в ассимилирующих органах. Это отмечалось как в отношении воздушного загрязнения в полевых (Фуксман и др., 1999, 2001) и камеральных (Giertych, Karolewski, 1993) условиях при исследованиях сернистого ангидрида, так и при поражении деревьев грибной микрофлорой (Giertych, Karolewski, 1999). Тем не менее, имеются лишь немногочисленные данные о содержании фенолов в ассимилирующих органах хвойных деревьев на Кольском полуострове. И.Л.Фуксман (1998) рассматривала особенности содержания фенолов в хвое сосны обыкновенной. Литературных данных о содержании фенолов в хвое ели на Кольском полуострове в условиях воздушного промышленного загрязнения к настоящему времени нет.

В условиях загрязнения наблюдается изменение морфометрических характеристик, продолжительности жизни ассимилирующих органов, возростание

доли поврежденной хвои и др. (Цветков и др., 1994; Алексеев, Лянгузова, 1990; Ярмишко, 1997).

Представляет интерес изучение изменения минерального состава и морфометрических характеристик хвои на побегах разного порядка ветвления, поскольку к настоящему моменту такие исследования не проводились.

Воздушное промышленное загрязнение оказывает существенное влияние на состояние хвойных пород. Информативными показателями состояния древесных растений являются параметры минерального питания, ростовых процессов и синтеза вторичных метаболитов. Согласно современным гипотезам (Loomis, 1932; Lorio, 1986, 1988; Bryant et al., 1983; Herms, Mattson, 1992), процессы роста доминируют над синтезом вторичных метаболитов при благоприятных для роста растений условиях. Важным представляется поиск взаимосвязей между уровнями аккумуляции элементов питания и вторичных метаболитов в растениях и изменением показателей их роста в условиях воздушного промышленного загрязнения.

Глава 2

Объекты и методы исследований

Объектом исследований послужила ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), формирующая древостой северо-таежных ельников кустарничково-зеленомошных в естественных условиях и в условиях воздушного промышленного загрязнения крупнейшим на Севере Европы медно-никелевым комбинатом "Североникель". Образцы хвои ели отбирались в 1995 и 2000-2001 гг. на сети постоянных мониторинговых площадей. Исследуемые биогеоценозы находятся на различных стадиях дигрессионной сукцессии, вызванной воздушным промышленным загрязнением: фон (Ф), стадии интенсификации дефолиации (ИД) - 100 км; затухающей дефолиации - 31 (ЗД1) и 28 (ЗД2) км и техногенного редколесья (ТР) - 7 км от комбината, соответственно) (Лукина, Никонов, 1993, 1996). Фоном послужила территория на значительном удалении от источника загрязнения, в юго-западной части Мурманской области.

Образцы хвои ели отбирали на перечисленных объектах в течение вегетационного периода из верхней трети кроны. Общее количество обследованных деревьев на содержание элементов питания и фенолов - 25; на определение морфометрических характеристик - 67. Количество образцов хвои, которые анализировались на содержание элементов минерального питания, составило 585, фенолов - 225. Определение морфометрических характеристик проводилось в 1000 образцах хвои. У хвои определяли максимальную продолжительность жизни, морфометрические характеристики (длина и масса хвоинок в абс.сух.состоянии), классифицировали ассимилирующие органы по степени повреждения (наличие

хлорозов и некрозов). В 1995, 2000 году отбор произведен в конце вегетационного периода (август). Хвоя разобрана по возрастным группам. Целью отбора явилось изучение возрастной динамики и изменений в процессе дигрессионной сукцессии содержания химических элементов и фенолов, а также морфометрических характеристик и степени поврежденности хвои.

В течение следующего вегетационного сезона (2001 год) хвою отбирали в июне, июле и сентябре для изучения внутрисезонной динамики и изменений в процессе дигрессионной сукцессии содержания элементов питания и фенолов. В данном случае хвою разбирали по возрастным классам, учитывая порядок ветвления побега, на котором хвоя функционирует.

Для оценки морфометрических характеристик проведен анализ более 300 тысяч хвоинок. Длину хвои различных возрастных классов измеряли с точностью до 1 мм. Массу 100 и 1000 хвоинок определяли с точностью до 0.01 г. Выделено 4 класса повреждения ассимилирующих органов по степени повреждения: 1 - неповрежденная (площадь повреждения - 0%), 2 - слабая (1-25%), 3 - умеренная (25-75%), 4 - сильная (>75%).

Концентрацию химических элементов и фенолов определяли в хвое, формирующейся на побегах I, II, III, IV и V порядков ветвления. Металлы (Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn) определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии, S, P - колориметрически, C - по методу Тюрина, общий N - по методу Кьельдаля; белковый азот - по методу Любошинского, фенолы - спектрофотометрически по реакции с п-нитроанилином (Александрова, Осипов, 1985). Содержание других элементов определяли с помощью нейтронно-активационного анализа в Дубне. Аналитические методы более детально обсуждены в работах (Лукина, Никонов, 1996, 1998).

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакетов программ "STATISTICA 6.0" и Microsoft Excel 6.0. В работе использован также однофакторный дисперсионный анализ. Определение достоверности различий полученных данных проводилось с помощью F-критерия Фишера. Корреляционный анализ применялся для выявления взаимосвязи между параметрами минерального питания, накоплением фенолов и морфометрическими характеристиками хвои ели сибирской.

Глава 3

Содержание азота и углерода в хвое ели

В природных условиях уровень обеспеченности ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) азотом определяется как дефицитный, что является одной из причин, лимитирующих ростовые процессы. Дефицитным для ели сибирской является уровень ниже <13.0 г/кг (Ingested, 1959; Huettl, 1986). По другим данным

дефицитным является уровень 12-15 г/кг, а при содержании азота <12.0 г/кг ель испытывает сильный дефицит данного элемента (Brackke, 1994; Brackke et al., 1998).

Азот в хвое ели представлен в основном белковой формой. В природных условиях в хвое текущего года и однолетней содержание белкового азота достигает 90-92%; в многолетней хвое - 83-86% от общего содержания азота. Доля небелковой формы азота не превышает 17%.

С увеличением возраста хвои снижается концентрация общего и белкового азота, напротив, повышается содержание небелкового азота. Отношение белкового азота к небелковому достигает максимальных значений в хвое текущего года и однолетней хвое, что свидетельствует о более активном функционировании хвои данных возрастных классов.

Выявлено, что в начале вегетации содержание общего и белкового азота характеризуется минимальными значениями. Относительно низкое содержание N в начале вегетации можно объяснить тем, что значительная часть азота требуется для развития новых органов и тканей и, соответственно, перемещается к зонам роста. При подготовке растений к периоду глубокого покоя содержание N в хвое возрастает за счет белковой формы, накапливаясь в составе резервного фонда.

В процессе депрессионной сукцессии концентрация общего, белкового и небелкового азота изменяется нелинейно (рис.1).

На стадии интенсификации дефолиации концентрация как белкового, так и небелкового азота снижается. На стадии затухающей дефолиации содержание азота либо снижается, либо остается на уровне фоновых значений. В техногенном редколесье наблюдается увеличение концентрации азота. В процессе депрессионной сукцессии происходит увеличение в хвое доли небелкового N, что демонстрируют полученные коэффициенты отношения азота белкового к небелковому (рис.2). Это свидетельствует о повышении эмиссионной нагрузки на растительный организм в связи с задержкой синтеза белковых соединений. Исключением является стадия интенсификации дефолиации, где данное соотношение остается сопоставимым с фоновыми значениями.

В условиях промышленного воздушного загрязнения сохраняются возрастные особенности распределения общего, белкового и небелкового азота, при этом увеличивается небелковая фракция, содержание которой в многолетней хвое на стадии затухающей дефолиации может достигать 22%, в техногенном редколесье - 24%. На стадии интенсификации дефолиации доля небелкового азота не превышает 12%.

МГ КГ⁻¹

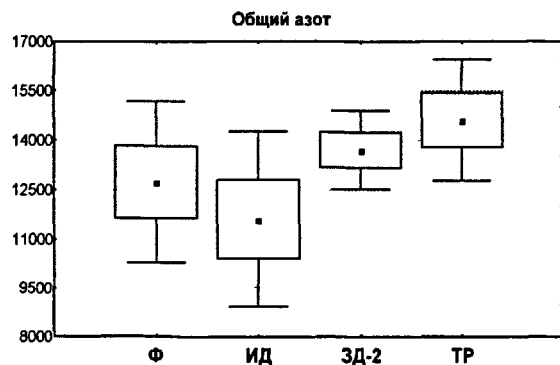
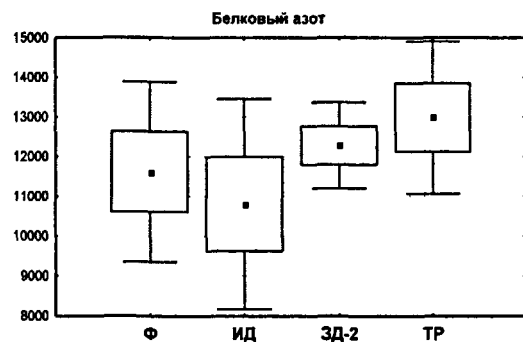
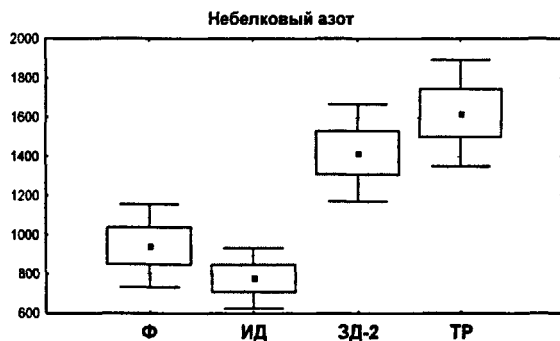


Рис.1. Концентрация азота в однолетней хвое в процессе дигрессионной сукцессии, мг кг⁻¹
Примечание: здесь и на рис.2, 4:

□ - среднее;
 □ - стандартная ошибка;
 I - стандартное отклонение.

Ф - фон; ИД - интенсификация дефолиации;
 ЗД-1 - затухающая дефолиация-1;
 ЗД-2 - затухающая дефолиация-2;
 ТР - техногенное редколесье



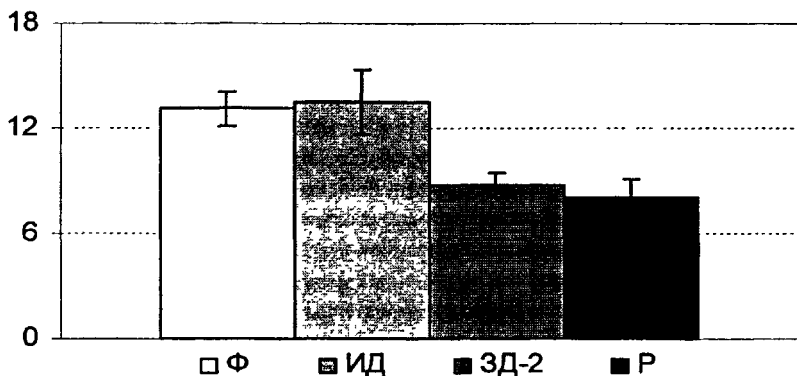


Рис.2. Отношение белкового азота к небелковому в однолетней хвое в процессе дигрессионной сукцессии

В условиях техногенного загрязнения сезонный характер изменений содержания общего азота сходен с природным. Максимальное накопление N в хвое всех возрастных классов отмечено в конце вегетационного периода. Выявленная особенность подтверждает идею о том, что в азотном питании древесных растений большое значение имеет явление буферности, которое основано на их способности к депонированию веществ и использованию этих запасов в тканях в последующие годы (Судницина, 1998). В течение периода вегетации происходит увеличение белкового N, причем как абсолютного, так и относительного содержания. Наиболее активно белковый N накапливается в августе-сентябре.

В процессе дигрессионной сукцессии наблюдается уменьшение относительного запаса азота в ассимилирующих органах ели в связи уменьшением размеров ассимилирующих органов и сокращением числа возрастных классов хвои.

Содержание углерода в природных условиях в хвое ели сибирской не превышает 50% и находится на постоянном уровне, о чем свидетельствует отсутствие ярко выраженной возрастной и внутрисезонной динамики данного элемента.

В условиях сильного атмосферного загрязнения (стадии затухающей дефолиации и техногенного редколесья) содержание углерода в конце вегетации достоверно возрастает и достигает 56-58%, а в начале вегетации сопоставимо с фоном. Изменений в зависимости от возраста хвои не выявлено.

Глава 4

Содержание макро- и микроэлементов в хвое ели в природных условиях

Ель, произрастающую на северном пределе распространения, в соответствии с минеральным составом фотосинтезирующего аппарата, можно отнести к азото-кальцефилам.

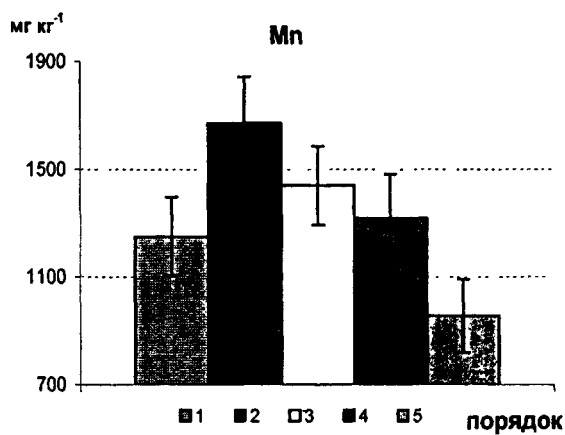
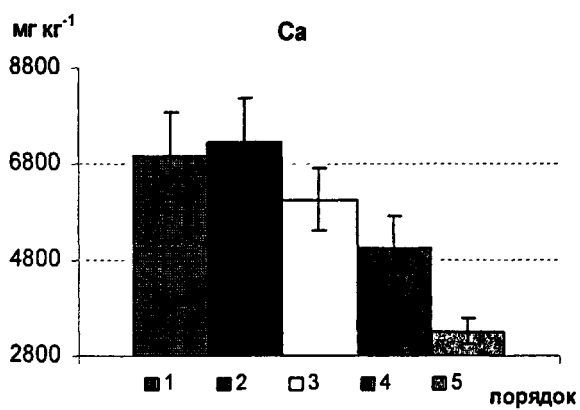
Уровень обеспеченности ели элементами питания оценивалось с использованием классификации Рейнхарда Хюттла (Huettl, 1993). Содержание кальция в хвое ели на Кольском полуострове является оптимальным (>1000 мг/кг в хвое), калия, фосфора и магния определяется как достаточное, хотя в отдельных случаях концентрация фосфора опускается ниже уровня дефицита ($<1.1-1.2$ г/кг). Концентрация в хвое марганца и цинка соответствует уровню, определяемому для однолетней хвои как оптимальный (>20 мг/кг).

Для ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) подтверждены достоверные изменения химического состава хвои с увеличением возраста, которые выражаются в ее обогащении малоподвижными макроэлементами Са и Мп и обеднении подвижными макроэлементами К и Р, а также Mg.

Содержание микроэлементов в хвое также подвержено возрастной изменчивости. С возрастом накапливаются в Al, Cd, Sr, Ba, Br, Sb, As, Au, т.е. их поведение сходно с малоподвижными макроэлементами. Максимальные концентрации Ni, Cu, Rb и Cs отмечены в хвое текущего года. К элементам средней подвижности отнесен Zn, максимальная концентрация которого отмечена в однолетней хвое. Равномерное распределение по возрастным классам хвои характерно для Fe, Sc, Ta, Co, а также лантоноидов и актиноидов.

Концентрация в хвое элементов питания зависит не только от возраста хвои, но и побега: чем выше порядок побега, тем больше в хвое концентрируется подвижных элементов - К и Р, и меньше - малоподвижных Са и Мп (рис.3)

Элементы питания в ассимилирующих органах подвержены внутрисезонной динамике, которая определяется фазой фенологического развития растений. Выявлена тенденция увеличения концентраций элементов в хвое к концу вегетационного периода. Ель сибирская к концу вегетации (сентябрь) накапливает как малоподвижные элементы - Са и Мп, так и подвижные - N, Р, Си, Ni в результате их активного поглощения из почвы. Максимальная концентрация К обнаружена в середине вегетации, к концу вегетации отмечено некоторое снижение его содержания вследствие более активного вымывания данного элемента атмосферными осадками, количество которых в сентябре возрастает. Тенденция аккумуляции элементов к концу вегетации обусловлена подготовкой растения к состоянию зимнего покоя, проявляющегося в накоплении в ассимилирующих органах достаточного количества макро- и микроэлементов для последующего формирования новых органов и тканей.



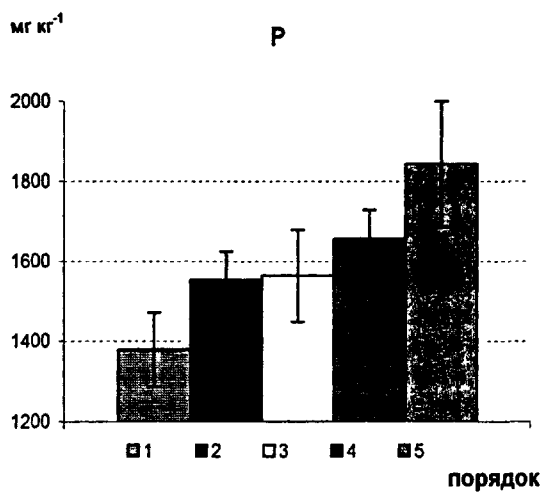
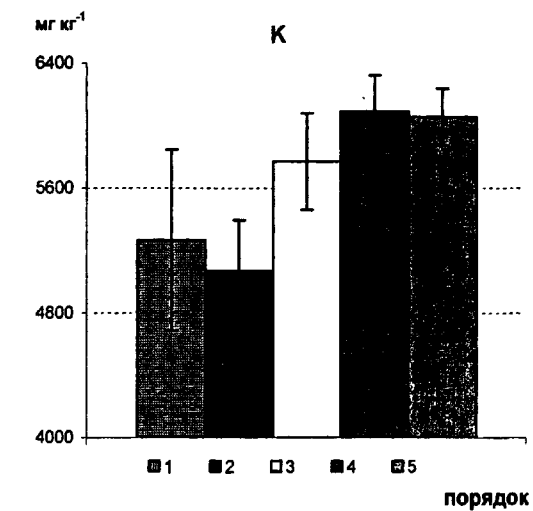


Рис.3. Элементы питания в хвое ели текущего года в зависимости от порядка ветвления побега, мг кг⁻¹

Глава 5

Макро и микроэлементы в хвое ели в процессе дигрессионной сукцессии

В процессе дигрессионной сукцессии азотно-кальциевый тип химического состава хвои ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) сохраняется только на стадии интенсификации дефолиации. На стадии затухающей дефолиации и техногенного редколесья для ассимилирующих органов характерен азотно-калиевый тип распределения элементов питания, поскольку преобладающими в хвое зольными элементами становятся азот и калий.

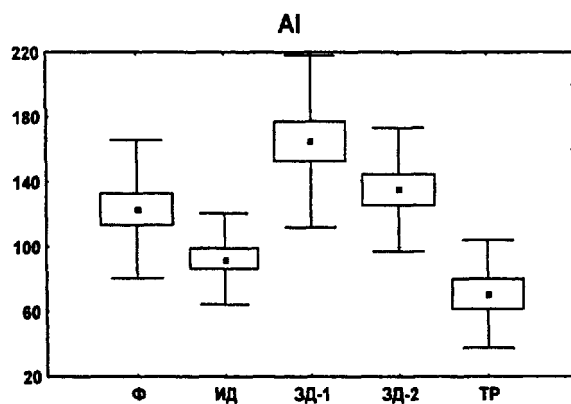
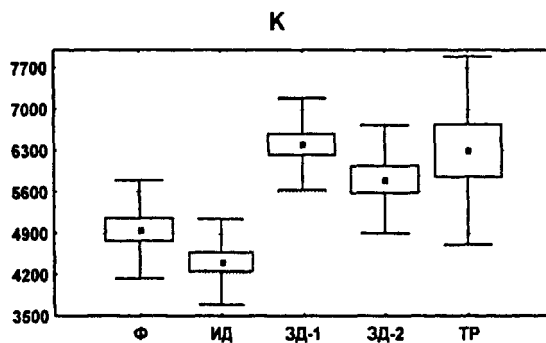
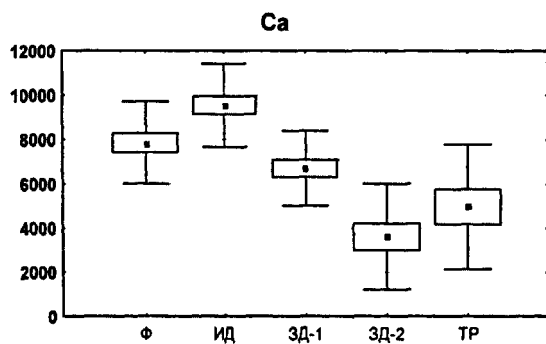
В условиях воздушного промышленного загрязнения для ели сибирской сохраняются возрастные изменения химического состава хвои по мере старения ассимилирующих органов, которые выражаются в ее обогащении малоподвижными элементами (Ca, Al, Mn) и обеднении подвижными элементами (K, P, Mg).

В процессе дигрессионной сукцессии, обусловленной выбросами медно-никелевого комбината, во всех возрастных классах хвои происходит накопление поллютантов - Ni, Si, S, Co, As, Mo, Sb.

В условиях аэротехногенного загрязнения обеспеченность элементами питания ели сибирской нередко находится на уровне дефицита для Ca, Mg, P. Концентрации элементов питания (Ca, Mg, K, P), а также Al, в хвое ели в процессе дигрессионной сукцессии под влиянием комбината цветной металлургии "Североникель" изменяются нелинейно (рис.4), что связано с изменением концентраций элементов в почвах и почвенных водах, а также с проявлением антагонистических взаимоотношений между элементами питания.

На стадии интенсификации дефолиации наблюдается увеличение содержания Ca и Mg, тогда как K, P и Al, напротив, снижается. На стадиях затухающей дефолиации и редколесья происходит обеднение хвои Ca, Mg, Mn и Zn и обогащение K. На стадии редколесья значительно возрастает содержание Fe. На фоне техногенных изменений химического состава хвои сохраняются возрастные особенности распределения элементов.

мг кг⁻¹



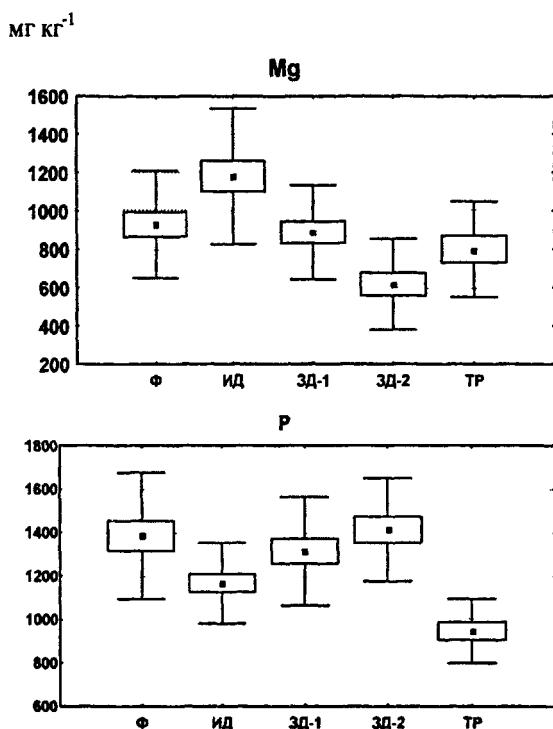
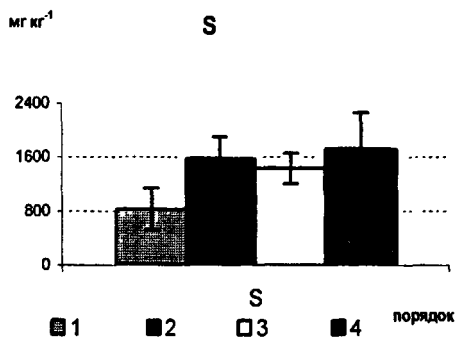
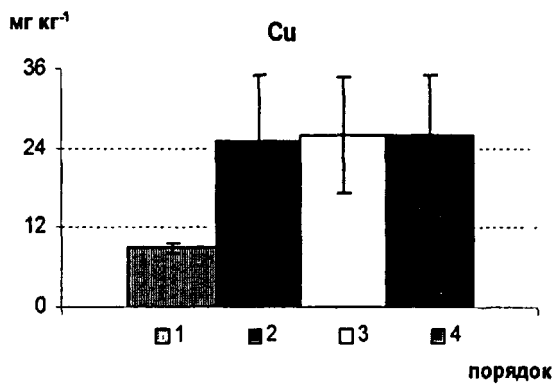
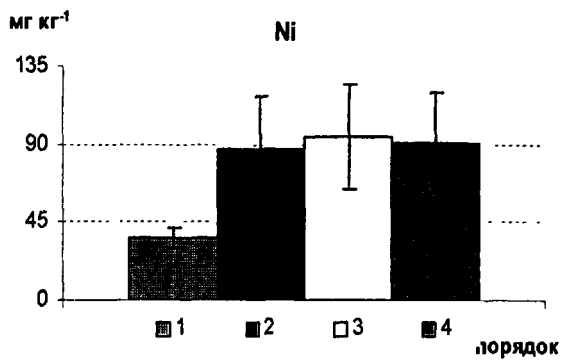


Рис. 4. Концентрация элементов питания в однолетней хвое на разных стадиях дигрессионной сукцессии, мг кг^{-1}

В условиях загрязнения медно-никелевым производством нарушаются природные особенности формирования химического состава ассимилирующих органов в зависимости от порядка побега. На стадии интенсификации дефолиации обнаружено обратное распределение в отношении Са, Мп, К и Р в молодой хвое по сравнению с природными условиями. Увеличение концентрации Са и одновременное снижение содержания в хвое К и Р на данной стадии происходит в результате изменений в химическом составе хвои, расположенной на самых молодых побегах. На стадии редколесья минимальные содержания поллютантов Ni, Cu, Fe, S обнаруживаются в хвое, формирующейся на побегах первого порядка (рис.5). Вероятно, хвоя на побегах более высокого порядка ветвления отличается интенсивным фоллиарным поглощением.



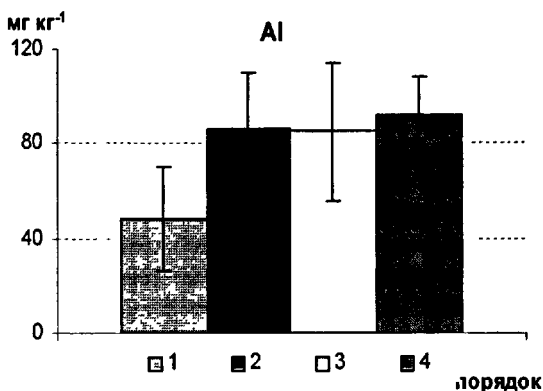


Рис.5. Концентрация Ni, Си, S и Al в хвое ели текущего года на ветвях разного порядка (стадия техногенного редколесья), мг кг⁻¹

В зоне влияния апатито-нефелинового производства хвоя всех возрастных классов обогащается K, P, S, Al, Fe, Ni, Си, Co, Mo, As, Sc, Ga, Sr, Ba, лантаноидами и актиноидами, входящими в состав отходов.

Глава 6

Содержание фенолов в хвое ели

В природных условиях содержание фенолов увеличивалось с возрастом хвои. Достоверные возрастные изменения выявлены в августе и сентябре. Эту особенность связывают со снижением оводненности клеток при их старении и их лигнификации (Giertych et al., 1999). На стадиях депрессионной сукцессии также наблюдаются достоверные изменения в содержании фенолов по мере увеличения возраста хвои, причем эти различия отмечены как в период интенсивного роста хвои (июль), так и в период меньшей активности ассимилирующих органов (сентябрь).

Согласно современным представлениям в условиях загрязнения происходит увеличение концентрации фенолов в ассимилирующих органах древесных растений. Нами выявлено, что в процессе депрессионной сукцессии данная тенденция наблюдается лишь в период активного роста в зоне сильного аэротехногенного загрязнения (стадии затухающей дефолиации и техногенного редколесья). В конце вегетации выявлены нелинейные изменения содержания

фенолов в процессе дигрессионной сукцессии. В августе на стадиях затухающей дефолиации и техногенного редколесья наблюдается достоверное увеличение концентрации фенолов в хвое всех возрастных классов, тогда как на стадии интенсификации дефолиации концентрации фенолов в хвое текущего года и многолетней сопоставимы с фоновыми значениями, а в однолетней отмечается даже некоторое снижение их концентрации. Выявленные изменения в содержании фенолов на стадии интенсификации дефолиации в августе 2000 года подтвердились на основе результатов анализа хвои, отобранной в самом конце вегетационного периода 2001 года (сентябрь) (табл.1). В этот период на данной стадии дигрессионной сукцессии обнаружены достоверное снижение в содержании фенолов для хвои всех возрастных классов по сравнению с фоновыми значениями.

При рассмотрении изменения концентрации фенолов в природных условиях в течение вегетационного периода, максимальное их содержание отмечено в сентябре, в период перехода растений к состоянию зимнего покоя, когда происходит затухание ростовых процессов.

На стадии затухающей дефолиации накопление фенолов происходит также к концу вегетации, тогда как на стадии техногенного редколесья увеличение содержания фенолов происходит к середине вегетационного периода (июль), а в сентябре остается практически на том же уровне.

Таблица 1

Содержание фенолов в хвое ели на разных стадиях дигрессионной сукцессии (% от сухого вещества), август 2000 год и сентябрь 2001 года

Возраст хвои, лет	Стадии дигрессионной сукцессии				
	фон	ИД	ЗД1	ЗД2	ТР
август 2000					
Текущая	2.05±0.21	2.02±0.20	2.18±0.20	1.89±0.18	2.36±0.17
Однолетняя	2.52±0.12	2.42±0.20	2.70±0.15	2.85±0.18	3.18±0.24
Многолетняя	2.80±0.18	2.81±0.23	3.14±0.19	3.32±0.22	3.18±0.25
сентябрь 2001					
Текущая	2.23±0.07	1.22±0.32	н.о.	2.34±0.13	2.28±0.10
Однолетняя	3.05±0.10	1.54±0.14	н.о.	3.14±0.17	3.09±0.13
Многолетняя	3.60±0.17	2.21±0.22	н.о.	3.65±0.25	3.62±0.20

ПРИМЕЧАНИЕ. Н.о. - не определяли

Предполагается, что при нарушении минерального питания значительная часть углеводов расходуется на синтез фенолов, что приводит к увеличению их содержания в хвое. На стадии затухающей дефолиации и техногенного редколесья наблюдается дефицит элементов питания (Са, Mg, P), при этом происходит накопление фенолов. На стадии интенсификации дефолиации обнаруживается активизация ростовых процессов, обусловленная высоким содержанием Са и Mg в ассимилирующих органах, что приводит к снижению концентрации фенолов.

Коэффициенты корреляции подтверждают идею о том, что на накопление фенолов существенное влияние оказывает минеральное питание растений. Выявлена отрицательная корреляционная связь между содержанием фенолов и Mg ($r=-0.636$), K ($r=-0.498$), P ($r=-0.458$), азота общего ($r=-0.556$) и белкового ($r=-0.637$) (при $n=30$; $p<0.05$). Напротив, наблюдается положительная корреляционная связь между содержанием фенолов и небелкового азота ($r=0.504$), косвенно свидетельствуя о том, что процессы синтеза фенолов и белков конкурируют между собой за исходное "сырье" - углеводы.

Глава 7

Морфометрические характеристики хвои ели

В природных условиях в ельниках кустарничково-зеленомошных Кольского полуострова хвоя ели сохраняется 8-13 лет. Количество возрастных классов хвои связано с порядками ветвления побега, количество которых не превышает 5. Максимального возраста достигает хвоя на побегах I и II порядков, минимального - на побегах V порядка. Средний возраст хвои на побегах I порядка составляет 10.1 ± 2.3 лет; на побегах II порядка - **10.7 ± 1.8** лет. Незначительно снижается количество возрастных классов на побегах III порядка ветвления, и средний возраст хвои составляет 8.7 ± 1.9 лет. На побегах IV и V порядка возраст хвои существенно снижается. Средний возраст хвои на побегах IV порядка составляет 5.5 ± 2.2 лет, что в 2 раза ниже, чем на побегах I и II порядка. На самых молодых побегах V порядка средний возраст хвои не превышает 1.7-10.7 лет.

Основная масса хвои в природных условиях не имеет признаков повреждения. Доля хвои, затронутой хлорозами и некрозами, не превышает 11%. Поврежденность ассимилирующих органов зависит как от возраста хвои, так и от возраста побега. Наиболее поврежденной оказывалась хвоя последних лет жизни - 16 % от общего количества. На самых молодых побегах V порядка ветвления практически вся хвоя являлась здоровой, и поврежденность не превышала 3 % от общего числа хвоинок. На ветвях I порядка, напротив, отмечено в 4 раза больше поврежденных хвоинок.

Изменение морфометрических характеристик (длина и масса) хвои обусловлено как возрастом хвои, так и побегом. В ельниках кустарничково-зеленомошных средняя длина хвои составляет 11.6 ± 0.05 мм, причем минимальное наблюдаемое значение не превышало 3 мм, максимальное - 21 мм. Длина и масса хвои достоверно возрастала по мере старения хвои и побегов.

Для описания морфометрических характеристик ассимилирующих органов предложен коэффициент роста, представляющий собой отношение массы 1 хвоинки к ее длине. Полученные коэффициенты наглядно демонстрируют, что в природных условиях относительная масса значительно возрастает с возрастом хвои и побегом (табл. 2).

На начальных стадиях дигрессионной сукцессии (стадия интенсификации дефолиации) продолжительность жизни хвои сопоставима с фоновыми значениями. На стадиях затухающей дефолиации и техногенного редколесья данный показатель значительно снижается (число возрастных классов сокращается до 2 раз), происходит также уменьшение порядков ветвления побега: отсутствуют побеги V порядка ветвления.

Таблица 2

Коэффициент роста хвои ели в фоновых условиях

Порядок побега	Возрастной класс хвои, лет								
	текущий	1	2	3	4	5	6	7	8 и более
I	0.49	0.53	0.59	0.60	0.60	0.55	0.59	0.56	0.65
II	0.45	0.46	0.52	0.53	0.53	0.54	0.52	0.53	0.51
III	0.39	0.41	0.45	0.46	0.48	0.55	0.52	0.48	0.55
IV	0.39	0.39	0.42	0.45	0.48	0.43	-	-	-
V	0.33	0.35	0.35	-	-	-	-	-	-
среднее	0.41	0.43	0.47	0.51	0.52	0.52	0.54	0.52	0.57

ПРИМЕЧАНИЕ. Прочерк - хвоя отсутствует

В условиях воздушного промышленного загрязнения увеличивается доля ассимилирующих органов, относящихся к 4 классу повреждения (площадь повреждения затрагивает более 75% поверхности хвоинки). На последних стадиях сукцессии доля поврежденной хвои увеличивается в 1.5 раза.

В процессе дигрессионной сукцессии морфометрические характеристики хвои изменяются нелинейно. На начальных стадиях сукцессии длина и масса ассимилирующих органов увеличивается. На следующих стадиях (стадия затухающей дефолиации и техногенного редколесья) наблюдается, напротив, уменьшение длины и массы ассимилирующих органов.

При этом сохраняются закономерности изменения морфометрических показателей в зависимости от возраста хвои и порядка ветвления побега. Гистограммы частот свидетельствуют о том, что в природных условиях модальный класс составляет хвоя с длиной 10-12 мм, в то время как на стадии интенсификации дефолиации увеличивается доля хвои длиной от 12 до 14 мм. На стадии затухающей дефолиации и техногенного редколесья модальный класс для однолетней хвои составляет хвоя с длиной от 8 до 10 мм (рис.6).

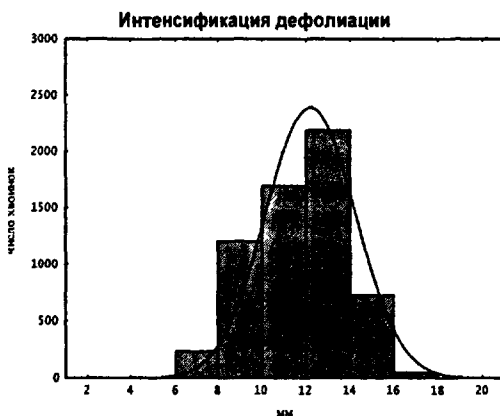
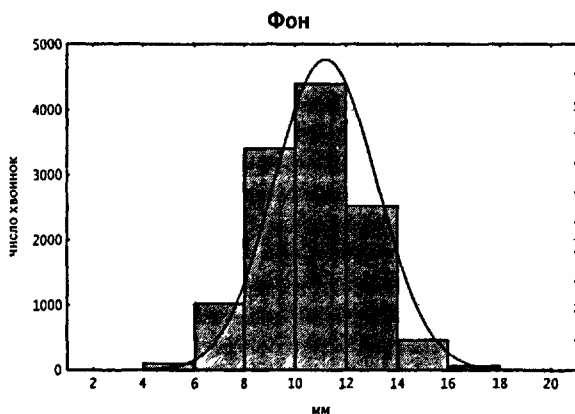




Рис.6. Гистограммы частот длины однолетней хвои ели на разных стадиях дигрессионной сукцессии

При оценке жизненного состояния хвойных пород информативным является коэффициент роста, который представляет собой отношение массы хвои к ее длине.

В природных условиях наблюдается положительная корреляционная связь между морфометрическими характеристиками ели и содержанием в ней азота. Для однолетней хвои коэффициенты корреляции между содержанием общего, белкового и небелкового азота в хвое и ее длиной составляют $r=0.836$; 0.815 и 0.842 , а массой - $r=0.786$; 0.781 и 0.693 соответственно (при $n=30$; $p<0.01$). Напротив, на стадии интенсификации дефолиации выявлена отрицательная связь между морфометрическими показателями и содержанием общего и белкового азота. Коэффициенты корреляции между содержанием общего и белкового азота и длиной хвои составляют $r=-0.585$ и -0.590 , массой - $r=-0.569$ и -0.607 соответственно (при $n=30$; $p<0.01$). Можно предположить, что отрицательная корреляционная связь на данной стадии связана с "эффектом разбавления", когда концентрация азота определяется размерами ассимилирующих органов. Выявлено, что на данной стадии длина и масса хвои больше, чем в фоновых условиях. Несмотря на то, что содержание азота несколько ниже фоновых значений, возрастает доступность других элементов питания - Ca и Mg, что может обуславливать интенсификацию ростовых процессов и приводить к увеличению длины и массы ассимилирующих органов. На данной стадии дигрессионной сукцессии обнаруживается положительная корреляционная связь между массой хвои и содержанием в ней Ca ($r=0.457$) и Mg ($r=0.562$) (при $n=30$; $p<0.05$). На стадии техногенного редколесья концентрации Ca значительно снижаются, а Mg опускаются ниже

уровня дефицита, при этом содержание фенолов значительно возрастает, а длина и масса хвои снижаются. Таким образом, Са и Mg наряду с N во многом определяют интенсивность протекания ростовых процессов.

Выводы

1. Содержание элементов минерального питания и фенолов в хвое ели сибирской характеризуются как возрастными и внутрисезонными изменениями, так и стадией дигрессионной сукцессии лесов.

2. В природных условиях с возрастом в хвое накапливаются малоподвижные элементы (Са, Mn, Al, Cd, Sr, Ba, Br, Sb, Ai) и снижается концентрация подвижных элементов питания (N, K, P, Ni, Cu, Rb, Cs). Относительно равномерное распределение характерно для Sc, Ta, Co, а также лантоноидов и актиноидов. Концентрация в хвое элементов питания зависит также от возраста побега: чем выше порядок побега, тем больше в хвое концентрируется подвижных элементов - K и P, и меньше - малоподвижных Са и Мп. С возрастом в хвое накапливаются фенолы.

3. К концу вегетационного периода в хвое повышается концентрация всех элементов питания, что является необходимым условием для формирования новых органов и тканей, а также увеличивается содержание фенолов, выполняющих защитную функцию при подготовке растений к периоду низких температур.

4. В природных условиях морфометрические характеристики (длина и масса) хвои возрастают по мере старения хвои и побегов.

5. В условиях атмосферного загрязнения сохраняются возрастные особенности изменения содержания элементов минерального питания и фенолов по мере старения ассимилирующих органов, но нарушаются природные закономерности распределения элементов питания в ассимилирующих органах на побегах разного возраста.

6. В условиях воздушного промышленного загрязнения существенных изменений во внутрисезонной динамике элементов питания не происходит. К концу вегетации их содержание в ассимилирующих органах, как правило, возрастает. Накопление фенолов на стадии затухающей дефолиации наблюдается к концу вегетационного периода, а на стадии техногенного редколесья увеличение концентрации фенолов происходит к середине вегетации (июль).

7. В процессе дигрессионной сукцессии концентрации элементов питания (N, Са, Mg, K, P, Al) и фенолов в хвое изменяются нелинейно. На начальной стадии дигрессии (стадия интенсификации дефолиации) наблюдается увеличение содержания Са и Mg, тогда как N, K, P и Al, напротив, снижается. На следующих стадиях (стадии затухающей дефолиации и редколесья) происходит обеднение хвои Са, Mg, Mn и Zn и увеличение концентрации K. На стадии

интенсификации дефолиации концентрации фенолов в хвое снижаются, а на стадиях затухающей дефолиации и редколесья, напротив, увеличиваются.

8. В процессе депрессионной сукцессии наблюдается увеличение доли небелкового азота в хвое, что свидетельствует о задержке синтеза белковых соединений.

9. В процессе депрессионной сукцессии наблюдается нелинейная изменчивость морфометрических характеристик хвои ели. На стадии интенсификации дефолиации длина и масса достоверно больше, чем в фоновых условиях. На последующих стадиях происходит снижение этих характеристик продукционного процесса. Сохраняются природные особенности изменения морфометрических характеристик с увеличением возраста хвои и побега.

10. Для описания изменения морфометрических характеристик ассимилирующих органов ели предложен коэффициент роста, рассчитываемый как отношение массы хвои к ее длине. Наименьшую относительную массу имеют хвоя текущего года и однолетняя хвоя на последних стадиях депрессионной сукцессии (стадия техногенного редколесья).

11. Минеральное питание ели сибирской оказывает значительное влияние на показатели ростовых процессов и накопление в хвое фенолов. При высоком содержании в хвое элементов питания увеличивается длина и масса ассимилирующих органов и одновременно происходит снижение содержания в ней фенолов (стадия интенсификации дефолиации). При снижении концентрации элементов питания в хвое ниже уровня дефицита (Ca и Mg), наблюдается обратная зависимость: размеры хвои уменьшаются, и усиливается синтез вторичных метаболитов (стадия затухающей дефолиации и техногенного редколесья).

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Сухарева Т.А. Влияние аэротехногенного загрязнения на длину хвои ели на Колском полуострове // III-научная конференция (Апатиты, 5-6 апреля 2000 г.). Тезисы докладов. - Апатиты, КФПetrГУ, 2000. - С.46.
2. Сухарева Т.А. Морфометрические характеристики хвои ели // IV-научная конференция (Апатиты, 12-13 апреля 2001 г.). Тезисы докладов. - Апатиты, КФПetrГУ, 2001. - С.43-44.
3. Сухарева Т.А. Содержание фенолов в хвое ели на разных стадиях техногенной трансформации // Второй политехнический симпозиум "Молодые ученые - промышленности Северо-Западного региона". Материалы конференции "Охрана окружающей среды" (7 декабря 2001 г.). СПб., 2001. - С.41.
4. Сухарева Т.А. Биохимические нарушения в хвое ели (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях техногенного стресса // V-научная конференция (Апатиты, 11-12 апреля 2002 г.). Тезисы докладов. - Апатиты, КФПetrГУ, 2002. - С.66-67.

5. Сухарева ТА Биохимические и морфологические показатели как индикаторы стрессового состояния хвойных деревьев // Естественные научные проблемы Арктического региона Тезисы докладов III-региональной научной конференции (Мурманск, 23-25 апреля 2002 г.). - Мурманск: Изд-во ПГИ, 2002. - С.38-39.
6. Сухарева Т.А. Особенности поглощения макро- и микроэлементов елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на Кольском полуострове // Кольский полуостров на пороге третьего тысячелетия. Проблемы экологии (сборник статей) / Под ред. НА Кашулина и О.И. Вандыш - Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2003. - С.151-158.
7. Сухарева ТА Динамика содержания фенолов в хвое ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях воздушного промышленного загрязнения на Кольском полуострове // VI научно-практическая конференция (Апатиты, 17-18 апреля 2003 года). Тезисы докладов. 4.1. - Апатиты: КФ Петр ГУ, 2003. - С.75-76.
8. Сухарева ТА. Особенности поглощения макро- и микроэлементов елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в процессе деградиционной сукцессии на Кольском полуострове // Экология 2003. Тезисы международной молодежной конференции (Архангельск, 17-19 июня 2003 года) / Под ред. Ф.Н. Юдахин. - Архангельск: Ин-т экологических проблем Севера УрО РАН, 2003. - С.71-72.
9. Сухарева ТА. Содержание элементов минерального питания и фенолов в хвое ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на Кольском полуострове в условиях техногенного стресса // Современные методы эколого-геохимической оценки состояния и изменений окружающей среды: Тезисы Международной Школы (Новороссийск, 15-20 сентября 2003 года). - Новороссийск: Научно-исследовательский ин-т Геохимии биосферы РГУ, 2003. - С.77.
- Ю. Сухарева ТА. Состояние ассимиляционного аппарата ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях техногенного загрязнения // Сбалансированное природопользование на примере освоения минеральных ресурсов. Сборник докладов. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. - С. 191-195.
11. Сухарева ТА. Элементный состав хвои ели (*Picea obovata* Ledeb.) в зависимости от порядка ветвления побега на Кольском полуострове // VII научная конференция (Апатиты, 15-16 апреля 2004 года). Тезисы докладов. Ч.1. - Апатиты: КФ Петр ГУ, 2004. - С.49-50.
12. Сухарева ТА., Лукина Н.В. Химический состав и морфометрические характеристики хвои ели сибирской на Кольском полуострове в процессе деградиционной сукцессии лесов // Лесоведение. - 2004. - № 2. - С.36-43.
13. Сухарева ТА. Элементы минерального питания в хвое ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на Кольском полуострове // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Тезисы международной конференции (Апатиты, 31 августа - 3 сентября 2004). 4.2 / Под ред. Г.А. Евдокимовой, О.И. Вандыш. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. - С.92-93.

Автореферат

СУХАРЕВА Татьяна Алексеевна

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ХВОИ ЕЛИ СИБИРСКОЙ
В УСЛОВИЯХ ВОЗДУШНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

Технический редактор ВА.Ганичев

Лицензия ПД 00801 от 06 октября 2000 г.

Подписано к печати 20.09.2004

Формат бумаги 60х84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times/Cyrillic

Уч.-издл. 1.53. Заказ № 47. Тираж 100 экз.

Российская Академия Наук

Ордена Ленина Кольский научный центр им.С.М.Кирова
184209, Апатиты, Мурманская область, ул.Ферсмана, 14

№ 18 96 1

РНБ Русский фонд

2005-4
15790