

Российская академия наук  
Уральское отделение  
Институт экологических проблем Севера

На правах рукописи

Прожерина Надежда Александровна

МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ  
ХВОЙНЫХ В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
(НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА)

03.00.16 – «Экология»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научные руководители:

доктор биологических наук, профессор

кандидат сельскохозяйственных наук

Ярмишко В.Т.

Тарханов С.Н.

Архангельск

2001

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях все возрастающего воздействия человеческой деятельности на окружающую среду своевременное обнаружение нарушений и загрязнений биосферы приобрело огромное значение. Проблема контроля за состоянием наземных экосистем затрагивает и Архангельскую промышленную агломерацию, где на сравнительно небольшой территории расположены три индустриально развитых центра – города Архангельск, Северодвинск и Новодвинск, являющиеся мощными источниками загрязнения атмосферы.

Экосистемы Севера отличаются особой уязвимостью, малой устойчивостью к внешним воздействиям, пониженной способностью к самовосстановлению и к самоочищению от загрязнений вследствие суровых природно-климатических условий. В качестве диагностического критерия состояния лесных экосистем наиболее перспективным можно считать метод биоиндикации (Судачкова и др., 1997; Ярмишко, 1997; Шебалова, Бабушкина, 1999). Своевременная защита лесных экосистем предусматривает выявление механизмов воздействия загрязнения еще до развития необратимых изменений. Для этого целесообразно использовать сочетание методов химического мониторинга, морфометрической оценки состояния деревьев с физиолого-биохимическими методами ранней диагностики повреждений.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований было изучить влияние атмосферных выбросов предприятий Архангельского промышленного узла на изменение морфологических, физиологических и биохимических параметров хвойных и выявить наиболее информативные признаки диагностики состояния сосны и ели.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- оценить уровень накопления серы и тяжелых металлов в различных компонентах лесных экосистем (лесной подстилке, хвое и лишайниках) района исследования;
- оценить степень воздействия поллютантов на изменения морфометрических характеристик хвои и побегов сосны и ели;
- определить ответную реакцию физиолого-биохимических процессов хвойных на увеличение степени техногенной нагрузки;
- изучить возрастные и сезонные особенности реакции растений на воздействие фитотоксикантов;

– установить наиболее информативные биоиндикационные признаки состояния хвойных, позволяющих проводить раннюю диагностику повреждения растений.

**Научная новизна.** Впервые установлены зависимости между морфометрическими параметрами хвои и побегов сосны и ели, физиолого-биохимическими характеристиками ассимиляционного аппарата хвойных и уровнем загрязнения лесных экосистем в зоне воздействия аэротехногенных выбросов Архангельского промышленного узла. Дана оценка уровня содержания серы и тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn, Cu, Hg) в различных компонентах лесных экосистем. Впервые для северной подзоны тайги Архангельской области использованы физиолого-биохимические методы ранней диагностики состояния растений. Определены возрастные и сезонные особенности реакции хвойных на воздействие фитотоксикантов. На основе полученных данных выявлена группа наиболее информативных биоиндикационных признаков состояния растений в условиях хронического воздействия низких доз поллютантов.

**Практическая значимость.** Разработанная система ранней диагностики может быть использована для экспресс-анализа состояния деревьев и древостоев сосны и ели, для проведения фонового и импактного мониторинга по оценке состояния окружающей среды. Установленные биоиндикационные критерии позволяют проводить экологическое нормирование в условиях хронического воздействия низких доз поллютантов. Отдельные разделы работы могут быть использованы для чтения лекций и проведения практических занятий со студентами.

**Степень обоснованности и достоверность результатов исследований** базируются на значительном экспериментальном материале (заложено 70 постоянных и временных пробных площадей, выполнено 22000 морфометрических измерений хвои, 4400 определений массы хвои, 2000 определений пигментов хвои, 930 определений активности пероксидазы, 530 определений уровня рН гомогената хвои и др.) и согласованностью разноплановых результатов – морфометрических, химических и физиолого-биохимических исследований, обработанных статистически с применением методов математического анализа.

**Организация исследований.** Работа выполнена в лаборатории экологической биологии Института экологических проблем Севера УрО РАН в рамках госбюджетных тем: 01.95. 0.0 04396 «Изучение состояния и биоиндикация загрязнений наземных и водных экосистем устьевой области Северной Двины» и

01.200.1 12255 «Внутривидовая изменчивость хвойных и изучение состояния лесорастительных сообществ в условиях загрязнения атмосферы Северо-Двинского бассейна».

**Личный вклад автора.** Автором определены цель и задачи, подготовлена программа исследований, выполнены работы по планированию, выбору и обоснованию методов. Сбор полевого материала проведен совместно с сотрудниками лаборатории экологической биологии Института экологических проблем Севера УрО РАН при непосредственном участии и под руководством автора. Автором лично проведен весь комплекс экспериментальных работ по морфометрическим и физиолого-биохимическим исследованиям, выполнена математическая обработка, анализ и обобщение полученных результатов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены на X Ломоносовских чтениях (Архангельск, 1998), Международной конференции «Геодинамика и геоэкология» (Архангельск, 1999), Международной конференции «Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура» (Архангельск, 2000), Всероссийском совещании «Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды» (Иркутск, 2000), Международной молодежной конференции «Леса Евразии в III тысячелетии» (Москва, 2001), Международном молодежном экологическом форуме стран Баренц-региона (Архангельск, 2001), XI Международном симпозиуме по биоиндикаторам «Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга» (Сыктывкар, 2001), Международной конференции «Актуальные вопросы экологической физиологии растений в 21 веке» (Сыктывкар, 2001).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 243 наименования, 48 из которых на иностранных языках, приложения, включающего 20 таблиц. Работа изложена на 162 стр. машинописного текста, содержит 21 таблицу, 25 рисунков.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность д.б.н. В.Т. Ярмишко В.Т. и к.с-х.н. С.Н. Тарханову за общее руководство, сотрудникам лаборатории экологической биологии ИЭПС УрО РАН за содействие и помощь в сборе и обработке полевого материала. Особая признательность д.с-х.н. Е.Н. Наквасиной и к.б.н. Г.А. Кононюк за консультации и оказание всесторонней поддержки при подготовке диссертации, к.б.н. В.В. Горшкову за консультации и помощь при проведении статистической обработки материала.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Основными аэротехногенными токсикантами, воздействующими на лесные экосистемы являются соединения серы и тяжелых металлов, повышенное содержание которых в атмосфере приводит к увеличению содержания поллютантов в фитоценозах (Лянгузова, 1990; Лукина, Никонов, 1993; Лукина, 1996; Никонов, Копцик, 1999; Михайлова, Бережная, 2000; Sutinen, Raitio, 2000).

Считается, что визуально наблюдаемые признаки повреждения побегов и хвои, такие как развитие хлорозов и некрозов хвои, снижение ее линейных параметров, сухого веса, изреживание крон древостоев могут служить надежными информативными показателями воздействия аэротехногенного загрязнения (Шуберт, 1988; Крючков, Макарова, 1989; Алексеев, Лянгузова, 1990; Цветков, 1991, 1996; Ярмишко, 1990, 1997; Бобкова и др., 1997).

Для проведения ранней диагностики повреждения растений атмосферными выбросами целесообразно использование сочетания глазомерных и морфометрических методов биоиндикации с тонкими инструментальными методами (Игамербердиев, 1994; Николаевский 1996, 1999; Судачкова и др., 1997; Ярмишко, 1994, 1997; Шавнин и др., 1999; Шебалова, Бабушкина, 1999). В качестве физиолого-биохимических критериев биоиндикации состояния растений в условиях техногенного загрязнения используют состояние пигментного комплекса (Ферафонов, 1988; Кривошеева и др., 1991; Кирпичникова и др., 1995; Тужилкина и др., 1998), содержание фенольных соединений (Frucht et al., 1994; Karolewski, Giertych, 1995; Фуксман и др., 1997, 2000), содержание свободных аминокислот (Массель и др., 1988, 1989; Иванова, Худаир, 1992; Фуксман и др., 1998; Ferreira et al., 1998), уровень активности окислительных ферментов (Keller, 1974; Рачковская, Ким, 1980; Сергейчик, Сергейчик, 1996; Коршиков, 1996; Roitto et al., 1999; Николаевский, 1999), изменения характеристик водного режима растений (Кулагин, 1974; Тарабрин, 1980; Кайбияйнен и др., 1995; Сенькина, 1999), деградация восков на поверхности листьев (Huttunen, Laine, 1983; Kim, Lee, 1990; Cape, Percy, 1998; Trimbacher, Weiss, 1999).

Значительные работы по оценке и прогнозу опасности техногенного загрязнений лесных экосистем в Северо-Западном регионе России проводятся на Кольском полуострове (Крючков, Макарова, 1989; Цветков, 1991; Лукина, Никонов, 1993; Ярмишко, 1997). В Архангельской области опыт проведения

подобных исследований почти отсутствует, имеются лишь фрагментарные сведения, касающиеся отдельных оценок состояния древостоев в условиях аэротехногенного загрязнения (Цветков, 1994, 1996; Салтыков и др., 1997; Бызова, 1991; Надеин, Тарханов, Лобанова, 1998, 1999, 2000). Требуется разработка системы диагностических критериев изучения состояния лесных экосистем в условиях хронического воздействия атмосферных фитотоксикантов в данном регионе, которая позволила бы проводить комплексную оценку состояния лесных сообществ.

## **Глава 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследования проводили на территории Архангельской промышленной агломерации, объединяющей города Архангельск, Новодвинск, Северодвинск и прилегающие к ним окрестности. Контрольные участки закладывались в фоновом районе – охранной зоне государственного заповедника «Пинежский». Район исследования расположен в таежной зоне Архангельской области и приурочен к северной подзоне тайги.

На основании литературных данных приведено описание рельефа, климата, почв и растительности исследуемого района.

Дана характеристика состояния атмосферного воздуха Архангельского промышленного узла. Основными источниками загрязнения атмосферы в районе исследования являются крупные предприятия лесопромышленного комплекса: Архангельский и Соломбальский целлюлозно-бумажные комбинаты, Архангельский гидролизный завод, Центр атомного судостроения в г. Северодвинске, объекты топливно-энергетического комплекса, включая мощные тепловые электроцентрали. Среди атмосферных выбросов предприятий Архангельской промышленной агломерации преобладают оксиды серы, азота и углерода, сероводород, органические соединения серы, неорганическая пыль.

Основными объектами исследований являлись главные лесообразующие породы северной подзоны тайги: ель (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* Ledeb.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), подверженные хроническому воздействию атмосферных выбросов предприятий Архангельской промышленной агломерации.

Изучение и оценка воздействия атмосферного загрязнения на состояние сосны и ели проводились на постоянных и временных пробных площадях (ПП). Всего было заложено 70 пробных площадей, которые располагались в различных условиях аэротехногенной нагрузки. При закладке и изучении пробных площадей

руководствовались общепринятыми методиками (Сукачев, 1957; Анучин, 1982; Антропогенная динамика..., 1995). Исследования проводились в 1998-2000 гг.

Согласно поставленной цели и задачам исследования программа работ предусматривала использование сочетания лесоводственно-геоботанических, морфометрических, химических и физиолого-биохимических методов исследования.

Морфологическое состояние фотосинтетического аппарата сосны и ели изучали на каждой пробной площади на 20 модельных деревьях, у которых определяли предельную продолжительность жизни хвои, длину хвои, количество хвои на 1 см длины побега, массу 10 хвоинок в абс. сух. состоянии у 1-3-летних побегов, проводили описание общего состояния хвои (наличие хлорозов и некрозов).

Сезонную динамику пластидных пигментов, уровня рН гомогената хвои, свободного пролина и активности пероксидазы изучали на постоянных пробных площадях в 1999 и 2000 гг. С 20 модельных деревьев в период с мая по октябрь с южной стороны нижней части кроны отбирали образцы хвои не реже одного раза в месяц, а в период активного роста – подекадно.

Спектрофотометрически определяли содержание в хвое фотосинтетических пигментов (Шлык, 1971), активность пероксидазы по скорости окисления бензидина (Бояркин, 1951), содержание свободного пролина с использованием нингидринового реактива (Bates, Waldren, 1973), суммарное содержание фенольных соединений по реакции с п-нитроанилином (Александрова, Осипов, 1985), концентрацию серы в растительности путем перевода ее в сульфатную форму и осаждением хлористым барием (Ринькис и др., 1987). Валовое содержание тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu) определяли методом атомно-адсорбционной спектроскопии распылением и атомизацией раствора в пламени на спектрофотометре «Спектр-5» (Методические рекомендации..., 1986; Методика выполнения..., 1990), содержание ртути определяли на анализаторе ртути «Юлия-2» (Непламенный атомно-адсорбционный метод..., 1990).

Водный режим хвои характеризовали по следующим показателям: общее содержание воды (термовесовым способом), реальный водный дефицит (Бобровская, 1971), водоудерживающая способность хвои по динамике водоотдачи изолированной хвои. Уровень рН гомогената хвои определяли на комбинированном рН-метре – милливольтметре – рН-150.

Состояние эпикутикулярного воска хвои сосны изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (JEOL JSM-35). Структурные и

количественные изменения воскового покрова хвои классифицировали по Ylimartimo et al. (1994).

В работе использованы данные расчета пространственного загрязнения и компьютерные карты полей рассеивания, выполненные сотрудниками ИЭПС УрО РАН по «Методике расчета концентраций...» (1987) с применением унифицированной программы расчета загрязнения атмосферы «Эколог».

Все данные исследований обработаны статистически (Леонтьев, 1966) с применением корреляционного, регрессионного и однофакторного дисперсионного анализов, метода непараметрического сравнения выборок при помощи критерия Колмогорова – Смирнова с использованием программ Excel 7.0 и Statgraphics Plus 3.0.

### **Глава 3. СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТАХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

Проведенный анализ содержания поллютантов в хвое сосны и ели, таллеме эпифитного лишайника *Hypogimnia physodes* L. и лесной подстилке показал, что близость к источникам выбросов в районе Архангельского промышленного узла привела к увеличению накопления серы в изученных компонентах фитоценозов, содержание которой положительно коррелировало с расстоянием до источников выбросов (табл. 1) и данными расчета концентрации серосодержащих эмиссий в атмосфере.

На рассматриваемой территории, где отсутствуют металлургические и горнообогатительные производства, нет заметных выбросов тяжелых металлов. Вследствие этого, уровень загрязнения атмосферы этими компонентами невысок. Нами не выявлено четких пространственных закономерностей в распределении тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn, Cu, Hg) в изученных компонентах экосистем.

Изучены особенности накопления поллютантов в разновозрастной хвое и в хвое подроста и древостоя сосны и ели. В хвое текущего года формирования и однолетней хвое сосны и ели содержалось больше серы, чем в двух- и трехлетней хвое (октябрь 2000 г.), что может быть связано с активным метаболизмом и газообменом молодой хвои и, как следствие, более интенсивным накоплением серы к концу вегетационного периода. Четких возрастных особенностей в накоплении в хвое сосны и ели свинца, цинка, кадмия и меди нами не обнаружено. В хвое древостоя сосны и ели накапливалось больше серы, чем в хвое подроста, что, вероятно, связано с затрудненным доступом атмосферных эмиссий к подросту под пологом древостоя.

Таблица 1

Содержание серы в талломе *Hypogimnia phisodes* (L.) Ach., хвое сосны и ели, сульфат ионов в лесной подстилке (% от абс. сух. веса)

Компонент фитоценоза	Расстояние от источников выбросов, км				ОДА <sup>3)</sup>
	0-10	10-20	20-30	более 30	
Хвоя ели	0,115-0,169 <sup>1)</sup> 0,145±0,006 <sup>2)</sup> n=11	0,123-0,168 0,145±0,010 n=6	0,083-0,119 0,098±0,007 n=5	0,045-0,107 0,079±0,012 n=5	***
Хвоя сосны	0,084-0,148 0,123±0,008 n=10	0,115-0,135 0,125±0,004 n=5	0,047-0,053 0,058±0,010 n=3	—	***
<i>Hypogimnia phisodes</i>	0,056-0,167 0,100±0,011 n=12	0,057-0,144 0,088±0,008 n=10	0,072-0,076 0,074±0,003 n=2	0,051-0,071 0,061±0,014 n=2	*
Лесная подстилка	0,043-0,096 0,070±0,010 n=7	0,019-0,048 0,041±0,011 n=10	0,022 — n=1	0,0096 — n=1	**

Примечание: n – число пробных площадей в каждой группе; 1) минимальное и максимальное значение; 2) среднее значение с ошибкой; 3) результат однофакторного дисперсионного анализа зависимости от фактора расстояния. \*, \*\*, \*\*\* – значение критерия Фишера достоверно при 0,05, 0,01 и 0,001 уровне значимости.

#### Глава 4. МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХВОИ И ПОБЕГОВ СОСНЫ И ЕЛИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ХВОЙНЫХ В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Воздействие атмосферных выбросов предприятий Архангельского промузла не вызвало значительных изменений изученных морфометрических характеристик хвой и побегов. Не выявлено четких пространственных закономерностей в изменении продолжительности жизни хвой. Так, у подроста и древостоя ели в различных типах леса она колеблется в пределах 10-17 лет, у древостоя сосны в сосняках кустарничково-сфагновых – 4-9 лет, что соответствует естественным пределам колебания этого показателя для северной подзоны тайги. Коэффициенты корреляции длины хвой и густоты охвоения побегов ели с расстоянием от источников выбросов, расчетными максимально разовыми концентрациями сероводорода, сернистого ангидрида и свинца в воздухе, а также содержанием серы и тяжелых металлов в хвое были низкими и составляли от 0 до ±0,3.

С увеличением градиента загрязнения происходило снижение накопления сухого веса хвой подроста ели, изменения этого показателя зависело от условий

произрастания. Так, в сосняках кустарничково-сфагновых происходило более интенсивное снижение сухого веса хвои, чем в сосняках черничных. Коэффициенты детерминации ( $\eta^2$ ) влияния загрязнения на накопление сухого веса хвои в сосняках кустарничково-сфагновых составили 0,76-0,82, в черничных сообществах 0,39-0,63. В исследованиях В.Ф. Цветкова (1990), проведенных на Кольском полуострове, также отмечено, что сосняки и ельники сфагновой группы проявляли большую чувствительность к атмосферному загрязнению, чем черничные сообщества.

В сосняках кустарничково-сфагновых реакция древостоя сосны на техногенное воздействие была несколько отличной от ели. Загрязнение практически не отразилось на длине и массе хвои сосны всех изученных возрастов. Близость к источникам выбросов, увеличение концентрации серосодержащих эмиссий в воздухе, а также повышение концентрации серы в хвое увеличивали густоту охвоения побегов.

Воздействие атмосферных выбросов предприятий Архангельского промузла вызвало ухудшение состояния эпикутикулярных восков хвои сосны. Под воздействием атмосферных поллютантов уменьшалась площадь поверхности хвои покрытой воском, а также ухудшалась структура эпикутикулярных восков: у хвои сосны, растущей вблизи источников выбросов, 100% изученных образцов имели различную степень повреждения восков. В городских условиях произрастания у сосны на поверхности хвои воска отсутствовали полностью. Деградация эпикутикулярных восков может неблагоприятно сказаться на устойчивости растений в техногенной среде, поскольку увеличивается возможность проникновения в лист токсичных веществ, вероятность заражения инфекционными заболеваниями, а также происходит увеличение кутикулярной и устьичной транспирации, что сказывается на уровне водообмена хвои.

## **Глава 5. ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ХВОЙНЫХ В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

Визуально наблюдаемым изменениям, затрагивающим морфологический уровень первоначально предшествует перестройка различных сторон метаболизма (Мальхотра, Хан, 1998).

В наших исследованиях наблюдалось стимулирующее воздействие атмосферных загрязняющих веществ на **пигментный комплекс** однолетней хвои древостоя ели в ельниках черничниках свежих (36 пробных площадей).

Новообразование пигментов происходило за счет хлорофиллов, содержание каротиноидов оставалось более стабильным. Это позволяет говорить об увеличении содержания хлорофилла в реакционных центрах фотосистем, в состав которых входит хлорофилл *a*, и о процессах перестройки светособирающего комплекса у хвой ели с увеличением доли хлорофиллов в нем под воздействием загрязняющих веществ. Свидетельством эффекта стимуляции пигментообразования в хвое ели с увеличением градиента загрязнения в хвое древостоя ели является наличие положительной связи между содержанием пластидных пигментов в хвое и данными расчета концентрации поллютантов в атмосфере (табл. 2). Реакция фотосинтетических пигментов хвой сосны в сосняках кустарничково-сфагновых на загрязнение была неоднозначной (29 пробных площадей). Мы наблюдали как стимуляцию пигментообразования, так и деградацию пигментов или же отсутствие каких-либо существенных изменений в их содержании.

Стимулирующее воздействие на пластидные пигменты хвой проявилось при повышении содержания серы в хвое в пределах 0,120-0,135% у сосны и 0,110-0,120% от сух. веса у ели. При увеличении концентрации серы в хвое выше 0,120 и 0,135% от абс. сух. веса стимулирующего действия на пластидные пигменты не наблюдалось. Возможно, что новообразование пигментов связано с необходимостью поддержания ассимиляционных процессов на определенном уровне в условиях воздействия токсичных веществ. Пигменты, таким образом, выполняют роль защитных веществ, препятствующих возникновению более глубоких повреждений фотосинтетического аппарата. Эта приспособительная реакция растений на загрязнение проявляется лишь в определенных интервалах концентрации поллютантов, превышение которых может подавлять адаптационные процессы у растений и вызывать деструктивные процессы пигментного комплекса.

Таблица 2

Коэффициент корреляции между концентрацией пластидных пигментов в хвое ели и содержанием поллютантов в воздухе (n = 18)

Поллютант	Хлоро-филл <i>a</i>	Хлоро-филл <i>b</i>	Хлоро-филл <i>a+b</i>	Кароти-ноиды	Сумма пигментов
Диоксид серы	0,558*	0,507*	0,555*	0,201	0,499*
Сероводород	0,703**	0,652*	0,704**	0,373	0,670*
Свинец	0,582*	0,528*	0,579*	0,202	0,514*

\*, \*\* – значение достоверно при 0,05 и 0,01 уровне значимости

Неблагоприятные естественные условия произрастания в кустарничково-сфагновых сообществах снижают устойчивость растений к воздействию аэротехногенных выбросов. Так, у подроста ели, растущего в непосредственной близости к источникам выбросов, суммарное содержание пластидных пигментов в хвое составляло 0,645 мг/г сыр. в-ва, что на 60-70% ниже, чем на более удаленных участках. Снижение концентрации пигментов происходило, главным образом, за счет хлорофилла *a*. Эффект стимуляции пигментобразования начал проявляться на расстоянии 10 км от источников выбросов. Вероятно, в неблагоприятных условиях избыточного увлажнения почв при снижении величины аэротехногенной нагрузки включаются компенсаторные механизмы адаптации растений к загрязнению, и низкие концентрации поллютантов начинают стимулировать процессы пигментобразования.

Реакция пигментного комплекса хвои подроста сосны и ели на загрязнение была выражена слабее, чем у древостоя.

Достоверных различий в содержании пластидных пигментов в хвое древостоя сосны и ели четырех последних лет формирования не обнаружено. Хотя, наибольшая стимуляция образования пигментов наблюдалась у однолетней хвои сосны и у двухлетней хвои ели.

Близость к источникам загрязнения привела к повышению **суммарного содержания фенольных соединений** в хвое сосны и ели, которое составило 0,36-0,57% и 2,37-2,56% от сух. в-ва соответственно. Увеличение суммы фенольных соединений с приближением к источникам выбросов у сосны было выражено сильнее, чем у ели. В хвое сосны, собранной с загрязненных участков содержалось фенольных соединений в среднем на 58% больше, чем в районе, расположенном на расстоянии 22-23 км. В хвое ели, произрастающей вблизи источников выбросов, содержание фенольных соединений в среднем было на 10% выше, чем у образцов, собранных с пробных площадей, удаленных на расстояние 25-27 км, и на 17% больше, чем у хвои ели, растущей в охранной зоне Пинежского заповедника (2,08% от абс. сух. в-ва).

Увеличение накопления в ассимиляционных органах фенольных соединений можно рассматривать как адаптивную реакцию растений на загрязнение. Адаптация растений к техногенной среде может обеспечиваться защитной функцией фенолов, которые в растениях способны служить акцепторами свободных радикалов и связывать ионы тяжелых металлов в устойчивые комплексы, лишая их каталитического действия (Шебалова, Бабушкина, 1999).

Способность растений поддерживать необходимый уровень жизнедеятельности в значительной степени зависит от **параметров водного обмена**. Нами установлено, что загрязнение воздуха не оказало заметного влияния на оводненность (содержание влаги в % от абс. сух. веса) хвои сосны и ели разного возраста (табл. 3). Значения показателя реального водного дефицита хвои текущего года и однолетней хвои сосны и ели были близкими и существенно не различались при различной степени аэротехногенной нагрузки. Атмосферное загрязнение привело к увеличению скорости водоотдачи и снижению водоудерживающей способности хвои сосны и ели, которое в большей степени сказалось на хвое текущего года по сравнению с однолетней. Стабильность оводненности тканей растения мы оценивали по времени, за которое хвоя теряет половину от общего содержания воды, близкому к пороговым значениям уровня обезвоженности – критерий  $t_{50}$  (Stransty, 1963; Котов, 1996). Значения этого показателя у хвои деревьев, растущих вблизи источников выбросов, было меньшим по сравнению с контрольными участками.

Таблица 3

Показатели водного режима хвои сосны и ели

Возраст хвои Расстояние, км	Ель			Сосна		
	6,5	26	$t_{st}$	5,5	23	$t_{st}$
	Оводненность, % ( $t_{0,05} = 3,18$ ; $t_{0,01} = 5,84$ )					
Текущего года	65,45±0,95	67,47±0,76	1,66	59,80±0,93	62,00±0,43	2,15
Однолетняя	62,03±0,32	60,27±0,37	2,79	55,43±0,22	56,03±0,62	0,91
$t_{st}$	3,41	8,06		4,57	7,91	
	Реальный водный дефицит, % ( $t_{0,05} = 3,18$ ; $t_{0,01} = 5,84$ )					
Текущего года	5,44±0,84	6,64±0,56	1,19	6,31±0,84	5,72±0,92	0,47
Однолетняя	6,35±0,74	4,59±0,73	1,69	7,29±0,93	8,55±0,98	0,23
$t_{st}$	0,81	2,32		0,78	2,10	
	Критерий $t_{50}$ , час ( $t_{0,05} = 2,23$ ; $t_{0,01} = 3,17$ )					
Текущего года	21,33±1,59	35,60±3,61	3,62	14,50±2,10	22,33±1,54	3,01
Однолетняя	42,80±3,87	48,67±3,92	1,06	33,33±3,65	43,30±3,65	1,93
$t_{st}$	5,13	2,45		4,47	5,29	

Причины снижения водоудерживающей способности под воздействием токсикантов различны. Это может быть нарушение проницаемости мембран клетки, свидетельством которого служит наблюдаемое в наших исследованиях увеличение

активности окислительного фермента пероксидазы и увеличение накопления фенольных соединений, а также ухудшение состояния эпикутикулярных восков и увеличение кутикулярной транспирации. Нарушения водного режима могут вызывать еще более глубокие функциональные повреждения. Наблюдаемый нами постоянный уровень параметров водного обмена – оводненности тканей хвои и стабильного водного дефицита, при разной техногенной нагрузке может способствовать стабилизации обменных процессов у хвойных и предотвращению развития визуально наблюдаемых симптомов повреждения хвои и побегов сосны и ели в условиях атмосферного загрязнения.

## **Глава 6. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СЕЗОННУЮ ДИНАМИКУ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОСНЫ И ЕЛИ**

Ритмичность течения физиолого-биохимических процессов может сказываться на устойчивости растений к техногенной нагрузке и иметь решающее значение при адаптации к экстремальным условиям среды (Новицкая и др., 1985).

Содержание **фотосинтетических пигментов** в период вегетации подвержено изменениям и зависит от фенологической фазы развития растений. В июне, в период интенсивного прироста побегов, количество пигментов в однолетней хвое сосны и ели уменьшалось как на участках, заложенных в фоновых районах, так и на пробных площадях, расположенных вблизи источников выбросов (рис. 1). По литературным данным, весенний минимум в содержании фотосинтетических пигментов связан с ростовыми процессами и оттоком пластических и энергетических веществ из хвои прошлых лет во вновь формирующиеся побеги и характерен для сосны и ели северной и средней подзоны тайги (Ширяева, 1967; Новицкая, 1971; Тужилкина, 1979, 1993). Дальнейшее изменение содержания фотосинтетических пигментов происходило по-разному на пробных площадях, расположенных в непосредственной близости к источникам выбросов и на удалении от них. У ели на пробных площадях, расположенных в районе промузла, отмечается только один, весенний, минимум содержания пигментов. У ели, произрастающей в районе, удаленном на расстояние 25-27 км от источников выбросов, во второй декаде августа наблюдался второй минимум содержания пигментов, что связано с активной подготовкой побегов к зимнему периоду. У сосны после летнего максимума содержания пигментов (третья декада июля) происходило постепенное снижение концентрации пигментов, более выраженное на загрязненных пробных площадях.

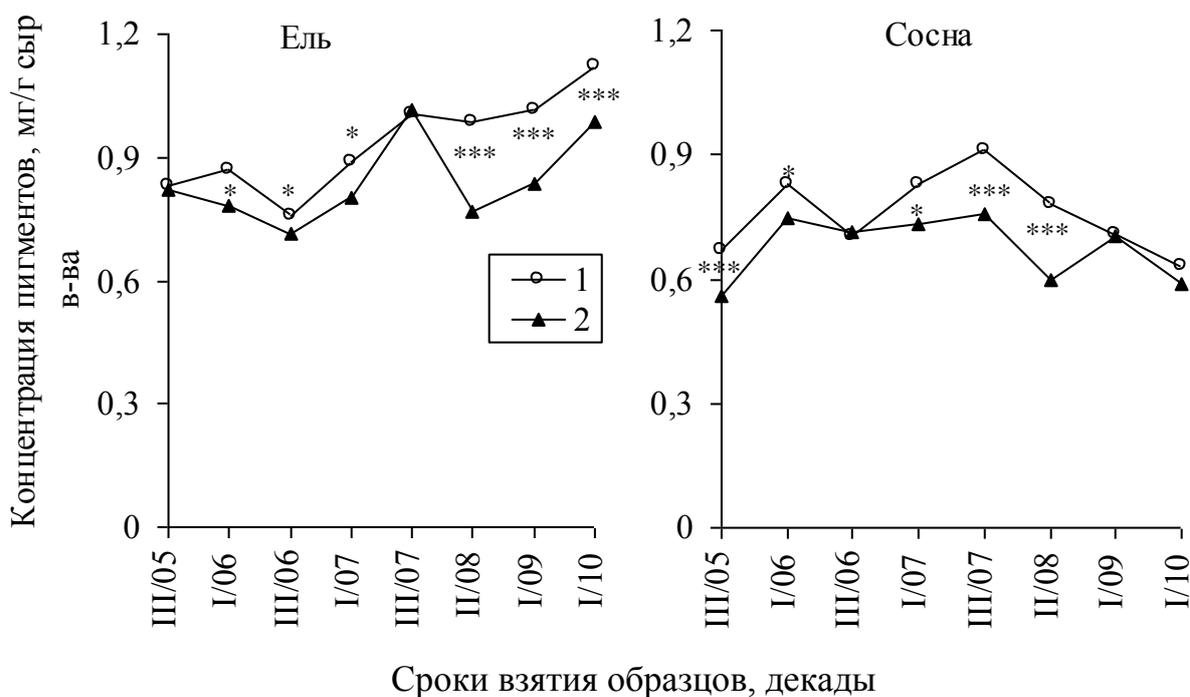


Рис. 1. Динамика содержания общей суммы пигментов однолетней хвои ели и сосны при различном уровне атмосферного загрязнения (1– 5-6 км, 2 – 23-27 км). \*, \*\*, \*\*\* – различия между средними значениями 1 и 2 достоверны при 0,05, 0,01 и 0,001 уровне значимости.

Показатель **кислотности гомогената хвои** однолетней хвои сосны и ели по мере роста текущих побегов снижался, величина рН гомогената к моменту окончания роста побегов (июль) достигала минимального значения: 3,71-3,72 у ели и 3,82-3,88 у сосны, затем происходило постепенное увеличение этого показателя, достигающего максимума в сентябре-октябре: 4,28-4,36 и 4,36-4,39 соответственно. Подобная изменчивость рН гомогената листьев в течение периода вегетации была выявлена и у лиственных пород (Васфилов, 1997). В течение сезона вегетации хвоя текущего года формирования имела более кислую реакцию среды по сравнению с хвоей прошлого года, в октябре значения рН гомогената хвои достигли уровня хвои второго года вегетации: 4,30-4,31 у ели и 4,31-4,46 у сосны.

Содержание **свободного пролина** в хвое текущего года формирования изменялось по мере ее роста. На раннем этапе развития отмечалось максимальное содержание свободного пролина в хвое: 1,97-2,95 мкмоль/г сух. в-ва у ели и 2,29-6,10 мкмоль/г сух. в-ва и сосны. В июне, в хвое текущего года концентрация свободного пролина была выше, чем у однолетней хвои в на 305-370% у ели и на 249-459% у сосны, что может быть связано с затрудненным водным режимом формирующейся хвои (Кудашова, 1989). В дальнейшем происходило постепенное

снижение содержания свободного пролина по мере роста хвои до 0,42-0,63 мкмоль/г сух. в-ва у ели и 0,82-0,85 мкмоль/г сух. в-ва у сосны.

В течение всего вегетационного сезона концентрация свободного пролина в однолетней хвое сосны и ели оставалась довольно низкой: 0,43-1,12 мкмоль/г сух. в-ва у ели и 0,85-3,78 мкмоль/г сух. в-ва у сосны. В динамике его содержания прослеживается связь с фенологической фазой развития растений. Как и в исследованиях по сезонной динамике пластидных пигментов, отмечался весенний минимум содержания свободного пролина – в третьей декаде июня, в период интенсивного роста побегов, что может быть связано с активными ростовыми процессами.

Атмосферное загрязнение вызвало увеличение содержания свободного пролина в хвое и сосны и ели на протяжении практически всего сезона вегетации. Разница между образцами, собранными с загрязненных и относительно контрольных участков, была наибольшей у хвои текущего года на ранних этапах ее формирования – 226% у сосны и 150% у ели. Повышение содержания свободного пролина в хвое сосны и ели может свидетельствовать о негативном воздействии поллютантов на растения. Поскольку свободный пролин обладает осмотически активными свойствами и участвует в стабилизации ионного равновесия в клетке, вероятно, увеличение его содержания под воздействием атмосферного загрязнения могло послужить причиной стабильности уровня рН гомогената хвои.

Считается, что активирование пероксидазы под влиянием различных неблагоприятных воздействий является характерной реакцией растений, обеспечивающей нормальный ход окислительных процессов (Николаевский, 1979). Нами не обнаружено достоверных изменений в **активности пероксидазы** у хвои сосны и ели четырех последних лет формирования. Исключение составила лишь хвоя текущего года у ели. Здесь наблюдалась повышенная активность фермента на ранних этапах развития хвои (июнь-июль) до 26,7-30,7 усл. ед. К концу сезона вегетации активность фермента у хвои текущего года снизилась до 4,0-7,3 усл. ед. и была почти в два раза меньше, чем у 1-3-летней хвои.

Близость к источникам выбросов привела к увеличению активности пероксидазы до 62% практически в течение всего периода вегетации у сосны и ели в хвое всех четырех изученных возрастов. Это может быть связано с субстратной активацией пероксидазы, вызванной образованием органических перекисей под воздействием атмосферного загрязнения и может привести к дестабилизации клеточных мембран и к нарушениям физиолого-биохимических процессов, в

частности к наблюдаемому нами нарушению водного режима – снижению водоудерживающей способности хвои сосны и ели.

Исследования, проведенные в зоне влияния атмосферных эмиссий предприятий Архангельского промышленного узла, позволили установить, что северотаежные лесные фитоценозы испытывают негативное воздействие атмосферного загрязнения. Установленные изменения, вызванные влиянием атмосферных эмиссий, отражают общую негативную реакцию хвойных на весь комплекс неблагоприятных условий среды их обитания, связанный с аэротехногенным воздействием – избытком поллютантов в воздухе, осадках, почвах, водах. Это обстоятельство позволяет использовать примененные методы оценки состояния хвойных, как индикационные, пригодные для целей фонового и импактного мониторинга по оценке состояния окружающей среды.

## **ВЫВОДЫ**

Близость к источникам выбросов в районе Архангельского промышленного узла привела к увеличению накопления серы в растительности и сульфат ионов в лесной подстилке. Их содержание положительно коррелировало с расстоянием до источников выбросов и данными расчета концентрации серосодержащих эмиссий в атмосфере. Не выявлено четких пространственных закономерностей в распределении тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn, Cu, Hg) в изученных компонентах экосистем.

Воздействие атмосферных выбросов предприятий Архангельского промузла не привело к значительному изменению изученных морфометрических характеристик побегов сосны и ели. Влияние поллютантов практически не отразилось на продолжительности жизни хвои, ее длине, степени развития хлорозов и некрозов хвои и потере хвои на побеге. Под воздействием атмосферных эмиссий происходило снижение сухого веса хвои подроста ели и увеличение густоты охвоения побегов сосны.

Реакция пигментного комплекса ели на воздействие атмосферного загрязнения заключалась в увеличении содержания пластидных пигментов у древостоя и подроста ели в хвое разных возрастов. Активация новообразования пигментов возможна в определенном интервале концентрации поллютантов. Увеличение содержания серы в хвое сосны до 0,135% от абс. сух. веса и ели до 0,120% от абс. сух. веса может приводить к разрушению пластидных пигментов. У

сосны в условиях избыточного увлажнения почв не проявилось четкой однозначной реакции фотосинтетических пигментов хвои на увеличение градиента загрязнения.

Атмосферное загрязнение привело к деградации эпикутикулярных восков хвои сосны, увеличению накопления суммы фенольных соединений в хвое, повышению активности пероксидазы и содержания свободного пролина в хвое сосны и ели, а также снижению водоудерживающей способности хвои, и практически не отразилось на уровне реального водного дефицита и степени насыщенности водой хвои сосны и ели.

Влияние фитотоксикантов не оказало повреждающего воздействия на уровень рН гомогената хвои сосны и ели. Происходило либо некоторое защелачивание клеточного содержимого, либо с увеличением степени техногенной нагрузки показатель кислотности гомогената оставался стабильным. Данное явление может быть связано с поддержанием ионного равновесия клетки на определенном уровне, необходимом для нормального течения процессов метаболизма.

Ход физиолого-биохимических процессов у хвойных зависит от ритмики ростовых процессов. В периоды смены фенологических фаз развития растений происходила наиболее активная перестройка метаболизма. Действие атмосферного загрязнения привело к нарушению хода сезонной динамики и изменению состава фотосинтетических пигментов сосны и ели. При проведении диагностических исследований необходимо учитывать возрастные и сезонные особенности изучаемых показателей. В наших исследованиях наибольшую чувствительность к загрязнению проявила хвоя текущего года на ранних этапах ее формирования.

Сочетание избыточного увлажнения почв с атмосферным загрязнением негативно отразилось на состоянии подроста ели. В сосняках кустарничково-сфагновых по сравнению с черничными сообществами происходило увеличение густоты охвоения 1-3-летних побегов, более интенсивное снижение накопления биомассы хвои. В условиях избыточного увлажнения почв наблюдалось угнетение адаптационных возможностей ассимиляционного аппарата, выраженное в процессах деструкции пигментного комплекса.

Ассимиляционный аппарат древостоя ели по сравнению с подростом накапливал большее количество поллютантов в хвое, проявил повышенную чувствительность к загрязнению и более пригоден для проведения биоиндикации техногенного загрязнения лесных экосистем.

Реакция растений на увеличение уровня атмосферного загрязнения выражена в развитии целого комплекса физиолого-биохимических

приспособлений, способствующих поддержанию нормального хода обменных процессов в тканях хвои. Стабилизация метаболизма в условиях загрязнения может рассматриваться как адаптивная реакция растений на воздействие техногенного стресса. При сохранении данного уровня загрязнения устойчивость растений к воздействию поллютантов может снизиться, и в дальнейшем возможно развитие уже необратимых процессов деградации лесных сообществ.

В качестве информативных биоиндикаторных признаков состояния хвойных в условиях атмосферного загрязнения предлагается использование показателей состояния эпикутикулярных восков хвои, накопления фенольных соединений, активности пероксидазы, содержания свободного пролина в хвое, скорости водоотдачи изолированной хвои, накопление массы хвои.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Костина Е.Г., Тарханов С.Н., Прожерина Н.А. Оценка жизненного состояния хвойных в районе Архангельского промузла // Тез. докл. X Ломоносовских чтений. – Архангельск, 1998. – С. 186-188.

2. Костина Е.Г., Прожерина Н.А., Тарханов С.Н. Влияние аэротехногенных выбросов на фотосинтетический аппарат ели в районе Архангельского промышленного узла // Экологические проблемы Севера. Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 2. – Архангельск, 1999. – С. 51-57.

3. Костина Е.Г., Прожерина Н.А., Тарханов С.Н. Накопление серы в хвое как биоиндикаторный показатель состояния ели при аэротехногенном загрязнении // Геодинамика и геоэкология: Тез. докл. Межд. конф. – Архангельск, 1999. – С. 174-176.

4. Прожерина Н.А., Костина Е.Г., Тарханов С.Н. Сравнительная характеристика влияния накопления сульфат ионов в почве на морфофизиологические параметры древостоя и подроста ели // Геодинамика и геоэкология: Тез. докл. Межд. конф. – Архангельск, 1999. – С.298-300.

5. Прожерина Н.А., Тарханов С.Н. Состояние ассимиляционного аппарата ели при воздействии аэротехногенных выбросов в районе города Коряжмы // Экологические проблемы Севера. Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 3. – Архангельск, 2000. – С. 115-118.

6. Прожерина Н.А., Хмара К.А., Рохина Н.Н., Тарханов С.Н. Влияние аэротехногенного загрязнения на сезонную динамику содержания пластидных пигментов в хвое сосны и ели в районе Архангельского промузла // Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура: Тез. докл. Межд. конф. – Архангельск, 2000.– С. 188.

7. Рохина Н.Н., Прожерина Н.А. Сезонная изменчивость рН гомогената хвои сосны и ели в условиях аэротехногенного загрязнения // Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура: Тез. докл. Межд. конф. – Архангельск, 2000. – С. 194-195.

8. Прожерина Н.А. Состояние эпикутикулярного воска хвои сосны обыкновенной в условиях атмосферного загрязнения // Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды: Тез. докл. Всерос. совещ. – Иркутск, 2000. – С. 77.

9. Прожерина Н.А. Особенности развития адаптационных процессов у хвойных, подверженных хроническому аэротехногенному воздействию в районе Архангельского промузла // Леса Евразии в третьем тысячелетии: Тез. докл. Межд. конф. молодых ученых. – Т. 1. – М., 2001. – С. 145-147.

10. Прожерина Н.А. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние древостоев сосны и ели в районе Архангельского промузла // Тез. докл. Межд. экологического форума стран Баренц-региона. – Архангельск, 2001. – С. 52-53.

11. Прожерина Н.А. Реакция фотосинтетического аппарата хвойных на атмосферное загрязнение в районе Архангельского промузла // Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга: Тез. докл. XI Межд. симп. по биоиндикаторам. – Сыктывкар, 2001. – С. 156.

12. Тарханов С.Н., Прожерина Н.А. Экотоксикологические реакции отдельных элементов лесорастительных сообществ в условиях загрязнения атмосферы устьевого области Северной Двины // Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга: Тез. докл. XI Межд. симп. по биоиндикаторам. – Сыктывкар, 2001. – С. 183.

13. Прожерина Н.А. Возрастные и сезонные аспекты устойчивости хвойных к воздействию техногенного стресса // Актуальные вопросы экологической физиологии растений в 21 веке: Тез. докл. Межд. конф. – Сыктывкар, 2001. – В печати.

14. Надеин А.Ф., Тарханов С.Н., Прожерина Н.А. Биогеохимическая оценка аэротехногенного загрязнения лесных фитоценозов вблизи промышленных зон г. Архангельска // Экологический риск 2001: Тез. докл. Второй Всерос. конф. – Иркутск, 2001 – С..

15. Надеин А.Ф., Тарханов С.Н., Прожерина Н.А. Накопление токсикантов в лесных фитоценозах на территории Архангельской области // Экология человека. – 2001. – № 3. – С.