

На правах рукописи

Теребова

ТЕРЕБОВА Елена Николаевна

**АЗОТНЫЕ И ФОСФОРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ХВОЙНЫХ
РАСТЕНИЙ ПРИ АЭРОТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ В
УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ**

03.00.12 – физиология и биохимия растений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Петрозаводск - 2002

Работа выполнена в лаборатории физиологии и цитологии древесных растений Института леса Карельского научного центра Российской академии наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: кандидат биологических наук,
Т. А. Сазонова

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ: доктор биологических наук,
профессор Е. Ф. Марковская

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор биологических наук,
профессор С. Н. Дроздов

доктор биологических наук
Н. В. Лукина

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Институт лесоведения РАН,
Московская область

Защита состоится 29 мая 2002 года в 14 часов 15 минут на заседании Диссертационного совета К 002.035.01 по присуждению ученой степени кандидата биологических наук при Институте биологии КарНЦ РАН по адресу: 185610, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, тел. (8142) 768160, факс (8142) 768160.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КарНЦ РАН

Автореферат разослан 15 апреля 2002 года

152199К

Учёный секретарь Диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Л. В. Топчнева



Актуальность темы. Промышленные выбросы, содержащие токсичные газы и тяжелые металлы, оказывают существенное воздействие на состояние лесных экосистем. На Северо-Западе России крупнейшими источниками промышленных эмиссий являются – Костомукшский горно-обогатительный комбинат (Республика Карелия) и Мончегорский медно-никелевый комбинат «Североникель» (Мурманская область). Исследовалось влияние выбросов этих комбинатов на содержание тяжелых металлов в хвое (Раменская, 1972, 1974) и почве (Федорец и др., 1998; Федорец, 2001), на состояние микробоценозов почв (Загуральская, Зябченко, 1994; Загуральская, 1997; Германова, Медведева, 2001), на поступление и распределение поллютантов в лесных фитоценозах (Лукина, Никонов, 1996, 1998), на морфологическую структуру хвойных растений (Ярмишко, 1997), на CO₂-газообмен (Кайбияйнен и др., 1994, 1995). Отсутствуют работы по метаболической компоненте реакции растений и растительных сообществ в этих условиях загрязнения. Известно, что промышленные выбросы вызывают нарушения метаболизма (Биохимические..., 1997), в частности в азотном и фосфорном обменах, как базовых процессах метаболизма. Имеющаяся литература противоречива и, как показали исследования, характер реакции зависит от типа и степени воздействия (Илькун, 1978; Фитотоксичность..., 1986; Барахтенова 1992, 1995), географических условий (Рожков, Михайлова, 1989) и видового состава растительного сообщества (Сергейчик, 1994, 2001; Кудашова, 2000; Михайлова, 1997). Для понимания реакции растительного организма на загрязнение необходим учёт метаболических особенностей деревьев различного жизненного состояния, что не исследовано. Таким образом, данные по региональным особенностям реакции растения могут существенно дополнить общую картину поведения не только организма, но и растительного сообщества в антропогенных условиях среды.

Цель исследования: выявить общие закономерности изменения показателей азотного и фосфорного обмена хвойных растений в зонах техногенного загрязнения Северо-Запада России.

Задачи исследования:

1. Определить содержание серы и тяжелых металлов в хвое сосны обыкновенной в зоне загрязнения горно-обогатительного комбината (Республика Карелия, г. Костомукша), а также сосны обыкновенной и ели сибирской в зоне загрязнения медно-никелевого комбината «Североникель» (Мурманская обл., г. Мончегорск);

2. Исследовать зависимость содержания азотных и фосфорных соединений в хвое сосны обыкновенной от уровня промышленного загрязнения в зоне действия Костомукшского ГОКа;

3. Исследовать зависимость содержания азотных и фосфорных соединений в хвое сосны обыкновенной и ели сибирской от уровня промышленного загрязнения в зоне действия комбината «Североникель»;

4. Изучить связь показателей фотосинтетического и азотного обменов с категорией жизненного состояния дерева.

Научная новизна. Впервые в условиях таежной зоны проведено исследование состояния показателей азотного и фосфорного обменов интактных растений сосны обыкновенной и ели сибирской в зоне действия загрязнения Костомукшского ГОКа и Мончегорского комбината «Североникель».

Вблизи комбинатов в условиях как слабого (Костомукшский ГОК), так и сильного (Мончегорский «Североникель») загрязнения отмечается одинаковое феноменологическое проявление реакций метаболизма – увеличение содержания азотных и фосфорных соединений в хвое. Этот феномен сопровождается разнонаправленными изменениями продуктивности растений: в условиях слабого загрязнения – продуктивность увеличивается, в условиях сильного загрязнения – уменьшается.

На основании метаболических показателей с использованием многомерного метода анализа показано существование трёх функциональных состояний сосны обыкновенной и ели сибирской, каждое из которых характеризуется определенным биохимическим статусом.

Практическая значимость работы. Полученные в работе данные по содержанию серы и тяжелых металлов в хвое сосны обыкновенной и ели сибирской можно использовать при организации систем мониторинга в условиях действия промышленных объектов Костомукшского ГОКа и Мончегорского комбината «Североникель». Сравнительный анализ химического состава хвои сосны и ели, растущих на фоновой и загрязнённой территориях, можно использовать при изучении биологического круговорота веществ в лесных экосистемах в условиях антропогенного загрязнения. Физиологические признаки могут быть использованы при обосновании критерия выделения категории жизненного состояния хвойных растений в лесоводческой практике.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на международной конференции «Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии» (Петрозаводск, 1999), всероссийском совещании «Экологический мониторинг лесных экосистем» (Петрозаводск, 1999), на международной конференции «Физиология растений – наука III тысячелетия»

в рамках IV съезда Общества физиологов растений России (Москва, 1999), всероссийском совещании «Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды» (Иркутск, 2000), международной конференции молодых ученых «Леса Евразии в третьем тысячелетии» (Москва, 2001), на международной конференции «Биологические ресурсы и устойчивое развитие» (Пушино, 2001), конференции «Актуальные вопросы экологической физиологии растений в 21 веке» (Сыктывкар, 2001) и международном симпозиуме «Plant under environmental stress» (Москва, 2001), на научном семинаре кафедры физиологии растений биологического факультета МГУ им. Ломоносова (Москва, 2001).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, включая 2 статьи.

Положения, выносимые на защиту:

– вблизи комбинатов в условиях как слабого (Костомукшский ГОК), так и сильного (Мончегорский «Североникель») загрязнения отмечается одинаковое феноменологическое проявление реакций метаболизма – увеличение содержания азотных и фосфорных соединений в хвое. Этот феномен сопровождается разнонаправленными изменениями продуктивности растений: в условиях слабого загрязнения – продуктивность увеличивается, в условиях сильного загрязнения – уменьшается;

– в условиях среднего уровня промышленного загрязнения комбината «Североникель» выделено три функциональных состояния сосны обыкновенной и ели сибирской, каждое из которых характеризуется определенным биохимическим статусом.

Организация исследований. Диссертационная работа выполнялась в 1998-2001 гг. в рамках госбюджетных тем лаборатории физиологии и цитологии древесных растений Института леса КарНЦ РАН № 119 «Эколого-физиологические характеристики сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели европейской (*Picea abies* L.) на северо-западе таёжной зоны» и № 123 «Биологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России».

Личный вклад автора. Автором выполнены основные работы по сбору, химическому анализу азотных и фосфорных соединений и камеральной обработке материала, проведен математический анализ, систематизация и интерпретация экспериментальных данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений, выводов и списка литературы. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 22 таблицы и 22 рисунка. Список цитируемой литературы включает 278 наименований, в том числе 112 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории физиологии и цитологии древесных растений Института леса, предоставившим возможность использования ранее собранного полевого материала (1987-1991 и 1997 гг.), за помощь при его обработке, а также сотрудникам аналитической лаборатории Института леса за проведение химического анализа по определению серы и тяжелых металлов в растительных образцах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Состояние вопроса

Основными загрязняющими веществами, воздействующими на лесные фитоценозы на Северо-Западе России, являются сера и тяжелые металлы. Рассмотрена аккумуляция этих поллютантов хвойными растениями (Лукина и др., 1994; Барахтенова, 1995; Innes, 1995; Manninen, Huttunen, 1995; Nieminen, Helmsaari, 1996; Rautio et al., 1997) и механизмы их адаптации к промышленному загрязнению (Илькун, 1978; Кулагин, 1980; Altman et al., 1982; Фитотоксичность..., 1986; Шевякова, 1988; Stockli, 1990; Судачкова, 1998). Сера и тяжелые металлы, проникая в растения, вызывают различные нарушения. Так, установлено повреждение покровных тканей – воскового кутикулярного слоя, эпидермиса и гиподермы (Huttunen, Laine, 1983; Tuomisto, 1988; Илькун, 1990; Anneli, Hannu, 1994; Trimbacher, Weiss, 1999), нарушение структурно-функционального состояния внутриклеточных мембран (Soikkeli, Kärenlampi, 1988; Kukkola et al., 1997), блокирование электрон-транспортной цепи (Барахтенова, 1992) и другие нарушения. Все эти повреждения приводят к раскоординации фотосинтеза и дыхания, а также изменениям в фундаментальных обменных процессах – азотном и фосфорном обменах. Если по нарушениям азотного обмена имеется обширная и противоречивая литература (Bender et al., 1990; Bercea et al., 1993; Pandey, Pandey, 1994; Giertych et al., 1997; Биохимические..., 1997), то по реакции показателей фосфорного обмена встречаются лишь единичные данные (Барахтенова, 1992; Сергейчик, 1994; Михайлова, Бережная, 2000). Так, отмечается как инактивация, так и активизация ферментов, сдвиг соотношений между фракциями отдельных метаболитов и, как следствие, разнонаправленные изменения в продуктивности. Сложности в выявлении общих закономерностей могут быть связаны с особенностями методических подходов, используемых разными авторами. И для более полного понимания механизмов фитотоксического действия поллютантов необходимы однотипные исследования по влиянию источни-

ков загрязнения, различающихся по разным составляющим системы связей «комбинат-биогеоценоз».

Глава 2. Объекты и методы исследования

Исследования проводили на территории воздействия загрязнения Мончегорского медно-никелевого комбината «Североникель» (Мурманская область) и Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОКа) (Республика Карелия). Среди промышленных выбросов преобладают сера и тяжелые металлы.

Основными объектами исследования являлись главные лесообразующие породы таёжной зоны: ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.).

Изучение и оценку воздействия загрязнения на состояние сосны и ели проводили на 3 пробных площадях в зоне загрязнения комбината «Североникель» и 7 пробных площадях в зоне загрязнения Костомукшского ГОКа. Работа на деревьях различных категорий жизненности была выполнена на пробной площади – 30 км от комбината «Североникель».

Образцы хвои разных лет жизни собирали с деревьев сосны и ели в верхней части кроны, в одно и тоже время суток. Биологическая повторяемость (количество деревьев, с которых брали хвою на каждой пробной площади) равнялась 5.

Оценку жизненного состояния дерева проводили по опубликованным методикам (Ярмишко, 1997; «Категории состояния основных лесообразующих пород Московской области», 2000).

Содержание общего, белкового азота и небелкового азота определяли методом Кьельдаля (Щетинина, Бутенко, 1957) в модификации Г.И. Гирс (1985), содержание фосфорных соединений – по методике В.В. Габуковой (1989). Общее содержание серы определяли колориметрическим методом (Козлов и др., 2001). Содержание тяжелых металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии (Козлов и др., 2001). Химическая повторяемость равнялась 3.

Достоверность полученного результата оценивали с помощью критерия Т с учетом объема сравниваемых совокупностей и порога вероятительной вероятности 0,95. Для разделения деревьев на категории по степени угнетенности был использован кластерный анализ (программа Statgraphics 2.1 для Windows) (Факторный..., 1989; Тюрин, Макаров, 1995). Для выяснения взаимозависимости между двумя и более выборками применяли регрессионный анализ и коэффициент корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмана (программа Statgraphics 2.1 для Windows) (Тюрин, Макаров, 1995).

Глава 3. Физиологическое состояние *Pinus sylvestris* L. в зоне загрязнения Костомукшского ГОКа

Проведенные исследования показали, что по мере удаления от источника загрязнения содержание серы и тяжелых металлов (Cu, Ni, Fe, Zn, Pb, Mn, Mo, Cd) в хвое уменьшалось. В зоне загрязнения комбината среднее содержание серы в хвое составляло 0,06%. Эта величина близка к нижнему пределу пороговой концентрации, которая по литературным данным составляет 0,05-0,14%. Количество тяжелых металлов в хвое соответствовало фоновому уровню (Ni, Cu – 5; Fe – 159-222; Co – 0,009-0,18; Cd – 5-30; Zn – 25-35 мг/кг).

Анализ распределения поллютантов в зависимости от возраста хвои сосны в зоне загрязнения комбината показал, что содержание серы, кобальта и хрома не зависело от её возраста, содержание меди, никеля, кадмия, свинца, молибдена с увеличением возраста хвои снижалось, железа, цинка, марганца увеличивалось. Такое распределение серы и тяжелых металлов по возрастным классам хвои характерно для контрольных условий (Сюткина и др., 1991; Kaiser et al., 1993) и определяется естественными процессами поглощения и распределения минеральных элементов в системе растение-среда. Следует отметить, что ассимиляционный аппарат деревьев сосны на разном расстоянии от комбината был представлен хвоей пяти лет жизни, то есть выбросы поллютантов не приводят к сокращению времени жизни хвои.

Поскольку сера является одним из основных загрязнителей, мы исследовали связи между содержанием серы и метаболитами у сосны на хвое 1-го года жизни. По результатам исследования зависимости содержания азотных, фосфорных соединений от серы были построены линейные регрессионные уравнения. Расчет каждой фракции показал, что с возрастанием уровня серы отмечается увеличение всех соединений (табл. 1). В среднем при увеличении содержания серы в хвое с 0,06 до 0,08% содержание общего, кислотонерастворимого фосфора, фосфорилированных сахаров возрастало на 40%, фосфорных соединений и общего азота, лабильного фосфора – на 60%, общего азота – на 19% и в виде тенденции изменения содержания неорганического фосфора – на 10%. Относительно низкие концентрации серы в хвое, которые зафиксированы в зоне действия комбината, могут оказывать как прямое стимулирующее действие на азотный и фосфорный обмены растений, в частности через активизацию ферментных систем, так и косвенное – через улучшение почвенного питания (Габукова, Ивонис, 1994; Загуральская, 1997).

Таблица 1

Содержание фракций фосфорных соединений и общего азота, рассчитанные по регрессионным уравнениям в зависимости от уровня серы в хвое *Pinus sylvestris* L. 1-го года жизни

S, %	Фосфор, мг%					Общий азот, %
	Общий	Кислото- нерастворимый	Стабильный	Лабильный	Неорганический	
0,04	88,89	44,56	13,81	1,81	34,26	1,09
0,05	114,81	62,92	19,96	3,23	37,10	1,27
0,06	140,73	81,29	26,11	4,64	39,94	1,42
0,07	166,65	99,66	32,26	6,06	40,78	1,56
0,08	192,57	118,03	38,41	7,48	43,62	1,68

Следует отметить, что при приближении к комбинату в хвое 1-го года у сосны отмечается стабильность в содержании неорганического фосфора и небелкового азота, а остальные фракции исследуемых соединений увеличиваются (рис. 1). Отсутствие изменений в двух фракциях, по-видимому, связано с их положением в системе метаболических превращений фосфора и азота. Они находятся в начале этой цепи, рассматриваются как исходные метаболиты и отсутствие изменений в их содержании может свидетельствовать о быстром включении в метаболизм. Следует отметить, что и с увеличением содержания серы неорганический фосфор в хвое сосны испытывает очень небольшие изменения.

Биометрические исследования показали, что размеры хвои сосны в зоне действия выбросов комбината увеличиваются по сравнению с хвоей в фоновых условиях. Так, на участке 2 км от комбината отмечается увеличение в 2 раза массы и 1,3 раза длины молодой хвои по сравнению с контрольными значениями на участке 25 км от комбината.

Таким образом, исследования с использованием метаболических показателей, подтверждают вывод о слабом уровне промышленного загрязнения в зоне действия Костомукшского ГОКа. Низкие концентрации серы вызывают стимуляцию синтетических процессов в хвое сосны, что видно по закономерным изменениям в содержании различных метаболических веществ и их количественным соотношениям, присутствию на растениях хвои разных лет жизни, увеличению биологической продуктивности растений в условиях загрязнения.

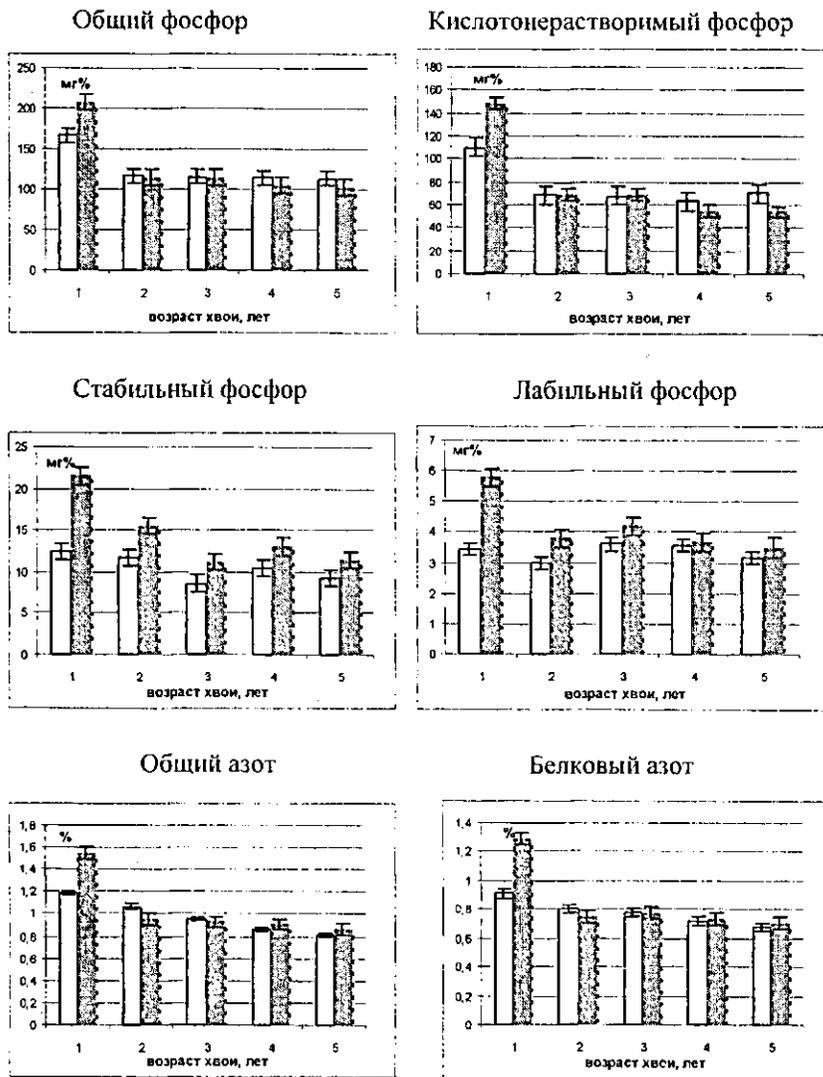


Рис. 1. Содержание фосфорных (мг%) и азотных (%) соединений в хвое *Pinus sylvestris* L. 1-5 лет жизни в опыте (серый столбик) и контроле (белый столбик)

Глава 4. Физиологическое состояние *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. в зоне загрязнения Мончегорского комбината «Североникель»

Оценка уровня содержания серы и тяжелых металлов у растений, произрастающих на расстоянии 10, 30 и 60 (контроль) км от комбината, показала, что содержание серы и тяжелых металлов в хвое сосны обыкновенной и ели сибирской с приближением к источнику загрязнения увеличивалось. В зоне техногенной пустоши (10 км от комбината) содержание серы в хвое деревьев сосны в среднем составляло 0,12 %, ели - 0,19%, что для сосны соответствует среднему пределу пороговой концентрации, а для ели значительно превышает его (0,05-0,14%). На участке, ближайшем к комбинату, накопление никеля в хвое сосны и ели в 8-11 раз превышало региональный фон, меди - в 5-6 раз, железа - в 3 раза, кадмия и свинца - в 2 раза, кобальта - в 5 раз.

Анализ содержания серы и тяжелых металлов по возрастным классам хвои сосны и ели выявил следующие зависимости. Содержание серы не изменялось с увеличением возраста хвои во всех вариантах опыта, за исключением 10 км от комбината, когда в условиях максимального загрязнения ее количество уменьшилось. Содержание кадмия и кобальта не изменялось с возрастом хвои, но происходило накопление никеля и свинца как у сосны, так и у ели в контрольных и загрязненных условиях. Если в фоновых условиях количество меди и магния с увеличением возраста хвои уменьшалось, а железа и цинка увеличивалось, то вблизи комбината содержание меди и магния увеличивалось, а цинка и железа уменьшалось. По результатам исследования зависимости содержания азотных и фосфорных соединений от серы были построены линейные регрессионные уравнения, расчет по которым показал увеличение металлов с возрастанием содержания серы (табл. 2, 3). Исследование фракций азотных и фосфорных соединений хвойных растений при приближении к комбинату показало, что количество кислотонерастворимого, лабильного, стабильного, и как результат - общего фосфора, а также общего и белкового азота в хвое растений увеличивается (рис.2). В зоне загрязнения комбината «Североникель» отмечается уменьшение размеров хвои, сокращение времени ее жизни до 2-3 лет (Ярмишко, 1997), что свидетельствует о снижении биологической продуктивности растений при приближении к комбинату на фоне увеличения содержания азотных и фосфорных метаболитов. Этот феномен не совсем понятен. Из имеющихся в литературе данных, можно предположить, что отмеченное нами увеличение содержания фракций азотных и фосфорных соединений в

хвое сосны и ели на территории действия «Североникеля» может быть обусловлено интенсивным поглощением соединений азота и фосфора из почвенных вод и эффективной реутилизацией этих соединений из стареющей в молодую хвою (Лукина, Никонов, 1996).

Таким образом, уровни накопления серы и тяжелых металлов в хвое сосны и ели, снижение продуктивности растений свидетельствует о сильном загрязнении в зоне действия выбросов комбината «Североникель».

Таблица 2

Содержание фракций фосфорных соединений и общего азота, рассчитанные по регрессионным уравнениям в зависимости от уровня серы в хвое *Pinus sylvestris* L. 1-го года жизни

S, %	Фосфор, мг%					Общий азот, %
	Общий	Кислото-нерастворимый	Стабильный	Лабильный	Неорганический	
0,06	118,20	60,18	18,91	1,58	17,43	1,54
0,08	142,18	74,48	29,70	2,85	25,46	1,84
0,10	164,09	87,88	40,48	4,52	33,48	2,11
0,12	184,48	100,59	51,27	6,59	41,51	2,37

Таблица 3

Содержание фракций фосфорных соединений и общего азота, рассчитанные по регрессионным уравнениям в зависимости от уровня серы в хвое *Picea obovata* Ledeb. 1-го года жизни

S, %	Фосфор, мг%					Общий азот, %
	Общий	Кислото-нерастворимый	Стабильный	Лабильный	Неорганический	
0,06	111,91	45,88	17,29	2,02	26,14	1,14
0,08	131,54	58,42	21,39	2,88	31,42	1,39
0,10	149,10	70,46	25,48	3,80	36,69	1,61
0,12	165,18	82,12	29,57	4,76	41,96	1,83
0,15	187,24	99,04	35,71	6,27	49,87	2,12

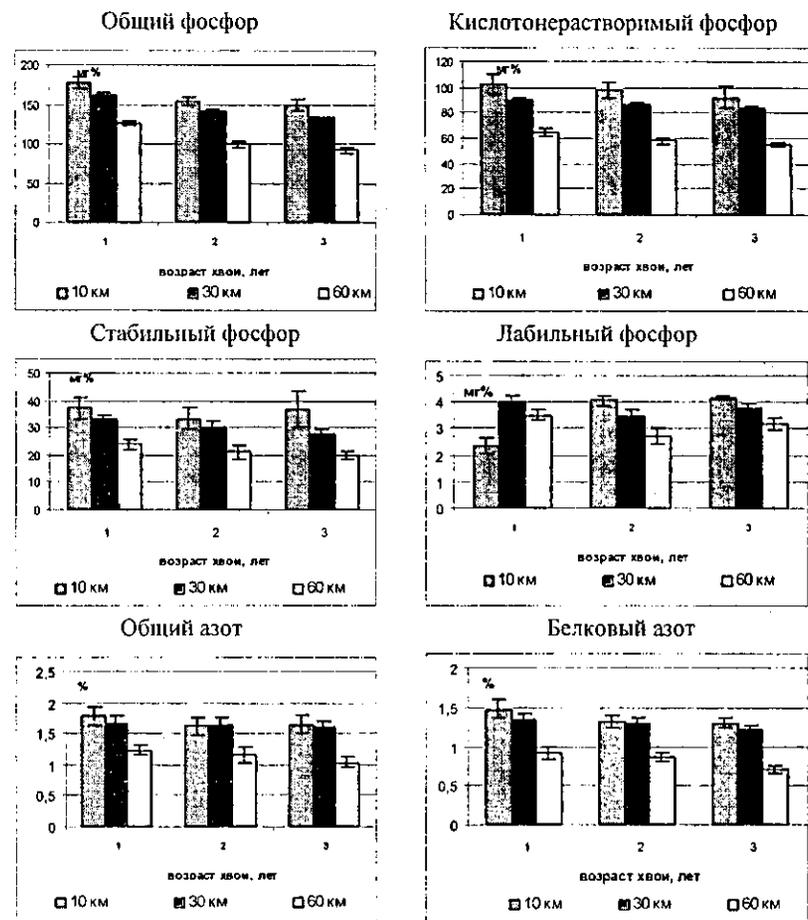


Рис. 2. Содержание азотных (%) и фосфорных (мг%) соединений в хвое на разном расстоянии от комбината «Североникель» (на примере *Pinus sylvestris* L.)

Метаболическая разнокачественность растений разной категории жизненного состояния в литературе не представлена. Исследование содержания серы и тяжелых металлов в хвое у деревьев разного жизненного состояния показало, что накопление Ni, Cu, Cd, Co, Fe, Pb и S было одинаковым в ассимиляционном аппарате сосны и ели и не зависело от физиологического состояния дерева. Следовательно, попадание загрязни-

телей не зависело от функциональной активности дерева, а определялось внешними экологическими условиями.

Однако анализ содержания азотных и фосфорных соединений в хвое сосны и ели разного жизненного состояния показал, что с его ухудшением отмечается уменьшение содержания всех фракций азотных соединений, лабильного и стабильного фосфора. Количество неорганического фосфора увеличивается у деревьев 4-й категории (табл. 4), а содержание кислотонерастворимого и общего фосфора не зависит от жизненного состояния организма. Наиболее сложные изменения отмечаются в составляющих фосфорного обмена, что может свидетельствовать о большей значимости энергетических нарушений у растений разных категорий состояния.

Таблица 4

Содержание азотных (%) и фосфорных (мг%) соединений в хвое *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. в зависимости от категории жизненного состояния дерева (на примере хвои 2-го года жизни)

Категория	Сосна обыкновенная				Ель сибирская			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Лабильный фосфор, мг%	<u>4,9</u> 0,2	<u>3,8</u> 0,4	<u>3,04</u> 0,28	<u>2,1</u> 0,1	<u>9,2</u> 1,0	<u>7,3</u> 1,3	<u>5,5</u> 0,5	<u>2,8</u> 0,4
Стабильный фосфор, мг%	<u>39,0</u> 2,9	<u>29,6</u> 3,03	<u>27,4</u> 3,01	<u>24,5</u> 1,7	<u>33,9</u> 1,8	<u>33,8</u> 1,0	<u>32,3</u> 1,7	<u>25,4</u> 0,9
Неорганич. фосфор, мг%	<u>18,3</u> 0,8	<u>17,0</u> 0,6	<u>17,9</u> 1,5	<u>25,5</u> 0,1	<u>31,4</u> 2,1	<u>34,8</u> 1,1	<u>38,8</u> 2,4	<u>48,7</u> 0,5
Общий азот, %	<u>1,8</u> 0,1	<u>1,6</u> 0,1	<u>1,5</u> 0,1	<u>1,4</u> 0,1	<u>1,7</u> 0,1	<u>1,6</u> 0,1	<u>1,4</u> 0,1	<u>1,3</u> 0,1
Белковый азот, %	<u>1,4</u> 0,1	<u>1,3</u> 0,1	<u>1,2</u> 0,1	<u>1,2</u> 0,1	<u>1,3</u> 0,1	<u>1,1</u> 0,1	<u>1,1</u> 0,1	<u>1,0</u> 0,1
Небелковый азот, %	<u>0,4</u> 0,1	<u>0,3</u> 0,1	<u>0,3</u> 0,1	<u>0,2</u> 0,1	<u>0,4</u> 0,1	<u>0,5</u> 0,1	<u>0,3</u> 0,1	<u>0,2</u> 0,1

в знаменателе - ошибка средней арифметической

Еще более сложная картина разнонаправленных метаболических изменений была получена при рассмотрении отдельных деревьев разного жизненного состояния, что вызвало необходимость обработки полученных данных с использованием методов многомерной статистики, в частности кластерного анализа. В основу кластеризации были положены следующие признаки: содержание лабильного, стабильного, общего органического и неорганического фосфора, общего, белкового, небелкового азота в хвое 2-го года у сосны и у ели.

Обработка данных с использованием этого анализа привела к объединению исследуемых метаболических показателей в три кластера. В каждый кластер включились растения с определенным уровнем содержания исследуемых метаболитов, для каждого из которых были определены диапазоны варьирования. Сочетание этих диапазонов составило биохимическую характеристику кластера, представленную в таблице 5А (сосна) и 5В (ель), где координаты центроидов – это значения содержания фракций азотных и фосфорных соединений, характерных для каждого кластера. Так, у сосны для первого кластера характерно включение деревьев с высоким содержанием всех соединений, за исключением неорганического фосфора, для третьего класса отмечается максимум неорганического фосфора, а второй кластер имеет промежуточные значения по содержанию всех соединений. Однако по лабильному фосфору, неорганическому фосфору, общему азоту растения, входящие в этот кластер, более близки к первому кластеру, а по стабильному фосфору к третьему. Выявленные различия в содержании неорганического фосфора – основного резервного и транспортного пула фосфора в растении, свидетельствуют об его активной утилизации у растений, входящих в первый и частично второй кластеры, и замедлению включения у растений третьего кластера. Эти данные подтверждают ранее высказанную гипотезу, что деревья разных категорий состояния различаются в большей степени по показателям энергетического обмена. Однако эта гипотеза требует экспериментальной проверки.

Таблица 5А

Результаты кластерного анализа данных по сосне обыкновенной

Кластер	Координаты центроидов						
	мг%				%		
	Лабильный фосфор	Стабильный фосфор	Неорганич. фосфор	Общий органич. фосфор	Общий азот	Белковый азот	Небелковый азот
1	4,16	43,48	16,95	47,64	2,33	1,68	0,66
2	3,92	27,12	18,31	31,04	1,52	1,25	0,27
3	1,81	22,36	25,81	24,17	1,04	0,9	0,14

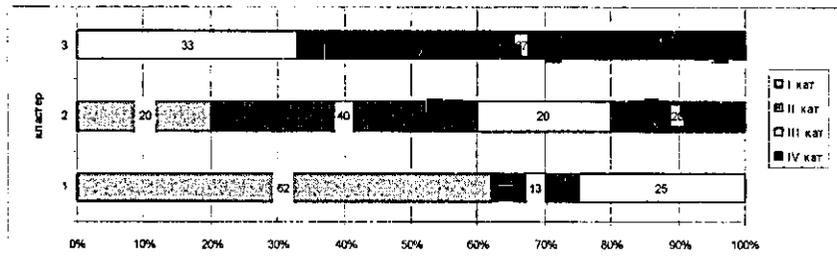
Таблица 5В

Результаты кластерного анализа данных по ели сибирской

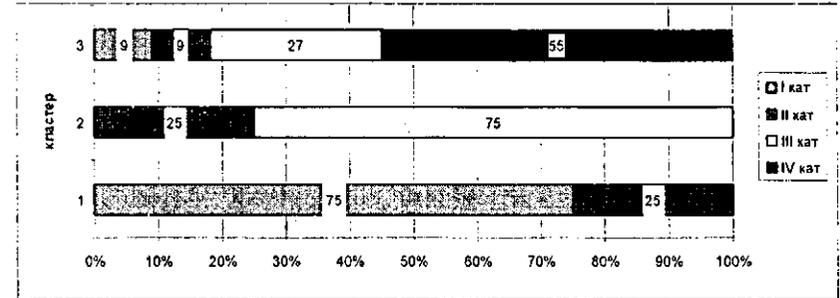
Кластер	Координаты центроидов						
	мг%				%		
	Лабильный фосфор	Стабильный фосфор	Неорганический фосфор	Общий органический фосфор	Общий азот	Белковый азот	Небелковый азот
1	8,46	40,03	31,38	48,5	0,83	0,72	0,18
2	5,78	36,81	30,92	42,59	0,76	0,61	0,15
3	3,19	29,31	50,65	32,5	0,68	0,5	0,11

Далее был проведен анализ деревьев по категориям состояния в разных кластерах (рис. 3). Оказалось, что в один кластер могут быть включены деревья разных категорий состояния, и деревья одной категории состояния – в разные кластеры. Это может означать, что в условиях загрязнения разные особи могут различаться качественной реакцией на загрязнение. Реакция растений может быть связана как со структурными перестройками с попыткой сохранения уровня метаболических процессов (разные категории в одном кластере), так и с метаболическими перестройками с целью поддержания структурной целостности (одна категория в разных кластерах). Вопрос о последовательности структурных и метаболических перестроек обсуждается в литературе (Кайбияйнен и др., 2001; Физиологические..., 1995). Возможно, оба варианта имеют место и зависят от индивидуальных особенностей организма. Сопоставление данных по сосне и ели показало их различия, что связано с биологией вида и разной выраженностью предполагаемых путей адаптации в условиях загрязнения.

Сосна обыкновенная

Рис. 3. Процентное соотношение деревьев *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. по категориям в кластере

Ель сибирская

Продолжение Рис. 3. Процентное соотношение деревьев *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. по категориям в кластере

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние вредных выбросов двух крупнейших комбинатов на Северо-Западе России – Костомукшского горно-обогатительного комбината (Республика Карелия) и Мончегорского медно-никелевого комбината «Североникель» (Мурманская область) на показатели азотного и фосфорного обменов сосны обыкновенной и ели сибирской. Их сопоставление оказалось возможным благодаря одинаковому составу промышленных выбросов у двух комбинатов и сходством исследуемых лесных экосистем, входящих в состав таежной зоны Северо-Запада России. Ранее, основываясь на анализе содержания серы и тяжелых металлов в растениях и воздухе, исследователи пришли к заключению о слабом загрязнении в зоне действия Костомукшского ГОКа и сильном – в зоне действия Мончегорского комбината «Североникель». Полученные нами данные по состоянию метаболитов двух ведущих обменных процессов в растении – азотном и фосфорном – подтвердили это положение и по функциональному состоянию растительных организмов.

В обоих случаях реакция показателей фосфорного и азотного обменов у сосны обыкновенной и ели сибирской на загрязнение имела одинаковое феноменологическое проявление – в ответ на возрастание уровня серы в хвое содержание фосфорных и азотных соединений увеличивается при приближении к комбинату. Однако, если в условиях Костомукшского ГОКа растения не только сохраняют хвою 5 лет жизни и увеличивают ее в размерах и по массе, то в условиях Мончегорского комбината «Североникель» остается хвоя только 2-3 лет жизни и отмечается резкое падение

ние продуктивности растений (Ярмишко, 1997). Природа увеличения содержания основных метаболитов фосфорного и азотного обмена различна. В условиях слабого загрязнения (Костомукшский ГОК) увеличенные содержания фракций азотных и фосфорных соединений в хвое растений связано со стимулирующим действием низких концентраций поллютантов на метаболизм растений сосны. Можно отметить, что в данном случае растения сосны находятся во второй фазе фитостресса – фазе адаптации (Удовенко, 1979; Меерсон, 1986; Пахомова, 1995). Имеет место биохимическая адаптация, происходящая на клеточном уровне, которая осуществляется, по-видимому, путём модуляции активности ферментов метаболизма (Хочачка, Сомеро, 1977; Физиологические..., 1995). «Сверхоптимальные» или дополнительные соединения фосфора и азота используются в синтетических процессах, что на организменном уровне реализуется увеличением продуктивности растений сосны. В адаптивный ответ на действие высоких концентраций тяжелых металлов включается увеличение термоустойчивости как неспецифической реакции растительного организма (Титов и др., 2001), что косвенно подтверждает гипотезу С.Н. Дроздова с сопр. (1984) о зональном действии не только температурного, но и других климатических факторов. В условиях сильного уровня загрязнения (Мончегорский «Североникель») защитные биохимические реакции древесных растений формируются под влиянием продолжительного губительного действия загрязнения. Растения сосны и ели находятся в третьей фазе фитостресса – гибели (истощения ресурсов надёжности) (Пахомова, 1995; Судачкова, 1998) и уровень фактора соответствует зоне повреждения (Дроздов и др., 1984), что приводит к необратимым деструктивным изменениям метаболизма растений. Увеличенные содержания азотных и фосфорных соединений в хвое растений в данных условиях связано с нарушением избирательности их поглощения (Придача, 2002) и в депонировании всего, что поступает в растение. Депонирование, возможно, связано с нарушением оттока ассимилятов из мезофилла во флоэму за счёт изменения функционального состояния плазмодесма (преобразование трубки в стержень) в ответ на подкисление цитоплазмы клеток в условиях действия сернистого ангидрида (Житкова, Новицкая, 2001). Азотные и фосфорные соединения в дальнейшем не включаются в метаболизм, что и может приводить к падению продуктивности растений. Депонирование азотных и фосфорных соединений в хвое деревьев сосны и ели максимально выражено на участке наибольшего экологического неблагополучия (10 км от «Североникеля») и может рассматриваться как особое состояние, являющееся результатом нарушения всего обмена веществ, а не как функциональная метаболическая реакция. Поэтому только показатели содержания азотных и фосфорных соедине-

ний в хвое растений без учёта других компонентов реакции организма не могут использоваться в качестве критерия диагностики физиологического состояния хвойных растений.

Использование метаболической компоненты растений разных категорий жизненного состояния показало их физиологическую гетерогенность. С использованием кластерного анализа удалось выделить три функциональных состояния. Первое состояние – исходное, высокое, с почти ненарушенным метаболизмом, второе – переходное, в котором усиливаются метаболические нарушения, сопровождающиеся нарушением структуры, и третье – устойчивое, низкое, которое соответствует тому уровню метаболизма, ниже которого могут начаться катаболические процессы, ведущие к гибели организма. Каждое состояние характеризуется определённым биохимическим статусом по содержанию азотных и фосфорных соединений. В исследуемом растительном сообществе (на площадке 30 км от комбината «Североникель») присутствуют особи, у которых отмечается корреляция между категорией состояния и метаболическим статусом, и особи, у которых эта корреляция отсутствует, что может свидетельствовать о разных путях адаптации к условиям загрязнения: метаболической и структурной.

Исследование показало, что с увеличением продолжительности работы комбинатов происходит увеличение аккумуляции серы и тяжелых металлов в ассимиляционном аппарате хвойных растений. Это приводит к усиливающейся деградации лесных экосистем, поэтому необходимо продолжение проведения постоянных мониторинговых исследований с использованием метаболических показателей.

ВЫВОДЫ

1. Содержание азотных и фосфорных соединений в разновозрастной хвое сосны обыкновенной и ели сибирской увеличивается по мере приближения к источнику эмиссии в зоне загрязнения Костомукшского ГОКа и Мончегорского комбината «Североникель». Для хвои 1-го года жизни установлена прямая пропорциональная зависимость между содержанием серы и азотными и фосфорными соединениями (общего, кислотонерастворимого, лабильного, стабильного, неорганического фосфора).

2. Выявлены закономерности изменения содержания серы и тяжелых металлов в хвое растений сосны обыкновенной в зоне загрязнения Костомукшского ГОКа. Так, содержание серы и тяжелых металлов в хвое по мере приближения к источнику эмиссий увеличивается, но не превышает

фоновых значений. С увеличением возраста хвои содержание серы, кобальта и хрома не изменяется, меди, никеля, кадмия, свинца, молибдена снижается, а железа, цинка и марганца увеличивается.

3. Выявлены закономерности изменения содержания серы и тяжелых металлов в хвое растений сосны обыкновенной и ели сибирской в зоне загрязнения Мончегорского комбината «Североникель». Так, содержание серы и тяжелых металлов в хвое сосны и ели по мере приближения к источнику эмиссий увеличивается и в несколько раз превышает фоновые значения. С увеличением возраста хвои содержание серы, железа и цинка уменьшается, меди, марганца, магния, никеля и свинца увеличивается, а кадмия и кобальта не изменяется.

4. Длина и масса разновозрастной хвои сосны обыкновенной с усилением техногенной нагрузки в зоне загрязнения Костомукшского ГОКа увеличиваются.

5. Выделено три функциональных состояния сосны обыкновенной и ели сибирской, произрастающих при одинаковом уровне загрязнения, каждое из которых характеризуется определенным биохимическим статусом.

6. В хвое у растений сосны и ели разной категории жизненного состояния, произрастающих при одинаковом уровне загрязнения, содержание серы и тяжелых металлов не различается. Содержание лабильного, стабильного фосфора, общего, белкового и небелкового азота уменьшается, а неорганического фосфора увеличивается с ухудшением их жизненного состояния.

7. Показатели содержания азотных и фосфорных соединений в хвое растений без учёта других компонентов реакции организма не могут использоваться в качестве критерия диагностики физиологического состояния хвойных растений в условиях загрязнения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1.Теребова Е.Н., Сазонова Т.А., Шредерс С.М. Оценка жизненного состояния дерева по фракционному составу азотных и фосфорных соединений//Экологический мониторинг экосистем : Тез. докл. Всерос. совещ. Петрозаводск, 1999. С. 101.

2.Сазонова Т. А., Теребова Е.Н., Придача В.Б., Галибина Н.А. Физиологическое состояние сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения//Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии : Тез. докл. Петрозаводск, 1999. С. 200.

3.Теребова Е.Н., Сазонова Т.А., Шредерс С.М. Фосфорные соединения сосны обыкновенной как индикатор слабого промышленного загрязнения//Реакция растений на глобальные и региональные изменения природной среды : Тез. докл. Всерос. совещ. Иркутск. 2000. С. 93.

4.Теребова Е.Н., Шредерс С.М. Азотные и фосфорные метаболиты хвойных растений разных категорий в условиях техногенных экотопов//Леса Евразии в третьем тысячелетии : Материалы Межд. конф. молодых ученых. Т.1. Москва, 2001. С. 153-154.

5.Сазонова Т.А., Придача В.Б., Теребова Е.Н. Динамика концентраций НРК в пасоке, почках и хвое сосны//Лесные стационарные исследования : методы, результаты, перспективы : Материалы совещания, Москва. Тула, 2001. С. 377-380.

6.Сазонова Т.А., Придача В.Б., Теребова Е.Н. Эколого-физиологические характеристики обмена минеральных питательных веществ сосны//Актуальные вопросы экологической физиологии растений в XXI веке : Тез. докл. Межд. конф. Сыктывкар, 2001. С. 108.

7.Галибина Н.А., Теребова Е.Н., Сазонова Т.А., Чинёнова Л.А., Шредерс С.М. Функциональные перестройки азотного, фосфорного и углеводного обменов сосны обыкновенной в условиях загрязнения//Актуальные вопросы экологической физиологии растений в XXI веке : Тез. докл. Межд. конф. Сыктывкар, 2001. С. 197-198.

8.Galibina N.A., Terebova E.N. Indices of physiological process in *Pinus sylvestris* under stress conditions//Plant under environmental stress. International Symposium. Moscow, K.A. Timiryazev Institute of Plant physiology (October 23-28, 2001). Moscow. 2001. P. 74-75.

9. Terebova E., Galibina N., Sazonova T., Shreders S. Acceleration of the annual development cycle in conifers – an adaptation to industrial pollution//Plant under environmental stress. International Symposium. Moscow, K.A. Timiryazev Institute of Plant physiology (October 23-28, 2001). Moscow. 2001. P. 293-294.

10. Галибина Н.А., Теребова Е.Н. Исследование физиологического состояния сосны обыкновенной в условиях слабого загрязнения//Биологические ресурсы и устойчивое развитие : Тез. докл. Межд. конф. Пуштино, 2001. С. 43.

11. Галибина Н.А., Теребова Е.Н. Изучение индивидуальной изменчивости сосны обыкновенной по метаболическим признакам ассимиляционного аппарата в условиях промышленного загрязне-

ния//Биологические ресурсы и устойчивое развитие : Тез. докл. Межд. конф. Пушкино, 2001. С. 44.

12. Терехова Е.Н., Галибина Н.А. Сазонова Т.А. Биохимические и структурные изменения метаболических показателей хвойных растений в условиях загрязнения // Биологические ресурсы и устойчивое развитие : Тез. докл. Межд. конф. Пушкино, 2001. С. 216-217.

13. Сазонова Т.А., Терехова Е.Н., Галибина Н.А., Таланова Т.Ю., Шредерс С.М., Чинёнова Л.А., Канючкова Г.К. Оценка функционального состояния *Pinus sylvestris* L. в условиях слабого загрязнения//Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-запада России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. С. 157-175.

14. Сазонова Т.А., Терехова Е.Н., Осипова И.А., Шредерс С.М. Азотные соединения в хвое растений в условиях промышленного загрязнения // Лесной журнал, 2001. № 5-6. С. 47-52.

15. Терехова Е.Н., Галибина Н.А., Сазонова Т.А., Таланова Т.Ю. Индивидуальная изменчивость метаболических показателей сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения//Лесоведение (принята в печать)

Серия ИД. Изд. лиц. № 00041
Формат 60x84¹/₁₆. Бумага офсет.
Уч.-изд. л. 1,4. Усл. печ. л. 1,4

Карельский
Редакционный
185003, Петрозаводск

152199K