

На правах рукописи



Папулов Евгений Сергеевич

УСТОЙЧИВОСТЬ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ  
К ДЕЙСТВИЮ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В РАЙОНЕ  
ПЕРВОУРАЛЬСКО - РЕВДИНСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА

06.03.03 - Лесоведение и лесоводство;  
лесные пожары и борьба с ними

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург - 2004

Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете

Научный руководитель: доктор биологических наук,  
профессор С.А. Шавнин

Официальные оппоненты: доктор сельскохозяйственных наук, в.н.с И.А. Фрейберг

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Б.С.Фимушин

Ведущее предприятие: Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды по Свердловской области.

Защита состоится "26" февраля 2004 г. в "10" часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесотехническом университете по адресу: 620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт – 37

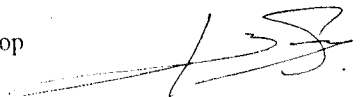
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета.

Автореферат разослан "21" января 2004 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор с.-х. наук, профессор



С.В. Залесов

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. При современном уровне развития технологии и техники загрязнение атмосферы аэропромвыбросами, несмотря на предпринимаемые усилия по снижению объема выбросов, еще продолжительное время будет неизбежным. Важное место в решении проблем защиты лесов от вредного воздействия аэропромвыбросов занимает разработка методов оценки состояния и устойчивости древостоев, без которых невозможны установление масштабов поражения лесных экосистем и оптимизация лесохозяйственных мероприятий по снижению ущерба от антропогенных воздействий.

Цель и задачи исследований. Целью работы является изучение состояния искусственных сосновых молодняков, подверженных техногенному загрязнению предприятий Первоуральско-Ревдинского промышленного узла, и разработка критериев оценки их устойчивости.

Основными задачами исследований являлись:

1. Проведение комплексной лесоводственно-физиологической оценки состояния сосновых молодняков в районе исследований и сравнение ее результатов с данными предыдущих обследований.
2. Изучение сезонно-возрастной динамики изменений биохимических и биофизических параметров деревьев, расположенных в зонах с разным уровнем загрязнения.
3. Исследование возможности применения данных мониторинга морфофизиологических характеристик для оценки устойчивости сосновых древостоев.
4. Поиск критериев для оценки устойчивости древостоев к действию загрязнений.
5. Изучение влияния дополнительного стрессового воздействия на состояние деревьев сосны.

Научная новизна заключается в следующих основных результатах исследований, полученных автором в ходе работы над диссертацией и выносимых на защиту:

1. Проведено повторное комплексное обследование сосновых молодняков в условиях техногенных загрязнений Первоуральско-Ревдинского промышленного узла, позволяющее оценить изменение состояния лесов за 5 лет.
2. Составлены карты-схемы состояния лесов района исследований по совокупности морфометрических и физиологических характеристик, а также по содержанию тяжелых металлов в почве. Анализ карт позволяет выявить основные источники негативного воздействия на древостои, масштабы поражения лесов и пространственно-временную динамику изменения состояния древостоев.

научная библиотека  
УГЛТУ  
г. Екатеринбург

3. Изучена сезонно-возрастная динамика изменения физиологических параметров деревьев, расположенных в различных зонах воздействия аэропромышленных выбросов, на основании которых определены показатели, перспективные для использования в качестве критериев при оценке устойчивости древостоев к действию загрязнений.

4. На основе изучения влияния комбинированного стресса (окорения) установлен набор физиологических характеристик деревьев, которые могут использоваться для дальнейшей разработки нового метода оценки состояния и устойчивости древостоев.

Практическая ценность работы. Заложенные постоянные пробные площади на территории Первоуральско-Ревдинского промышленного узла и результаты комплексного обследования древостоев могут использоваться при реализации региональных экологических программ разных уровней, ведении локального мониторинга лесов и разработке рекомендаций по проведению лесохозяйственных мероприятий по снижению ущерба, наносимого загрязнениями лесам. Данные по сезонно-возрастной динамике физиологических и биофизических характеристик древостоев могут быть использованы в учебном процессе при преподавании курсов "экология" и "экотоксикология".

Апробация работы. Основные положения работы доложены на VIII и IX молодежных научных конференциях "Актуальные проблемы биологии и экологии" (Сыктывкар, 2001, 2002); французско-российском научном симпозиуме "Прикладная и антропогенная динамика лесных экосистем" (Екатеринбург, 2001); научно-технической конференции "Экологическая безопасность Урала", проводимой в рамках международной выставки "Уралэкология. Техноген-2002" (Екатеринбург, 2002); молодежном семинаре "Проблемы изучения биоразнообразия" (Екатеринбург, 2002); научно-практической конференции в УрГПУ (Екатеринбург, 2002); научном молодежном симпозиуме "Безопасность биосферы-2001/02" (Екатеринбург, 2002); международном совещании "Биологическая рекультивация нарушенных земель" (Екатеринбург, 2002); научно-практическом семинаре "Проблемы совершенствования экономического механизма обеспечения экологической безопасности региона" (Екатеринбург, 2002); международной научно-технической конференции "Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса" (Екатеринбург, 2003); международной конференции "Физиология растений – основа фитобиотехнологии" (Пенза, 2003).

Публикации. По материалам исследований опубликовано 12 научных работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка цитируемой литературы и приложения, изложена на 170 страницах машинописного текста, включает 21 таблицу и 23 рисунка.

Список литературы содержит 199 библиографических ссылок, в том числе 21 на иностранном языке.

Работа выполнена на кафедре прикладной физики и биофизики Уральского государственного лесотехнического университета при поддержке Министерства образования РФ (грант № 05.01.022 "Использование морфофизиологической оценки состояния древостоев при определении устойчивости лесных экосистем, расположенных в зонах действия атмосферных промышленных загрязнений") и РФФИ (грант № 01-04-96428 "Изучение ростовых и физиологических процессов в древостоях и оценка устойчивости лесных экосистем, расположенных в зонах действия аэропромышленных загрязнений").

## ГЛАВА 1 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен на юго-западе Свердловской области в пределах Билимбаевского, Ревдинского, Верх-Исетского лесхозов Свердловского управления лесами и учебного научно-производственного комплексного лесохозяйственного предприятия УГЛТУ. Территория исследований представляет собой вытянутый на восток эллипс, с минимальным диаметром 25 км (от поселка Билимбаев до южной окраины города Ревды) и максимальным диаметром 50 км (от поселка Ильмовка до скалы Чертово Городище).

Согласно физико-географическому районированию, район исследований относится к подзоне южной тайги, к провинции низкогорной, наиболее сниженной, полосы Среднего Урала (Прокаев, 1976). По данным лесорастительного районирования Б.П. Колесникова район исследований находится на территории двух лесорастительных областей. Восточная часть района относится к южно-таежному округу Зауральской предгорной провинции Уральской горной лесорастительной области, а западная – к южно-таежному округу Среднеуральской предгорной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области (Колесников и др., 1974; Лесорастительные условия..., 1973).

Климат континентальный, умеренно-холодный, умеренно-влажный. Рельеф района характеризуется как низкогорно-хребтовый, с невысокими горными массивами со слабовыпуклыми вершинами, пологосклонными хребтами, увалами, холмами и отдельно стоящими горами; характерна значительная расчлененность речными долинами. В почвенном покрове преобладают типичные подзолистые, дерново-подзолистые, глеево-подзолистые, бурые горно-лесные, темно-серые, серые оподзоленные и глееватые почвы, а в поймах рек – дерново-луговые (Зубарева, 1986; Фирсова и др., 1982, 1986; Воробейчик и др., 1994). Лесной фонд представлен главным образом коротко- и длительно-производными хвойно-лиственными (елово-пихтовыми, пихтовыми, сосново-еловыми, березово-

еловыми, сосново-березово-еловыми), березовыми и осиновыми лесами. Значительна доля сосновых насаждений.

В районе исследований основным источником аэропромвыбросов является Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ). Основные компоненты газообразных выбросов СУМЗа включают окислы серы и азота, а также фтористый водород. Диоксид серы имеет наибольшую массовую долю среди всех газообразных выбросов. Основные химические элементы, содержащиеся в пылевых частицах – медь, цинк, мышьяк и свинец. Кроме СУМЗа существенный вклад в загрязнение окружающей среды района исследований вносит ряд менее крупных предприятий.

Программа работ включала в себя:

1. Анализ литературных данных о влиянии техногенных загрязнений на состояние и устойчивость древостоев, а также их диагностические параметры.
2. Сбор данных о природных условиях, лесном фонде, состоянии воздушного бассейна и других особенностей района исследований.
3. Подбор искусственных молодняков сосны второго класса возраста и закладка пятнадцати постоянных пробных площадей (ППП) на различном удалении от СУМЗа для создания сети экологического мониторинга лесов района.
4. Сбор хвои и почвенных образцов для дальнейших физиолого-биохимических и физико-химических исследований.
5. Комплексная оценка состояния насаждений по совокупности морфометрических и физиологических характеристик древостоев.
6. Проведение почвенного анализа на ППП.
7. Исследование сезонно-возрастной динамики физиолого-биохимических параметров фотосинтетического аппарата (ФСА) хвои сосны.
8. Проведение экологического зонирования территории исследования на основании совокупности диагностических характеристик и содержания тяжелых металлов в почве.
9. Закладка эксперимента по изучению влияния комбинированного стресса (КС) на состояние деревьев сосны.
10. Изучение скорости минерального питания физиолого-биохимических и биофизических параметров при комбинированном стрессе.
11. Изучение электрофизических свойств прикамбиального слоя стволов деревьев сосны.
12. Разработка критериев устойчивости сосновых древостоев, произрастающих в условиях техногенной нагрузки.

При закладке ППП руководствовались действующим отраслевым стандартом "Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки" (ОСТ 56-60-83) и методическими рекомендациями, изложенными в работе Огиевского В.В., Хирова А.А. (Огиевский, Хиров, 1974). В ходе полевых работ подобрано и заложено 15 ППП в искусственных молодняках сосны второго

класса возраста. Пробные площади равномерно распределены по зонам с различным уровнем загрязнения, в соответствии с экологическим зонированием территории, которое описано в работе Фомина В.В. (Фомин, 1998). Заложенные ППП представляют 9 типов лесорастительных условий и 9 типов леса, представляющие три близких группы типов леса по режиму увлажнения, свежие, периодически сухие, устойчиво свежие и свежие, периодически влажные (Лесорастительные условия..., 1973; Правила..., 1994). По вычисленному среднему диаметру выделяли и маркировали 20 модельных деревьев, диаметр которых наиболее близок к среднему. У каждого модельного дерева определяли радиальный прирост за последние 5 и 10 лет путем измерения кернов древесины, взятых приростным буром. Приросты по высоте определяли у трех модельных деревьев на каждой ППП.

Для определения типологической принадлежности и морфологических свойств почв на пробных площадях были заложены и описаны почвенные разрезы (Ремезов, Погребняк, 1965; Огиевский, Хиров, 1974; Иванова, 1976; Почвы СССР, 1979; Волкова и др., 1987; Ржанникова, Луганская, 1989). При отборе образцов почв для лабораторных исследований использовали метод конверта (Огиевский, Хиров, 1974; Калинин и др., 1989).

Физиологическое состояние системы транспорта воды, минеральных веществ и ассимилятов ствола определяли на каждой ППП с помощью измерения электрического импеданса прикамбиального комплекса (Голодрига, Осипов, 1972; Каширо, 1976; Каширо и др., 1988; Суховольский и др., 1979; Тараканова, 1984; Голиков, 2000; Шавнин и др., 2000; Голиков и др., 2001). Измерения проводили при помощи приборов ИД-2 и ИД-5, разработанных на кафедре биофизики УГЛТУ (Шавнин и др., 2003). Прибор ИД-5, в отличие от своего предшественника, позволяет измерять активную и реактивную составляющие импеданса биологических тканей.

При закладке эксперимента, в котором изучали влияние КС на скорость корневого минерального питания и физиолого-биохимические характеристики ФСА двухлетней хвои деревьев сосны, использовали следующую методику. На контрольной и сильно загрязненной ППП было отобрано по 9 модельных деревьев, с диаметрами, близкими к среднему диаметру. У трех деревьев удаляли полностью кору и луб по периметру ствола лентой шириной 10 см на высоте 1,0-1,3 м от шейки корня, у трех других - 90 % коры и луба, а три дерева оставались не окоренными (контроль). На этих деревьях проводили ежемесячно в течение периода вегетации измерения электрофизиологических характеристик. Почвенные образцы для определения подвижных форм N, P и K брали в непосредственной близости стволов модельных деревьев из горизонта A<sub>1</sub>.

На ППП 4, 9, 10 и 11 была исследована годовая динамика содержания пигментов, полифенолов, связанной и свободной воды, квантовой эффективности (КЭ) нециклического транспорта ФСА хвои.

Для определения пигментного состава, содержания флавонолов и катехинов, свободной и связанной воды, а также содержания серы в хвое сосны использовали общепринятые методики (Методы..., 1978; Крючков и др., 1988; Практикум..., 1996; Маслов, 1978). При помощи флуориметра РАМ-2000 (Walz, Германия) измеряли параметры быстрой флуоресценции хлорофилла "а" неотделенной от побегов хвои второго года (Portable..., 1993). Измерения проводили при двух потоках ФАР 10 и 100 мкЕ/(м<sup>2</sup>с).

Образцы почв для определения тяжелых металлов подготавливали к анализу по общепринятой методике (Аринушкина, 1970), с использованием сита диаметром 0.312 мм. Измерение концентрации тяжелых металлов проводили в вытяжках, полученных при обработке образцов азотной кислотой, на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Спираль-14». Для определения содержания основных элементов минерального питания (обменного калия и подвижных форм фосфора, а также нитратного и аммонийного азота) использовали стандартные методики (Магницкий и др., 1959; Практикум..., 1989; Аринушкина, 1970).

Все виды измерений были выполнены в течение четырех вегетационных периодов, с 2000 по 2003 гг. Общее число измерений составило: в полевых условиях – 9288, в лаборатории – 13734.

Математико-статистическую обработку данных производили с использованием стандартных пакетов программ.

При комплексной диагностике насаждений использовали модель оценки состояния древостоев (Калинин и др., 1989; 1991; Shavnin et al., 1997). При оценке состояния древостоев использовали величины показателей состояния и обобщенных показателей состояния. Согласно шкале желательности были выделены 5 зон с соответствующими качественными оценками: >53 баллов – состояние очень хорошее, соответствует фону; 53-41 баллов – состояние хорошее; 41-29 баллов – состояние удовлетворительное; 29-17 – состояние плохое и <17 баллов – состояние очень плохое.

Проведение семивариансного анализа осуществляли при помощи геостатистического пакета "GS + for Windows". Для получения карт состояния строили виртуальную поверхность (Голубев и др., 1995) с использованием программ "Surfer 32" и "GS + for Windows". В качестве координат X и Y использовали реальные координаты ППП (абсолютные значения в км, были взяты с топографической карты масштаба 1:200000), а в качестве Z – значения рассматриваемых характеристик. (Марков и др., 1997; Фомин, 1998; Фомин, Шавнин, 1999).

## ГЛАВА 2 ВЛИЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ДРЕВЕСНЫЕ РАСТЕНИЯ И ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

В Уральском регионе функционируют различные промышленные предприятия, деятельность которых влечет за собой загрязнение атмосферы

ры вредными выбросами, оказывающими отрицательное влияние на динамику развития лесных экосистем. Наиболее распространенными токсикантами являются: окислы серы и азота, соединения фтора и хлора, аммиак, сероводород, хлористый водород, окислы углерода, озон и соединения тяжелых металлов (Николаевский, 1979; Петров, 1985).

Под воздействием химических загрязнений кардинально изменяется структура фитоценоза, происходит сокращение его видового разнообразия (Второва, Пьявченко, 1984; 1987; Черненко, 1987; Крючков, 1991; Воробейчик, Хантемирова, 1994). Степень нарушений в анатомическом строении ассимиляционных органов растений зависит от концентрации и токсичности газов, а также длительности их действия и чувствительности отдельных видов. Неблагоприятное влияние токсических эмиссий на древостой выражается в уменьшении приростов ствола по диаметру (Кузьмичев, 1985; 1986; Лица, 1985; Вайчис и др., 1990) и приростов по высоте (Барткявичус, 1984; Юкнис и др., 1985; Пастернак и др., 1993).

Серьезные нарушения наблюдаются в строении ФСА листьев, а особенно в хлоропластах, так как многие поллютанты концентрируются в основном в хлоропластах и в вакуолях (Илькун, 1971; Кунин и др., 1979; Николаевский, 1979; Силаева, 1978). Многими исследователями установлено влияние промышленных выбросов на проницаемость клеточных мембран (Беляева и др., 1986, 1989; Николаевский, 1989).

В лесных биогеоценозах почти все поступающие из атмосферы тяжелые металлы накапливаются в подстилке и гумусовом горизонте (Вайчис и др., 1988). Токсическое воздействие ионов тяжелых металлов на биоту возрастает вследствие повышения кислотности почв вблизи предприятий. Кислые соединения газов и дымов не встречаются в лесной почве буферной силы, что создает большую опасность деградации их структуры и понижения плодородия (Щербаков и др., 1970). Фитомасса растений зоны промышленных выбросов в значительной степени обогащена ионами тяжелых металлов. Особенно интенсивно в сосновых древостоях накапливаются медь, свинец и цинк (Krosshaun et al., 1993). С возрастом накопление поллютантов в фитомассе, как правило, увеличивается (Шилова и др., 1984). Сосна обыкновенная активно поглощает и накапливает соединения тяжелых металлов в количествах, превышающих нормальную концентрацию этих элементов в 1,5 - 4 раза (Вайчис и др., 1988; Григорьев, Юргенсон, 1982).

Оценка состояния древостоев является неотъемлемой частью лесного экологического мониторинга, в рамках которого определяются прогнозы развития лесов, произрастающих под воздействием антропогенных, в т.ч. техногенных факторов (Залесов и др., 2001). Согласно анализу литературных данных, в настоящее время разработаны ботанические, физиолого-биохимические, морфо-биометрические, дендрохронологические, популяционные и биогеоценотические подходы и методы оценки влияния атмо-

сферных загрязнителей на растительные сообщества (Алексеев, 1990; Алиев, 1993; Аугустайтис, 1992; Барахтенова, Николаевский, 1988; Беляева и др., 1989; Вайнерт и др., 1988; Гетко, 1989; Гитарский, 1993; Голиков и др., 2000; Зубарева, 1993; Калинин, 1989; Крючков, 1991; Мэннинг, Федер, 1985; Николаевский, 1989; Ружицкая, 1969; Сабилов, 1988; Сапунов, 1984; Смит, 1985; Трешоу, 1988; Усманов и др., 2001; Шавнин и др., 1993, 2000, 2003; Шипунов, 1980; Immissionsökologische..., 1992; Lichen..., 1998; Shavnin et. al., 1995, 1997).

Устойчивость - сложное свойство фитоценозов, отражающее способность системы поддерживать свою структуру более или менее стабильной на протяжении некоторого отрезка времени (Розенберг, 1984). Устойчивость леса - это его способность сохранить нормальную структуру, состояние и ростовую динамику, а также ресурсный и экологический потенциал и биоразнообразие вопреки действию дестабилизирующих природных и антропогенных факторов и условий. Неустойчивость леса - это длительно невозвращаемые отклонения от перечисленных нормальных его свойств, приводящие к расстройству леса, преобразованию его в другой, менее ценный лес или приводящие к его гибели, переводу лесной площади в не покрытую лесом или в нелесную площадь (Методы оценки состояния..., 1999). Согласно А. Ю. Кулагину устойчивость растений к экстремальным факторам основана на адаптивном комплексе, в котором различные формы устойчивости играют ключевую роль на отдельных этапах онтогенеза и в отдельные периоды сезонного развития растений. А. Ю. Кулагин выделил различные уровни и формы устойчивости (Усманов и др., 2001): клеточно-тканевый уровень, включающий в себя анатомическую, физиологическую и биохимическую формы; организменный (онтогенетический), включающий габитуальную, феноритмическую, анабиотическую и регенерационную формы и популяционно-ценотический, включающий популяционную и ценотическую формы устойчивости.

На основании изученной литературы и научно-исследовательских материалов можно сделать вывод, что оценка состояния и устойчивости лесных экосистем должна быть комплексной, так как только такой подход может дать наиболее объективную картину влияния антропогенных факторов на природные объекты.

### ГЛАВА 3 КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДРЕВОСТОЕВ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНИРОВАНИЕ ЛЕСОВ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРВОУРАЛЬСКО-РЕВДИНСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА

При оценке состояния древостоев и ведении экологического мониторинга лесов наиболее перспективным является комплексный подход, основанный на применении лесоводственно-таксационных, геоботанических, почвоведческих и физико-химических методов (Залесов и др., 2001). Осо-

бое место в системе оценок состояния отдельных компонентов лесных экосистем занимают физиолого-биохимические параметры деревьев.

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, следует, что с увеличением расстояния от СУМЗа, снижается содержание серы в хвое, что является прямым подтверждением увеличения техногенной нагрузки с приближением к СУМЗу. На самой близкой к СУМЗу ППП 12, содержание серы в хвое в 1.36 раза выше, чем в контроле (ППП 4), однако это значение составляет только 78% от величины данного параметра на 8 пробной площади. Данный факт объясняется наличием преобладающих западных ветров и относительно плоским рельефом местности в направлении ППП 8, кроме этого данная пробная площадь расположена к юго-востоку от СУМЗа, а ППП 12 к западу.

Содержание пигментов в хвое с удалением от СУМЗа увеличивается. Самое низкое содержание хлорофиллов "а" и "б" наблюдается на ППП 9, расположенной на удалении 4.1 км в восточном направлении от завода. Хвоя с ППП 5, удаленной на расстоянии 19.4 км от источника выбросов имеет самые высокие значения данных параметров. Более низкое содержание пигментов в хвое древостоев пробных площадей относительно контроля наблюдается на удалении до 10-12 км от СУМЗа.

Факторный анализ позволил распределить значения диагностических характеристик по степени их взаимного влияния и выявить наиболее информативные параметры, такие, как содержание меди в почве, содержание хлорофилла "а" и серы в хвое и расстояние до источника выбросов.

Экологическое зонирование лесов в районах антропогенного воздействия является одной из важных проблем, имеющих фундаментальное и прикладное значение. На основании его результатов представляется возможность судить о состоянии лесного фонда, создавать сеть пунктов ведения лесного экологического мониторинга, обосновывать подходы к оценке ущерба, нанесенного лесам аэропромвыбросами и планировать проведение лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение их продуктивности и средообразующих функций (Фомин, Шавнин, 2001).

Анализ результатов оценки состояния древостоев, произрастающих в условиях вредного воздействия промышленных предприятий, с помощью карт, позволяет сделать следующие выводы:

1. В непосредственной близости от основного источника загрязнения показатели состояния древостоев по всем параметрам худшие.
2. С удалением от СУМЗа наблюдается улучшение состояния древостоев.
3. Границы расположения зон с различным состоянием древостоев имеют следующие особенности: вытянутость в восточном направлении обусловлена преобладанием западных и северо-западных ветров; вытянутость зон с плохим и удовлетворительным состоянием на север, связана с наличием на севере от СУМЗа дополнительных источников загрязнения г.

Первоуральска, а также с влиянием рельефа; мозаичность зон и сложная форма их границ (причинами являются особенности рельефа, влияющие на рассеивание поллютантов и неоднородность лесорастительных условий).

4. Негативное влияние аэропромышленных загрязнений в районе исследований наблюдается на удалении не менее 12 км от СУМЗа.

Таблица 1

Физиолого-биохимические параметры сосновых древостоев  
(в числителе - средние значения, в знаменателе - стандартные отклонения)

№ ППП	Хл. "а", мг/г сух. веса	Хл. "b", мг/г сух. веса	Кароти- ноиды, мг/г сух. веса	Сера, % от сух. веса
1	<u>2,35</u> 0,24	<u>0,78</u> 0,09	<u>0,76</u> 0,07	<u>0,14</u> 0,01
2	<u>2,18</u> 0,28	<u>0,95</u> 0,21	<u>0,57</u> 0,13	<u>0,14</u> 0,01
3	<u>1,85</u> 0,35	<u>0,80</u> 0,14	<u>0,42</u> 0,07	<u>0,13</u> 0,01
4	<u>2,15</u> 0,19	<u>0,71</u> 0,06	<u>0,71</u> 0,06	<u>0,11</u> 0,01
5	<u>2,51</u> 0,25	<u>0,91</u> 0,13	<u>0,85</u> 0,06	<u>0,12</u> 0,01
6	<u>2,28</u> 0,29	<u>0,79</u> 0,14	<u>0,84</u> 0,08	<u>0,15</u> 0,02
7	<u>2,11</u> 0,17	<u>0,67</u> 0,08	<u>0,74</u> 0,05	<u>0,11</u> 0,03
8	<u>2,27</u> 0,31	<u>0,84</u> 0,13	<u>0,80</u> 0,09	<u>0,19</u> 0,01
9	<u>1,16</u> 0,35	<u>0,38</u> 0,12	<u>0,47</u> 0,09	<u>0,13</u> 0,01
10	<u>1,87</u> 0,20	<u>0,61</u> 0,07	<u>0,63</u> 0,05	<u>0,14</u> 0,02
11	<u>2,10</u> 0,21	<u>0,71</u> 0,11	<u>0,70</u> 0,06	<u>0,16</u> 0,01
12	<u>1,54</u> 0,21	<u>0,51</u> 0,08	<u>0,58</u> 0,06	<u>0,15</u> 0,01
13	<u>2,07</u> 0,26	<u>0,66</u> 0,12	<u>0,68</u> 0,10	<u>0,14</u> 0,01
14	<u>2,21</u> 0,27	<u>0,76</u> 0,11	<u>0,74</u> 0,09	<u>0,13</u> 0,01
15	<u>2,06</u> 0,26	<u>0,67</u> 0,12	<u>0,67</u> 0,07	<u>0,13</u> 0,01

Сравнение оценок состояния древостоев по совокупности морфометрических характеристик, сделанных в 2000 году (рис. 1), с оценками их состояния в 1995 г. показало:

1. В 2000 г. фоновая зона стала иметь несколько большую протяженность на юге от СУМЗа (от 2 до 5 км)

2. Зона с плохим состоянием древостоев в 2000 г. стала иметь мозаичный характер. Основная ее часть концентрируется непосредственно за зоной с очень плохим состоянием и еще один участок находится к северу от источника загрязнения.

3. В целом за 5 лет картина оценки состояния древостоев существенно не изменилась. Следовательно, антропогенные факторы за данный период не ухудшили состояние древостоев. Возможно, что дополнительное проявление их воздействия наступит через больший период времени.

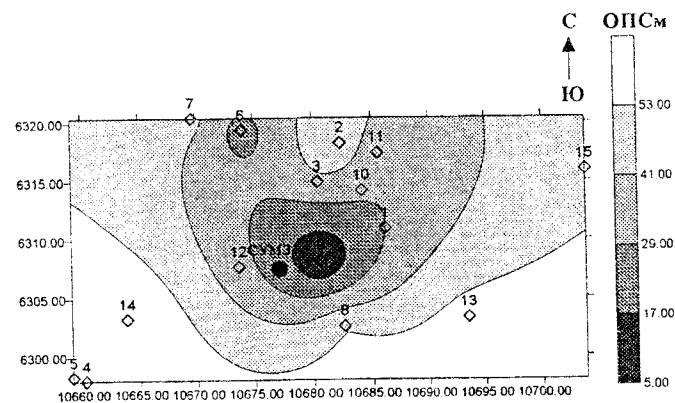


Рис. 1. Карта-схема состояния лесов на территории, прилегающей к СУМЗу, полученная на основании обобщения морфометрических показателей состояния древостоев (4 параметра). Данные получены в результате полного обследования пробных площадей в 2000 г. ОПСм - обобщенный морфометрический показатель состояния.  
◆ - пункт наблюдения; по горизонтали и вертикали - километровая сетка взятая с географической карты района

Из приведенных данных (рис. 2) следует, что концентрация меди в центральной части района исследований, соответствующей местоположению медеплавильного завода, многократно превышает фоновый уровень. Это объективно свидетельствует о загрязнении окружающей среды данным предприятием. Наибольшие концентрации меди наблюдаются в почвах 8, 9 и 12 ППП (360-376 мг/кг). Наименьшие концентрации поллютантов обнаружены в почвах 5, 7, 14 и 4 ППП (23-30 мг/кг).

Содержание свинца в почвах имеет наибольшее значение на ППП 9, 8 и 12 и составляет 60,0, 59,5 и 42,8 мг/кг соответственно. Наименьшие

значения содержания свинца имеют почвы на ППП 2, 14 и 5. Они составляют 5,2, 7,4 и 8,6 мг/кг соответственно. Низкие концентрации свинца на этих ППП, вероятно, обусловлены тем, что они расположены на достаточно большом расстоянии от завода. На всех ППП (за исключением 9, 8 и 12) содержание свинца ниже 22,8 мг/кг и соответствуют обычной фоновой концентрации для данного региона (32,4 мг/кг).

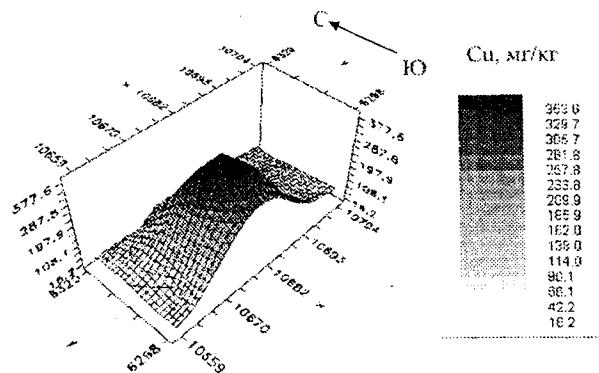


Рис. 2. Поверхность, полученная в результате интерполяции значений концентрации меди в почвах пробных площадей. Абсолютные отметки (в км) вдоль осей X и Y взяты с топографической карты масштаба 1:200000

Антибатное изменение параметров поверхностей распределения ОПС и концентраций меди и свинца в центральной части района исследования, объективно свидетельствует об отрицательном влиянии аэропромышленных выбросов СУМЗа на состояние лесных экосистем.

Проведенный анализ полученных данных свидетельствует о том, что использование геоинформационных систем в комплексе с морфометрическими и физиологическими исследованиями позволяет определять источник выбросов, распределение концентраций вредных веществ в почвах и оценить степень угнетения лесных экосистем. Ведение непрерывного экологического мониторинга лесов путем измерения физиолого-биохимических характеристик позволяет существенно уточнить и повысить объективность лесоводственно-таксационных оценок состояния древостоев.

#### ГЛАВА 4 ГОДИЧНАЯ ДИНАМИКА ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ И БИОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ХВОИ

Результаты исследования динамики содержания хлорофиллов в хвое в течение вегетационного периода показывают, что направленность се-

зонных изменений данного показателя одинакова для контрольной ППП и участков, подверженных среднему уровню воздействия экотоксикантов. Наиболее высокий уровень содержания хлорофилла наблюдается летом. Осенью, в период подготовки к зимнему покою, его количество в хвое, как правило, уменьшается. Совпадение сезонной динамики и величины содержания пигментов на ППП 4, 10 и 11 указывает на то, что при средних уровнях загрязнения ФСА хвои успевает быстро восстанавливаться. Это, в свою очередь, свидетельствует о его относительно более высокой чувствительности по сравнению с ростовыми процессами. Сильное воздействие экотоксикантов (ППП 9) изменяет как характер сезонной динамики пигментов, так и уровень их накопления. В течение всего вегетационного периода содержание пигментов в хвое на этой ППП практически не изменяется и составляет примерно половину от их количества на контрольной ППП 4, что указывает на глубокие нарушения в метаболизме фотосинтезирующих клеток. Содержание хлорофилла "а" на контрольной ППП в 1,7-2,1 раза выше, чем на 9 ППП в течение всего периода исследований.

Одной из наиболее чувствительных характеристик к действию стрессовых факторов на деревьях сосны является содержание относящихся к вторичным метаболитам катехинов и флавонолов в хвое, формирующих антиоксидантную систему листового аппарата. Величина содержания полифенолов возрастает на 9 ППП при увеличении стрессовой нагрузки. Данный факт на фоне низкого содержания хлорофилла свидетельствует, по видимому, о глубоких нарушениях защитно-регуляторных функций антиоксидантной системы, что приводит к изменению общего уровня метаболизма сосны. Результатом развития индуцированного загрязнением стресса является снижение выраженности сезонных изменений содержания флавонолов в хвое.

Проведенные исследования показали, что КЭ ФСА хвои является информативным параметром для проведения диагностик состояния лесных насаждений. В течение периода активной вегетации на контрольной ППП 4 значения величин КЭ стабильны и существенно выше значений данной характеристики на загрязненной ППП 9. После перехода к осенне-зимнему покою различия в КЭ на этих ППП незначительны.

Наблюдаемое в условиях сильного атмосферного загрязнения снижение оводненности хвои (с 50-59% на контроле до 49-54%) и содержания свободной воды, особенно значительно это уменьшение в летние месяцы, а также колебательный характер изменений количества свободной воды на фоне сохранения уровня связанной свидетельствует о появлении адаптационного синдрома. Последний характеризуется меньшей активностью метаболических процессов, в связи с чем снижается необходимость сохранять большие количества свободной воды. Падение уровня жизнедеятельности, в свою очередь, приводит к ослаблению скорости ростовых процессов. При этом устойчивость к действию стрессовых факторов поддержи-



вається за счет сохранения количества связанной воды в клетке на уровне, обеспечивающем функционирование основных физиолого-биохимических процессов.

Накопление в хвое серы в течение всего периода наблюдений в зоне сильного поражения аэропромвыбросами всегда выше (в 1,1 раза в сентябре и 3,3 раза – в мае-июне), чем на контрольной ППП. Результаты исследований свидетельствуют о том, что на ППП 9 сера продолжает накапливаться в хвое также и в зимние месяцы.

В ходе исследований установлено, что величины оценок состояния древостоев по физиолого-биохимическим характеристикам зависят от сезона наблюдений и могут не совпадать в разные годы. Для повышения объективности диагностики необходимо учитывать фенофазы развития растений на разных участках ведения экологического мониторинга. Это является дополнительным требованием к выделению фонового и сильно пораженного участков, используемых в качестве эталонов.

Корреляционный анализ, показал, что адекватность изменений состояния ФСА хвоя к погодно-климатическим условиям может существенно изменяться под действием аэропромышленных загрязнений. Это подтверждается, например, отсутствием корреляции между температурой воздуха и содержанием хлорофилла "а" и свободной воды в хвое на сильно загрязненной ППП 9. Диагностические характеристики ФСА хвоя и оводненность клеток хвоя достоверно коррелируют со среднемесячной температурой воздуха и, как правило, не коррелируют с влажностью и количеством осадков. Содержание вторичных метаболитов (полифенолов), слабо зависит от рассмотренных погодно-климатических условий района исследований.

При использовании методики электрофизиологической оценки системы транспорта воды, минеральных веществ и ассимилятов в районах со средним и слабым уровнями загрязнения учитывалось, что отличия в радиальных приростах у деревьев из разных зон не столь существенны, как в районах с интенсивным техногенным воздействием. Из этого следует, что для корректного сравнения сильно различающихся по радиальным приростам древостоев необходимо пронормировать как активную, так и реактивную составляющие электросопротивления к толщине годичного слоя. Кроме того, электрофизиологические характеристики флэзмы и ксилемы следует рассматривать отдельно. Для изучения возможностей такого подхода был проведен эксперимент по послойному измерению электрического импеданса у деревьев, растущих в зоне сильного загрязнения и в фоновых условиях.

Величины удельного сопротивления флэзмы и ксилемы прямо пропорциональны суммарному сопротивлению флэзмы и ксилемы и толщине измеряемого слоя. При этом отношение удельных сопротивлений ксилемы и флэзмы увеличивается под действием загрязнений. Это происходит за

счет увеличения удельного сопротивления ксилемы и снижения удельного сопротивления флэзмы. Суммарная электрическая емкость флэзмы и ксилемы, на контрольной ППП выше, чем на загрязненной ППП 9. Емкость одного годичного слоя ксилемы на контрольной ППП выше в 3-5 раз, чем на загрязненном участке.

## ГЛАВА 5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СОЗДАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО СТРЕССА ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ К ДЕЙСТВИЮ АЭРОПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Результаты комплексной оценки древостоев показали, что при умеренном загрязнении среды изменение ряда физиологических характеристик не всегда достоверно, а применение анализа их сезонной динамики для оценки устойчивости достаточно трудоемко и интерпретация данных не всегда однозначна. В связи с этим, было предположено, что применение дополнительного к загрязнению искусственного дозированного стрессового воздействия, усиливающего влияние внешних факторов на деревья, позволит предложить новые подходы к оценке их устойчивости. Изучение последствий КС для набора физиологических характеристик, имеющих диагностическую значимость, может позволить выделить новые критерии устойчивости деревьев к действию техногенных загрязнений.

Анализ результатов исследований показал, что содержание серы в хвое деревьев сосны постоянно накапливается в течение всего сезона вегетации и КС влияния на этот процесс не оказывает. Содержание зеленых пигментов ФСА хвоя снижается под действием поллютантов и также не зависит от КС. На 4 ППП содержание хлорофилла "а" больше в течение сезона вегетации в 1,4-1,8 раза. Загрязнение оказывает непосредственное влияние на КЭ. Величина этой характеристики на ППП 4 больше, чем на сильно загрязненной ППП 9 в 1,1-1,5 раза. Кроме того, осеннее снижение КЭ хвоя на ППП 9 наступает раньше, чем на ППП 4. Следует отметить, что в конце августа этот эффект увеличивается при максимальном КС (100% окорение). Водный обмен в хвое зависит от действия загрязнений. Содержание общей воды возрастает до августа на ППП 9 и до сентября на ППП 4. Уменьшение оводненности хвоя осенью происходит за счет снижения содержания свободной воды. КС, при 100% окорении, снижает содержание свободной воды на ППП 9 уже с середины периода вегетации. Таким образом, судя по показателям водного обмена, влияния КС и загрязнений аддитивны. Изучение антиоксидантной системы хвоя показало, что загрязнения вызывают повышение уровня катехинов и слабо изменяют содержание флавонолов. Содержание флавонолов растет в сезоне и не зависит от КС. Существенное снижение количества флавонолов происходит лишь при со-

вместном действии сильного КС и загрязнений. Содержание катехинов увеличивается при сильном загрязнении и не зависит от КС.

Начиная с конца июня на ППП 4 и 9 под действием КС происходит снижение потребления нитратного азота, пропорциональное степени повреждения флоэмной системы. Сезонная динамика потребления фосфора свидетельствует о замедлении перехода к осенне-зимнему покою под действием КС на обеих ППП, независимо от загрязнения. На ППП 4 происходит увеличение потребления этого элемента в июне-июле и снижение - в конце августа. Осенний эффект при действии КС происходит с запаздыванием. На ППП 9 сезонная динамика содержания фосфора в почве выражена меньше, чем на ППП 4. КС приводит к снижению потребления калия на ППП 4 уже в середине вегетации, в результате чего происходит его накопление в почве. У контрольных деревьев ППП 4 снижение потребления калия начинается в августе-сентябре, когда происходит снижение скорости их роста. На ППП 9 загрязнения вызывают изменения сезонной динамики обмена калия, а дополнительное влияние КС проявляется после прекращения фазы роста (в конце августа-сентябре). Снижение содержания калия в почве в конце сентября на ППП 9 происходит, по-видимому, за счет вымывания его осадками. Сентябрьское увеличение потребления калия в условиях действия КС на ППП 9 аналогично зарегистрированному по фосфору и свидетельствует об усилении минерального обмена в этот период при нарушении флоэмного транспорта.

Результаты исследований электрического импеданса прикамбиального комплекса ствола указывают на изменение сроков перехода в состояние покоя при КС, а также на более глубокий стресс при 100% окорении у деревьев на ППП 9. Под действием загрязнений и КС переход деревьев в покой замедляется. Действие КС вызвало снижение величины импеданса выше кольца окорения, и, в меньшей степени, в нижней части ствола. На ППП 9 ниже кольца окорения при сильном КС (100% окорение) величины импеданса в течение всего периода измерений высокие. Это свидетельствует, о более сильном угнетении системы водно-минерального транспорта и ростовых процессов ствола при комплексном воздействии рассмотренных стрессовых факторов.

## ВЫВОДЫ

Проведенные в ходе работы над диссертацией исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Морфофизиологические параметры древостоев, произрастающих в условиях влияния аэропромвыбросов, подвергаются количественным изменениям и зависят от расстояния и направления исследуемых насаждений до источника выбросов. Рядом с СУМЗом показатели состояния древостоев по всем параметрам худшие и с удалением от завода наблюдается их

улучшение. Негативное влияние аэропромвыбросов в районе исследований наблюдается на удалении не менее 12 км от СУМЗа.

2. Особенности расположения (вытянутость, мозаичность и сложная форма) границ зон с различным состоянием древостоев обусловлены преобладанием западных и северо-западных ветров, наличием на севере от СУМЗа дополнительных источников загрязнения, а также особенностями рельефа, влияющими на рассеивание поллютантов и неоднородность лесорастительных условий.

3. Морфометрические параметры древостоев в районе исследований имеют слабо выраженную динамику изменений во времени, что свидетельствует о стабилизации экологической обстановки. При решении некоторых задач экологического мониторинга лесов (например, при оценке состояния древостоев после залповых выбросов поллютантов), перспективно использовать в качестве диагностических более чувствительные физиологические и биофизические характеристики (содержание пигментов ФСА, электрический импеданс тканей ствола и др.).

4. Использование геоинформационных систем в комплексе с морфометрическими и физиологическими исследованиями позволяет определить источник выбросов, уточнить характер рассеивания вредных веществ на территории и оценить степень угнетения лесных экосистем. Эту информацию необходимо учитывать при разработке рекомендаций по ведению лесохозяйственных мероприятий, направленных на уменьшение отрицательного воздействия аэропромвыбросов на лесонасаждения.

5. При средних уровнях загрязнения ФСА хвоя успевает быстро восстанавливаться, что, в свою очередь, свидетельствует о его относительно более высокой устойчивости по сравнению с ростовыми процессами. Непрерывное длительное воздействие токсикантов изменяет характер сезонной динамики содержания пигментов и уровень их накопления в хвое.

6. Антиоксидантная система клетки хвоя на участках со средним уровнем загрязнения более активна, чем на сильно загрязненной территории, что способствует повышению устойчивости клеток и тканей хвоя к действию поллютантов.

7. В условиях сильного атмосферного загрязнения снижается содержание воды в хвое. Колебательный характер изменений количества свободной воды на фоне сохранения уровня связанной воды свидетельствует о появлении адаптационного синдрома, который характеризуется меньшей активностью метаболических процессов. Соотношение содержания отдельных форм воды в хвое может служить одним из критериев устойчивости деревьев сосны к действию атмосферных промышленных загрязнений.

8. Корреляционный анализ данных показал, что структурно-функциональное состояние ФСА хвоя зависят от среднемесячной температуры воздуха и слабо связаны с влажностью воздуха и количеством осадков. Содержание вторичных метаболитов (полифенолов) не коррелирует с

рассмотренными погодно-климатическими условиями района исследований.

9. Удельное сопротивление годичного слоя ксилемы возрастает под действием загрязнения, что связано, по-видимому, с уменьшением скорости транспорта воды и минеральных веществ. Электрическая емкость ксилемы и флоэмы уменьшается при действии загрязнения, что свидетельствует об уменьшении количества мембранных структур в тканях и снижении их жизнеспособности. Использование удельных сопротивлений ксилемы и флоэмы является перспективным подходом в диагностике оценки состояния древостоев, произрастающих в условиях аэропромвыбросов. Величина электрической емкости ксилемы и флоэмы является информативным параметром в исследовании древостоев, подверженных техногенной нагрузке.

10. Переход в стрессовое состояние, вызванное действием загрязнений и нарушением флоэмного транспорта, приводит к существенному изменению сезонной динамики корневого минерального питания деревьев сосны, и в меньшей степени, влияет на ФСА хвои. Параметры пигментного состава ФСА и состояния антиоксидантной системы (содержание полифенолов) хвои могут применяться при оценке состояния и устойчивости в качестве дополнительных. Более высокую устойчивость ФСА хвои к действию стрессовых факторов необходимо учитывать при проведении биоиндикационных исследований, т.к. они основаны преимущественно на измерении визуальных и физиолого-биохимических характеристик ассимиляционного аппарата листьев. В результате этого биоиндикационный подход может давать заниженные оценки масштабов ущерба, наносимого древостоям аэропромышленными загрязнениями.

11. Использование дозированного дополнительного стрессового воздействия, основанного на нарушении вертикального флоэмного транспорта (окорение), является перспективным методологическим подходом для разработки физиологических критериев оценки состояния и устойчивости деревьев и древостоев.

#### Список научных работ по материалам диссертации

1. Папулов Е.С. Экологическое зонирование сосновых древостоев в условиях техногенного загрязнения в районе Первоуральско – Ревдинского промышленного узла // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. VIII молод. научн. конф. Института биологии Коми НЦ УрО РАН. - Сыктывкар, 2002. - С. 242-243
2. S.A. Shavnin, V.V. Fomin, L.I. Koroleva, E.S. Papulov Use of morphophysiological approach to the forest ecosystems state estimation in industrially polluted areas // Dynamics of natural and man-conditioned forest ecosys-

tems: Proceedings from the French-Russian scientific seminar. - Yekaterinburg, 2001. - PP. 92-93

3. Шавнин С.А., Королева Л.И., Марина Н.В., Голиков Д.Ю., Фомин В.В., Папулов Е.С., Иванченко В.Г. Использование физиолого-биохимических характеристик при оценке состояния лесов в зонах действия аэропромышленных загрязнений // Экологическая безопасность Урала: Матер. научно-технич. конф. «УРАЛЭКОЛОГИЯ. ТЕХНОГЕН - 2002». - Екатеринбург, 2002. - С. 54
4. Папулов Е.С., Фомин В.В., Королева Л.И. Факторный анализ параметров древостоев, произрастающих в условиях аэропромвыбросов // Актуальные проблемы биологии и экологии: Матер. докл. IX молод. научн. конф. - Сыктывкар, 2002. - С. 113
5. Папулов Е.С., Королева Л.И., Гусев А.В. Использование физиологических параметров в оценке состояния сосновых древостоев // Безопасность биосферы: Сб. докл. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. - С.35
6. Папулов Е.С., Марина Н.В., Гусев А.В., Фомин В.В., Шавнин С.А. Комплексная оценка состояния лесных экосистем по морфофизиологическим параметрам и содержанию тяжелых металлов в почве // Биологическая рекультивация нарушенных земель: Матер. Междунар. совещания, Екатеринбург, 3-7 июня 2002г. - Екатеринбург: УрО РАН, 2003. - С. 356-363
7. Шавнин С.А., Фомин В.В., Марина Н.В., Новоселова Г.Н., Папулов Е.С. и др. Изучение ростовых и физиологических процессов в древостоях и оценка устойчивости лесных экосистем, расположенных в зонах действия аэропромышленных загрязнений // Региональный конкурс РФФИ «Урал-2001»: Аннотационные отчеты. - Екатеринбург, 2002. - С. 244-247
8. Шавнин С.А., Королева Л.И., Папулов Е.С., Фомин В.В. Экологическое зонирование лесов как региональный инструмент оценки влияния аэропромышленных загрязнений на углеродный баланс // Проблемы совершенствования экономического механизма обеспечения экологической безопасности региона: Докл. участников научно-практич. семинара. - Екатеринбург: Издательство АМБ, 2002. - С. 29
9. Папулов Е.С., Фомин В.В., Крюк В.И., Шавнин С.А. Использование быстрой флуоресценции хлорофилла хвои в оценке состояния сосновых древостоев // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: Сб. матер. междунар. научн.-техн. конф. / УГЛТУ. - Екатеринбург, 2003. - С. 96-97
10. Шавнин С.А., Яковлев И.Д., Голиков Д.Ю., Папулов Е.С., Иванченко В.Г. Использование электрофизиологических характеристик тканей прикамбиального комплекса ствола при диагностике состояния деревьев сосны обыкновенной // Леса Урала и хозяйство в них: Сб. научн. трудов. - Вып. 23. / УГЛТУ. - Екатеринбург, 2003. - С. 318-329

11. Шавнин С.А., Марина Н.В., Новоселова Г.Н., Голиков Д.Ю., Папулов Е.С., Фомин В.В. Использование комбинированного стресса при оценке устойчивости сосны обыкновенной к действию аэропромышленных загрязнений // Физиология растений - основа фитобиотехнологии: Сб. докл. - Пенза, 2003. - С. 356
12. Шавнин С.А., Фомин В.В., Марина Н.В., Новоселова Г.Н., Папулов Е.С. и др. Изучение ростовых и физиологических процессов в древостоях и оценка устойчивости лесных экосистем, расположенных в зонах действия аэропромышленных загрязнений // Региональный конкурс РФФИ «Урал-2002»: Аннотационные отчеты. - Екатеринбург, 2003. - С. 382-385