

На правах рукописи



Григоренко Алена Валерьевна

**ВЛИЯНИЕ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА
КОМПОНЕНТЫ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ
МИНУСИНСКОГО ЛЕНТОЧНОГО БОРА)**

03.02.08 – Экология (биология)
(биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова» (ФГБОУ ВО «ХГУ им. Н.Ф. Катанова»)

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Грибов Александр Ильич

Официальные оппоненты: **Шавнин Сергей Александрович**
доктор биологических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории
экологии древесных растений ФГБУН
«Ботанический сад Уральского отделения
РАН»

Тарасов Павел Альбертович
кандидат биологических наук, доцент, доцент
кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет науки и
технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Ведущая организация: ФГБУН «Центр по проблемам экологии и
продуктивности лесов РАН»

Защита диссертации состоится «5» июня 2018 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 999.119.02 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, ауд. Р8-06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте организации <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Л.А. Глущенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Наметившийся в прошлом веке экономический рост, способствовавший повышению благосостояния людей, в условиях недостаточного финансирования природоохранных мероприятий, привел к ослаблению, деградации и даже гибели лесных экосистем вокруг крупных промышленных центров и городов. Одним из основных факторов, оказывающих негативное воздействие на лесные экосистемы, признано аэротехногенное загрязнение промышленными выбросами (Писаренко, Мерзленко, 1990; Страхов, 1993; Чурагулов, 1999). Под воздействием техногенных эмиссий у древостоя лесных экосистем происходят негативные физиологические и биохимические изменения (Михайлова, 1997; Функциональные ..., 1989; Хвастунов, 1999; Михайлова и др., 2006; Есякова, Степень, 2008; Григоренко, Грибов, 2015). Вызывает опасение и тот факт, что влиянию эмиссий подвержены не только леса, расположенные в непосредственной близости от источников негативного воздействия, но и леса, произрастающие в десятках-сотнях километров от источников выброса загрязняющих веществ (Алексеев, 1990; Харук и др., 1996; Байдина, 2001; Зиганшин и др., 2011).

В свою очередь, в условиях глобального загрязнения, лесные экосистемы играют огромную роль в аккумуляции газообразных поллютантов, они способны поглотить из атмосферы до 50% вредных газов (Николаевский, 1978, 2002), а также пыли, приводя к снижению уровня загрязнения биосферы (Грибов, 1997; Скрипальщикова, 1997; Скрипальщикова, Грешилова, 2008; Луганский и др., 2010). Тем самым, в условиях аэротехногенного загрязнения, леса приобретают все большее значение как фактор окружающей среды, с помощью которого возможна ее экологическая стабилизация (IPCC, 2013; Второй оценочный..., 2014; Замолотчиков и др., 2015; Назлуханов, 2015). Именно лесные экосистемы регулируют химический состав атмосферы и ее оптические свойства, выполняя одну из своих главных полезных функций – климатообразующую (Ваганов и др., 2005), выполняют водоохранную, водорегулирующую, противоэрозионную, гидроресомелиоративную, биотопреобразующую и другие полезные функции, а, следовательно, нуждаются в особой охране и постоянном изучении.

Лесные экосистемы, произрастающие на территории юга Минусинской котловины, находятся в зоне комплексного воздействия наиболее «вредных» отраслей промышленности: теплоэнергетической, угольной, металлургической, от которых в окружающую среду поступают фтористые газообразные соединения, фториды неорганические плохо растворимые, ванадий, медь, никель, свинец, являющиеся наиболее фитотоксичными; умеренно фитотоксичные железо, марганец и другие. На данной территории

опыт проведения комплексных исследований состояния лесных экосистем в условиях аэротехногенного загрязнения отсутствует.

Большая часть выбрасываемых загрязняющих веществ на территории юга Минусинской котловины принадлежит предприятиям Абакано-Черногорского промышленного узла и АО «РУСАЛ Саяногорск», выбросы от которых с учетом розы ветров распространяются в восточном и северо-восточном направлениях со смещением в долину реки Енисей.

Минусинский ленточный бор произрастает на правобережной части реки Енисей, удаленность ближайших участков бора от предприятий Абакано-Черногорского промузла составляет около 15 км, от предприятия по производству алюминия – около 60 км. Наиболее близко расположенными (на расстоянии около 5 км) к Минусинскому бору стационарными источниками выброса являются источники выброса филиала «Минусинская ТЭЦ» АО «Енисейская ТГК (ТГК-13)».

Основная лесообразующая порода Минусинского бора – *Pinus sylvestris* L. весьма чувствительна к загрязнению, поэтому может быть использована в качестве объекта для мониторинговых исследований.

Цель исследования. Изучить влияние аэротехногенного загрязнения на компоненты лесной экосистемы – хвои и осевых побегов *Pinus sylvestris*, почвы и лесной подстилки на примере Минусинского ленточного бора.

Задачи исследования:

1. Определить характер атмосферной миграции загрязняющих веществ, отходящих от техногенных источников, и установить зону наибольшего осаждения взвешенных веществ на территории лесной экосистемы посредством мониторинга загрязнения снегового покрова, и оценить влияние аэротехногенного загрязнения на аккумуляционную способность древостоя.

2. Определить влияние аэротехногенного загрязнения на протекание физиологических процессов, на биохимические параметры и морфометрические характеристики хвои и осевых побегов *Pinus sylvestris*.

3. Оценить уровень загрязнения компонентов лесной экосистемы – почвы, лесной подстилки и хвои *Pinus sylvestris* фтором и тяжелыми металлами, выделить основные загрязнители, оказывающие негативное воздействие на состояние физиологических и морфометрических параметров ассимиляционного аппарата *Pinus sylvestris*.

Научная новизна. Впервые для юга Минусинской котловины проведено комплексное исследование компонентов лесной экосистемы в условиях аэротехногенного загрязнения. Построены карты, отражающие уровень загрязнения почвы, лесной подстилки и хвои *Pinus sylvestris*. Установлено, что в зоне комплексного влияния предприятий угольной и металлургической промышленности, теплоэнергетики, одними из основных загрязняющих веществ, оказывающих негативное воздействие на лесную экосистему, являются тяжелые металлы (цинк, ванадий, кадмий, железо, свинец, никель) и фтор.

Теоретическая и практическая значимость. Выявленные уровни загрязнения тяжелыми металлами и фтором почвы, подстилки и хвои *Pinus sylvestris* лесной экосистемы, а также оценка влияния загрязнения на физиологические функции и морфологические параметры древостоя, имеют большое значение для дальнейшего мониторинга состояния лесных экосистем в условиях аэротехногенного загрязнения.

Проведенный мониторинг содержания тяжелых металлов и фтора в почвах лесной экосистемы может быть использован для составления прогнозов концентрирования поллютантов в почвах в условиях техногенного загрязнения.

Полученные результаты о состоянии древостоя Минусинского ленточного бора, подкрепленные данными о содержании основных загрязняющих веществ в различных компонентах экосистемы, могут быть использованы органами лесного хозяйства для подбора новых и корректировки используемых лесомелиоративных мероприятий с целью сохранения насаждений.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве материала для чтения лекций и проведения практических занятий со студентами биологических и технических направлений подготовки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аккумулирующая способность лесной экосистемы, в условиях воздействия техногенных выбросов, зависит от расстояния до источников негативного воздействия. Лесная экосистема юга Минусинской котловины, в условиях аэротехногенного загрязнения, способна сохранять эффективность очищения древесного полога до 66,5%.

2. С приближением к стационарным источникам выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух у двухлетней хвои *Pinus sylvestris* снижается интенсивность фотосинтеза и возрастает водный дефицит.

Личный вклад автора. Автором определены цель и задачи, подготовлена программа исследований, осуществлены работы по планированию, выбору и обоснованию методов. Сбор полевого материала выполнен непосредственно автором. Автором лично проведен весь комплекс экспериментальных работ по морфометрическим и физиологическим исследованиям, математическая обработка, анализ и обобщение полученных результатов.

Степень обоснованности и достоверность результатов исследований базируются на значительном экспериментальном материале (заложено 22 постоянных и временных пробных площади, выполнено 660 определений содержания взвешенных веществ в снежном покрове, 16630 морфометрических измерений хвои и побегов, 900 определений интенсивности фотосинтеза, дыхания и водного дефицита; определение количественного и качественного содержания в хвое терпеноидов, тяжелых металлов и фтора осуществили в аккредитованных лабораториях) и

согласованностью разноплановых результатов – морфометрических, биохимических и физиологических исследований, обработанных статистически с применением методов математического анализа.

Апробация результатов. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Основные результаты работы были доложены на 6 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы промышленных городов» (Саратов, 2013), Международной научной конференции молодых ученых, посвященной 70-летию Национальной Академии Наук Армении «Биоразнообразие и экологические проблемы сохранения дикой природы» (Армения, Цахкадзор, 2013), IX Международной научно-практической конференции «Новости передовой науки – 2013» (г. София, Болгария, 2013), Всероссийской конференции с международным участием «Состояние лесов и актуальные проблемы лесопользования» (Хабаровск, 2013), XVII Международной школеконференции студентов и молодых ученых «Экология Южной Сибири и сопредельных территорий» (Абакан, 2013), XIII российско-монгольской научной конференции молодых ученых и студентов «Алтай: экология и природопользование» (Бийск, 2014), конкурсе-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН 2017 на секции «Исследования компонентов лесных экосистем Сибири» (Красноярск, 2017).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 452 наименования, 47 из которых на иностранных языках. Работа изложена на 196 стр. машинописного текста, содержит 28 таблиц, 26 рисунков, 5 приложений.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.б.н. А.И. Грибову за общее руководство и ценные советы при подготовке работы, к.т.н. Е.В. Шаниной за всестороннюю помощь при проведении исследования, к.б.н. В.М. Жуковой за помощь в освоении методик по исследованию физиологических параметров хвои, ст. преподавателю кафедры ИЭ и ОП А.А. Голубничему за ценные советы при проведении статистического анализа, д.б.н. А.А. Онучину, д.х.н. С.Р. Лоскутову и всем сотрудникам Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН за содействие и помощь в проведении биохимических исследований хвои, семье за поддержку и понимание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Негативное воздействие выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух на лесные экосистемы

В главе представлен анализ отечественной и зарубежной литературы по проблеме загрязнения атмосферного воздуха как одного из основных негативных факторов воздействия на лесные экосистемы.

Глава 2. Объект и методика исследований

Объектом исследования послужил Минусинский ленточный бор. Полевые работы проводились с 2012 по 2015 годы. Нами проведены работы по закладке постоянных и временных пробных площадей, по определению таксационных показателей древостоя, мониторингу снегового покрова, отбору проб компонентов бора, анализу физиологических и морфологических параметров хвои, статистическому анализу. Аналитическое исследование содержания терпеноидов в эфирном масле хвои проводили в лаборатории Института леса им. В.Н. Сукачева, определение тяжелых металлов и фтора в компонентах лесной экосистемы – в аккредитованной лаборатории.

Пробные площади заложены в типичных по условиям местопроизрастания участках, на расстоянии 5, 10, 16, 22, 25, 30, 35, 40, 45 км от источников негативного воздействия. Контрольная пробная площадь заложена в наибольшем удалении от источников выбросов, на расстоянии 49 км от города Минусинска. Всего заложено 10 постоянных пробных площадей, каждая площадью около 1 га (Таксация леса..., 2011) (рисунок 1).

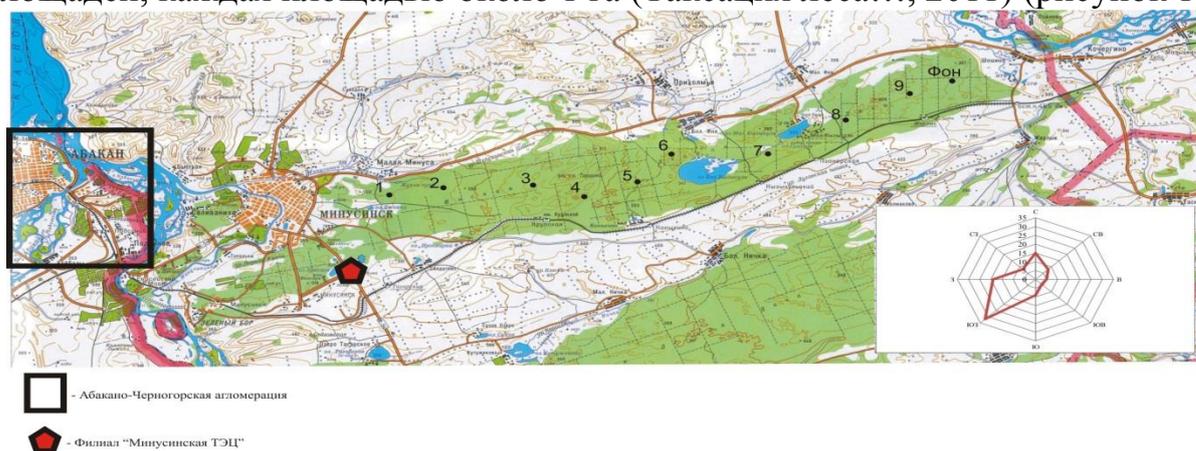


Рисунок 1 – Карта-схема расположения пробных площадей

На каждой пробной площади определили таксационные признаки древостоя, включая состав, среднюю высоту, возраст, бонитет, полноту, запас, средний диаметр, тип леса (Орлов, 1911; Анучин, 1982; Общесоюзные нормативы..., 1992; Лесоводство..., 2012).

Мониторинг загрязнения снегового покрова осуществляли с 2012 по 2014 год по общепринятым методикам (Наставление..., 1976; ГОСТ Р 51592-2000; ПНДФ 14.1:2:4.254-2009). Ежегодно в ходе исследования под пологом леса отбиралось 110 проб снега, в том же количестве отбирались пробы и на открытых участках.

Реакцию древостоя оценивали по состоянию ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной – интенсивности фотосинтеза (метод Л.А. Иванова и Н.Л. Коссович), дыхания (метод Бойсен-Иенсена), водного дефицита (Воскресенская и др. ..., 2008), а также по среднему возрасту хвои, степени ее поражения (Мартынюк, 2004), размерам, массе, сближенности хвои, длине осевых побегов и густоте охвоения (Вишнякова и др., 2008). Для отбора проб на каждой пробной площади выбрано 10 модельных деревьев.

Отбирали хвою второго года жизни как наиболее физиологически активную (Игнатьева, 2005) из разных частей кроны в начале августа.

Исследовали содержание загрязняющих веществ в почве, лесной подстилке и хвое. На каждой пробной площади были взяты смешанные пробы почв и подстилок – методом конверта. Отбор проб подстилки осуществлялся на всю мощность слоя, отбор проб почв – на глубину до 20 см. Хвою для химического анализа отбирали из разных частей крон модельных деревьев. После отбора образцы доставлялись в аккредитованную лабораторию для дальнейшего анализа.

Рассчитали коэффициенты концентраций (K_k) химических элементов, как отношение содержащихся в компонентах лесной экосистемы элементов на исследуемых участках к фоновому содержанию, и показатель суммарного загрязнения, представляющий собой сумму превышений коэффициентов концентраций химических элементов, по формуле Саета:

$$Z_c = \sum K_k - (n - 1), \quad (1)$$

где n – число анализируемых элементов загрязнителей;
 $K_k - > 1$.

Эфирное масло получали методом гидродистилляции. Выход находили волюмометрическим путем. Качественное определение компонентного состава образцов выполняли на хромато-масс-спектрометре «Agilent 5975C-7890A» с использованием автоматического пробоотборника для жидких образцов Agilent 7683. Идентификацию компонентов проводили путем сравнения масс-спектров исследуемых образцов с данными библиотеки «NIST05a. L».

На основе полученных аналитических материалов составлены карты, отражающие пространственное распределение концентраций взвешенных веществ в снеговом покрове, уровень загрязнения тяжелыми металлами и фтором почвы, подстилки и хвои. Карты сформированы с использованием программы CorelDRAW X14 с помощью интерактивного перетекания.

Статистическую обработку результатов проводили по общепринятым методикам (Лакин, 1990; Зайцев, 1991) с помощью программы Microsoft Excel 2010.

Глава 3. Характеристика природных условий и техногенных источников загрязнения района исследования

Минусинский ленточный бор приурочен к Алтае-Саянскому горнолесостепному району, расположенному по периферии Минусинской котловины. Расположение бора на территории котловины определяет влияние на лесную экосистему неблагоприятных климатических факторов, таких как инверсий температуры воздуха, частых штилей, способствующих застою воздуха (Государственный доклад..., 2016), а, с усилением господствующих западного либо юго-западного ветров, последующего переноса воздушными массами по направлению к Минусинскому ленточному бору промышленных пылегазовых эмиссий от крупных техногенных источников Абакано-Черногорского промышленного узла,

предприятий городов Минусинск, Саяногорск, сосредоточенных на сравнительно небольшой территории.

Наиболее крупными промышленными объектами, в зоне возможного влияния которых расположен Минусинский ленточный бор, являются предприятия теплоэнергетики – АО «Енисейская ТГК (ТГК-13)» филиалы «Абаканская ТЭЦ», «Минусинская ТЭЦ», ООО «Хакасский ТеплоЭнергоКомплекс»; угледобывающие производства – АО «УК «Разрез Степной» и ООО «СУЭК-Хакасия; предприятие по производству первичного алюминия – АО «РУСАЛ Саяногорск». Предприятиям Абакано-Черногорского промузла, городов Саяногорск и Минусинск выданы разрешения на выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух, в количестве свыше 250 тысяч тонн в год, в том числе на выброс наиболее фитотоксичных загрязняющих веществ (фтористые газообразные соединения, фториды неорганические плохо растворимые, ванадий, медь, никель, свинец) – около 780 тонн, умеренно фитотоксичных (железо, марганец) – более 5 тонн, пыли неорганической с содержанием двуоксида кремния 70-20% и ниже – более 11 тысяч тонн. Взвешенные вещества являются одними из приоритетных загрязняющих веществ в районе исследования. Определение компонентного состава взвешенных веществ и промышленной пыли при разработке нормативов допустимых выбросов предприятиями не проводится, так как это не предусмотрено утвержденными методиками расчета. Исследования качественного состава взвешенных веществ в снежном покрове Минусинского бора, проведенные А.И. Грибовым (2005), выявили содержание в твердых аэрозолях тяжелых металлов Fe, Mn, Cu, V, Zn, Pb, Cd, As, Hg, Co, Mo и фтора.

В районе исследования, наряду со значительными по объему промышленными эмиссиями, негативное воздействие на Минусинский бор оказывает длительность влияния эмиссий (более 30 лет), линейное загрязнение выбросами ж/д транспорта, проходящего по железной дороге, пролегающей вдоль южной границы бора, а также рекреация – Минусинский ленточный бор ввиду расположения является излюбленным местом отдыха населения Минусинского района Красноярского края и Республики Хакасия.

3.6 Диагностика атмосферной миграции взвешенных веществ по снеговому покрову

Проведенные исследования загрязнения снегового покрова на территории Минусинского бора показали, что ореол основного загрязнения в лесной экосистеме наблюдается на расстоянии до 16 км от близлежащих источников выброса загрязняющих веществ. С удалением от источников негативного воздействия наблюдается уменьшение содержания взвешенных веществ в снеге ($r = -0,69$, $p = 0,99$). Составленная на основе полученных данных о содержании взвешенных веществ в снеговом покрове карта-схема представлена на рисунке 2.

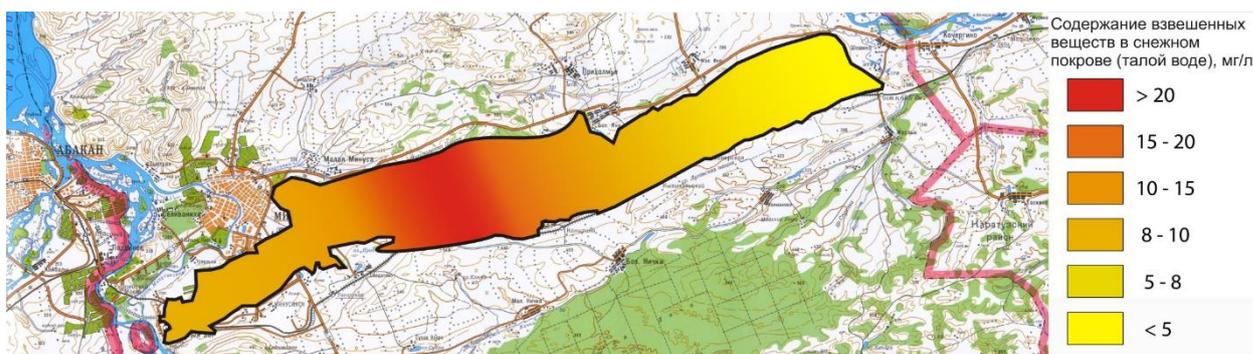


Рисунок 2 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения снегового покрова на всем протяжении Минусинского ленточного бора

На всех участках ленточного бора наблюдается превышение содержания взвешенных веществ в снеговом покрове по сравнению с фоном, что приводит к снижению аккумулирующей способности древостоя, в среднем, на 28,9%. На участках, подверженных наибольшему осаждению взвешенных веществ, очищающая эффективность насаждений снижается до 11,1%.

Несмотря на длительное техногенное воздействие, древостой Минусинского ленточного бора сохраняет способность поглощать до 66,5% поступающих в атмосферу взвешенных веществ.

Глава 4. Изменение физиологических процессов, биохимических параметров и морфометрических характеристик *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного загрязнения

С приближением к стационарным источникам выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух у хвой сосны обыкновенной второго года жизни наблюдается усиление водного дефицита ($r = -0,87$) и снижение интенсивности фотосинтеза хвой ($r = 0,81$). Наибольшее среднее значение водного дефицита выявлено на расстоянии 10 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ ($13,35\% \pm 0,07$), что в 2,7 раз превысило водный дефицит хвой фонового участка. Здесь же наблюдается наименьшее значение интенсивности фотосинтеза, разница с фоновым показателем составляет 37,05% (рисунок 3).

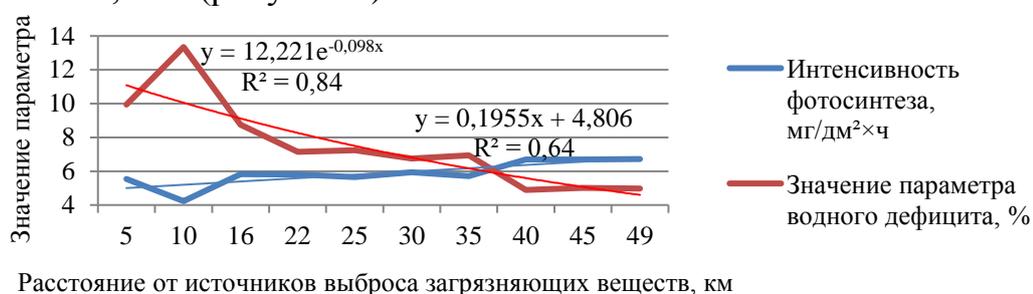


Рисунок 3 – Зависимость величины водного дефицита и интенсивности фотосинтеза от расстояния до ближайших источников выброса загрязняющих веществ

В хвое сосны обыкновенной с наиболее угнетенными физиологическими параметрами содержание эфирного масла на 38,7% превышает содержание масла хвои условно чистого района (таблица 1).

Таблица 1 – Содержание эфирного масла в хвое *Pinus sylvestris*, % от абсолютно сухой массы (а.с.м.)

Место отбора пробы	Содержание эфирного масла, % от а.с.м.
Фоновый участок – в 49 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ	0,19±0,01
Пробная площадь № 2 – в 10 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ	0,31±0,02

Следствием активизации биосинтеза эфирного масла может являться противодействие растительного организма неблагоприятному воздействию антропогенных факторов.

Диагностика состояния древостоя по компонентному составу эфирного масла показала, что увеличение техногенной нагрузки не приводит к изменению компонентного состава исследованных эфирных масел хвои, изменяется только количественный вклад компонентов. В частности, возрастает содержание монотерпенов, содержание сесквитерпенов, напротив, снижается (таблица 2), что, возможно, связано химическими превращениями внутри растительного организма под воздействием загрязняющих веществ.

Таблица 2 – Компонентный состав эфирного масла хвои *Pinus sylvestris* на фоновом участке и участке с угнетенными физиологическими параметрами

Наименование компонента	Содержание компонентов, % от цельного масла	
	Пробная площадь № 2 – в 10 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ	Фоновый участок – в 49 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ
Tricyclene C ₁₀ H ₁₆	0,93±0,04	0,57±0,03
α-Pinene C ₁₀ H ₁₆	26,42±0,62	17,13±0,43
Camphene C ₁₀ H ₁₆	4,12±0,17	2,73±0,12
β-Pinene C ₁₀ H ₁₆	3,99±0,11	3,18±0,13
β-Myrcene C ₁₀ H ₁₆	1,31±0,7	1,05±0,7
Δ ³ -Carene C ₁₀ H ₁₆	8,72±0,25	5,82±0,2
Limonene C ₁₀ H ₁₆	0,94±0,03	0,89±0,03
Terpinolen C ₁₀ H ₁₆	0,82±0,02	0,77±0,03
Всего монотерпенов	78,87±0,97	75,89±0,9
Всего кислородсодержащих веществ	3,45±0,09	2,25±0,1
Всего сесквитерпенов	11,87±0,31	14,83±0,33

Превалирующим компонентом монотерпенов в эфирном масле хвои сосны является α-пинен (C₁₀H₁₆), что, вероятно, обусловлено защитными свойствами данного вторичного метаболита для сосны в стрессовых ситуациях. Результаты нашей работы согласуются с исследованиями И.И.

Бардышева и др. (1978); А.С. Рожкова, Г.И. Массель (1982); В.Д. Рошиной, В.В. Рошиной (1989); О.В. Сотниковой и Р.А. Степень (2001).

Поражения хвои второго года жизни в большей степени наблюдаются на первых четырех участках (рисунок 4). Установлено, что с удалением от источников выброса загрязняющих веществ сокращается процент поражения хвои и число пораженных хвоинок в выборке, коэффициенты корреляции с вероятностью прогноза (p) 99% составляют соответственно $r = -0,95$ и $r = -0,92$

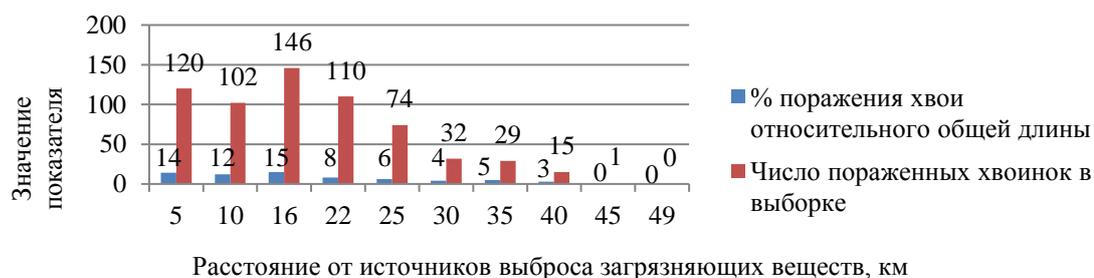


Рисунок 4 – Изменение процента поражения хвои и числа пораженных хвоинок в зависимости от расстояния от ближайших источников выброса

Максимальная продолжительность жизни хвои на всех участках, включая фоновый, не превышает 5 лет. Наибольшая средняя продолжительность жизни хвои и наибольшие средние значения длины и площади хвои выявлены на фоновом участке, наименьшие – на участке, расположенном на расстоянии 16 км от источников выброса. Разница значений морфологических параметров между фоновым и указанным участком составляет: по длине хвои – 26%, по площади хвои – 48,7%.

Проведенный статистический анализ зависимостей морфологических параметров хвои от расстояния до источников негативного воздействия показал, что наибольшие связи установлены между расстоянием и:

- средними значениями длины хвои – $r = 0,96$ ($p = 0,99$);
- средними значениями площади хвои – $r = 0,96$ ($p = 0,99$);
- средними значениями массы хвои – $r = 0,95$ ($p = 0,99$);
- средним возрастом – $r = 0,92$ ($p = 0,99$).

В результате проведенного регрессионного анализа получены следующие уравнения регрессии (таблица 3).

Таблица 3 – Значения уравнений регрессии, описывающих закономерности между параметрами хвои и расстоянием от источников выброса загрязняющих веществ

Исследуемый параметр хвои	Уравнение регрессии, описывающее закономерность между исследуемым параметром и расстоянием от источников выброса загрязняющих веществ
Длина хвои	$y = 0,4341x + 37,011$ ($R^2 = 0,95$)
Площадь хвои	$y = 2,5644x + 89,036$ ($R^2 = 0,94$)
Масса хвои	$y = 0,1144x + 10,758$ ($R^2 = 0,91$)
Средний возраст хвои	$y = 0,0263x + 2,1168$ ($R^2 = 0,84$)

С увеличением расстояния от источников выброса загрязняющих веществ достоверно возрастают средние длины осевых побегов первого года жизни ($r = 0,73$, $p = 98\%$) и второго года жизни ($r = 0,72$, $p = 98\%$). Существует достоверная обратная связь между длиной осевых побегов первого года жизни и количеством хвои на них ($r = -0,73$, $p = 98\%$), таким образом, имеет место увеличение плотности хвои с приближением к источникам негативного воздействия. Наибольшая сближенность хвои первого года жизни наблюдается на пробных площадях, расположенных на расстоянии 10 и 16 км от источников выброса загрязняющих веществ.

У модельных деревьев пробных площадей, расположенных на расстоянии от 10 до 25 км от источников выброса загрязняющих веществ, на осевых побегах практически отсутствует хвоя старших возрастов (рисунок 5), с удалением от источников негативного воздействия остается 2-5 хвоинок четвертого года жизни на 1 см длины осевого побега, т.е. количество хвои старшего возраста достоверно возрастает ($r = 0,94$, $p = 0,99$).

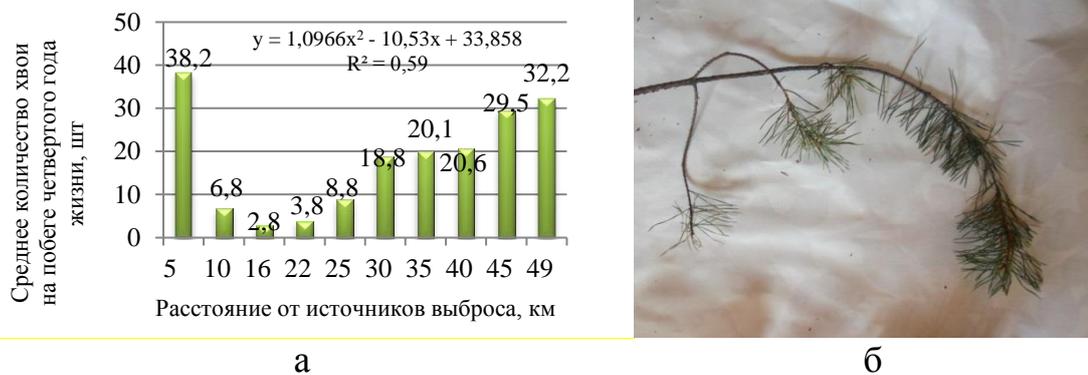


Рисунок 5 – Среднее количество хвои четвертого года жизни на 10 см длины осевого побега (а); осевой побег с пробной площадью № 3 (б)

Угнетение физиологических процессов ассимиляционного аппарата, с приближением к источникам негативного воздействия, сказывается на поражении хвои и ее размерах: коэффициент корреляции между значениями водного дефицита и процентом поражения хвои равен 0,82; между водным дефицитом, длиной и площадью хвои – $r = -0,65$, массой – $r = -0,64$; коэффициенты корреляции между изменением интенсивности фотосинтеза и значениями длины, массы и площади хвои составляют 0,68; 0,7; 0,66 соответственно. В результате проведенного регрессионного анализа получены следующие уравнения регрессии (таблица 4).

Таблица 4 – Значения уравнений регрессии между параметрами хвои

Параметр	Интенсивность фотосинтеза	Водный дефицит
Длина	$y = 1,7111x^2 - 14,537x + 76,255$ ($R^2 = 0,52$)	$y = 0,2176x^2 - 5,1009x + 75,461$ ($R^2 = 0,53$)
Площадь	$y = 6,1264x^2 - 37,589x + 175,86$ ($R^2 = 0,45$)	$y = 0,9819x^2 - 25,83x + 302,16$ ($R^2 = 0,45$)
Масса	$y = 0,4156x^2 - 3,1637x + 18,395$ ($R^2 = 0,53$)	$y = 0,0546x^2 - 1,3525x + 21,105$ ($R^2 = 0,48$)
Процент поражения	$y = 0,0119x^2 - 0,2754x + 6,8755$ ($R^2 = 0,64$)	$y = -0,311x^2 + 7,1911x - 27,809$ ($R^2 = 0,85$)

Глава 5. Содержание некоторых тяжелых металлов и фтора в различных компонентах Минусинского ленточного бора

Содержание загрязняющих веществ в компонентах лесной экосистемы – почве, подстилке и хвое *Pinus sylvestris* фтором и некоторыми тяжелыми металлами отражено в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристика содержания химических элементов в хвое, подстилке и почве Минусинского бора

Химический элемент	Компонент лесной экосистемы	Среднее содержание, мг/кг	Интервал концентрации, мг/кг	Фоновое содержание, мг/кг	Расстояние, на котором установлены наибольшие концентрации, км
Железо	почва	514,39	490,37 - 563,9	492,38	22-25
	подстилка	537,8	508,77 - 578,35	506,9	16-22
	хвоя	54,34	47,07 - 74,29	41,34	16-22
Медь	почва	6,94	6,23 - 9,57	6,19	5-22
	подстилка	2,77	2,55 - 3,81	2,30	16
	хвоя	2,56	2,21 - 2,99	2,61	5-16
Марганец	почва	411,89	401,63 - 418,92	419,71	40-49
	подстилка	419,69	387,2...440,8	445,6	49
	хвоя	63,3	44,89...77,8	79,7	45-49
Цинк	почва	33,7	30,36 - 45,64	30,12	5-10, 22
	подстилка	29,49	25,09 - 41,15	24,56	16-22
	хвоя	53,7	47,48 - 70,08	41,12	5-16
Свинец	почва	6,00	5,52 - 6,98	5,20	5-16
	подстилка	3,91	1,82 - 7,52	1,75	5-16
	хвоя	0,11	0,032 - 0,348	0,017	5-16
Никель	почва	21,71	20,17 - 23,74	19,49	22
	подстилка	20,24	17,42 - 25,63	17,31	16-22
	хвоя	1,62	1,53 - 1,79	1,42	16-25
Кадмий	почва	0,15	0,117 - 0,257	0,112	5-16
	подстилка	0,062	0,055 - 0,072	0,047	10-25
	хвоя	0,034	0,025 - 0,076	0,023	5-16
Ванадий	почва	38,23	36,22 - 40,18	36,02	10-22
	подстилка	46,58	39,06 - 54,69	36,23	5-16
	хвоя	0,8	0,56 - 1,10	0,47	10-16
Молибден	почва	2,81	2,74 - 2,98	2,71	5-22
	подстилка	3,04	2,88 - 3,34	2,87	5-16
	хвоя	0,9	0,76 - 0,98	1,01	49
Кобальт	почва	1,00	0,97 - 1,04	0,99	5, 22, 30
	подстилка	2,18	1,85 - 2,89	1,84	5-16
	хвоя	0,89	0,85 - 0,94	0,89	10
Фтор	почва	1,64	0,88 - 4,71	0,76	5-16
	подстилка	5,52	4,01 - 9,12	3,99	5-16
	хвоя	2,56	2,01 - 5,27	2,01	5-16
Ртуть	почва	0,029	0,027 - 0,032	0,024	10-16
	подстилка	0,032	0,0277 - 0,0399	0,0259	16-25
Мышьяк	почва	3,51	3,32 - 4,30	3,2	10-25
	подстилка	0,033	0,022 - 0,04	0,021	16-25

В почве и подстилке наблюдается превышение среднего содержания всех исследованных загрязняющих веществ по отношению к фоновому содержанию, за исключением марганца. В хвое, помимо марганца, средние концентрации меди и молибдена ниже фоновых, среднее содержание кобальта аналогично фоновому, среднее содержание железа, цинка, свинца, никеля, кадмия, ванадия, фтора превышает фоновые концентрации.

На расстоянии 16-22 км от источников негативного воздействия в хвое сосны обыкновенной наблюдается превышение нормальной (достаточной) концентрации железа, равной 50-60 мг/кг (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989); на расстоянии 10-16 км от источников выброса загрязняющих веществ концентрация цинка находится за пределом диапазона допустимых значений 10-62 мг/кг по данным работы S. Messenger and M. W. Stelford (1997). Превышение концентрации цинка в хвое по отношению к почве может говорить о том, что хвоя поглощает цинк непосредственно из воздуха. Повышенные концентрации цинка в хвое могут привести к ее поражению, в том числе к появлению хлорозов и некрозов. Содержание никеля на пробной площади на расстоянии 16 км от источников негативного воздействия превышает нормальные значения, составляющие 0,1-1 мг/кг сухой массы по данным работы Melsted (1973), в 1,79 раз.

На основе полученных данных о содержании загрязняющих веществ в компонентах Минусинского ленточного бора и расчета показателей суммарного загрязнения составлены карты-схемы, отражающие уровень загрязнения хвои (рисунок 6), почвы (рисунок 7) и подстилки (рисунок 8) на всем протяжении Минусинского ленточного бора.

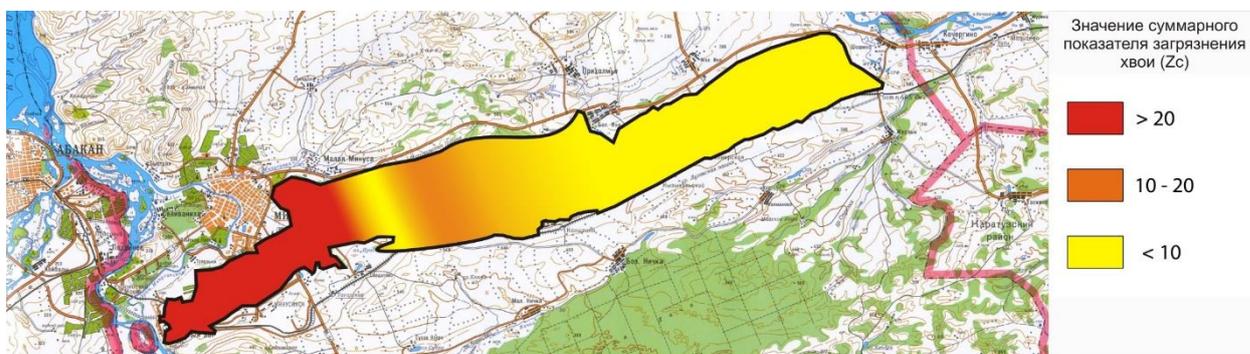


Рисунок 6 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения хвои *Pinus sylvestris*

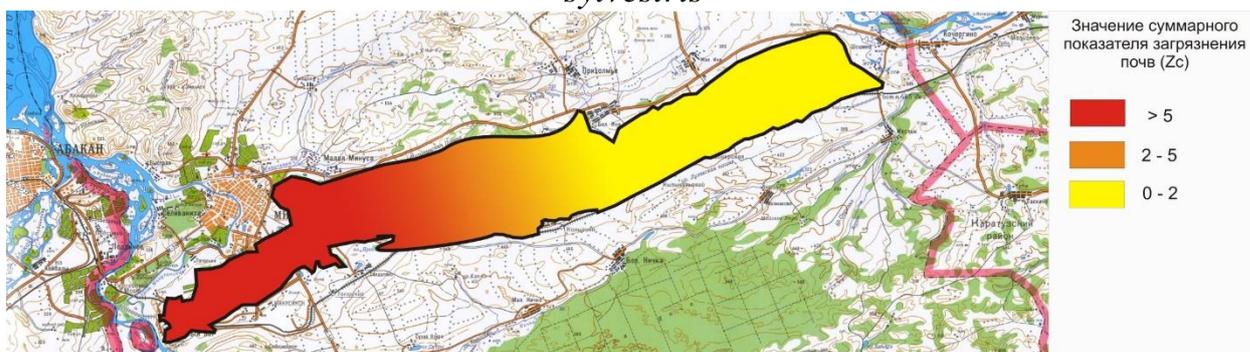


Рисунок 7 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения почвы

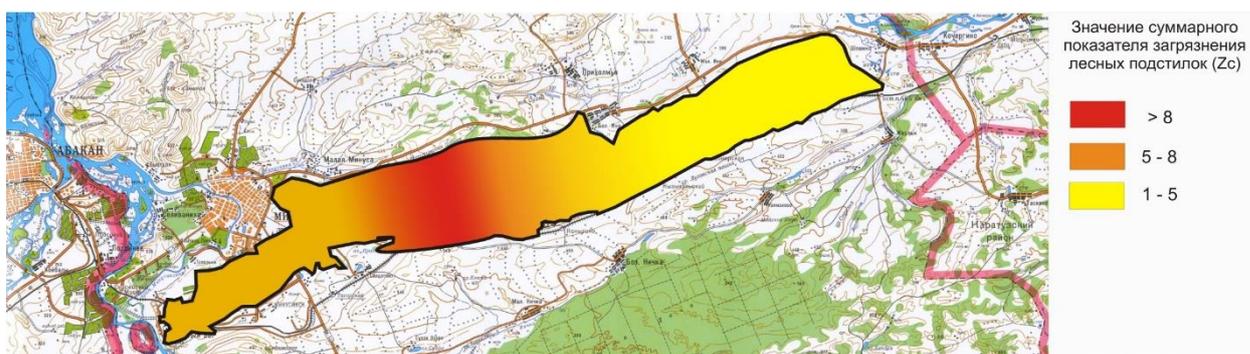


Рисунок 8 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения подстилки

С расстоянием от источников негативного воздействия в хвое, подстилке и почве снижается содержание большинства загрязнителей.

Максимальные показатели суммарного загрязнения хвои второго года жизни выявлены на пробных площадях, расположенных на расстоянии до 16 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Хвоя в наибольшей степени аккумулирует свинец, ванадий, кадмий, железо, цинк и фтор.

Наибольшие показатели суммарного загрязнения почвы и подстилки выявлены на расстоянии до 22 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ, их загрязнение обусловлено, главным образом, концентрациями свинца, фтора, кадмия, ртути, цинка, ванадия, мышьяка и меди. По веществам ванадий и ртуть подстилка выступает геохимическим барьером, содержание данных химических элементов в подстилке превышает аналогичное содержание в почвах не менее чем в 70% случаев по каждому веществу. По веществам кадмий, мышьяк и медь подстилка характеризуется низкой поглотительной способностью.

Максимальные концентрации кадмия и свинца в хвое, почве и подстилке на ближайших к населенным пунктам участках вызваны, вероятно, содержанием элементов в выхлопных газах автотранспорта населения, активно использующего данные участки бора для отдыха, а также выделением веществ при сжигании органического топлива.

Увеличение содержания фтора в хвое, почве и подстилке лесных участков с приближением к источникам выброса загрязняющих веществ, а также высокое значение коэффициента биологического поглощения хвоей, свидетельствует о техногенном пути поступления элемента в лесную экосистему.

Максимальные концентрации железа, цинка, меди, никеля и ванадия в хвое, почве и подстилке, мышьяка – в почве и подстилке на лесных участках, расположенных на расстоянии до 22 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ, обусловлены, вероятно, осаждением пылегазовых эмиссий, содержащих указанные элементы, выделяющихся в окружающую среду в результате единого производственного процесса.

Изучение временной динамики показателя концентрирования тяжелых металлов в почве лесной экосистемы с помощью сравнения наших данных с

содержанием валовых форм тяжелых металлов в почве Минусинского бора, полученных Э.Е. Боболевой (1975), позволило установить увеличение содержания в лесных почвах за 40 лет, в первую очередь таких металлов, как никель, цинк, кадмий и мышьяк (таблица 6).

Таблица 6 – Сравнение содержания химических веществ в почве, полученных Э.Е. Боболевой (1975), с нашими результатами

Источник данных	Содержание химического элемента в почве, мг/кг							
	Zn	Cd	Pb	Hg	Cu	Co	Ni	As
Э.Е. Боболева (1975)	28	0,05	6	0,05	8	3	6	1,5
А.В. Григоренко	33,7	0,15	6,00	0,029	6,94	1,00	21,71	3,51
ПДК (ГН 2.1.7.2041-06) (ОДК (ГН 2.1.7.2042-06)	(55)	(0,5)	32	2,1	(2)	-	(20)	(2)

Содержание мышьяка возросло в 2,3 раза, никеля – в 3,6 раз, отдельные концентрации мышьяка превышают ОДК в 2,15 раз, никеля – в 1,2 раз.

Содержание кадмия в почвах лесной экосистемы за последние 40 лет возросло в три раза, его концентрации на участках бора, расположенных вблизи населенных пунктов, достигают значений 0,5ОДК.

За последние 40 лет в почве бора в 1,2 раз возросло содержание цинка, концентрации элемента на отдельных пробных площадях достигают значений 0,83ОДК.

Содержание свинца осталось на прежнем уровне, выявлено снижение накопления меди, кобальта и ртути, что возможно вследствие миграции элементов вниз по почвенному профилю (Большаков, 2002; Вайзенен, Токарь, 2004), а также вследствие процесса выщелачивания, потребления растениями, эрозии и дефляции и снижения количества загрязняющих веществ, поступающих в почвенный компонент, в результате сокращения выбросов в атмосферный воздух за последние годы. Превышение ориентировочно-допустимых концентраций меди на всех исследованных участках, включая фоновый, возможно обусловлено высоким содержанием элемента в материнских породах.

Содержание анализируемых химических элементов оказывает влияние на физиологические и морфологические параметры хвои. На интенсивность фотосинтеза с 95% вероятностью прогноза оказывает влияние содержание цинка ($r = -0,64$) и ванадия ($r = -0,68$), а на значение водного дефицита – содержание цинка ($r = 0,72$, $p = 0,98$) (рисунок 9). Влияние цинка на фотосинтез происходит за счет снижения биосинтеза хлорофиллов в присутствии элемента (Panda et al., 2003; Souza, Rauser, 2003; Khudsar et al., 2004). В литературе нам не встретились данные о влиянии цинка на водный обмен хвои сосны обыкновенной.

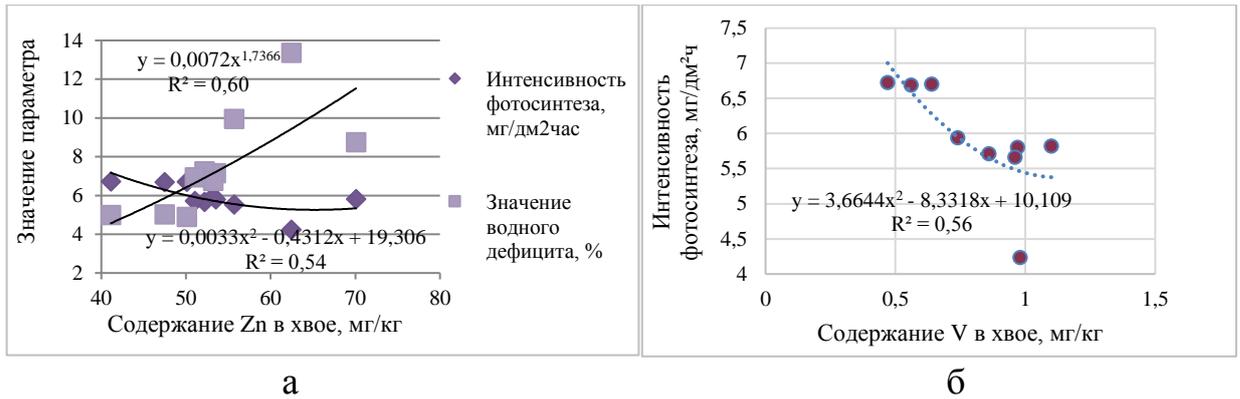


Рисунок 9 – Зависимость интенсивности фотосинтеза и водного дефицита от содержания в хвое Zn (а); интенсивности фотосинтеза – от содержания V (б)

На сегодняшний день нет единого мнения о влиянии ванадия на рост и развитие растений. Статистический анализ показал влияние цинка и ванадия на длину, площадь, массу и поражение хвои (рисунки 10-11).

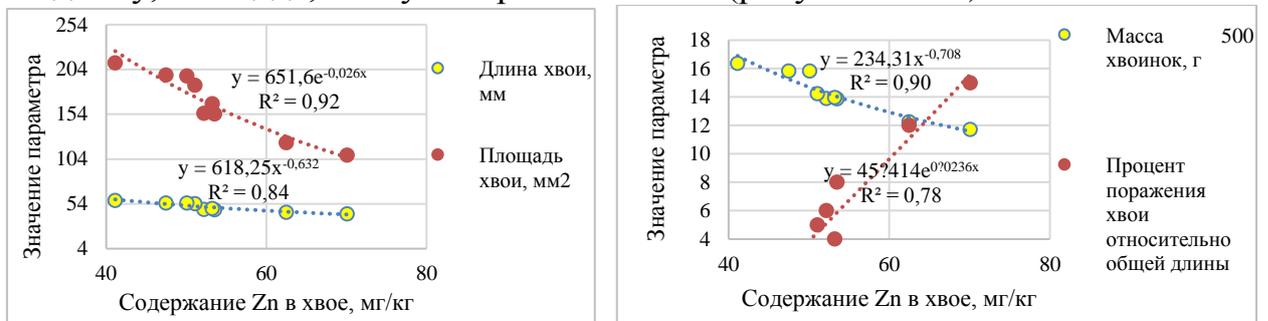


Рисунок 10 – Зависимость морфометрических параметров от содержания Zn

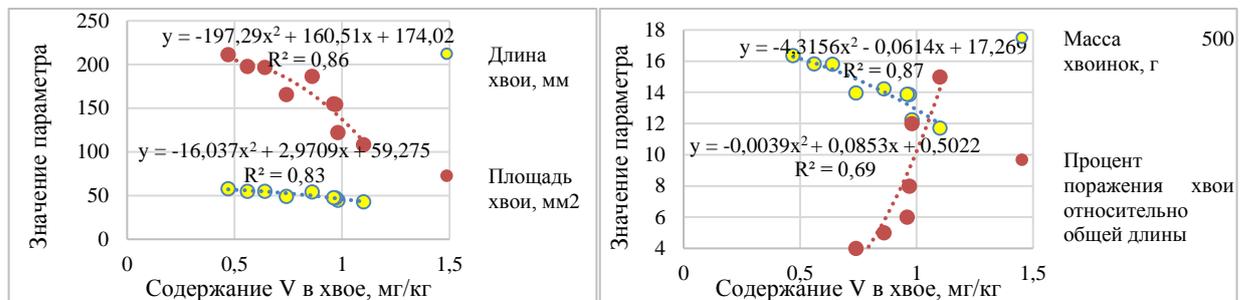


Рисунок 11 – Зависимость морфометрических параметров от содержания V

На значения длины, площади и массы хвои помимо цинка и ванадия оказывает влияние содержание марганца, молибдена, железа, никеля, и кадмия.

Марганец и молибден оказывают прямое влияние на ростовые процессы, с увеличением их концентраций значения длины, площади и массы хвои возрастают (рисунок 12).

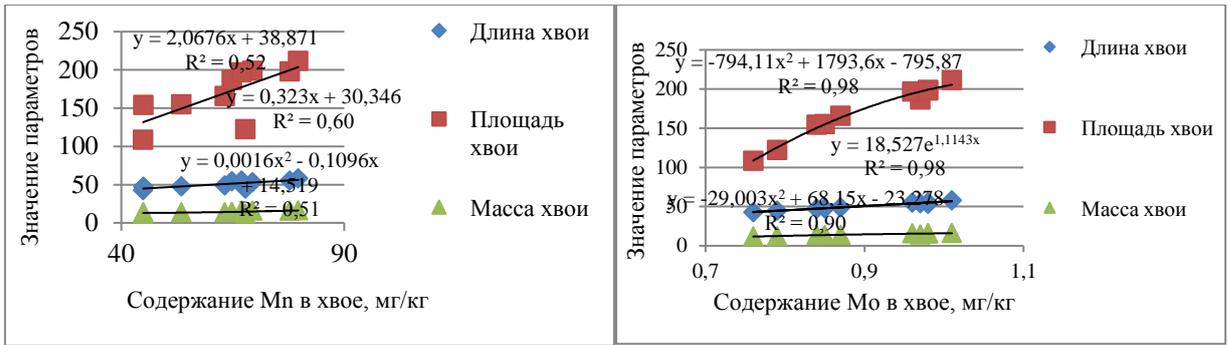


Рисунок 12 – Зависимость параметров хвои от содержания Mn и Mo

Марганец и молибден в установленных в хвое концентрациях являются элементами питания растений, а не загрязняющими веществами и оказывают стимулирующее влияние на морфометрические параметры хвои сосны.

Содержание железа, никеля, кадмия, напротив, вызывает угнетение морфометрических параметров (рисунок 13).

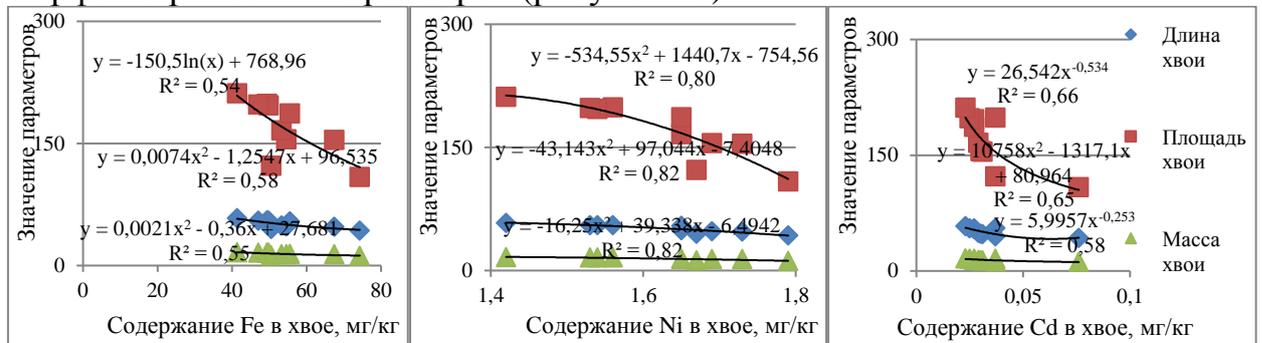


Рисунок 13 – Зависимость параметров хвои от содержания Fe, Ni и Cd

Содержание железа в хвое вносит вклад в угнетающее воздействие загрязняющих веществ в целом, несмотря на то, что элемент является необходимым для растения.

На процент поражения хвои наряду с цинком и ванадием оказывает влияние содержание в хвое свинца, кадмия, никеля и фтора (рисунок 14).

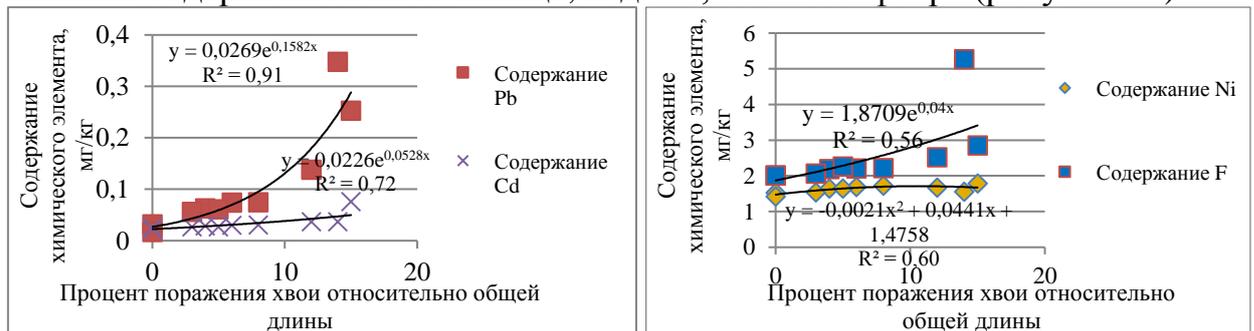


Рисунок 14 – Зависимость поражения хвои от содержания Pb, Cd, Ni и F

Влияние свинца и кадмия обусловлено токсичностью данных элементов для растений в любых концентрациях, а также избирательностью поглощения свинца хвоей сосны.

Содержание фтора и никеля оказывает воздействие с меньшей силой, об этом свидетельствуют соответствующие значения уровня аппроксимации.

Меньшее влияние фтора на поражение хвои обусловлено удаленностью Минусинского ленточного бора от основного источника поступления элемента в окружающую среду.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что осаждению пылевых компонентов, содержащихся в техногенных эмиссиях, наиболее подвержены лесные участки, расположенные на расстоянии до 16 км от ближайших стационарных источников выброса поллютантов, где содержание взвешенных веществ в снеговом покрове превышает фоновый уровень более чем в 8 раз. На участках, подверженных наибольшему осаждению взвешенных веществ, очищающая эффективность насаждений снижается до 11,1%. В среднем, снижение аккумулялирующей способности древостоя лесной экосистемы составляет 28,9%.

Зависимость между содержанием взвешенных веществ в снеговом покрове и расстоянием от источников негативного воздействия имеет отрицательный знак, с увеличением расстояния содержание загрязнителя в снеге уменьшается ($r=-0,69$). Лесная экосистема, в условиях воздействия выбросов предприятий теплоэнергетики, угольной и других отраслей промышленности, способна сохранять эффективность очищения древесного полога до 66,5%, которая зависит, главным образом, от расстояния до источников выброса ($r = 0,9$).

2. Аэротехногенное загрязнение отрицательно сказывается на интенсивности физиологических процессов, протекающих в хвое *Pinus sylvestris*. Установлено снижение интенсивности фотосинтеза хвои ($r=0,81$) и рост показателя водного дефицита ($r=-0,87$) с приближением к стационарным источникам выброса загрязняющих веществ. Наибольшее снижение интенсивности фотосинтеза хвои (на 37,05% по сравнению с фоновым) и максимальные значения водного дефицита хвои (14,21%) выявлены на расстоянии до 16 км от источников выброса. В среднем, в результате воздействия выбросов загрязняющих веществ интенсивность фотосинтеза хвои *Pinus sylvestris* снижается на 13,84%, а величина водного дефицита, напротив, возрастает на 56%. Растущий под воздействием техногенного загрязнения атмосферного воздуха водный дефицит хвои *Pinus sylvestris* оказывает отрицательное влияние на интенсивность фотосинтеза хвои ($r=-0,95$).

Воздействие аэротехногенного загрязнения приводит к росту содержания эфирного масла хвои *Pinus sylvestris* на 38,7% и изменению количественного вклада соединений, участвующих в метаболизме хвои. Причиной активизации биосинтеза эфирного масла и увеличения в нем содержания монотерпенов, в частности, α -pinene на 54 %, может являться противодействие растительного организма неблагоприятному воздействию антропогенных факторов.

На участках, подверженных наибольшему аэротехногенному воздействию, площадь поражения хвои возрастает, в среднем, на 12%, происходит уменьшение средних значений длин хвои на 19%, площади – на 31%, массы – на 18%, продолжительность жизни хвои сокращается на 24%. Приближение к источникам негативного воздействия приводит к уменьшению средних длин осевых побегов первого и второго года жизни, в среднем на 34 и 16% соответственно, увеличению плотности хвои на осевых побегах на 8 %.

С удалением от стационарных источников выброса загрязняющих веществ, происходит достоверное улучшение морфометрических параметров хвои *Pinus sylvestris*.

3. В зоне комплексного воздействия предприятий теплоэнергетики, угольной, металлургической отраслей промышленности, одними из основных загрязнителей компонентов лесной экосистемы, являются цинк, ванадий, кадмий, железо, свинец, никель и фтор. Наибольший уровень загрязнения компонентов лесной экосистемы наблюдается на расстоянии до 22 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

На состояние ассимиляционного аппарата, который определяет продуктивность насаждений в целом, значительное влияние оказывают цинк и ванадий. Наибольшее отрицательное влияние на интенсивность фотосинтеза ($r=-0,68$), изменение размеров хвои ($r=-0,91$ (для длины), $r=-0,9$ (для площади), $r=-0,92$ (для массы)) оказывает ванадий; на повышение водного дефицита хвои ($r=0,72$) и степень ее поражения ($r=0,88$) – цинк. Наряду с цинком на степень поражения хвои оказывает влияние и содержание свинца ($r=0,88$).

Для повышения экологического потенциала лесной экосистемы, расположенной в зоне влияния предприятий теплоэнергетики, угольной, металлургической отраслей промышленности, необходима система лесохозяйственных мероприятий, направленная на снижение угнетающего воздействия поллютантов, поступающих в компоненты лесной экосистемы путем осаждения пылегазовых эмиссий, например, включающая мероприятия по снижению фитотоксичности тяжелых металлов в почве.

Особое внимание следует уделять лесным экосистемам, расположенным вблизи источников негативного воздействия. Для усиления защитных функций насаждений, подверженных наибольшему воздействию аэропромвыбросов, и повышения их устойчивости в условиях антропогенного загрязнения, необходимо ввести особый режим лесопользования, включающий постоянный экологический мониторинг состояния данных лесных экосистем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Григоренко, А.В. Минусинский ленточный бор в условиях загрязнения неорганической пылью / А.В. Григоренко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014, – т. 16. – № 1(3), – С. 861-865.

2. Григоренко, А.В. Физиологические и морфологические показатели хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения / А.В. Григоренко // Вестник КрасГАУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 15-19.

3. Григоренко, А.В. Морфометрические параметры хвои, элементный состав хвои и компонентный состав эфирного масла *Pinus sylvestris* L. Минусинского бора в условиях антропогенного загрязнения / А.В. Григоренко, А.И. Грибов // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2015. – № 4. – С. 359-365.

Публикации в других изданиях:

1. Григоренко, А.В. Состояние некоторых компонентов Минусинского ленточного бора в условиях аэротехногенного загрязнения / А.В. Григоренко // Исследования компонентов лесных экосистем Сибири. Выпуск 14: материалы конкурса-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов, Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск. – 2017. – С. 16-17.

2. Григоренко, А.В. Изменения физиологических параметров хвои *Pinus sylvestris* L. Минусинского бора в условиях загрязнения промышленными выбросами / А.В. Григоренко // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 4-1 (48). – С. 27-29.

3. Григоренко, А.В. Характеристика ленточных боров Минусинской котловины / А.В. Григоренко // Международная научная конференция молодых ученых, посвященная 70-летию Национальной Академии Наук Армении «Биоразнообразие и экологические проблемы сохранения дикой природы», Армения, Цахкадзор. – 2013. – С. 98-100.

4. Григоренко, А.В. Оценка экологического состояния снежного покрова Минусинского бора / А.В. Григоренко // IX Международная научно-практическая конференция «Новости передовой науки – 2013», г. София, Болгария. – 2013. – Т. 48. – С. 21-24.

5. Григоренко, А.В. Пылеаккумулирующая роль соснового леса Минусинского района Красноярского края / А.В. Григоренко, В.В. Султреков // Всероссийская конференция с международным участием «Состояние лесов и актуальные проблемы лесопользования», Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, г. Хабаровск. – 2013. – С. 312-314.

6. Григоренко, А.В. Влияние предприятия теплоэнергетики на селитебную территорию г. Минусинска / А.В. Григоренко // Материалы 6-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы промышленных городов», Саратовский государственный технический университет. – 2013. – С. 174-176.

7. Григоренко, А.В. Рассеивание выбросов взвешенных веществ от предприятия теплоэнергетики (на примере ОАО «Енисейская ТГК (ТГК-13)» Филиала «Минусинская ТЭЦ») / А.В. Григоренко // XIII российско-монгольская научная конференция молодых ученых и студентов «Алтай: экология и природопользование», г. Бийск. – 2014. – С. 43-47.