

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ХАКАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.Ф. КАТАНОВА»

*На правах рукописи*



Григоренко Алена Валерьевна

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

Специальность 03.02.08 – Экология (биология) (биологические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук,  
профессор  
Грибов Александр Ильич

Красноярск – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 НЕГАТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ (ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ) ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ.....	10
1.1 Проблема загрязнения атмосферного воздуха как основного из негативных факторов воздействия на природные экосистемы .....	10
1.2 Антропогенное воздействие на лесные экосистемы.....	14
1.3 Влияние аэротехногенного загрязнения на физиологические и биохимические процессы древостоя.....	20
1.4 Влияние аэротехногенного загрязнения на морфологические изменения древостоя.....	23
1.5 Влияние тяжелых металлов и фтора на лесные экосистемы.....	26
Глава 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ .....	32
2.1 Характеристика объекта исследования .....	32
2.2 Методика исследования.....	37
Глава 3 ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И ТЕХНОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ .....	44
3.1 Физико-географические условия района исследования.....	44
3.2 Климатические особенности района исследования.....	47
3.3 Характеристика почвенного покрова района исследования.....	51
3.4 Растительность района исследования.....	53
3.5 Характеристика антропогенного воздействия на объект исследования .....	56
3.6 Диагностика атмосферной миграции взвешенных веществ по снеговому покрову.....	61
3.7 Заключение к главе 3.....	66
Глава 4 ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, БИОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК PINUS SYLVESTRIS L. В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ.....	67

4.1	Изменение интенсивности фотосинтеза, дыхания и водного дефицита хвои <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	67
4.2	Изменение содержания терпеноидных соединений в хвое.....	71
4.3.	Изменение морфометрических параметров <i>Pinus sylvestris</i> L. Минусинского ленточного бора .....	75
4.4	Взаимосвязь между физиологическими и морфологическими параметрами хвои <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	84
4.5	Заключение к главе 4.....	86
Глава 5 СОДЕРЖАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ФТОРА В РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТАХ МИНУСИНСКОГО ЛЕНТОЧНОГО БОРА.....		88
5.1	Содержание некоторых тяжелых металлов и фтора в хвое <i>Pinus sylvestris</i> L.....	88
5.2	Содержание некоторых тяжелых металлов и фтора в почвах.....	97
5.3	Содержание некоторых тяжелых металлов и фтора в лесной подстилке.....	108
5.4	Сравнение содержания химических элементов в хвое, лесной подстилке и почве.....	115
5.5	Влияние загрязнения на физиологические и морфологические параметры хвои <i>Pinus sylvestris</i> L. ....	127
5.6	Заключение к главе 5.....	134
ВЫВОДЫ.....		137
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....		140
ПРИЛОЖЕНИЯ.....		192

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследований.**

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; Замолодчиков 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), сглаживая температурный режим воздуха, повышая общее количество осадков, снижая скорость ветра; способны преобразовывать почву, предотвращая ее разрушение поверхностным стоком и ветром; выполняют водоохранную, водорегулирующую, противоэрозионную, гидролесомелиоративную, 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. Большая часть выбрасываемых загрязняющих веществ на данной территории 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 L.*, 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 аккумулирующую способность древостоя.

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

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

**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 L.* лесной экосистемы. 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, лесной подстилки и хвои *Pinus sylvestris L.* 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 бора, 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* L. снижается интенсивность фотосинтеза и возрастает водный дефицит.

**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.

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

**Апробация работы.** 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 школе-конференции 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).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 3 – в журналах из перечня ВАК.

**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-ру биол. наук А.И. Грибову за общее руководство и ценные советы при подготовке работы, канд. техн. наук Е.В. Шаниной за всестороннюю



помощь при проведении исследования, канд. биол. наук 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-ру биол. наук А.А. Онучину, д-ру хим. наук 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.

# **Глава 1 НЕГАТИВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ (ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ) ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ**

## **1.1 Проблема загрязнения атмосферного воздуха как основного из негативных факторов воздействия на природные экосистемы**

Обратной стороной научно-технического прогресса, которому обязан современный уровень жизни общества, явилось ухудшение среды жизни человека, проявившееся в истощении природных ресурсов, загрязнении суши, гидросферы, атмосферы, изменении климата, истощении озонового слоя, сведении лесов, опустынивании, исчезновении отдельных биологических видов. В докладе международной программы «Оценка экосистем на пороге тысячелетия» говорится о том, что повышение благосостояния людей достигнуто за счет значительных потерь биологического разнообразия и деградации экосистем в результате чрезмерной эксплуатации и загрязнения, изменении климата, интродукции инвазивных видов и др. (Оценка экосистем ..., 2005).

Загрязнение окружающей среды рассматривается на сегодняшний день в качестве неотъемлемой части жизни общества. По различным оценкам ежегодно в природную среду поступает свыше 100 тысяч различных химических элементов (Королев, 2003; Пивоваров и др., 2008; О санитарно-эпидемиологической..., 2010; Луганский и др., 2010).

Авторы многих работ сходятся во мнении, что экономический рост способствует увеличению антропогенной нагрузки на природную среду (Оценка экосистем ..., 2005; Промышленная экологическая ..., 2007; Сотникова и др., 2008). Рост выбросов предприятий с 1996 по 2006 год составил в среднем 10% (Промышленная экологическая ..., 2007). По данным В.П. Максаковского (1996) запыленность атмосферного воздуха за последние сто лет увеличилась на 10-20%. По некоторым данным только за 10 лет с 1970 по 1980 количество выбросов диоксида серы увеличилось на 46 млн. тонн (Базилевская, Антонова, 1990;

Кричко и др., 1990). Выброс углекислого газа по информации Института мировых ресурсов (США) в 1989 году составил 1,42 млрд. тонн (Лебедева, Лаврик, 1992). В настоящее время антропогенный выброс диоксида углерода достигает около 50 млрд. тонн в год (IPCC, 2013).

Ежегодно только в атмосферу Российской Федерации поступают миллионы тонн загрязняющих веществ, в 2013 году количество выбросов от стационарных источников составило 184 млн. 465 тыс. тонн, от передвижных – 134 млн. 244 тыс. тонн; в 2014 году – соответственно 174 млн. 519 тыс. тонн и 136 млн. 216 тыс. тонн (Государственный доклад..., 2015).

В Российской Федерации более половины населения живет в условиях загрязненного атмосферного воздуха с концентрациями загрязняющих веществ, превышающих предельно допустимые значения (Иванов, 2016; Самылина, 2016). В этих условиях проблема ухудшения качества окружающей среды выходит на передний план, а задача поддержания стабильного экологического состояния среды жизни населения становится вопросом национальной безопасности.

Проблеме сохранения качества атмосферного воздуха в нашей стране, как и во всем мире, уделяется большое внимание со стороны органов государственной власти и научного сообщества. Основным законом, установившим правовые основы охраны атмосферного воздуха, как жизненно важного компонента окружающей среды, является Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «Об охране атмосферного воздуха». Довольно много работ посвящено российскому и зарубежному законодательству в области охраны атмосферного воздуха (Koch, Lechelt., 1994; Ивакин, 2006; Туева, 2006; Габитов, 2008; Исмаилова, 2008; Баскакова, Гаджикурбанов, 2009; Маркин и др., 2009; Кананыкина, 2012; Анисимов и др., 2013; Каримов, 2013; Подзорова, 2014; Шанина, Косова, 2015; Kopytsia, 2015; Фролова, Чувашев, 2016), значительное количество работ посвящено проблемам в области охраны атмосферы на определенных территориях (Поспелова и др., 2005; Ковалевская, 2009; Пережогин, Сафронов, 2013; Бородкина, Ткачёва, 2014; Голубничий и др., 2014; Кузьмина, 2015; Медведев, Пилипенко, 2015; Рябец, Щербакова, 2015; Самылина,

2016) и проблемам охраны атмосферного воздуха в различных областях экономической деятельности (Шувалов и др., 2001; Богданов, 2004; Голованов и др., 2006; Долгов, 2009; Данко и др., 2011).

Проблемам в области охраны атмосферного воздуха на территории Красноярского края, включая Минусинский район, посвящены работы В.В. Тимофеева, О.В. Тасейко (2012), А.В. Григоренко (2013), А.И. Кириченко, Л.А. Герасимовой (2014), С.Э. Бадмаевой, В.И. Циммерман (2015) и др., в которых основными причинами высокого уровня загрязнения атмосферы городов региона называют выбросы от предприятий цветной металлургии, теплоэнергетики и выбросы от автотранспорта. В.В. Тимофеев, О.В. Тасейко (2012) считают, что высокий уровень загрязнения города Минусинска бенз(а)пиреном обусловлен выбросами Саянского алюминиевого завода, расположенного по розе ветров.

В промышленно развитых районах техногенное загрязнение является приоритетным негативным фактором (Ярмишко, 1987; Рожков, Михайлова, 1989; Лукина, Никонов, 1996; Харук и др., 1996; Михайлова, 1997; Неверова, 2001, 2003; Игнатьева, 2005).

Основными источниками загрязнения атмосферы являются предприятия теплоэнергетики (ТЭЦ, котельные), предприятия черной и цветной металлургии (Николайкин и др., 2004; Прикладная экология ..., 2008; Шеховцов, 2008; Кахраманова, 2013; Настинова, Емельяненко, 2013). В 2014 году на долю обрабатывающей отрасли в экономике России пришлось 5932,4 тыс. тонн загрязняющих веществ, выбросы от предприятий по производству и распределению электроэнергии, газа и воды составили 3761,5 тыс. тонн (Государственный доклад..., 2015).

Дальность переноса выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от источников выброса зависит от многих факторов – состояния атмосферы, метеопараметров, расположения источников выбросов, высоты труб, температуры отходящих газов, физико-химических свойств выбрасываемых веществ и др. (Luk'yanov, 2006; Ордабаев и др., 2009; Бурлаченко, 2011; Лазаренков, Хорева, 2012; Григорьева и др., 2015).

Крупнодисперсные компоненты выбросов предприятий оседают под действием силы тяжести, как правило, вблизи источников (Рапута, 2005). Мелкодисперсные вещества и газообразные примеси, напротив, способны переноситься на значительные расстояния. Пылевые частицы размером менее 10 мкм способны переноситься на несколько километров, даже при слабом ветре (Недре, 2008). Тяжелые металлы, входящие в состав пылевых частиц диаметром свыше 10 мкм, осаживаются вблизи источников выброса, а мелкие частицы диаметром до 5 мкм способны длительное время находиться в воздухе и переноситься на расстояние до 1000 км (Nriagu, 2000).

Выбросы загрязняющих веществ от организованных источников котельных способны переноситься на значительные расстояния благодаря высокой температуре (Курбатов, 2016). Распространению выбросов на десятки километров от источников выброса способствует и значительная высота труб котельных (Грибков, Тюклин, 2010).

На предприятиях по производству алюминия, напротив, используются невысокие трубы, что определяет наибольший уровень загрязнения на промышленных площадках предприятий и вблизи источников выброса. Вместе с тем высокий уровень загрязнения может наблюдаться и на значительном расстоянии от предприятий, этому способствует ряд метеорологических характеристик, таких как стабильность атмосферы, градиент температуры, скорость и направление ветра и др. (Берлянд, 1975).

Одними из основных компонентов выбросов от предприятий топливно-энергетического комплекса являются аэрозоли тяжелых металлов, доля твердых частиц составляет около 31% от общего объема выбросов ТЭЦ (Колесников, Долгих, 2015), которые при попадании в атмосферу рассеиваются вокруг источников выброса, образуя техногеомы, аналогичные по структуре естественным геохимическим полям рассеивания (Саеи и др., 1990).

На долю теплоэнергетической отрасли приходится около 40% от общих выбросов пыли (Геоэкология ..., 2015), объем которых составляет около 2 млрд. тонн в год (Сотникова и др., 2008).

Одними из основных компонентов выбросов от алюминиевых производств являются фтористые соединения, которые способны переноситься на расстояние более 40 км от предприятий (Garrec, Passera, 1980; Щетников, Зайченко 1998). Исследование распространения фторсодержащих компонентов, содержащихся в выбросах Иркутского алюминиевого завода, показали, что перенос фторидов осуществляется на расстояние 15-60 км от источника в зависимости от розы ветров (Михайлова и др., 2013).

Загрязнение фторидами атмосферного воздуха п. Шушенское, расположенного в 40 км по прямой на юго-запад от алюминиевого завода, стало наблюдаться уже на второй год его работы (Щетников, Зайченко, 1998).

Опасность загрязнения атмосферного воздуха обусловлена влиянием на состояние остальных компонентов биосферы – почвы, гидросферы, растительного и животного мира, так как загрязняющие вещества, поступающие в атмосферу, в конечном итоге, перераспределяются в биосфере (Гаджиев, 2013; Самылина, 2016).

## **1.2 Антропогенное воздействие на лесные экосистемы**

Проблема происходящих изменений в природе вследствие загрязнения, сегодня занимает важное место. Нормы, регулирующие отношения во взаимодействии природы и человека, действуют в большинстве государств, но решение проблем качества окружающей среды не возможно в пределах отдельного государства, масштабы экологических проблем давно вышли за пределы отдельных стран, регионов и континентов, охватив планету в целом, и, соответственно для их решения необходимо развитое сотрудничество между государствами. Началом сближения между странами на пути к выходу из глобального экологического кризиса стала конференция ООН в Рио-де-Жанейро в 1992 году, целью которой должна была стать «защита окружающей среды с учетом интересов будущих поколений». Одним из вопросов, вынесенных на «Повестку дня на 21 век», явилась борьба с обезлесением.

Антропогенное воздействие на природную среду привело к тому, что к середине 20 века было потеряно 2/3 лесного покрова планеты, к концу 20 века скорость уничтожения лесов достигала 7 млн. га в год и стала сокращаться только сейчас (Обзор: глобальная оценка..., 2015), на сегодняшний день сохранились лесные экосистемы лишь на площади около 18 млн. га (Лосев и др., 2009; Щепашенко и др., 2015), по данным М. Williams (2006) в начале голоцена леса занимали 45 % площади суши. Наибольшее влияние, согласно докладу Совета по Оценке экосистем на пороге тысячелетия, коснулось мангровых лесов, около 35% которых сведено за последние десятилетия, и тропических и субтропических лесов, подвергшихся наибольшей трансформации за последние 50 лет, в настоящее время под угрозой исчезновения находятся 25% всех хвойных (Оценка экосистем ..., 2005).

За гибелью лесов, в свою очередь, стоит большой спектр экологических проблем, таких как высвобождение углекислого газа, изменение климата, ухудшение качества почв, эрозия, потеря биологического разнообразия и другие (IPCC, 2013; Второй оценочный..., 2014; Замолодчиков и др., 2015; Назлуханов, 2015).

В Российской Федерации проблемы лесного сектора обусловлены, главным образом, рубками, которые в 20 веке в нашей стране, изменили соотношение состава лесов, доля хвойных уменьшилась, а доля лиственных, соответственно, возросла на 4,3% (Замолодчиков и др., 2015), пожарами, неэффективным воспроизводством лесов и низкой эффективностью контроля за их использованием (Большаков и др., 2015). Наряду с вышеперечисленными факторами потере лесов способствуют также разведка и добыча полезных ископаемых (Морозов и др., 2007; Замолодчиков и др., 2015). Воздействие недропользователей на лесные экосистемы проявляется в виде непосредственных рубок лесов до разработки месторождения, так и в период эксплуатации участков недр – влиянием выбросов в атмосферный воздух при добыче полезных ископаемых (Ерохин и др., 2003). В мире же, одной из основных причин уничтожения лесов является потребность в сельскохозяйственных землях,

необходимых для обеспечения населения продовольствием (Ramankutty, et al. 2002; Назлуханов, 2015).

Наряду с вышеперечисленными факторами, оказывающими негативное воздействие на лесные экосистемы, в конце прошлого столетия активно заговорили о влиянии на леса аэротехногенного загрязнения как одного из главных факторов воздействия (Писаренко, Мерзленко, 1990; Страхов, 1993; Чурагулов, 1999). Многочисленные проведенные исследования лесных экосистем, расположенных вблизи крупных промышленных центров и городов, показывают угнетение состояния, усыхание и даже гибель лесов (Лукина, Никонов, 1992; Симачев и др., 1992; Ivshin, Shiyatov, 1995; Лукина и др., 2005; Черненькова, 2000; Ламоткин и др., 2009; Калабин и др., 2010; Зиганшин и др., 2011; Корельский, 2011; Ярмишко, 2012; Рунова и др., 2015).

Исследования в зоне воздействия предприятия ОАО «Кольская ГМК» показывают, что на расстоянии 5-10 км от комбината расположена зона техногенной пустоши с нарушенным верхним слоем почвы и практически отсутствующим растительным покровом, с удалением от комбината на расстоянии 8-15 км наблюдается зона деградации, с редколесьем из хвойных пород, при этом явно выражены поражения хвои, ее предельный возраст достигает 2-3 лет (Корельский, 2011).

Техногенные пустоши вблизи комбината ГМК «Печенганикель» занимают до 75% площади вокруг источника (Лукина и др., 2005).

Протяженность зоны поражения лесных экосистем вокруг предприятия ГМК «Североникель» достигает по оценкам исследователей 100 км (Черненькова, 2000; Калабин и др. 2010; Ярмишко, 2012).

По данным работ ряда исследователей площадь погибших лесов в результате воздействия эмиссий вокруг Норильска к 1989 году достигла 283 тыс. га (Симачев и др., 1992; Ivshin, Shiyatov, 1995).

Наряду с гибелью лесов, большую проблему представляет их деградация, в результате которой упрощается экологическая структура лесов. Деградируемые



леса менее устойчивы к инвазивным видам, более подвержены иссушению (Тейлор, 2012).

Многолетние исследования, проведенные в насаждениях в районе Братска Иркутской области, позволили сделать вывод о состоянии древостоя в зоне воздействия целлюлозно-бумажного и алюминиевого заводов, установлен распад приспевающих, спелых и перестойных древостоев и формирование основного яруса за счет средневозрастного древостоя, свидетельствующие о техногенной сукцессии (Чжан и др., 2013).

Негативному воздействию от крупных промышленных центров и городов подвержены не только лесные экосистемы, расположенные в непосредственной близости от них, но и леса, находящиеся на значительном расстоянии от источников выбросов. Известно, что поллютанты при попадании в атмосферу распространяются на значительные расстояния и оказывают отрицательное влияние на состояние лесов, произрастающих в десятках-сотнях километрах от источников выброса (Алексеев, 1990; Харук и др., 1996; Байдина, 2001; Зиганшин и др., 2011).

Выбросы предприятия Норильского промышленного района по оценкам В.И. Харука и др. (1996) привели к поражению лесов на расстоянии до 180 км, по мнению Р.А. Зиганшина и др. (2011) лесные экосистемы подвержены усыханию на расстоянии, превышающем 200 км от Норильска на юг.

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). Именно лесные экосистемы регулируют химический состав атмосферы и ее оптические свойства, выполняя одну из своих главных полезных функций – климатообразующую (Ваганов и др., 2005).

Концентрация взвешенных веществ под пологом леса всегда оказывается меньше концентрации на открытых участках. Количество аккумулятивной

пыли определяется, главным образом, количеством фитомассы лесного биогеоценоза (Молчанов, 1971; Протопопов, 1975; Грибов, 1997; Спицына и др., 2001). Сосняки Назаровской котловины способны перехватывать пыль техногенного происхождения с коэффициентом перехвата 48-71% (Скрипальщикова, Грешилова, 2008). Дороховский, Пионерский и Захаринский боры в Средней Сибири аккумулируют до 58% оседающей пыли (Скрипальщикова, 1997).

Ежегодно лесные экосистемы способны аккумулировать до 70 тонн пыли (Луганский и др., 2010), по другим оценкам – до 20 тонн (Алексеев, Доченжер, 1981). По оценкам Хмелевской (2008), один гектар хвойного леса способен задержать до 40 тонн взвешенных веществ в год, поглощающая способность лиственных пород в разы выше – до 100 тонн/год.

Однако способность хвойных лесов, в частности сосняков к выделению фитонцидов, в том числе терпеноидов, кумаринов, этиленов, аминов и др., гораздо выше по сравнению с лиственными, 370-450 кг/га – у сосняков, 190-220 – у березняков и 170-190 кг/га – у осинников (Крючков, 1989, 1992; Крючков, Озорнина, 2010). По оценкам В.В. Протопопова (1975) сосняки Восточной Сибири способны выделить 400-450 кг/га фитонцидов, березняки – до 200-220 кг/га. Фитонциды оздоравливают и очищают воздух, убивая стафилококки, синегнойную и протейную палочки (Крючков, 1989). Известно, что терпеноиды являются средством защиты хвойных в условиях аэротехногенного загрязнения (Рощина, Рощина, 1989; Фуксман и др., 1997; Сотникова, Степень, 2001; Племенков, 2006; Ламоткин и др., 2009).

Значительная часть исследовательских работ по изучению хвойных пород посвящена сосне обыкновенной. *Pinus sylvestris* L. по праву можно отнести к бореальной лесообразующей породе, которая произрастает в пределах таежной зоны и зоны хвойно-широколиственных лесов России в достаточно разнообразных климатических и почвенно-гидрологических условиях. Наибольшие площади сосновых лесов сосредоточены в Ханты-Мансийском автономном округе, Иркутской области, Республике Саха (Якутия), Красноярском

крае, Республиках Коми и Карелии, Томской и Архангельской областях (Государственный доклад..., 2015).

Сосна обыкновенная отличается чувствительностью к загрязнению окружающей среды (Эрна, Раук, 1986; Mikhailova, 2000; Афанасьева и др., 2005; Аношкина, 2009; Баскакова, Савватеева, 2009; Ламоткин и др., 2009; Пахарькова и др., 2010; Иванов и др., 2011; Вахнина, Замана, 2013; Мохначев и др., 2016).

Воздействие техногенных выбросов на растения, в том числе на *Pinus sylvestris* L., осуществляется прямым и косвенным путями (Черненкова, 2000). Прямой способ достигается механическим, физическим и химическим воздействиями. Механическое влияние происходит путем закупорки устьичных щелей, ведущей к нарушению газообмена и транспирации (Павлов, 2005; Полякова и др., 2012; Григоренко, 2015); физическое воздействие связано с изменением оптических свойств света (Попов и др., 2011) и, как следствие, способно привести к увеличению температуры ассимиляционного аппарата, повышению транспирации, возникновению водного дефицита (Хмелевская, 2008). Ухудшение условий освещенности вследствие загрязнения атмосферы пылью снижает ультрафиолетовое излучение в несколько раз (Гольдфейн и др., 2014), способствуя развитию болезнетворных бактерий. Химическое воздействие связано с поглощением загрязняющих веществ растением непосредственно из воздуха или через корневую систему, вызывающее структурные перестройки тканей и зеленых пигментов (Прожерина и др., 2000; Сотникова, 2004; Башмаков, Лукаткин, 2009; Титова, 2010; Титов и др., 2014). Кроме того, зачастую негативные факторы воздействуют на природные экосистемы в комплексе. Антропогенное химическое воздействие с одновременным действием факторов неорганической природы способно усиливать действие последних. Установлено, что деревья, поврежденные действием промышленных выбросов, более чувствительны к колебаниям температуры воздуха, а еще сильнее – к засухе (Барахтенова, 1993).

Косвенное воздействие – воздействие посредством изменения почвенного компонента экосистем и перестройки ценологических и консортивных

взаимоотношений в экосистеме (Афанасьева и др., 2005; Чжан, 2014). Наряду с воздействием техногенных эмиссий негативное влияние на почвы, проявляющееся в ее уплотнении, оказывает рекреационная нагрузка. Установлен выраженный синергетический эффект совместного влияния загрязнения и рекреации (Водолажский, Сериков, 2013).

Большинство исследователей считает, что в результате воздействия техногенных выбросов 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), изменения генеративного аппарата (Воронов, 2003), морфоструктурные перестройки (Zierl, 2006).

### **1.3 Влияние аэротехногенного загрязнения на физиологические и биохимические процессы древостоя**

В первую очередь под воздействием промышленных эмиссий происходят физиолого-биохимические изменения в растительном организме (Shimazaki, 1980; Кирпичникова и др., 1995; Барахтенова, Николаевский, 1988; Судачкова и др., 1997; Игнатьева, 2005; Тарханов, Бирюков, 2014; Григоренко, 2015; Сергейчик, 2015).

Одной из самых чувствительных реакций у растений на действие неблагоприятных природных и антропогенных факторов является реакция фотосинтеза (Николаевский, 1979; Николаевский, Николаевская, 1988; Тимофеева, 1993), причем направленность изменения интенсивности фотосинтеза в ответ на воздействие носит неоднозначный характер. Различия ответных реакций растений могут быть обусловлены вариациями условий – видовыми разнообразиями растительных организмов, концентрацией, временем воздействия, свойствами токсиканта и другими (Неверова, 2004; Игнатьева, 2005). Некоторые исследователи сходятся во мнении, что при действии на растительность низких концентраций загрязнителей, особенно тяжелых

металлов, являющихся биогенными элементами, происходит активация фотосинтеза (Гирс, 1982; Коршиков, 1996; Поварницина, 2007; Бухарина и др., 2007), а влияние высокого содержания поллютантов, способно привести к подавлению фотосинтетической активности, в том числе, вследствие разрушения хлорофиллов, и, снижению интенсивности фотосинтеза (Shimazaki, 1980; Фрей, 1987; Барахтенова, 1993; Сергейчик, 1993; Кирпичникова и др., 1995; Андреев, 2013; Тарханов, Бирюков 2014). Установлена отрицательная корреляционная связь между изменением интенсивности фотосинтеза и индексом загрязнения атмосферы (Неверова, 2004).

На протекание фотосинтетических процессов оказывает влияние запыленность, вследствие снижения поглощения растениями активных лучей спектра (Илькун, 1978).

О состоянии фотосинтетической активности возможно судить по содержанию пигментов – хлорофилла и каротиноидов. Установлено влияние загрязнения на содержание пигментов в хвое (Рожков, Михайлова, 1989; Игнатьева, 2005; Зотикова и др., 2007; Титова, 2010), увеличение отношения хлорофилла а к хлорофиллу b (Кизеев, 2006; Тужилкина, 2009; Титова, 2010; Чупахина и др., 2012; Розломий и др., 2014).

Снижение общего содержания хлорофилла в условиях токсического действия эмиссий происходит за счет торможения метаболизма, разрушения фотосинтетических мембран и снижения оводненности хвои (Зотикова и др., 2007).

С удалением от источников загрязнения негативное воздействие на физиологические и биохимические процессы в растениях ослабляется (Григоренко, 2015; Денисова, 2015). Установлено снижение подавления интенсивности фотосинтеза различных сеянцев деревьев с увеличением расстояния от алюминиевого завода (Смит, 1985).

Любая экосистема до определенного предела способна противостоять загрязнению. Переполнение буферной емкости экосистемы ведет к ее деградации, имеющей, как правило, противоположный знак изменения. (Павлов, 2005).

Наряду с процессами фотосинтеза полноправным элементом продукционного процесса является дыхание растительного организма (Головко, 1999; Семихатова, 2000; Молчанов, 2007). Исследования кинетики  $\text{CO}_2$  газообмена показывают неоднозначную ответную реакцию интенсивности дыхания растений в загрязненном воздухе. В одних работах показано, что деревья, произрастающие в условиях загрязненного атмосферного воздуха, отличаются более высокой интенсивностью дыхательных процессов (Собчак, Куровская, 2009). В других работах, наоборот, с загрязнением среды связывают снижение интенсивности дыхания хвои сосны (Игнатьева, 2005; Ангальт, Жамурина, 2014).

Можно судить о воздействии выбросов загрязняющих веществ на лесные экосистемы и по значению параметра водного дефицита (Алешин, Пономарев, 1985; Долгова, 1997; Прожерина, 2001; Сотникова, 2004; Сазонова, Придача, 2009). Атмосферное загрязнение способствует повышению водного дефицита и может привести к увеличению скорости водоотдачи и снижению водоудерживающей способности хвои сосны (Григоренко, 2015).

В работе В.П. Тарабрина (1980) показано, что загрязнение среды токсикантами приводит к нарушению водного обмена у растений подобно засухе. В целом, присутствие в воздухе фитотоксикантов способно привести к снижению общей оводненности растения (Чернышенко, 1998).

Загрязнение атмосферного воздуха взвешенными веществами, в результате изменения оптических свойств света, приводит к нагреванию листьев, а, следовательно, к повышению скорости испарения воды (Феклистов, 2004). Нарушению водного обмена растительного организма вследствие закупорки устьиц способствуют выбросы в атмосферный воздух взвешенных веществ, что приводит в конечном итоге к усыханию лесов (Пономарева, 1978). В некоторых случаях осевшая на растения пыль, напротив, способствует снижению скорости транспирации, в результате нарушения работы устьичного аппарата (Артамонов, 1986).

Установлено, что фториды отрицательно воздействуют на скорость транспирации в растении, вызывая повышение водоадсорбционного потенциала (Хмелевская, 2008). Замедление транспирации у различных видов растений выявлено в присутствии повышенных концентраций кадмия, цинка и свинца (Veselov et al., 2003; Хмелевская, 2008; Uraguchi et al., 2009; Казнина, 2016).

В работе В.П. Тарабрина (1980) доказана зависимость между содержанием воды, ее фракционным составом и газоустойчивостью растений. Необходимое для нормального протекания физиологических процессов количество связанной в растении воды поддерживает устойчивость фитоорганизма к действию поллютантов (Попов и др., 2011).

#### **1.4 Влияние аэротехногенного загрязнения на морфологические изменения древостоя**

Применение морфологического подхода, который заключается в визуальном наблюдении за повреждениями побегов, ассимиляционного аппарата древостоя, для исследования состояния лесных экосистем, расположенных в зоне влияния техногенеза, является самым распространенным и наиболее простым в исполнении (Захаров и др., 2000; Осипенко, 2015).

Морфологические изменения ассимиляционного аппарата древостоя, такие как хлорозы, некрозы, изменение размеров и снижение продолжительности жизни, являются надежными индикаторами состояния растительного организма в условиях загрязнения окружающей среды (Алексеев, 1990; Хмелевская, 2008). Видимые симптомы токсичного воздействия на растения, такие как хлорозы или бурые точки – наиболее общие и неспецифические симптомы фитотоксичности (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Оценка состояния сосновых насаждений в условиях аэротехногенного загрязнения и экологическое зонирование территорий, загрязненных промышленными выбросами, базирующиеся на исследованиях морфологических параметров растений проведены в достаточно большом количестве работ

(Николаевский, 1999; Афанасьева и др., 2004; Неверова, 2004; Мартынюк, 2004; Бережная, 2005; Чжан и др., 2013; Васильева, 2015; Рунова и др., 2015).

Биологический мониторинг за состоянием лесных экосистем, в которых индикатором является сосна обыкновенная, позволяет оценить последствия техногенеза с высокой степенью надежности, так как сосна весьма чувствительна к загрязнению окружающей среды. Интегральными показателями состояния сосновых экосистем могут служить изменения морфометрических характеристик хвои сосны, рекомендуемых в качестве критериев состояния лесных экосистем в международных руководствах по мониторингу лесов (GEMS, Convention on Long-Range..., 1998).

В ряде работ исследователями установлено, что на подверженных загрязнению территориях ассимиляционный аппарат древостоя, восполняя снижение интенсивности протекающих в растительном организме физиологических процессов, увеличивается в размерах и массе (Армолайтис, Вайчис, 1984; Мартынюк, 2004; Злотникова, 2011). К.Э. Армолайтис и М. В. Вайчис (1984) связывают это со стимулирующим воздействием на хвою азота, содержащегося в выбросах. Полученные закономерности увеличения массы хвои в нижней части кроны с приближением к источнику эмиссии А.А. Мартынюк (2004) объясняет обесхвоиванием верхних частей крон и более интенсивными процессами биосинтеза оставшейся хвои. О.В. Злотникова (2011) связывает увеличение размеров хвои в условиях загрязнения почв нефтепродуктами с адаптационными механизмами хвои сосны.

Не все компоненты, содержащиеся в выбросах промышленных предприятий, действуют на растительный организм с одинаковым токсическим эффектом. Известны факты стимулирующего воздействия невысоких концентраций загрязняющих веществ на состояние растений (Смит, 1985; Innes, Oleksyn, 2000; Малахова, 2004; Сазонова и др., 2005).

Установлено стимулирующее влияние небольших доз диоксида серы на рост деревьев сосны Ревдинско-Первоуральского промышленного узла (Попов и др., 2011).



Многие исследователи сходятся во мнении, что с увеличением техногенной нагрузки размеры и масса хвои снижаются (Илькун, 1978; Marschner et al., 1994; Brown et al., 1999; Прожерина, 2001; Феклистов, 2004; Игнатьева, 2005; Ковылина и др., 2008; Валетова, 2009; Колясникова и др., 2011; Колясникова, Садакова, 2013; Коротченко, 2013).

В ряде работ авторы отмечают меньшую продолжительность жизни хвои загрязненных районов по сравнению с условно чистыми (Торлопова, 2003; Феклистов, 2004). Снижение продолжительности жизни хвои и изменение ее размеров можно рассматривать в качестве ответной реакции на снижение качества окружающей среды (Коровин, 2003; Валетова, 2009; Рунова, Гаврилин, 2010). В то же время на продолжительность жизни хвои оказывают влияние условия местопроизрастания и тип леса (Бобкова, 1987; Феклистов, 2004).

Авторы ряда работ связывают изменение морфометрических показателей хвои с содержанием в ней различных химических элементов (Афанасьева и др., 2004; Миронов, Коробова, 2004; Кизеев, 2009; Иванова, 2013). Повреждение ассимиляционного аппарата в этом случае связано с проникновением загрязнителей через кутикулу и устьица хвои (Фуксман, 1997).

В районе промышленных узлов бассейна реки Селенги выявлена обратная зависимость между морфологическими параметрами хвои и побегов (продолжительность жизни, длина побегов, длина хвои, масса хвои) и содержанием поллютантов (коэффициенты корреляции на уровне 0,6-0,9) (Афанасьева, 2005).

Негативное воздействие на ассимиляционный аппарат древостоя в последующем приводит к дефолиации крон и снижению биологической продуктивности (Андреев, 1988; Мартынюк, 2004).

Наибольшее негативное воздействие на растительность оказывают фторсодержащие выбросы (Рожков, Михайлова, 1989; Танделов, 2012; Федулов и др., 2015) и тяжелые металлы (Hsieh, 1981; Лозановская и др., 1998; Ильин, Сысо, 2001; Гайдукова и др., 2010; Копылова, 2012).

## 1.5 Влияние тяжелых металлов и фтора на лесные экосистемы

Необходимым условием длительного существования лесных экосистем, как любых природных экосистем, является стабильность биогеохимического круговорота веществ. Изменения в круговороте элементов в лесной экосистеме способны привести к изменению цикла органических и минеральных элементов в экосистеме, смене доминирующих в экосистеме видов (Шугалей и др., 1996).

Исследования показывают, что данные о содержании химических элементов в ассимиляционных органах растения отражают состояние и функционирование всего растительного организма (Правдин, 1964; Ламоткин и др., 2009; Михайлова и др., 2010). Содержание в растении микроэлементов отражает их содержание и в среде обитания, концентрация тяжелых металлов в растительном организме во многом зависит от экологических условий среды (Сибиркина, 2014).

Тяжелые металлы – группа химических элементов, в которую условно включены металлы с атомной массой более 50. Всего группа тяжелых металлов и металлоидов включает 58 элементов. Тяжелые металлы присутствуют практически во всех компонентах лесных экосистем в определенном количестве, в связи с чем их нельзя отнести к категории специфических загрязняющих веществ (Водяницкий, 2011).

Тяжелые металлы железо, марганец, цинк, медь, молибден, кобальт являются микроэлементами, в низких концентрациях они необходимы для жизнедеятельности растений (Колясникова и др., 2011). Оптимальный или безвредный интервал концентраций тяжелых металлов, являющихся микро- и ультрамикроэлементами, узок (Трубников и др., 2013).

Микроэлементы – металлы переходной группы периодической системы активируют энзимы или входят в металлоэнзимы в системы переноса электронов (Cu, Fe, Mn, Zn), а также катализируют изменения валентности в веществах субстрата (Cu, Co, Fe, Mo). Некоторые микроэлементы (Cu, Co, Mo, Mn, Zn) необходимы для выполнения защитных функций у морозостойких и засухоустойчивых разновидностей растений (MacLean and etc., 1973; Schulz and

etc., 1974). Вместе с тем пониженные концентрации микроэлементов, наряду с их избытком, способны привести к понижению синтеза органических веществ, хлорозу и даже гибели растения (Аминов, 2010; Протасова, Горбунова, 2010).

Некоторые тяжелые металлы являются токсичными для растений в любых концентрациях. Кадмий и свинец не являются необходимыми для растения элементами, они оказывают токсическое воздействие на растительный организм (Шубина, Юрьев, 2009).

В настоящее время нет единого мнения о степени опасности тяжелых металлов для растительных организмов. К особо опасным тяжелым металлам для древесной растительности, в случае их накопления, некоторые исследователи относят кобальт, медь, свинец, цинк, кадмий, ртуть (Смит, 1985; Мотылева, Соснина, 1996; Состояние зеленых..., 2000). По мнению А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас (1989) наиболее ядовитыми для высших растений, являются также ртуть, медь, свинец, кобальт, кадмий и никель. Российский санитарно-гигиенический ГОСТ 17.4.102-83 к высокоопасным элементам относит – Zn, Cd, к умеренноопасным – Ni и Mo. Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) к наиболее опасным веществам отнесены Co и V.

Установлено влияние тяжелых металлов в хвое сосны на повышение уровня дефолиации крон, снижение продолжительности жизни хвои, длины и массы хвои (Афанасьева и др., 2004), увеличение плотности охвоения побегов (Тутыгин и др., 2009; Тарханов, Бирюков, 2014), на повышение цитологических нарушений в меристеме проростков семян загрязненных участков по сравнению с контролем (Валетова, 2009; Белоусов и др., 2013).

Помимо тяжелых металлов одними из наиболее опасных компонентов газовой смеси выбросов для растительности являются фтористые соединения. В зоне воздействия алюминиевого производства нарушение природных экосистем начинается с повреждения наиболее чувствительного компонента – растительности (Преловский, 2011).

Фтор не является необходимым элементом для жизнедеятельности растений. Фтористый водород токсичнее диоксида серы, хлора или оксидов азота

в 3-1000 раз (Рожков, Михайлова, 1989). Угнетающее действие фтора выражается в изменении структуры РНК и ДНК, нарушении активности ферментов, подавлении синтеза АТФ, повреждении клеточных мембран (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

В сосновых лесах Верхнего Приангарья, загрязненных фторсодержащими примесями, наблюдается комплекс морфометрических отклонений, включая некрозы хвои, снижение продолжительности ее жизни, уменьшение размеров хвои, изменение формы кроны, 70-90% дефолиацию крон, суховершинность (Бережная, 2005).

Установлена положительная связь между поражением растительности и содержанием фтора в хвое (Давыдова, 1998).

Площадь поврежденных лесов вокруг промышленных предприятий исчисляется сотнями тысяч га. В зоне, подверженной влиянию Братского алюминиевого завода, повреждено свыше 80 тыс. га насаждений (Мартынчук и др., 1998). Имеются данные о гибели хвойных лесов вокруг алюминиевых заводов в радиусе до 13 км от источника (Смит, 1985).

Хвоя способна аккумулировать значительное количество примесей, поступающих через корневую систему из почвы, и непосредственно из атмосферного воздуха. В условиях аэротехногенного загрязнения возрастает вклад атмосферы в поступление в растительные организмы тяжелых металлов (Парибок, 1983), но влияние почвы на загрязнение растительности также значительно, установлены различия в накоплении тяжелых металлов у растений одного вида, произрастающих на разных почвах (Белюченко, 2014).

Механизм поступления загрязняющих веществ в почвенный покров определяется главным образом агрегатным состоянием поллютантов. Твердые загрязняющие вещества, оседая на подстилке, постепенно мигрируют в нижележащий горизонт почвы в зону корневого питания растений. Взаимодействуя с водным раствором почвы, часть химических элементов переходит в подвижное состояние, вследствие чего дерновый горизонт почв становится токсичным для растений (Чжан и др., 2013).

Газообразные вещества попадают в почву с осадками либо путем непосредственного поглощения почвой. Почвы способны аккумулировать загрязняющие вещества в течение всего периода техногенного воздействия. В условиях загрязненной среды почва сама становится источником вторичного загрязнения биосферы.

Продолжительность нахождения загрязняющих веществ в почвах выше по сравнению с другими средами (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), вследствие чего загрязнение почв может быть одним из главных негативных факторов, влияющих на состояние лесных экосистем и лесовозобновление (Вахнина, Замана, 2013).

В лесных экосистемах роль естественного геохимического барьера, препятствующего загрязнению почв, играет лесная подстилка (Щербов, 2012; Герасимова, Богданова, 2013; Федорец, Солодовников, 2013).

Исследования изменений значений мощности подстилок могут быть эффективно использованы в диагностике антропогенных нарушений лесных экосистем (Tyler, 1984; Воробейчик, 1994, 1995, 2003). В значительном количестве работ установлена зависимость мощности подстилки от интенсивности антропогенной нагрузки и расстояния до источника загрязнения. Увеличение мощности подстилки вблизи источников загрязнения выявлено во многих исследованиях (Лукина, Никонов, 1992; Воробейчик, 1994, 1995, 2003 и др.). Вблизи предприятий цветной металлургии, выбрасывающих тяжелые металлы и сернистый ангидрид, отмечено двух-трех-кратное увеличение мощности подстилки (Лукина, Никонов, 1992; Кайгородова, Воробейчик, 1996; Воробейчик, 2003). Около предприятия ГМК «Печенганикель» зарегистрировано увеличение мощности лесной подстилки в 10 раз по сравнению с фоновым уровнем (Черненькова, 2000).

Вместе с тем, в непосредственной близости от крупных промышленных предприятий металлургической, химической и других отраслей, в условиях длительного токсического воздействия промышленных эмиссий большая часть почвы обнажена и эродирована (Второва, Пиявченко, 1987; Черненькова, 2000). Это происходит вследствие нарушения механического состава и питательных

свойств почвы в сочетании с изменившейся кислотностью почвенных растворов, сопровождаемой водным дефицитом почвы.

Основной вклад в формирование подстилки лесных экосистем вносит растительный опад и отпад наземных органов растений. Основным компонентом опада в хвойных культурах является хвоя.

Причинами увеличения мощности лесных подстилок вблизи источников негативного воздействия могут являться преждевременное осыпание хвои, угнетение активности и гибель крупных почвенных сапрофагов и целлюлозоразлагающих микроорганизмов (Воробейчик, 1994). В непосредственной близости от источников загрязнения почвенная фауна находится в угнетенном состоянии, наблюдается снижение численности и массы сапрофитов, в первую очередь, почвенных микромицетов и дождевых червей (Арманд и др., 1987; Второва, Пиявченко, 1987; Черненко, 2000).

В лесных насаждениях восточного Донбасса авторы (Ворон и др., 2000) отмечают интересную закономерность снижения опада с ростом техногенной нагрузки, снижение мощности подстилки при этом не наблюдается, ее максимальная масса выявлена в наиболее поврежденных насаждениях.

Значительное влияние на снижение активности почвенных организмов и, как следствие, деструкцию органического вещества, оказывает загрязнение почв тяжелыми металлами – свинцом, медью, никелем и другими (Евдокимова и др., 1984; Гришина, Иванова, 1997). Наряду с тяжелыми металлами жизнедеятельность почвенной микрофлоры подавляют фтористые соединения. Установлено превышение мощности подстилок загрязненных фторидами зон по сравнению с фоновыми лесами в 2-3 раза (Чжан, 2014).

Наибольшая мощность лесных подстилок наблюдается в зонах сильного и слабого загрязнения. Накопление мортмассы в условно чистых районах можно объяснить тем, что здесь древостой находится в более устойчивом и здоровом состоянии, с увеличением запаса которого возрастает и опад. Установлено накопление лесной подстилки в лесах Братского района с удалением от Братского алюминиевого завода (Чжан и др., 2011).

Значительные работы по оценке состояния лесных экосистем в условиях техногенного воздействия проведены в Европейской части России (Бобкова, 1987; Страхов, 1993; Воробейчик, 1994, 1995, 2003; Лукина и др., 1999; Прожерина, 2001; Коровин, 2003; Мартынюк, 2004; Миронов, 2004; Кизеев, 2006, 2009; Залесов, 2008; Колясникова и др., 2011, 2013; Асылбаев, 2013; Розломий, 2014; Завьялов, 2015 и другие), многочисленны исследования состояния лесных экосистем в условиях антропогенного воздействия на территории Западной и Восточной Сибири (Побединский, 1965; Михайлова, 1997; Неверова, 2001, 2003, 2004; Афанасьева и др., 2004, 2005; Бережная, 2005; Михайлова и др., 2006, 2010, 2013; Морозов, 2007; Калугина, 2013; Сибиркина, 2014; Рунова и др., 2015; Чжан и др., 2011, 2013 и другие). Исследования состояния лесных экосистем в условиях аэротехногенного загрязнения на территории Красноярского края ограничиваются в основном исследованиями лесных экосистем расположенных в непосредственной близости от Красноярска (Грибов, 1997; Скрипальщикова, 1997; Степень и др., 1996; Скрипальщикова, Грешилова, 2008; Татаринцев, 2009; Злотникова, 2011; Коротченко, 2013 и другие). На Юге Минусинской котловины опыт проведения комплексных исследований отсутствует.

## Глава 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Характеристика объекта исследования

Минусинский ленточный бор приурочен к правобережной части реки Енисей, тянется в виде ленты с северо-востока на юго-запад и пересекает степную часть Минусинскую котловины.

Основное влияние на пространственное распределение бора оказывает дюнный рельеф, образовавшийся на площадях древних речных долин в местах выхода на поверхность песков и подвергшихся действию воздушных потоков (Коляго, 1967).

Территория бора относится к Алтае-Саянскому горно-лесостепному району Южно-Сибирской лесорастительной зоны (Лесохозяйственный регламент..., 2008).

Минусинский бор относится к категории защитных лесов и выполняет водоохранные, почвозащитные, санитарно-гигиенические, общекультурные, плодopомысловые и другие функции. Бор занимает площадь 29539 га, среди которых 297,2 га занимают леса, расположенные в водоохранных зонах; 26791,6 га – леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов (в том числе: 2764,2 га – леса, расположенные вдоль железнодорожных путей общего пользования, федеральных автомобильных дорог общего пользования, автомобильных дорог общего пользования, находящихся в собственности субъектов Российской Федерации; 24027,4 га – зеленые зоны, лесопарки), а так же 2450,2 га ценных лесов, включая нерестоохранные полосы лесов – 181,7 га и леса, имеющие историческое или научное значение – 2268,5 га (Лесохозяйственный регламент..., 2008; Григоренко, 2014).

Минусинский бор – уникальный природный ландшафт Минусинской котловины, характеризуется относительной однородностью рельефа и почвенно-грунтовых условий (Грибов, 1983). Основная лесобразующая порода Минусинского бора – *Pinus sylvestris* L., занимает более 90% площади бора. Преимущественно распространены сосняки разнотравной и зеленомошной групп



типов леса (Государственный доклад..., 2015). На равнинных частях лент произрастают сосняки разнотравные и орляковые.

Исследования, проведенные М.А. Поляковой (2008) по изучению закономерностей пространственной структуры бора, выявили следующие наиболее встречающиеся мезокомбинации Минусинского бора:

- сочетание олиготрофных и мезо-олиготрофных сосновых лесов в ландшафтах с хорошо выраженным комплексом высоких дюн, а именно сочетание сосновых остепненно-разнотравных и сосновых разнотравно-мохово-лишайниковых лесов и псаммофитных разнотравных степей;

- сочетание березово-сосновых кустарничково-разнотравно-зеленомошных и березово-сосновых кустарничково-зеленомошно-разнотравных лесов;

- сочетание сосновых разнотравных и сосновых зеленомошно-разнотравных мезофильных лесов;

- сочетание псаммофитных разнотравных степей с фрагментами сосновых остепненно-разнотравных лесов.

Пробные площади заложены в зеленомошной, разнотравной и остепненной группах типов леса (рисунок 1).

Сосняки зеленомошные – это одноярусные, IV-V классов возраста, чистые по составу насаждения, II-III классов бонитета с запасом древесины 275-340 м<sup>3</sup> на га. Произрастают на дерново-боровых слаборазвитых оподзоленных почвах междюнных понижений, древних аллювиальных террас и склонов северных экспозиций. Характеризуются равномерным и групповым размещением самосева и подроста, редким подлеском и равномерным покрытием травяного покрова (Грибов, 1997).

Сосняки разнотравной группы – одноярусные, V класса возраста, I-II классов бонитета с запасом древесины до 350 м<sup>3</sup>/га. Произрастают на дерново-боровых развитых, серых и темно-серых лесных, дерново-луговых почвах. Древостой распределен по блюдцеобразным западинам, широким междюнным понижениям, пологим участкам временных водотоков и древних речных террас. Подрост

равномерного распределения. Подлесок и живой напочвенный покров хорошо развиты, образуют четко выраженные ярусы.

А



Б



В



Рисунок 1 – Тип леса: сосняк зеленомошный (А), разнотравный (Б) и остепненный (В)

Сосняки остепненной группы менее производительны (III-IV классы бонитета), средний класс возраста – IV. Распространены на склонах южных экспозиций и возвышениях дюн. Произрастают на дерново-боровых примитивных

и слаборазвитых песчаных и супесчаных почвах. Подрост и подлесок слаборазвиты (Грибов, 1997).

Различие почвенно-геоморфологических условий обуславливает различную продуктивность сосновых древостоев в борах – от 1 до 5 класса бонитета. Преобладающими по площади являются древостои 2 и 3 классов бонитета (Плешиков, 1975; Плешиков, Рыжкова, 1991).

Таксационная характеристика насаждений по группам типов леса и номерам пробных площадей приведена в таблице 1. Методики, использованные автором для определения таксационных показателей, представлены в подглаве 2.2.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что насаждения подобраны в зеленомошной, разнотравной и остепненной группах типов леса – в чистых одновозрастных сосняках IV-V классов возраста (их средний возраст различается не более чем на 20 лет). Колебания средних высот укладываются в пределах одного разряда высот, среднего диаметра – трех ступеней толщины, бонитета – в пределах класса. Различия абсолютной полноты – не более 18 м<sup>2</sup>/га, относительной – 0,4.

Однородность состава, возраста и других таксационных признаков дает основание рассматривать эти насаждения репрезентативными при оценке состояния Минусинского ленточного бора.

Таблица 1 – Таксационная характеристика насаждений Минусинского бора

№ п/п	Группа типов леса	Состав (возраст)	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Класс бонитета	Полнота		Запас, м <sup>3</sup> /га
						Абсолютная, м <sup>2</sup> /га	Относительная	
1	Зеленомошная	10С(77)едБ,Ос	20,0	24,8	II	30,7	0,7	310
2		10С(87)едБ	22,8	24,8	II	31,0	0,8	275
3		10С(87)едБ	23,7	32,7	II	32,9	0,8	339
4	Разнотравная	10С(85)едБ,Ос	23,0	25,5	II	33,1	0,8	350
5		10С(85)едБ,Ос	22,5	29,0	II	25,2	0,7	280
6	Остепненная	10С(72)едБ,Ос	17,0	22,2	III	18,3	0,5	154
7		10С(78)	18,0	25,3	III	29,0	0,8	257
8		10С(75)едБ	20,0	24,7	III	32,9	0,9	304
9	Разнотравная	10С(88)едБ,Ос	23,9	28,8	II	35,1	0,9	350
Фон		10С(89)едБ	24,2	31,3	II	35,4	0,9	356

## 2.2 Методика исследования

Изучение состояния Минусинского ленточного бора проводили на постоянных и временных пробных площадях. Полевые работы проводились в период с 2012 по 2015 годы. Автором лично 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. Аналитическое исследование содержания терпеноидов в эфирном масле хвои проводили в лаборатории Института леса им. В.Н. Сукачева, определение тяжелых металлов и фтора в компонентах лесных экосистем – в аккредитованной лаборатории.

Постоянные пробные площади заложены в типичных по условиям местопроизрастания участках, вдали от широких просек, осушителей, прогалин, вырубок, в относительно однородных по составу, возрасту, бонитету, полноте насаждениях в количестве 10 (рисунок 2), каждая площадью около 1 га (Таксация леса..., 2011).

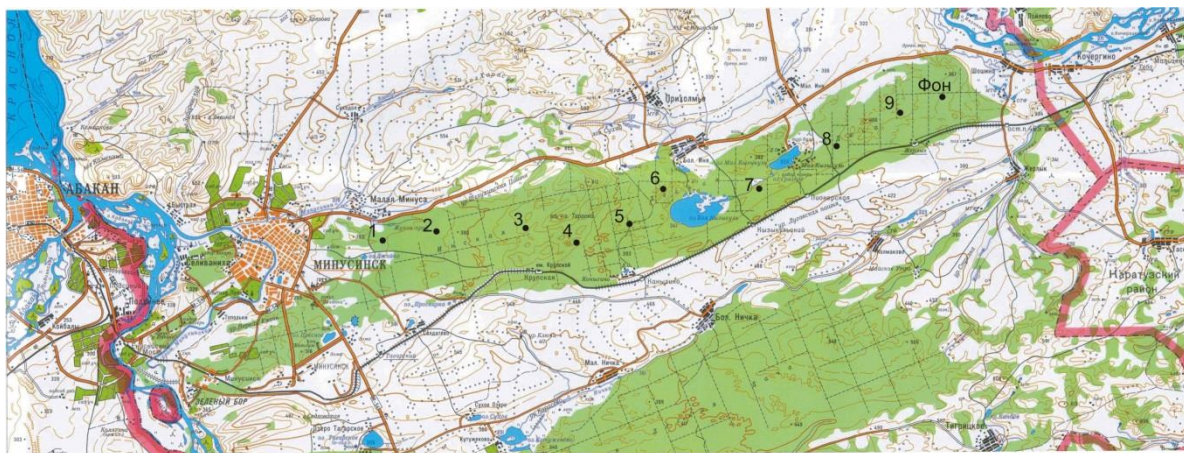


Рисунок 2 – Карта-схема расположения пробных площадей

Пробные площади заложены в спелых и приспевающих древостоях, размеры площадей определены исходя из необходимости обеспечения на них 150-200 деревьев.

Каждая пробная площадь ограничивалась визирами без рубки деревьев с постановкой вешек через каждые 15-20 м. По углам площадей установлены

кольшки-пикеты, диаметром 6-8 см, высотой 130-150 см, на которых масляной краской нанесены номер пробной площади, год закладки и площадь.

Контрольная пробная площадь заложена на расстоянии 49 км от города Минусинска, в наибольшем удалении от источников выброса загрязняющих веществ.

На каждой пробной площади определили таксационные признаки древостоя, включая состав, среднюю высоту, возраст, бонитет, полноту, запас, средний диаметр, тип леса (Анучин, 1982), для чего выполнили пересчет деревьев, полосами, параллельными стороне пробной площади. Каждое дерево пронумеровали масляной краской, сперва слегка зачистив кору. Черту на высоте 1,3 м также проводили краской. Отметки делали с той стороны, которая обращена к еще не обмеренному насаждению.

Диаметры деревьев замерили мерной вилкой на высоте 1,3 м, после чего определили средний диаметр древостоя. За начальную ступень пересчета брали 0,4 от среднего диаметра основного элемента леса. (Лесоводство..., 2012).

Для определения средней арифметической высоты выбрали 25 деревьев. Высоту определяли с помощью высотомера. При обмере такого количества деревьев погрешность измерений менее 2% (Анучин, 1982).

Возраст древостоя определяли при помощи подсчета числа годичных колец на имеющихся пнях на пробной площади.

Полноту древостоя определили путем деления суммы площадей поперечных сечений (измеренных с помощью полнотомера Биттерлиха) на сумму площадей поперечных сечений нормального древостоя, значения которых получены по таблице стандартных значений сумм площадей сечений нормальных древостоев основных лесообразующих пород по классам бонитета, предложенной В.В. Загреевым (Общесоюзные нормативы..., 1992).

Производительность древостоев оценивали по бонитировочной шкале М.М. Орлова (1911).

Запас древостоя определяли по номограмме, разработанной Н.П. Анучиным (1982).

По преобладающей породе и растению индикатору установлен тип леса.

В связи с тем, что для района исследования одним из приоритетных загрязнителей являются взвешенные вещества, в целях определения характера рассеивания загрязнителей и установления зоны максимального оседания загрязняющих веществ на территории Минусинского ленточного бора, с 2012 по 2014 гг. осуществляли мониторинг загрязнения снегового покрова.

Площадь бора разделена на лесные кварталы, ежегодно в ходе исследования под пологом леса отбиралось 110 проб снега из 22 кварталов (пробы снега из кварталов, расположенных в наибольшем удалении от Минусинска рассматриваются как фоновые).

Кроме того, в указанных лесных кварталах отбирались пробы и на открытых участках (опушках, полянах) в том же количестве, что и под пологом леса.

Снегомерную съемку проводили в период максимальных снегозапасов (2-3 декада февраля) согласно общепринятой методике (Наставление..., 1976). Образцы снега отбирали весовым снегомером (ВС-43) (рисунок 3). Отбор проб производился в соответствии с ГОСТ Р 51592-2000 «Вода. Общие требования к отбору проб». Для каждого снежного керна были определены высота и плотность.



Рисунок 3 – Отбор пробы снега весовым снегомером ВС-43

После отбора снег для растапливания был перенесен в стаканы, при этом из него пинцетом выбирались веточки, листья, хвоя, трава и другие растительные остатки. Растапливание снега производилось при комнатной температуре. Образовавшуюся воду сливали на маркированные бумажные обеззоленные фильтры «синяя лента», помещенные в воронки и смоченные дистиллированной водой для хорошего прилипания. Через каждый фильтр пропускали 1,5 литра тщательно перемешанной пробы талой воды. Во всех пробах было определено значение водородного показателя (рН) с помощью рН-метра.

По окончании фильтрования фильтр с осадком высушивали сутки при комнатной температуре, затем в сушильном шкафу в течение 2 часов при температуре 105 °С, после чего охлаждали в эксикаторе и, закрыв бюкс крышкой, взвешивали. Процедуру сушки в сушильном шкафу повторяли до установления разницы между взвешиваниями не более 0,5 мг при массе осадка до 50 мг.

Далее согласно ПНДФ 14.1:2:4.254-2009 рассчитали содержание взвешенных веществ в анализируемых пробах талой воды по формуле:

$$X = \frac{(m_{\text{фо}} - m_{\text{ф}}) \times 1000}{V}, \quad (1)$$

где:  $m_{\text{фо}}$  – масса бюкса с бумажным фильтром после фильтрования с осадком взвешенных веществ, г;

$m_{\text{ф}}$  – масса бюкса с бумажным фильтром до фильтрования, г;



$V$  – объем профильтрованной через фильтр воды,  $\text{дм}^3$ .

Реакцию древостоя оценивали по состоянию ассимиляционного аппарата сосны – интенсивности фотосинтеза, дыхания, водного дефицита, а также по среднему возрасту хвои, степени ее поражения, размерам, массе и густоте охвоения осевых побегов. Для отбора проб на каждой пробной площади было отобрано 10 модельных деревьев.

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

Измерение интенсивности фотосинтеза хвои выполнили по методу ассимиляционной колбы (по Л.А. Иванову и Н.Л. Коссович). Интенсивность дыхания определяли по количеству выделенного диоксида углерода (метод Бойсен-Иенсена).

Водный дефицит определяли по общепринятой методике как разность между наибольшим содержанием воды в состоянии насыщения и содержанием воды в момент анализа (Воскресенская и др. ..., 2008). Все опыты проводили в трехкратной повторности (Григоренко, 2015).

Длину хвои измеряли линейкой с точностью до 1 мм, ширину и толщину хвои – микрометром с точностью до 0,01 мм.

Площадь поверхности хвои вычисляли по формуле:

$$S=PL, \quad (2)$$

где  $P$  – периметр поперечного сечения хвои, мм;

$L$  – длина хвои, мм.

Периметр поперечного сечения рассчитывали по формуле Тирена (Вишнякова и др., 2008):

$$P = 2\sqrt{a^2 + b^2}, \quad (3)$$

где  $a$  – толщина хвои, мм;

$b$  – ширина хвои, мм.

Для исследования данных морфометрических показателей на каждой пробной площади было отобрано по 250 пар хвоинок.

Для определения абсолютно сухой массы хвои, высушивали 500 хвоинок до воздушно-сухого состояния, затем вычисляли их массу.

Степень поражения хвои оценивалась по изменению ее окраски и соотношению длины пораженной части к общей длине, выраженному в процентах (Мартынюк, 2004).

Измерение прироста осевых побегов сосны последних четырех лет жизни проводили линейкой с точностью до 1 мм.

Сближенность хвои определяли подсчетом количества хвоинок на 10 см побега, при длине побега менее 10 см подсчет вели по существующей длине, в последующем производя пересчет на 10 см.

Для оценки состояния Минусинского ленточного бора проводили исследования содержания химических элементов в почве, лесной подстилке и хвое. На каждой пробной площади были взяты смешанные пробы почв и лесных подстилок – методом конверта (4 точки по краям и одна в центре). Отбор проб лесной подстилки осуществлялся на всю мощность слоя, отбор проб почв – на глубину до 20 см. Отбор проб осуществлялся в полиэтиленовые мешки, после окончания работ пробы высушивались в проветриваемом помещении и доставлялись в лабораторию для дальнейшего химического анализа.

Для установления влияния техногенных факторов на лесную подстилку на каждой пробной площади проводили измерение толщины лесной подстилки в 20-ти кратной повторности.

Отбор проб хвои для химического анализа осуществлялся из разных частей крон 10 модельных деревьев. Отобранные пробы хвои после высушивания доставляли в лабораторию.

Определение ванадия, железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, молибдена, никеля, свинца, цинка в почве и растительных образцах выполняли методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии

(Методические указания..., 1992); определение мышьяка в подстилке и почве – методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА (Методика выполнения..., 2004; ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.48-06..., 2005); ртути в почве – методом беспламенной атомной абсорбции с термическим разложением проб (Методика выполнения..., 1996); ртути в подстилке – методом беспламенной атомной абсорбции (Методические указания..., 1990); определение фтора в хвое и лесной подстилке – ионометрическим методом (Методические указания..., 1995); фтора в почве – методом прямой потенциометрии (Методика выполнения..., 2008).

Эфирное масло получали методом гидродистилляции (перегонка с водяным паром). Выход находили волюмометрическим путем. Качественное определение компонентного состава образцов выполняли на хромато-масс-спектрометре «Agilent 5975C-7890A» фирмы Agilent (США) с использованием автоматического пробоотборника для жидких образцов Agilent 7683. Идентификацию компонентов проводили путем сравнения масс-спектров исследуемых образцов с данными библиотеки «NIST05a. L», с помощью газохроматографических стандартов индивидуальных терпенов и терпеноидов фирм «SIGMA-ALDRICH» и «FLUKA» –  $\alpha$ -пинена,  $\beta$ -пинена, камфена, мирцена,  $\Delta^3$ -карена, лимонена, камфоры, терпинолена,  $\alpha$ -фелландрена, борнеола, борнилацетата, а также линейных индексов удерживания, используя программу AMDIS.

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

#### 3.1 Физико-географические условия района исследования

Объект исследования – Минусинский ленточный бор расположен на правом берегу реки Енисей, по административному делению он приурочен к Минусинскому району Красноярского края.

Характер рельефа рассматриваемого района обусловлен положением на территории Минусинской котловины, которая наряду с Назаровской, Чулымо-Енисейской, Сыдо-Ербинской котловинами образуют Минусинскую впадину (рисунок 4). Расчленяют Минусинскую впадину хребты и отроги горных систем, кроме того рельеф усложняется долиной реки Енисей, протекающей в меридиональном направлении посередине впадины (Алифанова, 1976).

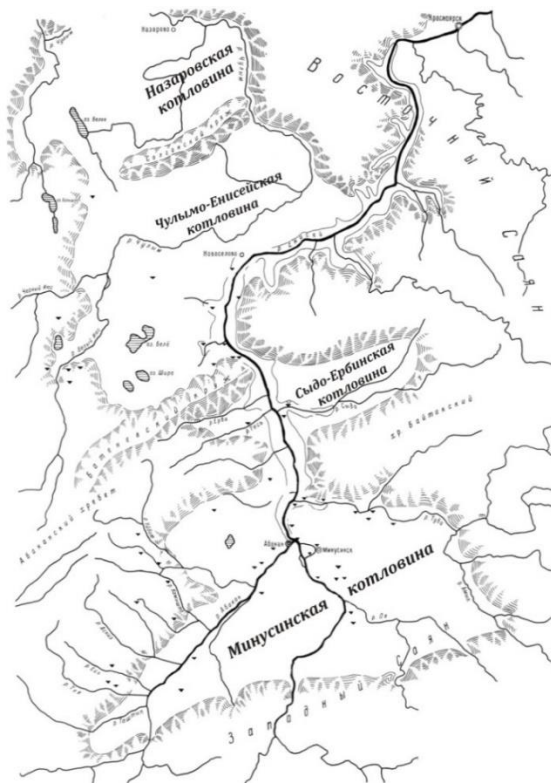


Рисунок 4 – Минусинская впадина

Поверхности впадины постепенно повышаются с севера на юг с 250-300 м абсолютной высоты – в Назаровской котловине до 300-450 м – в Минусинской котловине.

Минусинский межгорный прогиб наметился в начале нижнего девона, по зонам расколов в докембрийско-нижнепалеозойском складчатом основании, направленным вкрест простирания основных каледонских структур (Гавлина, 1954).

Минусинская котловина (Южно-Минусинская, Хакасско-Минусинская) – южная часть обширной сбросовой Минусинской впадины, находящаяся в Приенисейском крае. Центральная часть котловины имеет высоту около 240 м, к окраинам она увеличивается до 600-700 м.

Южная граница Минусинской котловины начинается от нижнего течения реки Таштып, далее идет по правобережью реки Абакан параллельно северным увалам подножия Западного Саяна. Восточная граница следует вдоль предгорий Каннского и Манского Белогорий Восточного Саяна. На севере границей является Курбатово-Сырское Белогорье и далее Солгонский кряж (горный хребет на юге Красноярского края, высотой до 875 м). Западная граница проходит вдоль предгорий восточных отрогов Томского кряжа системы Кузнецкого Алатау и далее вдоль Абаканского хребта до реки Таштып. От Томского кряжа начинается Батеневский кряж, который делит Минусинскую котловину на две части: большую южную и меньшую северную (Сибирская советская энциклопедия..., 1931).

Современный рельеф Южно-Минусинской котловины неодинаков в различных геоморфологических подразделениях. Рельеф котловины преимущественно увалисто-равнинный, расчлененный долинами. Возвышенности (600-800 м и реже 1000-1200 м) характеризуются сочетанием низкогорного, холмисто-сопочного и увалистого рельефа. Равнинные поверхности террас современных рек в пределах Минусинской котловины сочетаются с формами высокоувалистого и увалисто-сопочного рельефа междуречий (Миляева, 1988).

В основании равнины – сланцы, песчаники, конгломераты, мергели, известняки, туфы, порфириты и сиениты палеозойского возраста, перекрытые суглинками, лессами и супесями (Сибирская советская энциклопедия..., 1931).

Котловину принято разделять на левобережную и правобережную части. Границей между ними является река Енисей с левым притоком Абаканом. Господствующими формами рельефа правобережной части котловины, на которой расположен объект исследования, являются водоразделы междуречий и невысокие сопки. В понижениях котловина сложена молодыми палеозойскими отложениями. Почвообразующими породами правобережья Енисея Минусинской впадины являются коричнево-бурые глины, лессовидные глины и тяжелые лессовидные суглинки, лесс и лессовидные суглинки, лессовидные супеси и легкие суглинки, слоистые пески (Коляго, 1954).

С юга на северо-восток по направлению к Тубе подходят песчаные пространства с высокими вытянутыми холмами и глубокими западинами между ними. В местах выхода на поверхность пески подверглись действию воздушных потоков, образовав в конечном итоге, дюнно-бугристый рельеф, явившийся предпосылкой образования соснового леса. Выходы песков на земную поверхность приурочены к местам эрозионного расчленения кайнозойской толщи реками древней (ранне-четвертичной) и современной гидрографической сети, а также к наиболее приподнятым и эродированным складчатым глыбам. Минусинский ленточный бор является местом древней эрозии, вскрыт он еще до наиболее сильного проявления тектогенеза впадины, до образования долин и водоразделов современных рек Туба и Енисей (Коляго, 1967).

### 3.2 Климатические особенности района исследования

Минусинская впадина характеризуется резкой континентальностью климата и относится к Саяно-Алтайской области холодно-умеренного подпояса (Шашко, 1967). Климат Минусинской котловины отличается более выраженной континентальностью нежели в соседних Сыдо-Ербинской, Чулымо-Енисейской и Назаровской котловинах. Для нее характерно длительное промерзание почв, засушливость (Николаева, 2008).

Природные и климатические условия Минусинской котловины определяются множеством факторов – удаленностью океанов, расположением в центре Азиатского материка, орографической замкнутостью, повторяемостью циклонов, ролью барьерно-орографического фактора в распределении осадков, влиянием Азиатского антициклона и, в конечном счете, создают неповторимые, индивидуальные особенности ландшафта (Сухова, 2008).

Большое влияние на климат котловины оказывает рельеф, особенно ее горное обрамление.

Для рассматриваемого района в течение года характерно сравнительно небольшое количество осадков, вследствие того, что котловина со всех сторон окружена горами, создающими местные воздушные потоки. Сезонная особенность атмосферной циркуляции – относительно сухая зима и резко выраженный летний максимум.

Средняя годовая температура воздуха района исследования составляет  $0,3^{\circ}\text{C}$ , средняя температура января – минус  $20,8^{\circ}\text{C}$ , средняя температура самого жаркого месяца (июля) –  $19,8^{\circ}\text{C}$ , средняя максимальная температура января составляет минус  $14,1^{\circ}\text{C}$ , самого жаркого месяца –  $26,6^{\circ}\text{C}$ , средняя максимальная годовая температура достигает  $7,3^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный максимум температуры воздуха в январе зафиксирован в 1979 году и составил  $6^{\circ}\text{C}$ , абсолютный максимум июля составил  $39^{\circ}\text{C}$  (1962 год). Абсолютный минимум января равен минус  $52^{\circ}\text{C}$  (1931 год), июля –  $3^{\circ}\text{C}$  (1971 год).

Средняя продолжительность безморозного периода составляет 109 дней, наименьшая продолжительность была зафиксирована в 1934 году (81 день), наибольшая – в 1966 году (152 дня).

Среднее число дней с температурой ниже минус 30°C – 36 дней, в том числе с температурой ниже минус 40°C – 7,8, с температурой ниже минус 35°C – 19,5 дней. Температура воздуха более 30°C характерна для летнего периода и первой декады сентября, среднее число дней в год с данной температурой составляет 15,4 дня.

Зима малоснежная, мощность снегового покрова может достигать более 30 см, обычно около 10 см.

Для Минусинского района в зимний период характерна инверсия температуры воздуха. В этих условиях над районом возникает запирающий слой воздуха, препятствующий рассеиванию загрязнителей и способствующий накоплению в атмосфере водяного пара, пыли, дыма и вредных примесей.

Весной с разрушением Азиатского антициклона скорость ветра возрастает и застой воздуха прекращается, но вблизи промышленных центров уровень загрязнения атмосферы остается практически неизменным вследствие превышения уровня загрязнения над потенциалом самоочищения атмосферы.

Ветровой режим относительно стабильный. Господствующими в течение года являются ветры юго-западного и западного направлений (32 и 19% соответственно). Повторяемость юго-западного направления в зимний период – 49%, в летний – 21%. Западного – 17% зимой, 21% – летом.

На повторяемость ветров оказывает влияние горное окружение рассматриваемого района исследования (рисунок 5). Преобладают юго-западные ветры, образованию которых способствует промежуток между Западным Саяном и Абаканским хребтом. Воздушные массы, проходя через довольно низкий водораздел Абакана и притоков Томи, «врываються» в котловину и, растекаясь, достигают значительной скорости у земли, создавая



возможность распространения вредных примесей почти по всему югу Минусинской котловины и предгорьям (Дурнев, 1980). С северной стороны, от Батеневского кряжа ветры тоже довольно часты, повторяемость – 15% в год. Северо-западным и восточным ветрам мешают соответственно Кузнецкий Алатау и Западный и Восточный Саяны, повторяемость 8 и 5 % в год.

Среднегодовая скорость ветра составляет 1,8 м/с, в зимний период – 1,3 м/с, средняя скорость за летний период – 1,5 м/с. Наибольшая из средних скоростей наблюдается в апреле и мае и равна 2,6 м/с.



Рисунок 5 – Орографическая схема района исследования, совмещенная с розой ветров\*

\*На орографической схеме более высокие хребты помечены жирными линиями и схема совмещена с розой ветров.

Наиболее высокие концентрации загрязнителей в приземной атмосфере и наибольший по площади ареал загрязнения наблюдаются при штиле и слабом ветре со скоростью 0-1 м/с. Повторяемость слабых ветров в зимний период составляет 79,4%, в летний период – 71,2%, в год – 70,1%. Среднегодовая повторяемость скорости 2-3 м/с составляет 15,2%, в зимний период – 8%, в летний – 19,3%. Повторяемость скорости ветра 4-5 м/с – 9,0% в год, 7% – в зимний и летний периоды. Скорость ветра 6-7 м/с повторяется с

частотой 3,7% в год, зимой – 4,5%, летом – 1,8%. Повторяемость скорости 8-9 м/с составляет 1,6% в год, в зимний период – 1,8%, 0,4% – летом. Скорость ветра более 10 м/с наблюдается редко – 0,4% в год.

Годовое число дней со скоростью ветра более 15 м/с, способствующей возникновению пыльных бурь вследствие распространения почв легкого механического состава, недостаточного атмосферного увлажнения, колеблется от 13 до 16. Ветры с такой скоростью наблюдаются обычно с апреля по июнь, когда среднее число дней с данной скоростью составляет от 2 до 3, в остальное время среднемесячное число дней с таким ветром не превышает 1. Особенно сильны ветры западного направления (Кусковский, Кривошеев, 1989).

Среднее годовое давление атмосферного воздуха составляет 989,9 гПа, максимальное атмосферное давление за период наблюдения зафиксировано в 1931 году, оно составило 1038,2 гПа, минимальное – 957 гПа (1975 год).

Относительная влажность воздуха в течение года колеблется в пределах 56-78%. Средняя годовая влажность воздуха составляет 70%. Число дней с влажностью менее 30% составляет 56 в год. Наибольшее количество дней с относительной влажностью менее 30% наблюдается с апреля по июнь. Среднегодовое число дней с влажностью воздуха более 80% составляет 32, наибольшее их число характерно для зимнего периода (4 – январь, 8 – декабрь).

Среднегодовое количество осадков составляет 351 мм, во внутригодовом их распределении на территории рассматриваемого района наблюдается преобладание осадков летнего периода, так среднее годовое количество жидких осадков – 270 мм, твердых – 65 мм, смешанных – 17 мм.

Глубина сезонного промерзания почвы – 2,5 м. Вечная мерзлота отсутствует (Научно-прикладной..., 1990).

Климатические условия района исследования являются особенно неблагоприятными для рассеивания выбросов (Государственный доклад..., 2016) и характеризуются часто повторяющимися инверсиями температуры

воздуха, частыми штилями, способствующими застою воздуха, и периодически возникающими пыльными бурями.

Неблагоприятные климатические факторы усиливают негативное действие промышленных токсикантов (Кондратюк и др., 1980). В свою очередь, воздействие промышленных выбросов приводит, в целом, к ослаблению растений, что отражается на их чувствительности к климатическим факторам и патогенам (Гудериан, 1979).

### **3.3 Характеристика почвенного покрова района исследования**

Исследованиями почв правобережья Минусинской котловины занимались С.А. Коляго, Ф.И. Плешиков, Э.Е. Боболева.

Почвообразующими породами юга Минусинской котловины являются аллювиальные отложения, образованные в четвертичном периоде – песчано-галечниковые наносы, перекрытые песками, супесями и лессовидными суглинками. Наиболее характерны для Минусинской котловины красноцветные, серые и бурые песчаники, песчанистые сланцы и конгломераты (Коляго, 1967).

Почвообразующими породами Минусинского ленточного бора, расположенного на правобережье реки Енисей, являются озерно-речные пески, слагающиеся в песчаные дюны. Минусинские боры образовались на обнаженных эоловых переотложенных песках на площадях древних речных долин. Возраст песков недостаточно изучен, имеются данные о том, что они образовались до формирования современного облика котловины и были вскрыты до проявления современной тектонической структуры Минусинской впадины, возможно, еще до формирования современного водораздела Енисея и его притоков (Коляго, 1954).

После перестройки гидрографической сети обнаженные пески подверглись эоловому переотложению. В местах выхода на поверхность пески подверглись действию воздушных потоков, образовав в конечном

итоге, дюнно-бугристый рельеф, явившийся предпосылкой образования соснового леса.

Боровые пески отличаются серовато-желтым цветом, мелкозернистой структурой, ограниченностью минерального состава и бедностью элементов зольного питания. Функционирование Минусинских боров в условиях сухого климата котловины на субстрате, обедненном минеральными веществами, обусловлено приспособленностью сосны к специфике водного режима песчаников с учетом недостаточного атмосферного увлажнения (Побединский, 1965; Плешиков, 1975).

Как отмечалось ранее, исследования Минусинского бора проводились в сосняках зеленомошной, разнотравной и остепненной групп типов леса.

Сосняки зеленомошные произрастают преимущественно на дерново-боровых слаборазвитых оподзоленных почвах междюнных понижений, древних аллювиальных террас и склонов северных экспозиций. Почвами сосняков остепненной группы являются преимущественно дерново-боровые примитивные и слаборазвитые песчаные и супесчаные.

Исследования дерново-боровых почв проведены Ф.И. Плешиковым (1975, 1991). У данных почв отсутствует четкая дифференциация профиля, обусловленная слабой миграцией веществ. Дерново-боровые почвы бедны элементами питания. Содержание гумуса в них зависит, в первую очередь, от массы растительного опада и условий его разложения. Формирующиеся на высоких дюнах примитивные дерново-боровые почвы отличаются невысокими запасами гумуса (13-23 т/га) вследствие слабого развития травяного покрова. Более развитый травяной покров на слабовсхолмленных участках бора с более благоприятным водным режимом стимулирует развитие травяного яруса, что усиливает биологическую миграцию элементов и способствует процессу накопления гумуса.

Сосняки разнотравной группы произрастают на дерново-боровых развитых, серых и темно-серых лесных, дерново-луговых почвах. Высокая заиленность материнских пород повышает поглотительную способность

почв, создает благоприятные условия для закрепления гумусовых веществ и тем самым обуславливает более высокие темпы развития сосняков. Разнотравные древостои представлены преимущественно древостоями II-III классов бонитета. Сосняки более низкой продуктивности в этих условиях почти не встречаются.

Исследованиями серых и темно-серых лесных почв Минусинских боров занималась Э.Е. Боболева (1975). Серая почва – по составу легкосуглинистая, мощность покровного суглинка составляет 50-60 см. Последний сменяется мощным слоем супесей и песков. Подстилающий суглинок бурением до 7 м не обнаружен. В профиле преобладают фракции мелкого песка крупной пыли, размером 0,01-0,05 мм.

Темно-серая почва по механическому составу – легкосуглинистая. Она имеет трехслойное строение: покровный легкий суглинок мощностью 60-70 см, второй слой супеси и песков, затем на глубине 2,0-2,5 м легкий карбонатный лессовидный суглинок.

Ранее проведенные исследования (Коляго, 1954; Грибов, 1997) показали, что почвенный покров древних речных долин однообразен, что обусловлено едиными супесчаными материнскими породами и схожим растительным покровом, преобладающими здесь выступают супесчаные дерново-подзолистые почвы. Слабоподзолистые почвы встречаются на склонах дюн, дерново-подзолистые расположены на северных, северо-западных и северо-восточных склонах, а также в понижениях между дюнами.

### **3.4 Растительность района исследования**

Разнообразие растительности Минусинской котловины обусловлено, главным образом, выделением на ее территории двух природных зон: степной, расположенной в центральной части котловины, и лесостепной.

Степная зона на юге западной половины Минусинской котловины включает степи: Койбальскую, Сагайскую, Качинскую, на востоке –

Минусинскую, в северной части – Июсо-Чулымскую. Лесостепная часть Минусинской котловины вытянута вдоль северной и восточной границ в виде полосы шириной 20-60 км.

Изучение растительности юга Красноярского края датируется с 1627 года (Черепнин, 1954). Достаточно разнообразны исследования растительности степей. Эколого-фитоценотическая классификация и описание растительности некоторых степей представлена в работе А.В. Куминовой (1976). Перечень синтаксонов растительности степных сообществ Минусинских котловин приводится в работе Н.И. Макуниной (2006). Подробная характеристика структуры и биомассы растительности Койбальской степи описана в работе В.Г. Волковой и др. (1979). Фитоценотическая структура галофитных лугов Койбальской степи исследована Т.М. Зоркиной и др. (2013). В работе А.Ю. Королюк, Н.И. Макуниной (2000) очерчен ареал луговых степей на территории Алтае-Саянской горной области, показано своеобразие их флористического состава. Многочисленные исследования растительности юга Западной и Средней Сибири проведены Н.Б. Ермаковым (2004, 2009, 2012 и др.).

Довольно много работ посвящено растительным компонентам степных экосистем в зоне влияния Саяногорского алюминиевого завода (Сараев, Харахинова, 1992; Давыдова, 2007; Лавриненко, 2007; Бессолицына, 2009; Преловский, 2011; Градобоева и др., 2008; Сторожев, Бондарь, 2012). По мнению Н.Д. Давыдовой (2007) большую часть территории, находящейся под воздействием промышленных выбросов АО «РУСАЛ Саяногорск», занимают степные растительные сообщества, относительно устойчивые к загрязнению и способные накапливать и выдерживать высокие концентрации фтора.

Научные исследования, проведенные В.Г. Сараевым и С.И. Харахиновой (1992) в первые годы работы завода установили в травянистой растительности содержание фтора – до 100-150 мг/кг сухого вещества, а в соломе вблизи с. Михайловка (9 км от завода) его содержание варьировало

от 10 до 30 мг/кг. Через 10 лет работы завода, площадь территории загрязнения фторсодержащими солями составила более 1600 км<sup>2</sup>.

Исследованию воздействия АО «РУСАЛ Саяногорск» на лесные экосистемы посвящено небольшое количество работ, в качестве объектов исследований в них выступают лесные экосистемы, расположенные в непосредственной близости от завода – Смирновский, Бондаревский, Очурский сосновые боры (Преловский, 2011).

Как указывалось ранее, уникальным природным ландшафтом Минусинской котловины является Минусинский бор. Он приурочен к Алтае-Саянскому горнолесостепному району, расположенному по периферии Минусинской котловины. Ленточный бор примыкает к административному центру Минусинского района Красноярского края – г. Минусинску, находится в 25 км от столицы Республики Хакасия – г. Абакана.

По данным М.А. Поляковой (2008) на территории Минусинских боровых лент произрастают 12 видов растений, занесенных в Красную книгу Красноярского края: венерин башмачок крапчатый (*Cypripedium guttatum*), бруннера сибирская (*Brunnera sibirica*), венерин башмачок настоящий (*Cypripedium calceolus*), венерин башмачок крупноцветковый (*Cypripedium macranthon*), гнездоцветка клобучковая (*Neottianthe cucullata*), гроздовник виргинский (*Botrychium virginianum*), зимолюбка зонтичная (*Chimaphila umbellate*), ковыль перистый (*Stipa pennata*), лилейник малый (*Hemerocallis minor*), фиалка пальчатая (*Viola dactyloides*), фиалка рассечённая (*Viola dissecta*), щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas*).

Согласно Красной книге Красноярского края (2012), редкими (категория 3 (R)) по шкале категорий редкости, имеющими малую численность и ограниченное распределение, являются: *Brunnera sibirica*, *Botrychium virginianum*, *Cypripedium guttatum*, *Chimaphila umbellate*, *Dryopteris filix-mas*, *Neottianthe cucullata*, *Stipa pennata*, *Viola dactyloides*, *Viola dissecta*; сокращающимися в численности (категория 2 (V)): *Cypripedium macranthon*, *Cypripedium calceolus*. Лилейник малый (*Hemerocallis minor*) в

Красную книгу редких и находящихся под угрозой исчезновения видов дикорастущих растений и грибов 2012 года не вошел.

### **3.5 Характеристика антропогенного воздействия на объект исследования**

Наиболее крупным населенным пунктом, близко расположенным к объекту нашего исследования – Минусинскому ленточному бору, является административный центр Минусинского района Красноярского края – город Минусинск.

Минусинск не является крупным промышленным центром. Основной вклад в экономику города вносят предприятия пищевой отрасли, удельный вес которых в общем объеме производства составляет более 93,2%, отрасль распределения электроэнергии, газа, воды занимает второе место, ее вклад в производстве – 6,3%, третье место за деревообрабатывающей отраслью – 0,3%, вклад прочих отраслей экономики составляет 0,2%. Несмотря на это, город Минусинск с 2007 года входит в, так называемый, «список самых грязных городов России» (Государственный доклад..., 2015).

На территории Минусинска насчитывается 30 предприятий, осуществляющих выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, общее количество источников выбросов на которых составляет 1310 (Государственный доклад..., 2015).

В связи с тем, что в районе исследования преобладающими в течение года являются юго-западный и западный переносы воздушных масс, по направлению к Минусинскому ленточному бору движутся промышленные эмиссии предприятий Абакано-Черногорского промузла и предприятий города Саяногорска Республики Хакасия (приложение 1).

Республика Хакасия промышленно развита, количество предприятий в сфере промышленного производства в 2015 году составило 1123 (Государственный доклад..., 2016).



В среднем, согласно статистических данных, представляемых хозяйствующими субъектами в органы статистического учета, в 2015 году в атмосферный воздух от промышленных предприятий Республики Хакасия и Минусинского района Красноярского края поступило около 93 тысяч тонн загрязняющих веществ. Большая часть выбрасываемых загрязняющих веществ принадлежит предприятиям Абакано-Черногорского промузла и АО «РУСАЛ Саяногорск». За период с 2012 по 2015 годы сведения о ежегодном выбросе, представляемые природопользователями, существенно не изменились: в 2014 году выброс от стационарных источников составил 87,462 тысяч тонн; в 2013 году – 93,324 тысяч тонн; в 2012 году – 99 тысяч тонн (Государственный доклад...,2016; Государственный доклад...,2016а).

Согласно информации, полученной из Управлений Росприроднадзора по Республике Хакасия и Красноярскому краю, предприятиям Абакано-Черногорского промузла, городов Саяногорск и Минусинск выданы разрешения на выброс загрязняющих веществ на общую сумму свыше 250 тысяч тонн.

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», занимающее третье место по производству алюминия после Братского и Красноярского алюминиевого заводов.

Наиболее близко расположенными к участкам бора, на расстоянии 5 км на юг, из крупных стационарных источников выброса загрязняющих веществ, являются источники, принадлежащие филиалу «Минусинская ТЭЦ» АО «Енисейская ТГК (ТГК-13)».

Отрицательное влияние предприятий по производству тепловой и электрической энергии на окружающую среду в значительной степени связано с использованием органического топлива – угля, при сгорании которого в атмосферный воздух поступают различные загрязнители.

Негативное воздействие предприятий по добыче и обогащению угля наряду с существенным влиянием на геологическую среду обусловлено выбросами значительного количества загрязняющих веществ вследствие проведения взрывных, выемочно-погрузочных работ, дробления, транспортирования угля, пыления угольных отвалов, их самовозгорания, сжигания угля в котельных и др.

Основное отрицательное влияние АО «РУСАЛ Саяногорск» связано с технологией производства первичного алюминия посредством электролиза криолитоглиноземного расплава и вспомогательными производствами, в результате которых в атмосферный воздух выбрасывается значительное количество загрязняющих веществ. Наиболее значимыми загрязнителями, выделяющимися при производстве алюминия, являются: фтористые соединения (фтористый водород и плохо растворимые неорганические фториды) и тяжелые металлы.

Газообразные выбросы от предприятий по производству алюминия способны переноситься на значительные расстояния. Ранее проведенными исследованиями фтористые соединения обнаружены на расстоянии более 40 км от алюминиевых производств (Garrec, Passera, 1980; Щетников, Зайченко 1998).

Компактное расположение источников выброса загрязняющих веществ на исследуемой территории, аналогичные по содержанию выбрасываемых веществ пылегазовые эмиссии и господствующие направления ветров, создающие возможность их перекрытия, затрудняют выделение вклада конкретных источников выбросов при оценке воздействия на Минусинский бор.

Выше указанным предприятиям разрешено ежегодно выбрасывать в атмосферный воздух наиболее фитотоксичных загрязняющих веществ (фтористые газообразные соединения, фториды неорганические плохо растворимые, ванадий, медь, никель, свинец) (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Садовникова, 2006; Yruela, 2009) – около 780 тонн, умеренно фитотоксичных (железо, марганец) – более 5 тонн. Разрешено выбрасывать пыли неорганической с содержанием двуоксида кремния 70-20% и ниже, способной привести к закупорке устьичных щелей хвои, и, как следствие, к повышению транспирации и возникновению водного дефицита (Понамарева, 1978; Феклистов, 2004; Павлов, 2005; Хмелевская, 2008; Petkovšek et al., 2008; Попов и др., 2011; Полякова и др., 2012), более 11 тысяч тонн в год.

Исследования компонентного состава взвешенных веществ и промышленных пылей при разработке нормативов допустимых выбросов предприятиями не проводятся, так как это не предусмотрено утвержденными методиками расчета, в частности и методикой определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС РД 34.02.305-98. Вместе с тем, в составе взвешенных веществ, промышленных пылей и летучей золы содержится значительное количество фитотоксичных тяжелых металлов As, Cd, Co, Cu, Pb, Mn, Hg, Ni, Zn (Brigden, Santillo, 2002; Smółka-Danielowska, 2006; Nalawade et al., 2015; Tian et al., 2015).

Взвешенные вещества являются одним из приоритетных загрязняющих веществ в районе исследования. Источниками выделения данного загрязнителя, наряду со сжиганием твердого топлива, являются двигатели внутреннего сгорания автомобилей.

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 работе Н.Д. Давыдовой (2013) по исследованию компонентного состава пылегазовых эмиссий от предприятия АО «РУСАЛ Саяногорск», установлено содержание в твердых аэрозолях фтора, алюминия, кремния, железа, марганца, меди, ванадия, цинка, никеля, кобальта, свинца.

В районе исследования, наряду со значительными по объему промышленными эмиссиями, негативное воздействие на растительность оказывает длительность влияния. Запуск первого энергоблока на Абаканской ТЭЦ датируется 1982 годом, на Минусинской ТЭЦ – 1997 годом. Теплоснабжающее предприятие города Черногорска ООО «Хакасский ТеплоЭнергоКомплекс» функционирует с 2002 года. Добыча угля на Черногорском месторождении началась с 1907 года, а уже к 1934 году достигла объема 417 тысяч тонн в год. В настоящее время добыча угля на Черногорском угольном месторождении составляет более 17 млн. тонн в год. Саяногорский алюминиевый завод введен в эксплуатацию в 1986 году. Таким образом, растительность в районе исследования подвержена интенсивному воздействию промышленных эмиссий на протяжении более 30 лет.

Кроме того, негативным антропогенным фактором воздействия на насаждения Минусинского бора является линейное загрязнение выбросами железнодорожного транспорта, проходящего по железной дороге, пролегающей вдоль южной границы Минусинского бора на всем его протяжении, а местами и непосредственно через бор. Негативное воздействие обусловлено, главным образом, поступлением в лесную экосистему тяжелых металлов с выхлопными газами тепловозов, при сдувании угольной пыли при транспортировании насыпью, истирании рельсов и ходовой части.

Негативным фактором в исследуемом районе выступает и рекреация – Минусинский ленточный бор ввиду расположения является излюбленным местом отдыха населения Минусинского района Красноярского края и Республики Хакасия. Рекреация действует на природу как сложный экологический фактор. С одной стороны – это прямое воздействие

отдыхающих на лесные экосистемы (вытаптывание растительного покрова, вырубка подроста и подлеска для костров, замусоривание, выбросы выхлопных газов автотранспортом и т.д.), а с другой, косвенное влияние – изменение световых и почвенных условий посещаемых участков (уплотнение верхних горизонтов почвы, увеличение освещенности и т.д.). Согласно проведенных нами подсчетов на участках бора вблизи населенных пунктов, подверженных постоянной рекреационной нагрузке, количество автотранспортных средств с отдыхающими ежегодно только за летний период составляет свыше 2500 единиц.

Все вышеперечисленные факторы в комплексе с неблагоприятными климатическими особенностями района исследования создают угрозу для насаждений Минусинского ленточного бора.

### **3.6 Диагностика атмосферной миграции взвешенных веществ по снеговому покрову**

В условиях длительного техногенного воздействия на лесные экосистемы очень важно располагать данными о состоянии лесов. Лесные экосистемы, произрастающие на пути переноса дымовых газов предприятий, способны задерживать их древесным пологом, имеющим огромную поверхность зеленой фитомассы. Лесная опушка, оказывающая тормозящее действие на скорость ветра, приводит к интенсивному выпадению загрязняющих частиц из воздушных масс и их осаждению в различные компоненты лесных экосистем (Скрипальщикова, 1997). В свою очередь лесные экосистемы подвергаются значительному механическому и химическому воздействию задерживаемых компонентов выбросов.

Определить характер рассеивания твердых загрязнителей, зону максимального оседания загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы, возможно с помощью исследования загрязнения снежного покрова. Накапливающийся за зиму снеговой покров служит хорошим индикатором

ореола загрязнения вокруг промышленных центров и городов (Градобоева и др., 2008).

Крупными техногенными объектами, способными оказать негативное воздействие на Минусинский бор, как было установлено ранее, являются АО «Енисейская ТГК (ТГК-13)» филиалы «Абаканская ТЭЦ», «Минусинская ТЭЦ», ООО «Хакасский ТеплоЭнергоКомплекс», АО «УК «Разрез Степной», ООО «СУЭК-Хакасия и АО «РУСАЛ Саяногорск». Так как алюминиевый завод находится на значительном расстоянии от Минусинского бора, его воздействие, скорее всего, осуществляется через газообразные выбросы, которые способны переноситься на значительные расстояния. Крупнодисперсные фракции, содержащиеся в отходящих дымовых газах, начинают выпадать в первую очередь. Осаждение грубодисперсных примесей аэрозолей происходит в радиусе 30 км от источников загрязнения, при этом большая их часть выпадает на расстоянии 7 км (Онучин и др., 2014). Таким образом, поступление аэрозолей на территорию бора определяется выбросами предприятий Минусинска (включая филиал «Минусинская ТЭЦ»), Абакано-Черногорского промузла, выбросами от автотранспорта и железнодорожного транспорта.

Поступающая в атмосферу техногенная пыль, обогащенная рядом химических элементов, в конечном итоге, седиментирует, аккумулируясь в различных компонентах природных экосистем. Исследования снегового покрова Минусинского бора позволили проанализировать поступление загрязняющих веществ на территорию лесной экосистемы и установить участки с наибольшим осаждением загрязнителей.

Высота снежного покрова на территории бора варьирует в пределах от 12 до 44 см, наименьшая высота снежного покрова наблюдается в кварталах вблизи города Минусинска. Наибольшая высота – 44 см – в районе станции Жерлык и на фоновых участках. Средняя высота снежного покрова составила  $20,87 \pm 0,14$  см. Плотность снежного покрова колеблется от 110 до 200 кг/м<sup>3</sup>, среднее значение составляет  $156 \pm 0,97$  кг/м<sup>3</sup>.

На рН-метре были исследованы значения водородного показателя. Значения рН варьируют в пределах от 6,33 до 7,38, среднее значение составило  $6,85 \pm 0,05$  (Григоренко, 2014). Выявлена закономерность увеличения значения рН с приближением к источникам выброса загрязняющих веществ ( $r = 0,72$ ,  $p = 0,98$ ). В незагрязненных районах величина водородного показателя осадков не превышает 7, и регулируется концентрацией углекислого газа в атмосфере (Янченко и др., 2014). Максимальные значения водородного показателя определены на участках на расстоянии до 16 км от близлежащих стационарных источников выброса загрязняющих веществ. Подщелачивание снеговых вод, возможно, связано с поступлением пылевых компонентов выбросов в снеговой покров (Мартынчук, 2004), загрязнением окислами металлов (Ершов, Парасич, 2006; Роговенко и др., 2010).

Определяющее значение для оценки загрязнения каждого лесного участка имеет его сравнение с фоном. Для всех участков бора характерно превышение содержания взвешенных веществ в снеговом покрове по сравнению с фоновыми участками (рисунок 7).

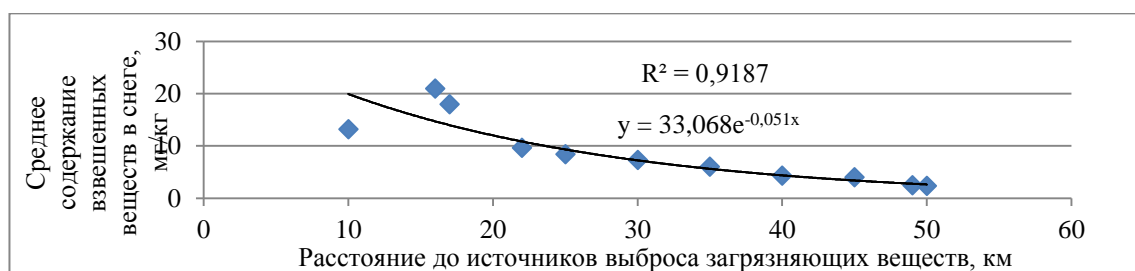


Рисунок 7 – Зависимость средних значений содержания взвешенных веществ в анализируемых пробах талой снеговой воды от расстояния до ближайших источников выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух

На основании того, что распространение загрязнителей подчиняется гауссову распределению (Golubnichiy, Nedelina, 2015) с явной асимметрией, мы исключили из выборки значение до точки максимума.

Из графика видно, что зависимость содержания взвешенных веществ в снеговом покрове под пологом леса относительно расстояния до источников

загрязнения имеет экспоненциальный вид. Мы видим обратную зависимость – с увеличением расстояния содержание взвешенных веществ в снеге уменьшается ( $r = -0,69$ ,  $p = 0,99$ ).

Участки с наименьшим содержанием взвешенных веществ в снеговом покрове располагались в наибольшем удалении от техногенных источников, среднее фоновое содержание аккумулятивной пыли составило  $2,42 \pm 0,07$  мг/л, значение рН –  $6,9 \pm 0,06$ .

Среднее содержание взвешенных веществ в отобранных пробах составило  $9,33 \pm 0,09$  мг/л, что свидетельствует о превышении фонового значения. Самая близкая к Минусинску точка отбора проб расположена на расстоянии около 1 км от него, где концентрация взвешенных веществ составила  $8,1 \pm 0,07$  мг/л, что также превышает фоновое значение.

Максимальное загрязнение наблюдается на расстоянии 16 км от близлежащих источников выброса вредных веществ, оно составило  $21,1 \pm 0,25$  мг/л, что превышает фоновое значение в 8,71 раз (Григоренко, 2014). На основе полученных данных о содержании взвешенных веществ в снежном покрове, составлена карта-схема (приложение 2).

Для того чтобы оценить роль сосновых насаждений в аккумуляции взвешенных веществ, нами были отобраны пробы снегового покрова на открытых участках в тех же лесных кварталах и в том же объеме, что и под пологом леса. Соотношение среднего содержания взвешенных веществ на участках под пологом леса к открытым участкам представлено ниже (рисунок 8).

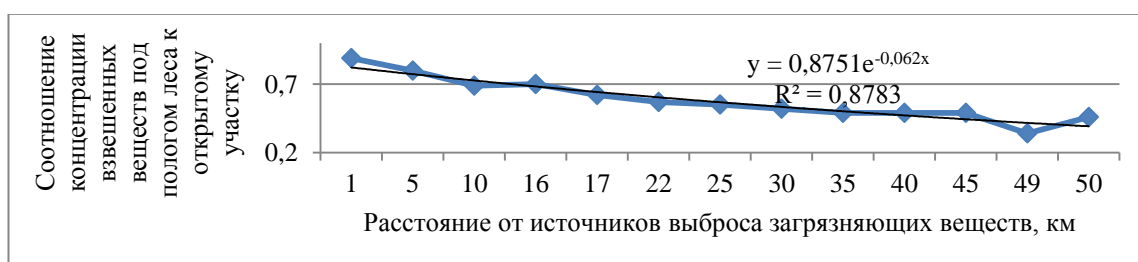


Рисунок 8 – Соотношение концентрации взвешенных веществ на участке под пологом леса к открытому участку



Рассчитав эффективность очищения древесного полога от взвешенных веществ по формуле Dochingera (1980):

$$K = \frac{O-P}{O} \times 100\%, \quad (4)$$

где  $K$  – очищающая эффективность насаждений;

$O$  – масса взвешенных веществ на открытом участке;

$P$  – масса взвешенных веществ на участке под пологом леса,

получили следующие значения.

Очищающая эффективность насаждений бора варьирует в пределах от 11,1 до 66,5%, и зависит, главным образом от расстояния до источников выброса ( $r = 0,9$ ,  $p = 0,99$ ), что можно объяснить угнетающим воздействием техногенных источников на аккумуляционную способность древостоя в непосредственной близости от них и, снижением количества оседаемой пыли с удалением от источников выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Древесный полог Минусинского бора задерживает ежегодно в среднем свыше 28 кг взвешенных веществ на 1 га. Аккумуляционная способность древостоя на участках, подверженных осаждению взвешенных веществ, снижена в среднем на 28,9%, по сравнению с фоном.

Так как для зимнего периода характерно большое число дней с инверсией температуры воздуха, а также отсутствие ветров со скоростью, способствующей возникновению пыльных бурь, можно говорить о том, что в этот период Минусинский бор перехватывает пыль техногенного происхождения.

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

### 3.7 Заключение к главе 3

Минусинский ленточный бор может служить объектом длительных мониторинговых наблюдений состояния природной среды в зоне действия предприятий Абакано-Черногорского промышленного узла, Минусинска и Саяногорска.

Расположение бора на территории Минусинской котловины определяет влияние на лесную экосистему неблагоприятных климатических факторов, таких как инверсий температуры воздуха, частых штилей, способствующих застою воздуха, а, с усилением господствующих западного либо юго-западного ветров, последующего переноса воздушными массами промышленных пылегазовых эмиссий от крупных техногенных источников Абакано-Черногорского промышленного узла (предприятий угледобычи, теплоэнергетики) и алюминиевого производства, сосредоточенных на сравнительно небольшой территории, по направлению к Минусинскому ленточному бору.

Ореол основного загрязнения в лесной экосистеме наблюдается на расстоянии до 16 км от близлежащих источников выброса загрязняющих веществ. С приближением к источникам негативного воздействия наблюдается увеличение водородного показателя снегового покрова до значения 7,38, что может быть обусловлено повышенным содержанием взвешенных веществ и окислов металлов нем. Ранее установлено, что в незагрязненных районах величина водородного показателя осадков не превышает 7.

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%.

## **Глава 4 ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, БИОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК *PINUS SYLVESTRIS L.* В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

### **4.1 Изменение интенсивности фотосинтеза, дыхания и водного дефицита хвои *Pinus sylvestris L.***

В последние годы все большее внимание уделяется промышленному загрязнению как фактору воздействия на физиологические процессы в растительных организмах. Любые изменения, происходящие в растении в ответ на негативное воздействие, необходимо рассматривать в качестве компенсационной реакции организма.

Исследованиями влияния антропогенного загрязнения на физиологическое состояние растений занимались многие ученые. Установлено, что ответная реакция растительного организма на негативное воздействие промышленных выбросов, как правило, зависит от интенсивности, длительности и направленности влияния. Многие ученые полагают, что в результате воздействия поллютантов на растительный организм происходит угнетение физиологических процессов. Установлено, что в условиях сильного и среднего аэротехногенного загрязнения среды у сосны обыкновенной наблюдаются различные нарушения метаболических процессов внутри клетки (Рожков, Михайлова, 1989; Игнатьева, 2005; Кизеев, 2006; Зотикова и др., 2007; Тужилкина, 2009; Титова, 2010; Чупахина и др., 2012; Розломий и др., 2014). Повышение концентраций загрязнителей и продолжительность воздействия поллютантов на растения обуславливает переход процессов жизнедеятельности на другой жизненный уровень.

Ранее проведенные исследования показывают вариабельность и информативность основных физиологических процессов в древесных

организмах, таких как интенсивность фотосинтеза и дыхания, по которым можно судить о неблагоприятных воздействиях на лесные экосистемы.

Для оценки состояния древостоя Минусинского бора нами проведены исследования основных физиологических процессов, таких как интенсивность фотосинтеза и дыхания хвои *Pinus sylvestris L.* и водного дефицита на всем его протяжении. Как установлено ранее, сосна обыкновенная отличается повышенной чувствительностью к загрязнению атмосферного воздуха.

Исследовали физиологические параметры ассимиляционного аппарата сосны, т.к. в нем раньше всего проявляются вызванные техногенным воздействием изменения.

Учет физиологических особенностей хвои сосны позволяет делать выводы о качестве окружающей среды и о характере влияния техногенных источников на лесные экосистемы.

Зависимости значений физиологических параметров хвои *Pinus sylvestris L.* (интенсивности фотосинтеза и дыхания) и водного дефицита хвои от удаленности от источников загрязнения, представлены на графиках (рисунки 9-11). Значения получены в результате лабораторных исследований.



Рисунок 9 – Зависимость величины водного дефицита от расстояния до ближайших источников загрязнения

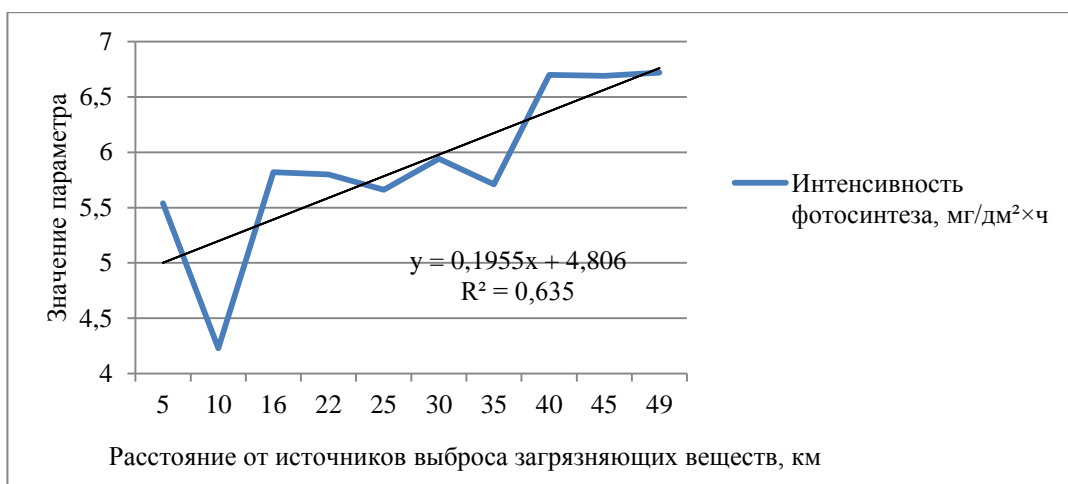


Рисунок 10 – Зависимость интенсивности фотосинтеза от расстояния до ближайших источников загрязнения

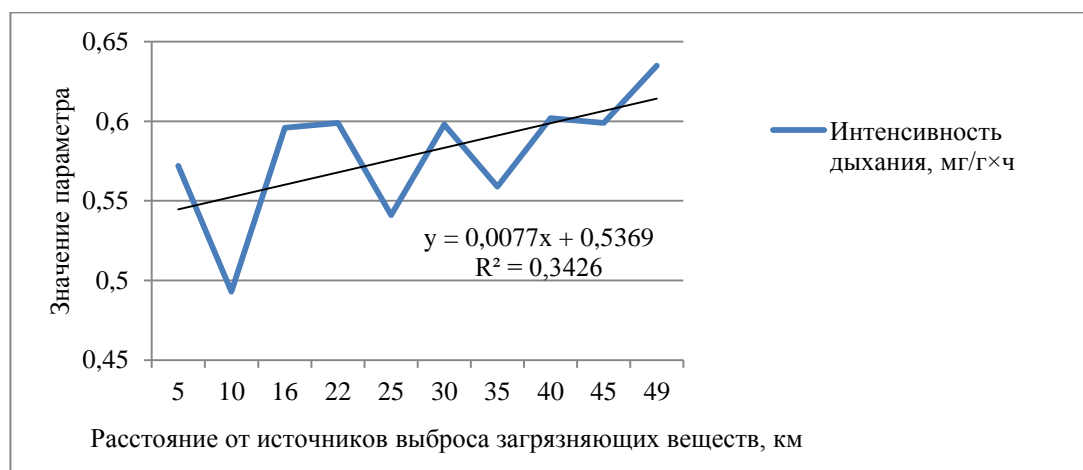


Рисунок 11 – Зависимость интенсивности дыхания от расстояния до ближайших источников загрязнения

На рисунке 9 прослеживается значительная отрицательная связь между расстоянием до источников загрязнения и значением водного дефицита хвои.

Значение водного дефицита в фоновой точке составило  $4,98 \pm 0,01\%$ . В природных условиях полное насыщение хвои водой практически не наблюдается. Значение водного дефицита, не достигающее 10%, не причиняет растению вреда, а значение водного дефицита, превышающее 25%, способно привести к снижению интенсивности роста и фотосинтеза, закрыванию устьиц и даже завяданию (Крамер, Козловский, 1983). Значения водного дефицита на всех пробных площадях, кроме п/п №№ 1 и 2, не

превышает 10%. На пробной площади № 2 в 10 км от ближайших источников выброса водный дефицит отдельных образцов достигает 14,21%, на расстоянии 5 км (пробная площадь № 1) максимальное значение водного дефицита отдельных проб составило 10,9%.

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 хвои фонового участка. Здесь же наблюдаются наименьшие значения интенсивности фотосинтеза и дыхания хвои, разница с фоновыми показателями составляет 37,05% и 22,35% соответственно.

Значение интенсивности фотосинтеза хвои на ближайшем к Минусинску участке (пробная площадь № 1) снижено, по сравнению с фоном, на 17,56%, дыхания – на 9,91%. Среднее значение интенсивности фотосинтеза хвои на всех пробных площадях меньше фонового на 13,84%, среднее значение интенсивности дыхания снижено по отношению к фоновому участку на 9,75%.

Удаление от источников выброса оказывает положительное влияние на интенсивность фотосинтеза хвои, но помимо данного фактора на фотосинтез оказывают влияние свет, температура, концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере, запас влаги в почве (Цельникер и др., 2007), а также условия минерального питания растений (Смашевский, 2014), специфика наложения и пересечения данных факторов создают своего рода кластеры (буферные зоны). При этом увеличение влияния расстояния от источника загрязнителя в группе факторов смещает уровень равновесия таким образом, что на графике вместо стандартного линейного тренда наблюдается ступенчатая структура увеличения показателя.

Как видно из рисунка 11, удаленность источников выброса вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, не влияет на интенсивность дыхания, о чем говорит колебание величины показателя вблизи линейного тренда и значение коэффициента уравнения линейной регрессии близкое к 0.

На все процессы жизнедеятельности растительных организмов влияет недостаток влаги. Наши результаты согласуются с исследованиями, проведенными И.А. Хмелевской (2008), согласно которым усиление водного дефицита способствует снижению интенсивности фотосинтеза и дыхания, выявлена отрицательная корреляционная связь между водным дефицитом и интенсивностью дыхания ( $r = -0,79$ ,  $p = 0,99$ ), отрицательная связь между водным дефицитом и интенсивностью фотосинтеза ( $r = -0,95$ ,  $p = 0,99$ ).

В связи со сложностью протекания физиологических процессов в растительных организмах, а также влияния на фитоценоз комплекса разнообразных факторов, необходимо проводить дополнительные исследования растений в условиях антропогенного воздействия.

#### **4.2 Изменение содержания терпеноидных соединений в хвое**

Наряду с физиологическими процессами под действием загрязнителей происходят биохимические изменения. Для своевременного принятия решений полезно располагать данными о содержании и компонентном составе терпеноидных соединений (Фуксман и др., 1997).

Терпены и терпеноиды получили широкое распространение в растительности. Учеными выделено и идентифицировано более 4000 различных терпенов (Племенков, 2006). В зависимости от числа атомов углерода и частиц изопрена терпены подразделяются на полутерпены, монотерпены, сесквитерпены, дитерпены, сестертерпены, тритерпены, тетратерпены, политерпены.

Основная масса растительных терпенов образуется на конечных этапах вторичных обменных процессов растений.

Основу эфирных масел хвойных составляют монотерпены, и сесквитерпены.

Монотерпены – летучие вещества с сильным и оригинальным ароматом. В составе фракции монотерпенов хвойных выделяют:  $\alpha$ - и  $\beta$ -

пинены, лимонен,  $\Delta^3$ -карен, камфен, терпинен, терпинолен, мирцен и  $\beta$ -фелландрен.

В летучих маслах хвойных пород содержатся также соединения, относящиеся к сесквитерпенам: ациклические соединения фарнезен и неролидол, моноциклический гермакрен, бициклические кадинен, кадинол и муролен, а также более сложные по строению лонгифолен, лонгипинен и лонгициклен. Общее количество сесквитерпенов составляет 1-5 % фракции монотерпенов древесины хвойных пород.

Терпены участвуют в обменных процессах, протекающих в растительных организмах, некоторые из них регулируют активность генов, участвуют в фотохимических реакциях. Углеродные цепи отдельных терпенов являются ключевыми звеньями на пути синтеза гормонов, ферментов, антиокислителей, витаминов Д, Е, К. Летучие терпеноиды защищают растение от солнечной радиации и излишнего испарения (Племенков, 2006а).

Для исследования изменчивости соединений, участвующих в метаболизме растительного организма, выбрали участок с наиболее угнетенными физиологическими параметрами. Хвою с этого участка мы сравнили по составу и содержанию компонентов эфирного масла с фоновым участком.

Исследования качественного и количественного состава метаболитов растений показывают, что при повышении аэротехногенной нагрузки у хвойных срабатывает механизм образования защитных, в том числе терпеноидных веществ (Рощина, Рощина, 1989).

В результате проведенных нами исследований установлено, что хвоя сосны участка с угнетенными физиологическими параметрами на 38,7% богаче эфирным маслом по сравнению с хвоей фонового участка (таблица 2), что согласуется с данными работ (Рощина, Рощина, 1989; Фуксман, и др., 1997; Сотникова, Степень, 2001; Ламоткин и др., 2009).



Таблица 2 – Содержание эфирного масла в хвое сосны обыкновенной, % 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 необходимость противодействия растительного организма неблагоприятному воздействию антропогенных факторов. Исследованиями установлена взаимосвязь между накоплением терпеноидов в хвое и уровнем загрязнения воздушной среды (Сотникова, Степень, 2001).

Диагностировать состояние древостоя возможно и по компонентному составу эфирного масла (таблица 3).

Таблица 3 – Компонентный состав эфирного масла хвои сосны 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 <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0,93±0,04	0,57±0,03
α-Pinene C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	26,42±0,62	17,13±0,43
Camphene C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	4,12±0,17	2,73±0,12
β-Pinene C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	3,99±0,11	3,18±0,13
β-Myrcene C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1,31±0,7	1,05±0,7
Δ <sup>3</sup> -Carene C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	8,72±0,25	5,82±0,2
Limonene C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0,94±0,03	0,89±0,03
Terpinolen C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	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

С увеличением техногенной нагрузки компонентный состав монотерпенов исследованных эфирных масел остался постоянным, изменился только их количественный вклад.

Преобладающим компонентом монотерпенов в эфирном масле хвои *Pinus sylvestris L.* является  $\alpha$ -пинен ( $C_{10}H_{16}$ ), что, вероятно, обусловлено защитными свойствами данного вторичного метаболита для сосны в стрессовых ситуациях (Рощина, Рощина, 1989). В наших исследованиях содержание  $\Delta^3$ -карена на загрязненном участке превышает фоновое и расходится с данными работ (Степень и др., 1996; Ламоткин и др., 2009), что возможно связано со свойствами данного метаболита противостоять некоторым болезням и вредителям в условиях такого воздействия (Пентегова и др., 1987; Чернодубов, Дерюжкин, 1990; Тараканов и др., 2004).

На участке с выраженным техногенным воздействием наблюдается увеличение вклада монотерпенов в составе эфирного масла. Предположительно, причиной этого является то, что монотерпены представляют основное средство защиты у хвойных растений. Результаты нашей работы согласуются с исследованиями И.И. Бардышева и др. (1978); А.С. Рожкова, Г.И. Массель (1982); О.В. Сотниковой и Р.А. Степень (2001).

При переходе от чистого фонового участка к загрязненному в эфирном масле хвои сосны возрастает доля кислородсодержащих соединений. Фракция сесквитерпенов в образцах, взятых на загрязненной территории, сократилась с 14,83% до 11,87%. Возможно, такие изменения связаны с химическими превращениями внутри растительного организма под воздействием загрязняющих веществ и особенностями биосинтеза.

Некоторые ученые связывают изменение в биосинтезе компонентов эфирного масла и перераспределении его отдельных компонентов с воздействием на растительный организм тяжелых металлов (Владыкина, Ламоткин, 2011).

### **4.3. Изменение морфометрических параметров *Pinus sylvestris* L. Минусинского ленточного бора**

Стабильное функционирование и развитие лесных экосистем связано с комплексом взаимосвязанных факторов, немаловажное место среди которых занимает загрязнение среды. Повышенные концентрации загрязнителей в атмосфере, педосфере и продолжительность воздействия поллютантов оказывают непосредственное влияние на состояние лесных экосистем. Многочисленные проведенные исследования (Мартынюк, 2004; Михайлова и др., 2006; Зотикова и др., 2007; Хмелевская, 2008; Татаринцев, Скрипальщикова, 2009; Колясникова, Садакова, 2013; Чжан и др., 2013) показывают, что длительное, усиливающееся воздействие химических веществ, относящихся к загрязняющим (вредным) веществам, оказывает, в конечном счете, угнетающее воздействие на древостой лесных экосистем, что приводит к снижению продуктивности и даже к их гибели.

Ответная реакция растительных организмов начинается с изменения интенсивности протекающих физиологических процессов. В результате воздействия аэротехногенного загрязнения на *Pinus sylvestris* L. нами установлено снижение интенсивности фотосинтеза и увеличение водного дефицита хвои при приближении к источникам воздействия. Превращения, происходящие внутри растительного организма под воздействием антропогенных факторов, через какое-то время приводят к видимым изменениям.

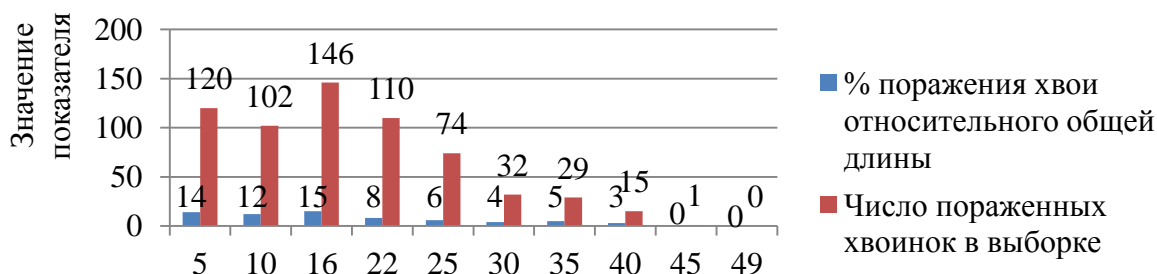
Одним из наиболее важных параметров для оценки нарушений у хвойных фитоценозов в условиях аэротехногенного воздействия является состояние ассимиляционного аппарата, который влияет на поглощение солнечной радиации, температурный режим, а главное, определяет продуктивность насаждений, степень их устойчивости к воздействию неблагоприятных факторов (Ярмишко, Лянгузова, 2013). Используя информативные морфометрические показатели хвои сосны, возможно

охарактеризовать текущее состояние древостоя, а также сделать вывод об устойчивости лесной экосистемы в условиях антропогенного воздействия.

Исследование морфометрических характеристик хвои начали с оценки степени повреждения и изменения ее окраски. Хвоя модельных деревьев на фоновом участке и участке на станции Жерлык темно-зеленая, без видимых признаков повреждений. На остальных пробных площадях встречается хвоя с желтовато-зеленым оттенком в поврежденных частях. На пробных участках вблизи города выявлена хвоя с некротическими повреждениями – побурениями преимущественно апикальной части и продольное скручивание хвои. Реже встречается побурение всей поверхности хвои. Переход от коричнево-бурой окраски хвои к зеленой части выражен четко. На пробных площадях с номерами 2 и 3 наблюдается усыхание кончика хвои, длиной около 2 мм. Данные поражения могут возникнуть, в том числе, вследствие избыточной концентрации цинка в хвое, составляющей свыше 62 мг/кг сухой массы (Messenger, Stelford, 1997), полученной нами в ходе лабораторных исследований (см. табл. 8).

Появление хлоротических и некротических поражений связано с воздействием поллютантов на хлоропласты, ведущим к снижению содержания хлорофилла в хвое (Мартынюк, 2004).

Поражение хвои второго года жизни в большей степени наблюдается на первых четырех участках. С удалением от источников воздействия количество хвои с побурениями и некрозами уменьшается (рисунок 12).



Расстояние от источников выброса загрязняющих веществ, км

Рисунок 12 – Изменение процента (%) поражения хвои и числа пораженных хвоинок в зависимости от расстояния от источников выброса

Наибольшая степень повреждения хвои выявлена на пробной площади № 3, где из 500 исследованных хвоинок 146 оказались пораженными в той или иной степени, а общая длина поражений хвои составила более 32 см (при общей длине 500 хвоинок – 214,25 см). 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  $r = -0,92$ .

Вариабельными информативными морфометрическими показателями хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения являются показатели длины, площади и абсолютно сухой массы хвои (Вишнякова и др., 2008; Колясникова и др., 2011).

Результаты исследования морфологических изменений хвои сосны на всем протяжении Минусинского ленточного бора представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Морфологические параметры хвои *Pinus sylvestris* L. второго года жизни

№ п/п	Характеристика пробной площади	Продолжительность жизни хвои (лет), max–min/средняя	Средняя длина хвои, мм	Средняя площадь хвои, мм <sup>2</sup>	Масса 500 хвоинок, г
1	5 км от г. Минусинска, за кафе «Полянка»	5–2/3,6±0,27	53,3±0,14	198,7±1,67	15,78±0,003
2	в 10 км от г. Минусинска	4–2/2,6±0,27	44,82±0,13	122,34±1,77	12,25±0,003
3	ст. Крупская – в 16 км от г. Минусинска	4–1,5/2,5±0,3	42,85±0,09	108,54±1,09	11,72±0,003
4	ст. Коньгино – в 22 км от г. Минусинска	4–2/2,6±0,27	47,44±0,11	154,31±1,93	13,87±0,003
5	до оз. Большой Кызыкуль – в 25 км от г. Минусинска	4–2/2,7±0,26	47,87±0,13	155,14±1,56	13,89±0,003
6	после оз. Большой Кызыкуль – в 30 км от г. Минусинска	4–2/2,9±0,28	49,08±0,12	165,78±1.25	13,97±0,006
7	оз. Малый	4-2/2,9±0,28	54,32±0,13	186,57±1.83	14,23±0,003

	Кызыкуль–в 35 км от г. Минусинска				
8	40 км от г. Минусинска	$4-2/3,1\pm 0,23$	$55,12\pm 0,14$	$196,7\pm 1,67$	$15,82\pm 0,003$
9	ст. Жерлык – в 45 км от г. Минусинска	$4-2/3,2\pm 0,2$	$55,18\pm 0,09$	$197,84\pm 1,49$	$15,83\pm 0,003$
Фон	в 49 км от г. Минусинска	$5-2/3,7\pm 0,3$	$57,98\pm 0,08$	$211,63\pm 1,78$	$16,36\pm 0,003$

Максимальная продолжительность жизни хвои на всех участках, включая фоновый, не превышает 5 лет. Согласно исследованиям, проведенным в Сибири, продолжительность жизни хвои *Pinus sylvestris* L. может достигать 6-8 лет (Морозова, 2003; Залесов, Бачурина, 2008). Наибольшая средняя продолжительность жизни хвои выявлена на фоновом участке, наименьшая – на участке на станции Крупская. Средняя продолжительность жизни хвои на участке № 1 незначительно отличается от фоновой, что может быть обусловлено концентрациями биогенных элементов – меди, молибдена и марганца в хвое на данной пробной площади, близкими к фоновой (см. таблица 8). Стоит отметить встречаемость на пробной площади № 1 образцов хвои со значениями длины, достигающей 60-65 мм, при том, что наибольшие значения длины хвои на фоновой пробной площади достигают 60 мм, но следует учитывать частоту встречаемости данных значений, на пробной площади № 1 длина 63 и 65 мм выявлена у двух образцов, длина от 60 до 62 мм – у 24 хвоинок. Значения длины хвои на фоновой пробной площади, достигающие 60 мм, встречаются у 39 образцов, длина от 59 до 60 мм – наиболее встречаемая, наблюдается у 132 образцов. На пробной площади № 1 значения длины от 59 до 60 мм наблюдаются у 19 образцов хвои. Наибольшую частоту встречаемости на пробной площади № 1 имеет длина хвои 52-53 мм – 153 образца.

Как видно из таблицы 4, наибольшие средние значения длины и площади хвои наблюдаются на фоновом участке, а самые низкие средние значения исследованных морфологических параметров выявлены на пробной площади № 3, расположенной вблизи станции Крупская в 16 км от

ближайших источников выброса загрязняющих веществ. Разница значений морфологических параметров между фоновым и указанным участком составляет: по длине хвои – 26 %, по площади хвои – 48,7 %.

Уменьшение длины и площади хвои может являться ответной реакцией растительного организма на неблагоприятное воздействие внешней среды (Прожерина, 2001), что способно привести к снижению аккумулирующей способности фитоценоза (Сибиркина, 2014).

Влияние удаленности от источников негативного воздействия на морфологические параметры хвои, в том числе на длину и площадь, представляет собой отражение закона нормального распределения, так первая точка отбора проб, расположенная вблизи источников, попадая в восходящую линию влияния фактора, по своей сути, не многим отличается от территории не подверженной загрязнению, при дальнейшем удалении, происходит нарастание воздействия до порогового уровня, следом за которым воздействие фактора уменьшается. В связи с вышесказанным, корреляционный анализ зависимостей морфологических параметров хвои от расстояния до источников негативного воздействия проведен нами без учета результатов, полученных с пробной площади № 1. Наибольшие связи установлены между:

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

Таким образом, установлено достоверное улучшение морфологических показателей хвои *Pinus sylvestris* L. с удалением от источников выброса вредных веществ.

Анализ зависимостей результативных и факторных переменных показал, что они более приближены к линейным, поэтому уравнения регрессии представлены прямыми. Сопоставление степеней аппроксимации

показало, что учет параметров хвои вблизи города значительно снижает значения величины достоверности аппроксимации ( $R^2$ ), а так как использование полиномов степеней  $> 2$  мало соответствует реальным закономерностям, было принято решение не учитывать в анализе данных морфологические значения на пробной площади № 1. В результате проведенного регрессионного анализа получены следующие уравнения регрессии (таблица 5).

Таблица 5 – 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	$y = 0,4341x + 37,011$ ( $R^2 = 0,9467$ )
Площадь хвои	$y = 2,5644x + 89,036$ ( $R^2 = 0,9425$ )
Масса хвои	$y = 0,1144x + 10,758$ ( $R^2 = 0,9069$ )
Средний возраст хвои	$y = 0,0263x + 2,1168$ ( $R^2 = 0,839$ )

В качестве информативного показателя зачастую используют показатель густоты охвоенности побегов. Загрязнение окружающей среды неблагоприятно сказывается на длине побегов сосны, вызывая торможение их роста (Колясникова, Садакова, 2013; Овечкина, Шаяхметова, 2013), которое в свою очередь приводит к увеличению плотности хвои (Калманова, 2005; Закамская, 2014).

Результаты средних значений прироста осевых побегов *Pinus sylvestris* L. последних четырех лет жизни и среднего числа хвоинок на 10 см длины данных побегов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты средних значений прироста осевых побегов *Pinus sylvestris* L. последних четырех лет жизни и числа хвоинок на 10 см длины

№ п/п	Характеристика пробной площади	Возраст побега	Средняя длина осевого побега, см	Среднее число хвоинок на 10 см осевого побега, шт.
1	5 км от г.	1	9,3±0,07	82,3±0,65



	Минусинска, за кафе «Полянка»	2	12,8±0,11	76,2±0,48
		3	13,7±0,1	74,2±0,41
		4	14,7±0,1	38,2±0,42
2	в 10 км от г. Минусинска	1	5,3±0,07	88,2±0,48
		2	10,5±0,12	74,2±0,46
		3	10,1±0,05	42,1±0,46
		4	13,5±0,1	6,8±0,44
3	ст. Крупская – в 16 км от г. Минусинска	1	7,9±0,1	89,9±0,55
		2	12,3±0,06	79,8±0,62
		3	12,5±0,05	21,6±0,63
		4	12,1±0,06	2,8±0,37
4	ст. Коньгино – в 22 км от г. Минусинска	1	7,5±0,06	85,4±0,61
		2	11,7±0,09	71,6±0,63
		3	13,2±0,06	26,8±0,52
		4	11,2±0,08	3,8±0,42
5	до оз. Большой Кызыкуль – в 25 км от г. Минусинска	1	8,4±0,07	84,6±0,77
		2	11,8±0,07	72,6±0,72
		3	12,1±0,09	38,4±0,71
		4	11,9±0,13	8,8±0,58
6	после оз. Большой Кызыкуль – в 30 км от г. Минусинска	1	8,9±0,08	83,2±0,91
		2	12,4±0,1	71,8±0,54
		3	12,2±0,09	40,8±0,46
		4	12,5±0,1	18,8±0,68
7	оз. Малый Кызыкуль – в 35 км от г. Минусинска	1	8,9±0,1	83,6±0,83
		2	12,5±0,1	73,1±0,51
		3	12,9±0,11	42,3±1,05
		4	13,5±0,13	20,1±0,71
8	40 км от г. Минусинска	1	9,5±0,11	85,5±0,76
		2	13,1±0,09	72,8±0,95
		3	13,2±0,08	42,4±0,82
		4	13,6±0,11	20,6±0,6
9	ст. Жерлык – в 45 км от г. Минусинска	1	10,6±0,12	84,6±0,7
		2	13,7±0,09	73,4±1,17
		3	14,2±0,06	43,7±0,63
		4	13,9±0,05	29,5±0,67
Фон	в 49 км от г. Минусинска	1	11,3±0,1	80,1±0,41
		2	14,1±0,05	78,6±0,55
		3	14,7±0,08	44,7±0,41
		4	14,9±0,05	32,2±0,58

Проведенный статистический анализ показал следующее. С удалением от источников выброса загрязняющих веществ изменяются средние длины осевых побегов, установлено, что с увеличением расстояния достоверно возрастают средние длины осевых побегов первого года жизни ( $r = 0,73$ ,  $p = 98\%$ ) и второго года жизни ( $r = 0,72$ ,  $p = 98\%$ ). Связь между длиной осевых побегов третьего года жизни и удаленностью от источников негативного

воздействия не является достоверной. Отсутствие взаимосвязи между длиной осевых побегов четвертого года жизни и расстоянием, может быть следствием механизма адаптации древостоя к неблагоприятному воздействию.

У модельных деревьев пробных площадок №№ 2-5 на осевых побегах четвертого года жизни хвоя практически отсутствует (рисунок 14), с удалением от источников воздействия на побегах этого года жизни остается 2-5 хвоинок на 1 см длины осевого побега, т.е. с удалением от источников негативного воздействия количество хвои старшего возраста достоверно возрастает ( $r = 0,94$ ,  $p = 0,99$ ).



Рисунок 14 – Осевой побег с пробной площадки № 3 (хвоя старших возрастов отсутствует)

Результаты наших исследований показали, что 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 городу. В результате ухудшения роста побегов пучки хвоинок первого года жизни более сближены и на 10 см побега количество хвои на загрязненных участках превышает количество хвои фоновой зоны (рисунок 15).

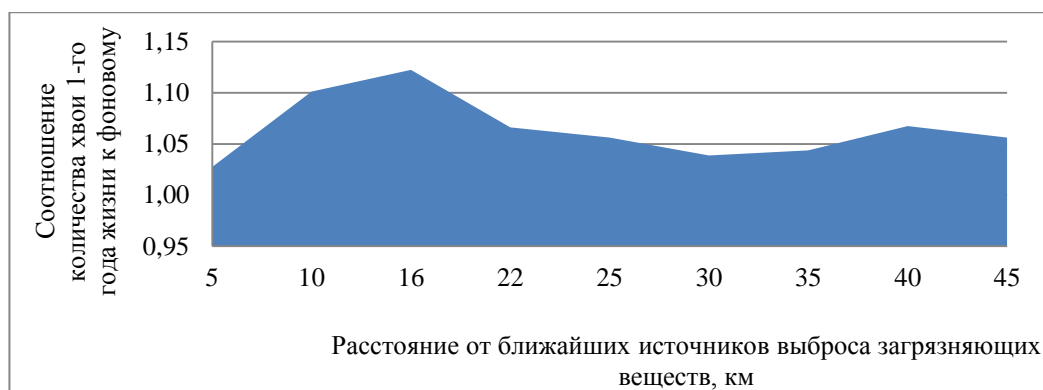


Рисунок 15 – Соотношение количества хвои первого года жизни на десяти см длины осевого побега исследуемых участков к фоновому

Как видно из графика, наибольшая сближенность хвои первого года жизни наблюдается на пробных площадях, расположенных на расстоянии 10 и 16 км от источников выброса.

Сближенность хвои негативно отражается на продолжительности ее жизни, приводит к появлению некрозов, хлорозов и, в конечном итоге, к усыханию хвои (Калманова, 2005).

Проведенный корреляционный анализ показал, что с уровнем вероятности 95% наблюдается прямая связь между увеличением плотности хвои с приближением к источникам негативного воздействия и количеством пораженной хвои ( $r = 0,63$ ).

Наиболее угнетенную хвою, расположенную на пробной площади № 3, сравнили с фоновой хвоей, изучив образцы под микроскопом НІТАСНІ ТМ-1000 при увеличении  $\times 1000$  (рисунок 16).

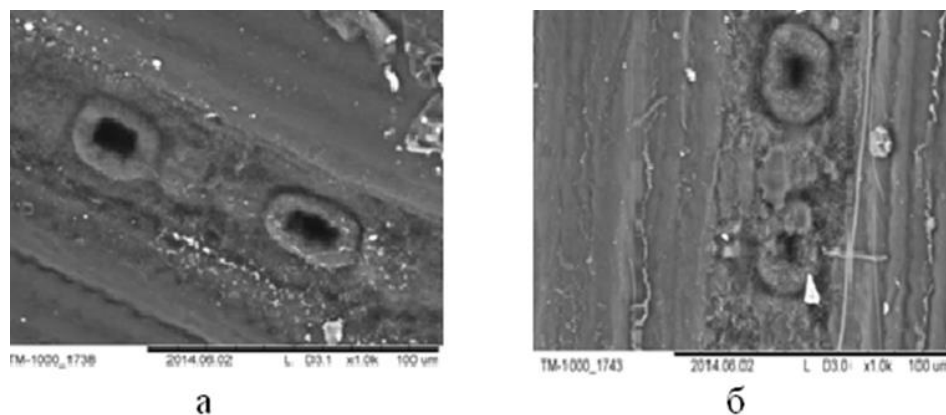


Рисунок 16 – Образцы хвои при  $\times 1000$  увеличении: с фонового участка (а), с участка на расстоянии 16 км от ближайших источников выброса (б).

Как видно из рисунка, устьица фоновой хвои чистые, хвоя с участка на расстоянии 16 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ покрыта налетом, устьица забиты (Григоренко, 2015).

#### 4.4 Взаимосвязь между физиологическими и морфологическими параметрами хвои *Pinus sylvestris* L.

Для установления взаимосвязи между состоянием хвойного фитоценоза и степенью техногенного загрязнения был проведен статистический анализ по выявлению закономерностей между физиологическими и морфологическими параметрами хвои (таблица 7).

Таблица 7 – Коэффициенты корреляции между физиологическими и морфологическими параметрами хвои

Физиологический параметр / Морфологический параметр	Интенсивность фотосинтеза хвои	Интенсивность дыхания	Водный дефицит
Длина хвои	0,68	0,49	-0,65
Площадь хвои	0,66	0,5	-0,64
Масса 500 хвоинок	0,7	0,54	-0,64
Процент поражения хвои относительно общей длины	-0,71	-0,47	0,82

В результате наших исследований установлено, что изменение интенсивности фотосинтеза оказывает прямое влияние на процесс накопления в хвое органических веществ, что отражается на длине, площади и массе хвои, об этом свидетельствуют коэффициенты корреляции с 95%-ной вероятностью прогноза – 0,68, 0,66 и 0,7 соответственно.

На интенсивность процесса фотосинтеза оказывают обратное влияние некротические поражения хвои, омертвление участков хвои и частичное усыхание, т.е. сокращение площади фотосинтезирующей поверхности хвои ( $r = -0,71$ ,  $p = 0,95$ ).

На морфологические параметры хвои оказывает значительное отрицательное влияние и величина водного дефицита. Установлена достоверная обратная связь между значениями водного дефицита, длиной, площадью и массой хвои ( $r = -0,65$ ,  $p = 0,954$   $r = -0,64$ ,  $p = 0,95$ ). Связь между водным дефицитом и процентом поражения хвои прямая ( $r = 0,82$ ,  $p = 0,99$ ).

Сопоставление степеней аппроксимации, получаемых при применении различных математических функций для построения линии тренда, показало, что значения  $R^2$ , приближающиеся к 1, характерны для полиномиальных функций с большими степенями, которые не отражают реальных закономерностей. Для описания зависимостей между физиологическими и морфологическими параметрами наиболее приемлемой оказалась полиномиальная функция с  $n=2$ . В результате проведенного регрессионного анализа получены следующие уравнения регрессии:

$y = 1,7111x^2 - 14,537x + 76,255$  ( $R^2 = 0,5166$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между интенсивностью фотосинтеза хвои и длиной хвои;

$y = 6,1264x^2 - 37,589x + 175,86$  ( $R^2 = 0,4534$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между интенсивностью фотосинтеза хвои и площадью хвои;

$y = 0,4156x^2 - 3,1637x + 18,395$  ( $R^2 = 0,5255$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между интенсивностью фотосинтеза хвои и массой хвои;

$y = 0,0119x^2 - 0,2754x + 6,8755$  ( $R^2 = 0,6377$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между процентом поражения хвои относительно общей длины и интенсивностью фотосинтеза хвои;

$y = 0,2176x^2 - 5,1009x + 75,461$  ( $R^2 = 0,5263$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между водным дефицитом хвои и длиной хвои;

$y = 0,9819x^2 - 25,83x + 302,16$  ( $R^2 = 0,4542$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между водным дефицитом хвои и площадью хвои;

$y = 0,0546x^2 - 1,3525x + 21,105$  ( $R^2 = 0,4813$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между водным дефицитом хвои и массой хвои;

$y = -0,311x^2 + 7,1911x - 27,809$  ( $R^2 = 0,8483$ ) – уравнение регрессии, описывающее закономерность между водным дефицитом хвои и % поражения хвои относительно общей длины.

#### 4.5 Заключение к главе 4

С приближением к стационарным источникам выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух у хвои *Pinus sylvestris* L. второго года жизни наблюдается усиление водного дефицита ( $r = -0,87$ ) и снижение интенсивности фотосинтеза хвои ( $r = 0,81$ ). Достоверной связи между изменением расстояния от источников загрязнения и интенсивностью дыхания хвои не установлено. Наибольшее усиление водного дефицита и наибольшее снижение интенсивности фотосинтеза хвои выявлено на расстоянии до 16 км от ближайших стационарных источников выброса вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

В хвое с наиболее угнетенными физиологическими параметрами содержание эфирного масла на 38,7% превышает содержание масла хвои условно чистого района. Увеличение техногенной нагрузки не приводит к изменению компонентного состава исследованных эфирных масел хвои *Pinus sylvestris* L., изменяется только их количественный вклад, в частности, возрастает содержание монотерпенов, содержание сесквитерпенов, напротив, снижается.

Угнетение физиологических процессов ассимиляционного аппарата *Pinus sylvestris* L. второго года жизни, 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.

С удалением от стационарных источников выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух происходит достоверное улучшение морфологических показателей ассимиляционного аппарата и осевых побегов *Pinus sylvestris* L. – значения длины, площади, массы хвои второго года жизни, средний возраст хвои, количество хвои старшего возраста, а также длины осевых побегов первого и второго лет жизни возрастают.

## Глава 5 СОДЕРЖАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ФТОРА В РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТАХ МИНУСИНСКОГО ЛЕНТОЧНОГО БОРА

### 5.1 Содержание некоторых тяжелых металлов и фтора в хвое *Pinus sylvestris L.*

Из параметров лесной экосистемы наиболее значимыми являются параметры древостоя, так как именно древостой принимает на себя основную нагрузку, определяя всю последующую циркуляцию элементов экосистемы (Воробейчик, 1994).

Основная лесообразующая порода Минусинского бора – сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris L.*) характеризуется определенным адаптационным комплексом к постоянно меняющимся условиям окружающей среды.

Как уже неоднократно отмечалось, функционирование Минусинского ленточного бора определяется относительно неблагоприятными природными условиями и продолжительным интенсивным воздушным промышленным загрязнением. В таких условиях в первую очередь реагирует ассимиляционный аппарат – хвоя *Pinus sylvestris L.* В ней раньше всего проявляются изменения, вызванные промышленными эмиссиями (Михайлова, 1997; Фуксман и др., 1997).

Результаты лабораторных исследований по анализу содержания химических элементов в хвое представлены в таблице 8.



Таблица 8 – Содержание химических элементов в хвое *Pinus silvestris* L. второго года жизни Минусинского бора

№ п/п	Содержание химического элемента, мг/кг сухой массы										
	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F
1	49,42± 0,98	2,99± 0,08	69,4± 0,76	55,7± 1,02	0,348± 0,01	1,56± 0,07	0,037± 0,008	0,69± 0,05	0,98± 0,09	0,85± 0,01	5,27± 0,7
2	50,53± 1,02	2,83± 0,04	67,8± 0,9	62,47± 1,11	0,138± 0,07	1,67± 0,09	0,037± 0,006	0,98± 0,04	0,79± 0,03	0,94± 0,03	2,52± 0,37
3	74,29± 0,99	2,51± 0,04	44,89± 0,67	70,08± 0,98	0,253± 0,09	1,79± 0,1	0,076± 0,004	1,10± 0,09	0,76± 0,08	0,89± 0,01	2,85± 0,27
4	67,42± 0,87	2,21± 0,05	44,99± 0,69	53,51± 0,76	0,075± 0,009	1,73± 0,06	0,031± 0,004	0,97± 0,08	0,84± 0,07	0,91± 0,02	2,22± 0,28
5	54,55± 0,92	2,32± 0,04	53,50± 0,76	52,19± 0,88	0,074± 0,011	1,69± 0,08	0,03± 0,003	0,96± 0,09	0,85± 0,07	0,92± 0,03	2,21± 0,41
6	53,32± 0,74	2,45± 0,09	63,2± 0,75	53,24± 1,06	0,063± 0,007	1,65± 0,08	0,029± 0,004	0,74± 0,05	0,87± 0,06	0,87± 0,03	2,19± 0,19
7	55,54± 0,86	2,56± 0,25	64,77± 0,79	51,07± 1,18	0,061± 0,004	1,65± 0,09	0,027± 0,001	0,86± 0,04	0,97± 0,11	0,88± 0,05	2,26± 0,14
8	49,87± 0,76	2,56± 0,05	66,99± 0,81	50,09± 1,16	0,056± 0,007	1,54± 0,07	0,027± 0,002	0,64± 0,02	0,96± 0,09	0,91± 0,04	2,07± 0,27
9	47,07± 0,85	2,59± 0,05	77,8± 0,92	47,48± 0,97	0,032± 0,003	1,53± 0,09	0,025± 0,004	0,56± 0,01	0,98± 0,04	0,87± 0,02	2,01± 0,21
Фон	41,34± 0,74	2,61± 0,06	79,7± 0,93	41,12± 0,85	0,017± 0,001	1,42± 0,07	0,023± 0,001	0,47± 0,02	1,01± 0,01	0,89± 0,03	2,01± 0,13
Среднее содержание	54,34± 3,07	2,56± 0,07	63,30± 3,83	53,7± 2,51	0,11± 0,03	1,62± 0,03	0,034± 0,005	0,8±0,07	0,9±0,03	0,89± 0,009	2,56± 0,31

Для нормального роста и развития растения необходимо достаточное содержание микроэлементов. Сравнение концентрации микроэлементов в исследуемой хвое с нормальной (достаточной) для роста и развития организма концентрацией микроэлементов приведено в таблице 9.

Таблица 9 – Сравнение содержания микроэлементов в исследуемой хвое с нормальным содержанием

Химический элемент	Среднее содержание элемента в исследуемой хвое <i>Pinus sylvestris</i> L., мг/кг сухой массы	Максимальное содержание элемента в исследуемой хвое <i>Pinus sylvestris</i> L., мг/кг сухой массы	Минимальное содержание элемента в исследуемой хвое <i>Pinus sylvestris</i> L., мг/кг сухой массы	Достаточная или нормальная концентрация химического элемента в растении, мг/кг сухой массы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989)
Fe	54,34	74,29± 0,99	41,34± 0,74	50-60
Cu	2,56	2,99± 0,08	2,21± 0,05	2-20
Mn	63,30	79,7± 0,93	44,89± 0,67	20-300
Zn	53,7	70,08± 0,98	41,12± 0,85	27-100 (10-62*)
Mo	0,9	1,01± 0,01	0,76± 0,08	0,2-1
Co	0,89	0,94± 0,03	0,85± 0,01	0,02-1

\* по данным работы S. Messenger and M. W. Stelford (1997)

Как видно из таблиц 8 и 9, полученные концентрации железа на площадях №№ 3, 4 превышают достаточную (нормальную) концентрацию элемента по литературным данным, содержание железа на фоновой пробной площади и площадях № 8, 9 напротив, находится ниже достаточного диапазона. Повышенные концентрации элемента на пробных площадях вблизи населенных пунктов могут быть следствием поступления в лесную экосистему окислов железа, образующихся при сжигании топлива.

Анализ вышеприведенных таблиц показывает, что железо и марганец ведут себя противоположным образом: при увеличении содержания железа наблюдается снижение концентрации марганца. Между их содержанием в хвое выявлена отрицательная корреляция ( $r = -0,93$ ,  $p = 0,99$ ). Возможно, это связано с процессами антагонизма между микроэлементами. Так, железо способно вытеснять другие микроэлементы, заменяя их в процессе жизнедеятельности (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Между тем, все

растения отличаются потребностью в марганце, который необходим для нормального протекания окислительно-восстановительных реакций в организме. Среднее содержание марганца в хвое, несмотря на вытеснение железом на исследуемых пробных площадках, находится выше критического уровня, который составляет по литературным данным 15-20 мг/кг сухой массы. В лесных экосистемах, подверженных неблагоприятному техногенному воздействию, возможен дисбаланс питания, выражающийся в обеднении, вплоть до дефицита хвои Mn. В работе (Лукина, Никонов, 1996) сходятся во мнении, что марганец является наиболее дефицитным в условиях загрязнения воздуха для всех видов древесных растений. Наши результаты согласуются с данным исследованием, мы видим в среднем на всех пробных площадях 30% дефицит марганца в хвое по сравнению с фоновым участком.

Как следует из таблицы 8, содержание меди максимально на участке № 1, затем мы видим плавное снижение ее количества до минимального значения на участке № 4 (2,21 мг/кг), и постепенный рост до значения 2,61 мг/кг на фоновом участке. Содержание меди в отобранных пробах находится около минимума допустимых значений вследствие сниженной доступности элемента в песчаных и супесчаных почвах.

Наименьшее содержание цинка наблюдается на фоновом участке, наибольшее – на пробных площадях №№ 2, 3 здесь концентрация элемента находится за пределом диапазона допустимых значений по данным работы S. Messenger and M. W. Stelford (1997). Повышенные концентрации цинка в хвое могут привести к ее поражению, в том числе к появлению хлорозов и некрозов.

Содержание молибдена варьирует незначительно в пределах от 0,76 до 1,01 мг/кг сухой массы. Максимальная его концентрация наблюдается на фоновом участке, минимальная концентрация – на пробной площади № 3. Молибден относится к жизненно необходимым для растения микроэлементам, однако физиологическая потребность в нем относительно

невелика. Концентрации молибдена в растениях в количестве 1 мг/кг сухой массы характерны для незагрязненных территорий.

Содержание кобальта варьирует в пределах 0,85-0,94 мг/кг и не зависит от расстояния до источников загрязнения. Сведений о влиянии техногенного загрязнения на накопление кобальта в растениях немного, хотя этот металл поступает в атмосферу при сжигании угля и мазута. Содержание кобальта в хвое находится в пределах допустимого диапазона по данным работы А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас (1989).

Содержание элементов никель и ванадий в наибольших концентрациях наблюдается на пробной площади на ст. Крупская (№ 3) и в наименьших концентрациях – на фоновом участке. Для разных растений приводятся различные токсичные уровни содержания никеля. Содержание никеля во всех отобранных пробах значительно, концентрация элемента на пробной площади № 3 превышает нормальные значения, составляющие 0,1-1 мг/кг сухой массы по данным работы Melsted (1973), в 1,79 раз.

Исследователи до настоящего времени не пришли к единому мнению о необходимости ванадия для роста и развития растений. Есть исследования, в которых отмечено фитотоксическое действие (хлороз, ослабление темпов роста) у некоторых растений при содержании V в тканях около 2 мг/кг сухой массы (Davies, Vloham, 1979).

Кадмий является токсичным для растений, наибольшая его концентрация обнаружена на пробной площади № 3 –  $0,076 \pm 0,004$  мг/кг, что превышает фоновое значение в 3,3 раза. Концентрация кадмия в растениях в районах вблизи ТЭЦ, работающих на угле, может достигать значения 1,1 мг/кг сухой массы (Quincke, 1979). Относительно невысокий уровень загрязнения хвои кадмием на исследуемых участках может свидетельствовать о том, что большая часть Cd, независимо от источника поступления, аккумулируется в тканях корней (Jones, 1972).

Наибольшее содержание свинца в хвое наблюдается на пробных площадях №№ 1, 3. Вероятно, высокие концентрации Pb в пробах связаны с

особенностью сосны к накоплению данного тяжелого металла (Гераськина, 2007). Способность растений поглощать Pb из почвы и воздуха, несмотря на его низкую биологическую доступность, имеет огромное значение для охраны окружающей среды.

Исследования содержания фтора в хвое показали, что наибольшая его концентрация наблюдается на участке № 1 – 5,27 мг/кг, возможно, это связано с расстоянием от основного источника поступления фтора в окружающую среду – АО «РУСАЛ Саяногорск», и розой ветров, среднее превышение концентрации фтора в хвое на исследуемых участках по отношению к фоновому участку составляет около 27%. Сосна относится к чувствительным видам по отношению к фтору. Концентрация фтора в хвое, равная 5,27 мг/кг, характерна для зоны сильного загрязнения лесных экосистем (Рунова и др., 2015).

В целях исследования интенсивности техногенного воздействия на содержание химических элементов в ассимиляционном аппарате сосны и вклада исследованных веществ в этот процесс нами рассчитаны коэффициенты концентрации ( $K_k$ ).  $K_k$  показывают отношение содержащихся в ассимиляционном аппарате сосны химических элементов на исследуемых участках к фоновому содержанию элемента в хвое, произрастающей на относительно незагрязненном участке.

Значения коэффициентов концентраций приведены на таблице 10.

Таблица 10 – Значения коэффициентов концентраций химических элементов в хвое *Pinus sylvestris* L.

№ п/п	$K_k$ химических элементов в хвое										
	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F
1	1,2	1,15	0,87	1,35	20,47	1,10	1,61	1,47	0,97	0,96	2,62
2	1,22	1,08	0,85	1,52	8,12	1,18	1,61	2,09	0,78	1,06	1,25
3	1,8	0,96	0,56	1,70	14,88	1,26	3,30	2,34	0,75	1,00	1,42
4	1,63	0,85	0,56	1,30	4,41	1,22	1,35	2,06	0,83	1,02	1,10
5	1,32	0,89	0,67	1,27	4,35	1,19	1,30	2,04	0,84	1,03	1,10
6	1,29	0,94	0,79	1,29	3,71	1,16	1,26	1,57	0,86	0,98	1,09
7	1,34	0,98	0,81	1,24	3,59	1,16	1,17	1,83	0,96	0,99	1,12
8	1,21	0,98	0,84	1,22	3,29	1,08	1,17	1,36	0,95	1,02	1,03
9	1,14	0,99	0,98	1,15	1,88	1,08	1,09	1,19	0,97	0,98	1,00

Ср.зн ач.	1,35± 0,07	0,98± 0,03	0,77± 0,05	1,34± 0,06	7,19± 2,11	1,16± 0,02	1,54 ± 0,22	1,77 ± 0,13	0,88 ± 0,03	1,00 ± 0,01	1,30± 0,16
--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	---------------

Загрязнение хвои элементом тем выше, чем больше  $K_k$  превышает единицу. Изучаемые химические вещества, в зависимости от коэффициентов концентраций, разделили на 3 группы, в первую вошел марганец с коэффициентами концентраций существенно ниже 1, что прослеживается на всех исследуемых площадях. Во вторую группу входят медь, молибден и кобальт, с  $K_k$  близким к 1. В третью группу объединены железо, цинк, никель, кадмий, ванадий, фтор и свинец, для которых на всех пробных площадках  $K_k > 1$ . Стоит отметить концентрацию свинца в пробе № 1, которая превышает фоновую концентрацию более чем в 20 раз. На пробной площади № 3 концентрация свинца превысила фоновое значение более чем в 14 раз. Как отмечалось ранее, возможно, это связано с особенностью сосны к накоплению элемента, а также близким расположением к населенным пунктам, первая пробная площадь расположена вблизи Минусинска, третья – недалеко от станции Крупская. Данные участки активно используются населением в рекреационных целях. В результате выезда населения в бор с выхлопными газами автотранспорта в воздух выбрасывается кадмий и свинец. Кроме того, источником поступления кадмия и свинца в лесные экосистемы может являться сжигание топлива и осаждение дымовых газов.

В ассимиляционном аппарате сосны в большей степени аккумулируются  $Pb > V > Cd > Fe > Zn > F > Ni > Co > Cu > Mo > Mn$  (рисунок 17).

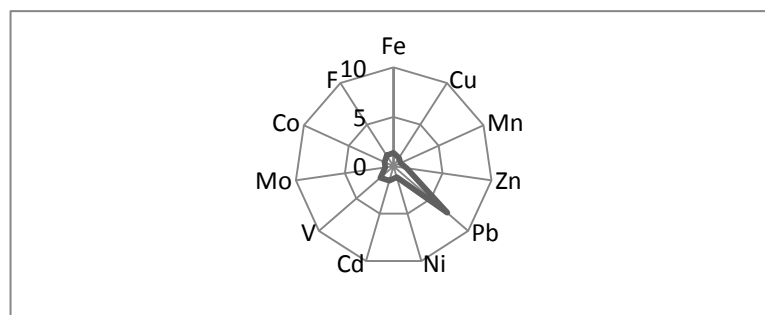


Рисунок 17 – Спектр загрязнения химическими элементами хвои Минусинского ленточного бора

Исследование накопления тяжелых металлов хвоей *Pinus sylvestris L.* Минусинского ленточного бора показало, что хвоя сосны в наибольшей степени аккумулирует Pb, V, Cd, Fe, Zn, F.

Оценка воздействия микроэлементов на растения очень сложна, потому что наряду с дефицитом или избытком элементов необходимо учитывать их взаимодействие. Нарушения баланса концентраций веществ, связанные со способностью элементов стимулировать или ингибировать действие друг друга, могут служить причиной химических стрессов у растений.

Рассчитанные соотношения концентраций пар элементов антагонистов в хвое *Pinus sylvestris L.* второго года жизни представлены в таблице 11. Нормы соотношения элементов получены из данных работы В.Н. Второвой, Л.Б. Холоповой (2009).

Таблица 11 – Соотношения концентраций элементов-антагонистов в хвое Минусинского бора и нормы соотношений

Соотношение	Хвоя 2-го года жизни	Норма соотношения
Cd:Zn	0,001	0,001
Cu:Mo	2,8	25-30
Fe:Mn	0,86	0,1-0,3
Fe:Zn	1,01	0,9-1,1

Значения соотношений Cd:Zn и Fe:Zn находятся в пределах нормы. Соотношение Cu:Mo ниже нормы, вероятно, за счет низкой концентрации меди в хвое. Причинами отклонения от нормы соотношения пары Cu:Mo могут являться тип азотного питания или почвенные факторы, увеличивающие доступность Mo для растений, и, оказывающие ингибирующее воздействие на поглощение меди растениями (Gadde, Laitinen, 1974). Незначительное превышение наблюдается в соотношении Fe:Mn, за счет увеличения концентрации Fe и снижения содержания Mn в хвое.

Для обобщенной оценки интенсивности техногенной нагрузки на древостой Минусинского ленточного бора нами был рассчитан показатель суммарного загрязнения хвои по формуле Саета, представляющий собой

сумму превышений коэффициентов концентраций химических элементов, по формуле:

$$Z_c = \sum K_k - (n - 1), \quad (5)$$

где  $n$  – число анализируемых элементов загрязнителей;

$K_k - > 1$ .

Существуют различные мнения о том, какие коэффициенты концентрации учитывать при расчете показателя  $Z_c$ . Сейчас при расчете суммарного показателя  $Z_c$  нет единообразия в учете химических элементов с разными коэффициентами  $K_k$ . Некоторые авторы считают, что ошибочно учитывать обедненные по сравнению с фоном концентрации, т.е. с  $K_k < 1$  (Выборов и др., 2004).

Различное мнение складывается и относительно границ критерия  $K_k$ .  $K_k > 1,5$  используется для расчета показателя  $Z_c$  в работе (Кашулина и др., 2007);  $K_k > 2$  – в работе (Большаков и др., 1999).

В нашей работе показатель  $Z_c$  рассчитан на основе коэффициентов концентраций превышающих 1.

Значение показателя суммарного загрязнения для каждой пробной площади и среднее значение представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Значения показателей суммарного загрязнения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Среднее
Расстояние от г. Минусинска, км	5	10	16	22	25	30	35	40	45	-
Значение $Z_c$	20,94	8,13	17,26	3,09	2,6	0,37	0,45	0,38	0	5,65

Наибольшие показатели суммарного загрязнения выявлены на пробных площадях №№ 1 и 3 вблизи населенных пунктов – Минусинск и ст. Крупская.

На основе полученных данных о содержании загрязняющих веществ в хвое, составлена карта-схема, отражающая уровень загрязнения хвои на всем протяжении Минусинского ленточного бора (приложение 3).



## 5.2 Содержание некоторых тяжелых металлов и фтора в почвах

В последние десятилетия ученые отмечают серьезные нарушения функционирования хвойных лесов, подверженных неблагоприятному воздействию промышленных выбросов. Многие исследователи причиной этого видят в нарушении естественных биогеохимических циклов элементов, в том числе, дисбаланса элементов питания, увеличения кислотности почв и повышения доступности тяжелых металлов (Mitchell, Lindberg, 1992; Копцик, 2012 и другие).

Почвенный компонент обеспечивает непрерывное функционирование лесных экосистем благодаря наличию в нем влаги, необходимых питательных элементов, непрерывному круговороту веществ. Почвы способны поглощать значительную долю поллютантов, содержащихся в загрязненном атмосферном воздухе, изменяя при этом свой состав и свойства.

Проведенные исследования показывают, что у почв в зоне влияния промышленных предприятий ухудшена структура, нарушен водный режим и увеличена плотность, а угнетение растений вследствие воздействия загрязнителей, способствует усилению эрозии и дефляции (Лебедева, 1993; Колесников и др., 2002; Васильев, Чащин, 2011).

Поступая в почву тяжелые металлы трансформируются, происходит их радиальное и латеральное перераспределение.

Содержание тяжелых металлов в почве зависит от их взаимодействия с гуминовыми кислотами, которые обладая высокой сорбционной емкостью, выступают в качестве мощного геохимического барьера. Интенсивность миграции веществ зависит от гранулометрического состава почв и содержания гумуса. Концентрации загрязняющих веществ в почвах, в том числе тяжелых металлов определяются, главным образом, характером почвогрунтов и морфологическими особенностями территории, влияющих на

процессы латеральной и радиальной миграции и аккумуляции (Савченко, 1998).

Согласно ГОСТ 17.4.1.02-83 к наиболее опасным веществам в почве отнесены: мышьяк, кадмий, ртуть, свинец, цинк, фтор, кобальт, никель, молибден, медь, ванадий, марганец и другие.

До настоящего времени не разработаны единые унифицированные показатели токсичности поллютантов, включая тяжелые металлы, определяющие предельно допустимые концентрации, превышение которых приводит к повреждению растительных организмов. В российском законодательстве нормирование содержания загрязняющих веществ в почве осуществляется с помощью санитарно-гигиенических нормативов – предельно допустимых и ориентировочно допустимых концентраций. На сегодняшний день нормативы предельно допустимых концентраций утверждены не для всех тяжелых металлов. Кроме того, проведенные исследования во ВНИИЛМ по нормированию содержания тяжелых металлов в лесных почвах показали, что для саженцев сосны и ели с учетом параметров роста и состояния растений (прирост побегов, размеры хвои, изменение биомассы, физиологические показатели) ПДК по меди выше санитарно-гигиенических нормативов в 26 раз, по цинку – в 4 раза, по свинцу – в 3 раза (Мартынюк, 2004).

Гигиеническими нормативами ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве» установлено валовое предельно допустимое содержание в почвах с учетом фона (кларка): ванадия – 150,0 мг/кг; марганца – 1500 мг/кг; свинца – 32 мг/кг; ртути – 2,1 мг/кг.

Гигиеническими нормативами ГН 2.1.7.2042-06 «Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве» утверждено валовое ориентировочно допустимое содержание в песчаных и супесчаных почвах с учетом фона (кларка): кадмия – 0,5 мг/кг; меди – 2 мг/кг; никеля – 20 мг/кг; цинка – 55 мг/кг; мышьяка – 2 мг/кг.

Таким образом, не установлено санитарно-гигиенических нормативов для элементов: железо, молибден, кобальт, фтор.

Как показывают исследования, загрязняющие вещества в наибольшей степени аккумулируются в лесной подстилке и верхнем горизонте почвы, в гумусово-элювиальном и элювиальном горизонтах почвы количество загрязняющих веществ снижается в результате процессов выноса органических и минеральных веществ (Чжан, 2014).

Исследование содержания тяжелых металлов в гумусово-аккумулятивном горизонте почвы проводилось по стандартным методикам. Результаты количественных определений представлены ниже в таблице 13.

Таблица 13 – Содержание химических элементов в почвах Минусинского бора

№ п/п	Характеристика пробной площади	Содержание химического элемента, мг/кг												
		Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F	Hg	As
1	5 км от г. Минусинска, за кафе «Полянка»	493,87± 6,27	8,99± 0,68	408,4± 5,76	35,72± 0,91	6,98± 0,51	21,42± 0,82	0,257± 0,022	39,69± 1,05	2,98± 0,18	1,02± 0,07	4,71± 0,37	0,029± 0,013	3,4± 0,13
2	в 10 км от г. Минусинска	499,2± 7,86	9,57± 0,76	401,63± 4,9	36,09± 0,88	6,78± 0,59	22,78± 0,77	0,201± 0,035	39,98± 1,11	2,79± 0,23	1,01± 0,08	3,5± 0,39	0,031± 0,014	4,30± 0,17
3	ст. Крупская – в 16 км от г. Минусинска	503,61± 5,93	6,81± 0,90	404,23± 5,67	30,36± 0,97	6,90± 0,52	21,99± 0,73	0,171± 0,030	40,18± 1,13	2,81± 0,36	0,99± 0,06	1,69± 0,13	0,032± 0,015	3,42± 0,21
4	ст. Коньгино – в 22 км от г. Минусинска	556,12± 7,32	6,43± 0,83	404,99± 4,39	45,64± 1,07	6,00± 0,46	23,74± 0,76	0,148± 0,026	39,87± 1,08	2,84± 0,16	1,03± 0,07	1,07± 0,09	0,029± 0,013	3,81± 0,18
5	до оз. Большой Кызыкуль – в 25 км от г. Минусинска	563,9± 6,18	6,32± 0,84	411,5± 4,3	32,89± 1,08	5,79± 0,43	22,89± 0,78	0,139± 0,023	38,96± 1,07	2,79± 0,21	0,98± 0,05	1,01± 0,03	0,028± 0,011	3,53± 0,17
6	после оз. Большой Кызыкуль – в 30 км от г. Минусинска	520,11± 5,36	6,35± 0,9	415,23± 5,64	33,45± 1,03	5,64± 0,47	21,65± 0,76	0,136± 0,024	37,74± 0,95	2,87± 0,23	1,04± 0,08	1,01± 0,09	0,028± 0,01	3,38± 0,14
7	оз. Малый Кызыкуль–в 35 км от г. Минусинска	526,76± 5,5	6,26± 0,85	416,18± 5,29	31,37± 0,91	5,61± 0,44	21,97± 0,78	0,128± 0,031	37,36± 0,83	2,78± 0,19	1,02± 0,05	0,91± 0,04	0,029± 0,012	3,39± 0,13
8	40 км от г. Минусинска	490,37± 4,87	6,23± 0,81	418,09± 5,03	30,37± 0,97	5,59± 0,47	20,17± 0,75	0,117± 0,022	36,22± 0,72	2,76± 0,17	0,97± 0,04	0,9± 0,02	0,027± 0,009	3,32± 0,11
9	ст. Жерлык – в 45 км от г. Минусинска	497,57± 5,1	6,24± 0,71	418,92± 5,7	31,01± 0,97	5,52± 0,48	21,01± 0,73	0,120± 0,024	36,26± 0,81	2,74± 0,24	0,98± 0,07	0,88± 0,05	0,028± 0,009	3,34± 0,15
Фон	в 49 км от г. Минусинска	492,38± 5,74	6,19± 0,67	419,71± 5,6	30,12± 0,85	5,20± 0,39	19,49± 0,71	0,112± 0,021	36,02± 0,73	2,71± 0,21	0,99± 0,04	0,76± 0,06	0,024± 0,008	3,2± 0,13
Среднее значение (P=0,95)		514,39 ±8,49	6,94± 0,4	411,89 ±2,11	33,7± 1,49	6,00± 0,2	21,71± 0,4	0,15± 0,01	38,23± 0,54	2,81± 0,02	1,00± 0,01	1,64± 0,43	0,029± 0,001	3,51± 0,1

Железо, вследствие высокого содержания в земной коре и почве, не является микроэлементом, а по роли для функционирования растительных организмов занимает промежуточное положение между макро- и микроэлементами. Среднее содержание железа в почвах исследуемого бора сопоставимо с литературными данными для песчаных почв. В исследуемом районе техногенным источником поступления железа в компоненты биосферы является выброс при сжигании топлива в виде окислов железа.

В результате сжигания угля и нефтепродуктов в атмосферу ежегодно поступает около 2100 т соединений меди (Байдина, 1995). В результате лабораторных исследований установлено превышение ориентировочно-допустимых концентраций меди в почвах Минусинского бора в среднем в 3,47 раз.

Концентрация цинка в почве Минусинского бора не превышает ориентировочно-допустимых концентраций, но является значительной, так на пробной площади № 4 концентрация элемента составила 0,83ОДК. Антропогенным источником поступления элемента в окружающую среду является сжигание топлива. Баланс Zn в верхних почвенных горизонтах в различных экосистемах показывает, что атмосферное поступление этого металла превышает его вынос за счет выщелачивания и образования биомассы. Основным источником антропогенного поступления Zn в почву – воздушная пыль промышленного происхождения (Robson, 1993). Цинк – важный компонент клеток, участвующий в биохимических процессах, может стать токсичным при избыточном содержании.

Среднее содержание никеля в почвах исследуемого бора является значительным и превышает ориентировочно-допустимую концентрацию на 1,71 мг/кг. Превышения критического значения для сосны обыкновенной (80 мг/кг) не установлено (Maileena, 2005). Концентрация никеля в почве зависит как от его содержания в материнских породах, так и от техногенного загрязнения. Основными антропогенными источниками поступления никеля

в окружающую среду являются выбросы металлообрабатывающих предприятий и сжигания угля и нефти.

Кадмий относится к редким рассеянными элементам, с одним из наибольших периодов полувыведения из почвы – около 1100 лет (Кадмий: экологические ..., 1994). Источниками поступления кадмия в почву являются: выхлопные газы автотранспорта, сточные воды предприятий, минеральные удобрения (Ильин, Сысо, 2001). По содержанию Cd почвы Минусинского бора можно отнести к относительно незагрязненным. Среднее значение элемента в исследуемых почвах составило 0,15 мг/кг (0,3ОДК). Однако на пробной площади вблизи города концентрация кадмия составила 0,5ОДК. Для элемента свойственна миграция вниз по профилю почв и его накопление в верхних горизонтах может свидетельствовать о техногенном пути попадания в экосистему. Повышенная концентрация кадмия в почве на участке вблизи города может являться следствием частого пребывания в нем населения.

Антропогенными источниками поступления свинца в почву являются выхлопные газы автомобилей, потребляющих бензин с присадкой свинца, а также несанкционированные свалки в бору, куда попадают использованные электрические аккумуляторы, краски, лом металлов. Вероятно, повышенные концентрации свинца на пробных площадях вблизи города Минусинска связаны с использованием данных участков бора в качестве мест отдыха населения. Исследования показывают, что даже в незагрязненных районах на 1 гектар поверхности в среднем поступает до 180 грамм свинца (Степанок, 1998). Период полувыведения свинца из почв может достигать 5900 лет, что превышает аналогичный период у опасного кадмия (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Концентрация ванадия в почвах бора сопоставима со средними концентрациями элемента в песчаных и супесчаных почвах. Главными антропогенными источниками поступления ванадия в окружающую среду являются сжигания топлива – мазута и угля. Ванадий следует относить к

опасным тяжелым металлам (Верихов, 2007). Различие в заряде элемента приводит к большой вариации его свойств. Наиболее опасен ванадий в нейтральных почвах, в которых его подвижность и токсичность для растений возрастает. Накопление элемента в почве отрицательно влияет на урожайность растений (Иванов, 1996).

Среднее содержание молибдена в почвах Минусинского бора незначительно превышает среднее значения для почв мира, которое составляет 2,0 мг/кг (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Антропогенными источниками поступления элемента в окружающую среду являются выбросы при сжигании угля и мазута. Повышение концентрации элемента в почве на пробных площадях вблизи населенных пунктов может свидетельствовать именно о техногенном пути поступления в лесную экосистему.

Концентрация фтора в почвах Минусинского бора является незначительной. Это может говорить о том, что в природных условиях фтор малоподвижен и не накапливается в верхних горизонтах почв (Егунова, 2007). Установлено также, что фтор в первую очередь загрязняет атмосферу, а через нее уже почву и растения. Наибольшие концентрации фтора вблизи города свидетельствуют о техногенных источниках его поступления в педосферу. Загрязнение окружающей среды фтористыми соединениями происходит, главным образом, за счет выбросов предприятий по производству алюминия, некоторое количество фтора попадает в атмосферу в результате сгорания каменного угля (Габович, 1957). Выбросы алюминиевых предприятий оказывают негативное воздействие на значительном расстоянии от них (Павлов, 2005).

Марганец не считается загрязняющим почвы металлом. Концентрация марганца в почвах изучаемой территории близка к средней концентрации лесных почв России, которая составляет 710 мг/кг сухой массы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Кобальт – микроэлемент, необходимый для роста и развития растений, участвующий в фиксации азота. Кобальт является быстрорастворимым

элементом. В крупных промышленных центрах и вблизи них растительность испытывает дефицит кобальта вероятно из-за нейтрально-щелочной реакции почв (Иванов, 1996). Нормальное содержание кобальта в поверхностном слое лесных почв обычно изменяется от 1 до 40 мг/кг (Алиханова и др., 1977). Концентрации кобальта в почвах Минусинского бора находятся в пределах 1 мг/кг. Таким образом, почвы Минусинского бора можно считать не загрязненными кобальтом. Источниками антропогенного поступления данного элемента в почвы являются заводы по выплавке цветных металлов.

Полученные в результате анализов концентрации ртути в почвах исследуемых участков не превышают среднюю мировую концентрацию Hg в поверхностном слое почв, которая составляет около 0,4 мг/кг. На сегодняшний день фоновые уровни ртути в почвах нелегко оценить из-за широкого распространения антропогенного загрязнения металлом, вместе с тем, миграция ртути в почвах довольно ограничена (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Среднее содержание мышьяка в почвах Минусинского бора составляет около 3,51 мг/кг, что превышает ориентировочно-допустимую концентрацию в 1,76 раз. Антропогенными источниками поступления элемента в почвы рассматриваемого района могут являться: деятельность по обработке металлов и сжигание угля.

Аналогично рассчитанным в подглаве 5.1 для хвои *Pinus sylvestris* L. К<sub>к</sub>, рассчитали коэффициенты концентраций исследованных элементов в почве (таблица 14).

Таблица 14 – Значения коэффициентов концентраций химических элементов в почве Минусинского бора

№ п/п	К <sub>к</sub> химических элементов в почве												
	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F	Hg	As
1	1,00	1,45	0,97	1,18	1,34	1,1	2,29	1,10	1,1	1,03	6,19	1,21	1,06
2	1,01	1,55	0,96	1,2	1,3	1,17	1,79	1,11	1,03	1,02	4,61	1,29	1,34
3	1,02	1,1	0,96	1,01	1,33	1,13	1,53	1,12	1,04	1,0	2,22	1,33	1,07
4	1,13	1,04	0,96	1,52	1,15	1,22	1,32	1,11	1,03	1,04	1,41	1,21	1,19
5	1,15	1,02	0,98	1,1	1,11	1,17	1,24	1,08	1,03	0,99	1,33	1,17	1,1



6	1,06	1,03	0,99	1,11	1,08	1,11	1,21	1,05	1,06	1,05	1,33	1,17	1,06
7	1,07	1,01	0,99	1,04	1,08	1,13	1,14	1,04	1,03	1,03	1,2	1,21	1,06
8	1,00	1,01	1,0	1,01	1,08	1,03	1,04	1,01	1,02	0,98	1,18	1,13	1,04
9	1,01	1,01	1,0	1,03	1,06	1,08	1,07	1,01	1,01	0,99	1,16	1,17	1,04
Ср.з нач. ( $P=0,95$ )	1,05 $\pm$ 0,02	1,14 $\pm$ 0,07	0,98 $\pm$ 0,01	1,13 $\pm$ 0,05	1,17 $\pm$ 0,04	1,13 $\pm$ 0,02	1,4 $\pm$ 0,14	1,07 $\pm$ 0,01	1,04 $\pm$ 0,01	1,01 $\pm$ 0,01	2,29 $\pm$ 0,61	1,21 $\pm$ 0,02	1,11 $\pm$ 0,03

Как видно из таблицы среднее значение коэффициента концентрации ниже 1 только для одного элемента – Mn, для остальных элементов  $K_k \geq 1$ . Для элементов Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, V, Mo, Co, Hg, As средние значения  $K_k$  близки. Наибольшие коэффициенты концентраций наблюдаются для элементов Cd и F.

В почве в наибольшей степени аккумулируются  $F > Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > Ni > As > V > Fe > Mo > Co > Mn$  (рисунок 18).

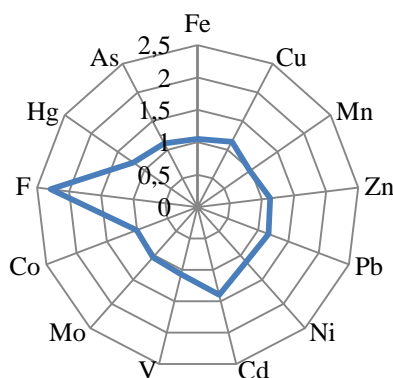


Рисунок 18 – Спектр загрязнения химическими элементами почв Минусинского ленточного бора

Нами рассчитан предложенный Саеом суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ), по формуле, представленной в подглаве 5.1.

Оценка состояния почвенного покрова по значениям суммарного показателя загрязнения для каждой пробной площади и по средним значениям коэффициентов концентраций представлена в таблице 15.

Таблица 15 – Значения показателей суммарного загрязнения почв  
Минусинского бора

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Среднее
Расстояние от г. Минусинска, км	5	10	16	22	25	30	35	40	45	-
Значение $Z_c$	8,05	6,42	2,9	2,37	0,5	1,32	1,04	0,55	0,65	2,75

Как видно из таблицы, наибольшие показатели значения суммарного показателя загрязнения характерны для пробных площадей 1 и 2, основной вклад в показатель загрязнения здесь вносит фтор и кадмий. Полученные нами суммарные показатели загрязнения почв четко показывают снижение уровня загрязнения по мере удаления от города и источников загрязнения ( $r = -0,87$ ,  $p = 0,99$ ).

На основе полученных данных о значениях суммарных показателей загрязнения для исследуемых пробных площадей составлена карта-схема, отражающая уровень загрязнения почв Минусинского ленточного бора (приложение 4).

Нами рассчитан суммарный показатель  $Z_c$  с учетом разной токсичности элементов, представленный в работе Ю.Н. Водяницкого (2011), по формуле:

$$Z_{ст} = \Sigma(K_{k_i} * K_{T_i}) - (n - 1), \quad (6)$$

где  $K_{T_i}$  – коэффициент токсичности  $i$ -го элемента.

Значения коэффициентов токсичности элементов представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Значения коэффициентов токсичности элементов

Класс опасности	$K_T$	Химические элементы
1	1,5	As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn, Cr
2	1,0	Co, Ni, Mo, Cu, Sb
3	0,5	Ba, V, W, Mn, Sr

Для элементов с неустановленным классом опасности коэффициент токсичности принимаем равным 1.

Рассчитанные показатели суммарного загрязнения с учетом токсичности элементов представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Значения показателей суммарного загрязнения почв Минусинского бора с учетом токсичности элементов

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Среднее
Расстояние от г. Минусинска, км	5	10	16	22	25	30	35	40	45	-
Значение $Z_c$	11,04	9,33	5,48	5,01	2,82	3,61	3,29	2,2	2,33	5,23

Вычисленные показатели суммарного загрязнения, учитывающие токсичность элементов, превышают значения суммарных показателей, рассчитанных по формуле Саета, в среднем на 3 единицы, что связано с вкладом в загрязнение токсичных элементов, таких как кадмий, ртуть и свинец.

Для значений суммарного показателя загрязнения определены следующие границы: при  $Z_c < 16$  – загрязнение считается допустимым; при  $16 < Z_c < 32$  – умеренно опасным; при  $32 < Z_c < 128$  – опасным; при  $Z_c > 128$  – чрезвычайно опасным (Методические указания ..., 1999).

По полученным значениям показателя суммарного загрязнения  $Z_c$  по степени опасности, можно отнести загрязнение почв рассматриваемого района к допустимому. Вместе с тем, следует учесть установленные превышения ориентировочно-допустимых концентраций в почве меди, мышьяка и никеля.

С целью изучения временной динамики показателя концентрирования тяжелых металлов в почвах Минусинского бора полученные нами данные сравнили с содержанием валовых форм тяжелых металлов в дерново-подзолистой, песчаной и супесчаной почвах минусинских боров, полученных Э.Е. Боболевой (1975). Сравнение данных приведено в таблице 18.

Таблица 18 – 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
Содержание по Э.Е. Боболевой (1975)	28	0,05	6	0,05	8	3	6	1,5
А.В.	33,7	0,15	6,00	0,029	6,94	1,00	21,71	3,51

Григоренко (2016)								
----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Таким образом, исследования, проведенные спустя более 40 лет, после проведенных Э.Е. Боболевой, позволили установить увеличение в первую очередь содержания в лесных почвах таких металлов как никель, цинк, кадмий и мышьяк. Аккумуляцию тяжелых металлов в почвенном покрове можно объяснить труднорастворимостью или нерастворимостью соединений поступающих загрязнителей, которые в дальнейшем в виде солей с органическими кислотами закрепляются гумусовым веществом почвы (Залывская и др., 2009). В то же время отмечается, что содержание свинца осталось на прежнем уровне, выявлено снижение накопления меди, кобальта и ртути, что возможно вследствие миграции элементов вниз по почвенному профилю (Большаков, 2002; Вяйзенен, 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.

### **5.3 Содержание некоторых тяжелых металлов и фтора в лесной подстилке**

Огромная роль в круговороте веществ принадлежит древесостю как основному компоненту леса. В последние десятилетия большое влияние на биологический круговорот веществ оказывают аэротехногенные источники поступления поллютантов в окружающую среду. Загрязняющие вещества, выпадая из атмосферы, перераспределяются в различных компонентах лесных экосистем. Оценка параметров лесной экосистемы невозможна без изучения лесной подстилки. Лесная подстилка – связующее звено системы растение-почва, выполняет важнейшие функции (Богатырев, 1996) –

участвует в почвообразовательном процессе, является источником возвращения азота и зольных веществ (Чжан, 2014).

В развитых лесных подстилках можно различить три слоя: верхний, состоящий из свежего опада, ещё мало затронутого процессами разложения и гумификации; средний слой (слой ферментации лесного опада), состоящий из полуразложившихся остатков, часть из которых еще сохранила морфологические признаки растений или их частей, и нижний слой – аморфная гумифицированная масса органического вещества темно-серого, бурого или черного цвета (Лесная энциклопедия ..., 1985).

Лесная подстилка является первым фильтрующим слоем, защищающим корневую систему растений от загрязнителей. Ранее проведенными исследованиями установлено, что хорошим индикатором загрязнения лесных экосистем служит значение мощности лесной подстилки.

Наши измерения мощности лесных подстилок приведены в таблице 19.

Таблица 19– Результаты средних измерений толщины подстилки

№ п/п	Характеристика пробной площади	Мощность лесной подстилки, см
1	5 км от г. Минусинска, за кафе «Полянка»	3,15± 0,06
2	в 10 км от г. Минусинска	3,26± 0,06
3	ст. Крупская – в 16 км от г. Минусинска	5,15± 0,06
4	ст. Коныгино – в 22 км от г. Минусинска	4,67± 0,06
5	до оз. Большой Кызыкуль – в 25 км от г. Минусинска	4,05± 0,05
6	после оз. Большой Кызыкуль – в 30 км от г. Минусинска	4,74± 0,05
7	оз. Малый Кызыкуль – в 35 км от г. Минусинска	4,75± 0,07
8	40 км от г. Минусинска	4,77± 0,05
9	ст. Жерлык – в 45 км от г. Минусинска	5,15± 0,07
Фон	в 49 км от г. Минусинска	5,57± 0,06

Как видно из таблицы, наименьшая мощность подстилки наблюдается на участках вблизи города, возможно, это связано с негативным воздействием выбросов и с высокой рекреационной нагрузкой, население активно использует близлежащие участки бора для отдыха. Затем на участке на станции Крупская мы видим увеличение мощности подстилки. Как

отмечалось в подглаве 3.6, данный участок подвержен наибольшему осаждению выбросов взвешенных веществ, кроме того на данной пробной площади концентрации тяжелых металлов (Cu, Zn, Ni, Cd, Mo, Co), способных оказать негативное влияние на активность почвенных микроорганизмов, выше по сравнению с остальными пробными площадями (таблица 20). С удалением от города мощность лесной подстилки достоверно увеличивается ( $r = 0,8$ ,  $p = 0,99$ ). Наши результаты согласуются с литературными данными – на расстоянии от источников техногенного воздействия лесные подстилки находятся в более здоровом состоянии, происходит увеличение запаса древостоя, а, следовательно, и количества лесного опада, что отражается на мощности.

Далее с целью выявления степени воздействия аэротехногенного фактора на формирование химизма почв был проведен отбор лесной подстилки и химический анализ образцов на содержание загрязняющих веществ. Результаты химических анализов представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Содержание химических элементов в лесной подстилке Минусинского бора

№ п/п	Характеристика пробной площади	Химические элементы, мг/кг (P =0,95)												
		Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F	As	Hg
1	5 км от г. Минусинска, за кафе «Полянка»	560,3± 9,7	2,79± 0,18	390,4± 4,7	25,74 ± 0,77	7,49± 0,32	22,06± 0,66	0,061± 0,012	54,69 ± 1,35	3,18± 0,16	2,85± 0,24	7,29± 0,27	0,022± 0,009	0,0281± 0,0035
2	в 10 км от г. Минусинска	542,5± 9,7	2,55± 0,12	387,2± 4,6	26,83 ± 0,87	7,52± 0,35	21,84± 0,56	0,064± 0,013	50,96 ± 1,25	3,29± 0,21	2,26± 0,19	9,12± 0,37	0,024± 0,006	0,0289± 0,0039
3	ст. Крупская – в 16 км от г. Минусинска	578,35 ± 9,9	3,81± 0,22	424,61 ± 4,18	41,15 ± 0,89	6,34± 0,31	25,63± 0,71	0,072± 0,015	53,17 ± 1,69	3,34± 0,26	2,89± 0,22	7,18± 0,17	0,039± 0,008	0,0366± 0,0050
4	ст. Коньгино – в 22 км от г. Минусинска	562,3± 9,6	2,79± 0,15	409,5± 4,8	37,38 ± 0,83	5,10± 0,26	22,65± 0,64	0,070± 0,015	48,61 ± 1,11	2,96± 0,17	2,17± 0,11	5,12± 0,13	0,04± 0,009	0,0399± 0,0055
5	до оз. Большой Кызыкуль – в 25 км от г. Минусинска	540,25 ± 9,9	2,78± 0,15	415,32 ± 4,94	36,39 ± 0,74	2,07± 0,29	19,86± 0,57	0,068± 0,014	46,54 ± 0,89	3,05± 0,25	2,06± 0,12	5,01± 0,11	0,039± 0,011	0,0385± 0,0053
6	после оз. Большой Кызыкуль – в 30 км от г. Минусинска	530,8± 9,65	2,81± 0,19	419,74 ± 4,4	26,19 ± 0,56	2,99± 0,25	19,48± 0,57	0,063± 0,019	46,06 ± 1,02	2,99± 0,16	2,01± 0,09	5,19± 0,17	0,037± 0,01	0,0372± 0,0049
7	оз. Малый Кызыкуль–в 35 км от г. Минусинска	528,23 ± 9,36	2,67± 0,13	423,65 ± 4,6	26,07 ± 0,58	2,06± 0,29	18,25± 0,54	0,059± 0,017	46,12 ± 1,16	2,97± 0,31	1,88± 0,08	4,21± 0,14	0,037± 0,011	0,0299± 0,0038
8	40 км от г. Минусинска	519,6± 9,8	2,59± 0,12	440,1 ± 4,45	25,09 ± 0,56	1,92± 0,28	17,93± 0,46	0,058± 0,013	44,32 ± 0,86	2,89± 0,19	1,96± 0,07	4,05± 0,12	0,034± 0,013	0,0278± 0,0034
9	ст. Жерлык – в 45 км от г. Минусинска	508,77 ±9,65	2,59± 0,13	440,8± 4,2	25,54 ± 0,97	1,82± 0,31	17,42± 0,47	0,055± 0,014	39,06 ± 0,64	2,88± 0,24	1,85± 0,12	4,01± 0,16	0,035± 0,012	0,0277± 0,0036
Фон	в 49 км от г. Минусинска	506,9± 9,74	2,30± 0,14	445,6± 5,1	24,56 ± 0,55	1,75± 0,24	17,31± 0,47	0,047± 0,01	36,23 ± 0,58	2,87± 0,22	1,84± 0,12	3,99± 0,09	0,021± 0,01	0,0259± 0,0031
Среднее значение		537,8± 7,49	2,77± 0,13	419,69 ±6,33	29,49 ±1,97	3,91± 0,77	20,24± 0,86	0,062± 0,002	46,58 ±1,83	3,04± 0,05	2,18± 0,12	5,52± 0,56	0,033± 0,002	0,0321± 0,0017

На пробной площади № 3 наблюдаются максимальные значения элементов: железо, медь, цинк, никель, кадмий, молибден, кобальт, причем содержание железа на данном участке превышает фоновое в 1,14 раз, меди – в 1,66 раз, цинка – в 1,68 раз, никеля – в 1,48 раз, кадмия – в 1,53 раз, молибдена – в 1,16 раз, кобальта – в 1,57 раз. Выявлена определенная закономерность в изменении концентраций указанных веществ: с удалением от города наблюдается увеличение содержания элементов до максимума на пробной площади № 3, затем снижение концентраций по мере приближения к фоновому участку.

Содержание марганца увеличивается с расстоянием от города, однако концентрация элемента на пробной площади № 3 достигает своего рода максимума по отношению к соседним пробным площадям №№ 2 и 4. Резкое повышение концентрации на данной пробной площади можно объяснить присутствием значительного количества Mn в выбросах ТЭЦ. Наибольшее содержание марганца в лесной подстилке наблюдается на фоновой точке.

Содержание свинца убывает от пробной площади № 1 к фоновому участку, наибольшие его концентрации выявлены вблизи города.

Максимальная концентрация ванадия определена вблизи города, на пробной площади № 1. Анализ литературных данных показал, что лесная подстилка вблизи густонаселенных территорий содержит ванадия в концентрации до 100 мг/кг (Tiffin, 1977)

Максимум содержания фтора в лесной подстилке выявлено на пробных площадях №№ 1, 2, что, вероятно, связано с розой ветров и расстоянием от основного источника поступления фторидов в окружающую среду – АО «РУСАЛ Саяногорск».

Наибольшие концентрации мышьяка и ртути выявлены на пробных площадях №№ 3, 4. Установлено, что ртуть в наибольшей степени накапливается именно в лесных подстилках вследствие миграции из подгоризонта деструкции органического вещества (Гладкова, Малинина, 1999). У нас отсутствует информация о конкретных источниках поступления



данных химических элементов в лесную экосистему, согласно литературным данным (Гришина, Иванова, 1997) ртуть и мышьяк поступают в атмосферу при сжигании топлива, содержатся в золе ТЭЦ и частного сектора.

Аналогично вычислениям, проведенным в подглаве 5.1, определили интенсивность техногенного воздействия на компонент лесной экосистемы – подстилку, рассчитав коэффициенты концентраций загрязнителей и суммарный показатель загрязнения тяжелыми металлами по формуле Саета.

Значения коэффициентов концентраций приведены в таблице ниже.

Таблица 21 – Значения коэффициентов концентраций химических элементов в лесной подстилке

№ п/п	K <sub>к</sub> химических элементов в лесной подстилке												
	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F	Hg	As
1	1,11	1,21	0,88	1,05	4,28	1,27	1,3	1,51	1,11	1,55	1,83	1,09	1,05
2	1,07	1,11	0,87	1,09	4,3	1,26	1,36	1,41	1,15	1,23	2,29	1,12	1,14
3	1,14	1,66	0,95	1,68	3,62	1,48	1,53	1,47	1,16	1,57	1,8	1,41	1,86
4	1,11	1,21	0,92	1,52	2,91	1,31	1,49	1,34	1,03	1,18	1,28	1,54	1,9
5	1,07	1,21	0,93	1,48	1,18	1,15	1,45	1,28	1,06	1,12	1,26	1,49	1,86
6	1,05	1,22	0,94	1,07	1,71	1,13	1,34	1,27	1,04	1,09	1,3	1,44	1,76
7	1,04	1,16	0,95	1,06	1,18	1,05	1,26	1,27	1,03	1,02	1,06	1,15	1,76
8	1,03	1,13	0,99	1,02	1,1	1,04	1,23	1,22	1,01	1,07	1,02	1,07	1,62
9	1,00	1,13	0,99	1,04	1,04	1,01	1,17	1,08	1,00	1,01	1,01	1,07	1,67
Ср. зн. а.ч. (P=0,95)	1,06 ± 0,01	1,23 ± 0,06	0,94 ± 0,01	1,22 ± 0,09	2,37 ± 0,47	1,19 ± 0,05	1,35 ± 0,04	1,32 ± 0,04	1,07 ± 0,02	1,2± 0,07	1,43 ± 0,15	1,26 ± 0,07	1,62 ±0,1

Как видно из таблицы, средние коэффициенты концентраций для всех элементов, кроме марганца превышают единицу. Это может говорить о наличии техногенного воздействия на лесную подстилку. Наибольшие коэффициенты концентраций наблюдаются для свинца, мышьяка и фтора.

В лесной подстилке накапливаются в наибольшей степени  $Pb > As > F > Cd > V > Hg > Cu > Zn > Co > Ni > Fe > Mo > Mn$  (рисунок 19).

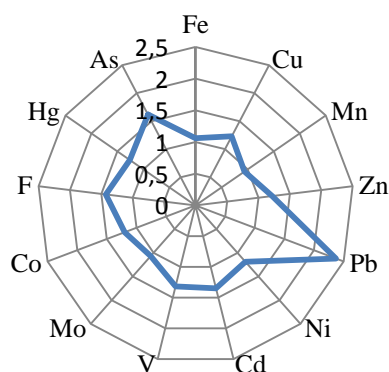


Рисунок 19 – Спектр загрязнения химическими элементами лесной подстилки Минусинского ленточного бора

Оценка состояния лесной подстилки по значениям суммарного показателя загрязнения для каждой пробной площади и по средним значения  $K_k$  представлена в таблице 22.

Таблица 22 – Значения показателей суммарного загрязнения для лесной подстилки

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Среднее
Расстояние от г. Минусинска, км	5	10	16	22	25	30	35	40	45	-
Значение $Z_c$	6,36	6,53	8,38	5,82	3,61	3,42	2,04	1,56	1,23	4,33

На основе полученных данных о значениях суммарных показателей загрязнения для исследуемых пробных площадей, составлена карта-схема, отражающая уровень загрязнения лесных подстилок Минусинского ленточного бора (приложение 5).

Нами рассчитан суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  с учетом разной токсичности химических элементов (таблица 23) по формуле Ю.Н. Водяницкого (2011), представленной в подглаве 5.2.

Таблица 23 – Значения показателей суммарного загрязнения лесной подстилки с учетом токсичности элементов

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Среднее
Расстояние от г. Минусинска, км	5	10	16	22	25	30	35	40	45	-
Значение $Z_c$	9,99	10,33	12,7	9,83	6,7	6,45	4,61	3,97	3,69	7,58

Как видно из таблиц 22 и 23, суммарные показатели загрязнений, рассчитанные с учетом токсичности, превышают показатели загрязнений, рассчитанные по формуле Саета, разница в значениях в среднем составляет около 3 единиц.

Увеличение связано с тем, что наибольший вклад в загрязнение вносят наиболее токсичные элементы свинец и мышьяк, для которых коэффициент токсичности равен 1,5.

Большая часть территории Минусинского ленточного бора характеризуется загрязненностью лесных подстилок со значением показателя суммарного загрязнения  $Z_c < 10$ . Максимальное загрязнение подстилки наблюдается на первых четырех участках.

Учитывая, что суммарные показатели загрязнений для всех исследованных участков не превышают 16, уровень загрязнения лесных подстилок можно отнести к допустимому (Методические указания ..., 1999).

#### **5.4 Сравнение содержания химических элементов в хвое, лесной подстилке и почве**

Исследования особенностей загрязнения хвои, лесной подстилки и почвы сосновых насаждений Минусинского ленточного бора представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Характеристика содержания химических элементов в хвое, лесной подстилке и почве Минусинского бора

Химический элемент	Компонент лесной экосистемы	Среднее содержание	Интервал концентрации	Фоновое содержание	Превышение фона (в среднем), %
Железо	почва	514,39	490,37...563,9	492,38	4,47
	подстилка	537,8	508,77...578,35	506,9	6,1
	хвоя	54,34	47,07...74,29	41,34	31,45
Медь	почва	6,94	6,23...9,57	6,19	12,12
	подстилка	2,77	2,55...3,81	2,30	20,43
	хвоя	2,56	2,21...2,99	2,61	-
Марганец	почва	411,89	401,63...418,92	419,71	-
	подстилка	419,69	387,2...440,8	445,6	-
	хвоя	63,3	44,89...77,8	79,7	-

Цинк	почва	33,7	30,36...45,64	30,12	11,89
	подстилка	29,49	25,09...41,15	24,56	20,07
	хвоя	53,7	47,48...70,08	41,12	30,59
Свинец	почва	6,00	5,52...6,98	5,20	15,38
	подстилка	3,91	1,82...7,52	1,75	123,43
	хвоя	0,11	0,032...0,348	0,017	547,06
Никель	почва	21,71	20,17...23,74	19,49	11,39
	подстилка	20,24	17,42...25,63	17,31	16,93
	хвоя	1,62	1,53...1,79	1,42	14,08
Кадмий	почва	0,15	0,117...0,257	0,112	33,93
	подстилка	0,062	0,055...0,072	0,047	31,91
	хвоя	0,034	0,025...0,076	0,023	47,83
Ванадий	почва	38,23	36,22...40,18	36,02	6,14
	подстилка	46,58	39,06...54,69	36,23	28,57
	хвоя	0,8	0,56...1,10	0,47	70,21
Молибден	почва	2,81	2,74...2,98	2,71	3,69
	подстилка	3,04	2,88...3,34	2,87	5,92
	хвоя	0,9	0,76...0,98	1,01	-
Кобальт	почва	1,00	0,97...1,04	0,99	1,01
	подстилка	2,18	1,85...2,89	1,84	18,48
	хвоя	0,89	0,85...0,94	0,89	-
Фтор	почва	1,64	0,88...4,71	0,76	115,79
	подстилка	5,52	4,01...9,12	3,99	38,35
	хвоя	2,56	2,01...5,27	2,01	27,36
Ртуть	почва	0,029	0,027...0,032	0,024	20,83
	подстилка	0,032	0,0277...0,0399	0,0259	23,55
Мышьяк	почва	3,51	3,32...4,30	3,2	9,69
	подстилка	0,033	0,022...0,04	0,021	57,14

Как видно из таблицы, в почве и лесной 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 остальных загрязняющих веществ – железа, цинка, свинца, никеля, кадмия, ванадия, фтора превышает фоновые концентрации.

Среди рассматриваемых элементов в почве и лесной подстилке доминирует железо, среднее его содержание в данных компонентах составляет 514,39 мг/кг и 537,8 мг/кг соответственно. Наибольшее среднее содержание в хвое из рассмотренных элементов – у марганца – 63,3 мг/кг.

Содержание меди в исследуемых почвах бора изменяется в значениях от 6,23 до 9,57 мг/кг, при среднем показателе – 6,94 мг/кг. Колебание

значений в подстилке менее значительно – от 2,55 до 3,81 мг/кг, при среднем значении в 2,77 мг/кг. Выявлено слабое биогенное накопление меди в горизонте лесной подстилки относительно нижележащего почвенного горизонта. Содержание меди в хвое варьирует в пределах от 2,21 до 2,99 мг/кг, установлена прямая зависимость между содержанием элемента в хвое и почве, коэффициент корреляции равен 0,76 ( $p = 0,98$ ). Считается, что не менее половины поступивших в растительный организм тяжелых металлов поступает из почвы через корневую систему (Смирнов и др., 2009).

Концентрация марганца в почвах колеблется в незначительных пределах 401,63-418,92 мг/кг, среднее содержание элемента составило 411,89, что ниже средней концентрации для лесных почв России (710 мг/кг) (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). При этом следует учесть, что наши расчеты относятся только к поверхностному горизонту почв. Среднее содержание в лесной подстилке превышает аналогичное содержание в почве и составляет 419,69 мг/кг, что согласуется с ранее проведенными исследованиями, в которых установлено, что в большинстве случаев марганец аккумулируется в подстилочном слое вследствие его фиксации органическим веществом (Шильцова и др., 2008). Аккумуляция марганца в подстилке загрязненных районов объясняется еще и интенсивным выносом элемента из корнеобитаемого слоя почв (Лукина и др., 1999). Выявлена положительная связь между содержанием марганца в почве и подстилке ( $r = 0,80$ ,  $p = 0,99$ ), содержание марганца в хвое тоже коррелирует с содержанием элемента в почве, но с меньшей силой связи ( $r = 0,63$ ,  $p = 0,95$ ).

Среднее валовое содержание цинка в почве 33,7 мг/кг превышает среднее содержание в лесной подстилке на 4,21 мг/кг, но ниже среднего содержания в хвое, которое составляет 53,7 мг/кг. Линейных зависимостей между содержанием Zn в подстилке-почве и почве-хвое не выявлено. В работе по исследованию зависимости содержания цинка в растениях от валового содержания цинка в почве установлено, что зависимость между содержанием элемента в данных компонентах криволинейная, а также что

при умеренно высоких концентрациях элемента в почве (более 30 мг/кг) содержание Zn в растениях превышает 50 мг/кг (Спицына и др., 2013), что согласуется с нашими исследованиями.

Концентрации свинца в подстилках варьируют в пределах 1,82-7,52 мг/кг, в рассматриваемом почвенном горизонте – 5,52-6,98 мг/кг, в хвое размах значений наименее значителен от 0,032 до 0,348 мг/кг. Среднее содержание свинца в почве равно 6,00 мг/кг превышает среднее содержание в подстилочном горизонте более чем в 1,5 раза, что может говорить об аккумуляции данного элемента поверхностным горизонтом почв, что подтверждается ранее проведенными исследованиями (Тютюнник, 1992; Байдина, 1995; Смирнова и др., 2005; Ляшенко, 2007) и сильными положительными связями между содержанием свинца в подстилке и почве ( $r = 0,95$ ,  $p = 0,99$ ). Содержание элемента в почве и хвое также взаимообусловлено, о чем говорит коэффициент корреляции  $r = 0,90$ , при уровне вероятности 99%. Из анализа литературных данных следует, что нет единой точки зрения по вопросу влияния загрязнения почв свинцом на растения, в одних работах установлено, что свинец в почве оказывает незначительное влияние на его содержание в растениях (Зайковская, 1980; Кочарян, 1987), в других работах, напротив, уровень загрязнения растительности коррелирует с загрязнением почв (Залывская и др., 2009; Асылбаев и др., 2013). Данное противоречие, вероятно, можно объяснить различиями почвенных условий, формой нахождения самого металла в почве, а также видовыми особенностями растительного организма.

Размах значений концентраций никеля в верхнем почвенном горизонте составляет 20,17-23,74 мг/кг, среднее значение – 21,71 мг/кг; для лесной подстилки размах колебаний более значителен – в пределах от 17,42 до 25,63 мг/кг, при среднем уровне в 20,24 мг/кг. Содержание никеля в хвое изменяется в незначительном диапазоне 1,53-1,79 мг/кг со средним содержанием 1,62 мг/кг. Не установлено достоверной зависимости между концентрациями Ni в подстилке и почве, между содержанием элемента в

почве и хвое, напротив, выявлена сильная прямая связь ( $r = 0,84$ ,  $p = 0,99$ ), что подтверждает ранее проведенные исследования, согласно которым доступность никеля для поглощения растениями из почв высока (Брукс, 1982; Иванов, 1996; Архипов и др., 2005).

Содержание кадмия в почве флуктуирует в границах 0,117-0,257 мг/кг, в подстилке – 0,055-0,072 мг/кг. Среднее содержание элемента в почве (0,15 мг/кг) превышает аналогичное в лесной подстилке (0,062 мг/кг) более чем в два раза. Наименьшее содержание кадмия из представленных компонентов лесной экосистемы наблюдается в хвое – среднее значение 0,034 мг/кг. Зависимостей в содержании кадмия между компонентами почва-подстилка и почва-хвоя не установлено, что подтверждает ранее проведенные работы (Burton, Morgan, 1984; Farago, Cole, 1988).

Количество ванадия изменяется в пределах от 39,06 до 54,69 мг/кг в подстилках и от 36,22 до 40,18 мг/кг в исследованном почвенном горизонте, при средних значениях, равных соответственно 46,58 и 38,23 мг/кг. На исследованных пробных площадях выявлена значительная аккумуляция ванадия лесными подстилками, где его содержание в среднем в 1,25 раз выше, чем в рассматриваемом почвенном горизонте, кроме того, установлено наличие сильной положительной связи между содержанием ванадия в указанных компонентах ( $r = 0,89$ ,  $p = 0,99$ ). Связь между содержанием ванадия в почве и хвое менее выражена ( $r = 0,83$ ,  $p = 0,99$ ), но также довольно сильная. Ванадий активно мигрирует в системе почва-растение, особенно в щелочной среде (Глазовская, 1978; Гринь и др., 2012).

Установленный средний уровень содержания молибдена в лесных подстилках Минусинского бора – 3,04 мг/кг, что превышает среднее значение элемента в почвах (2,81 мг/кг). Среднее содержание молибдена в хвое ниже среднего в почве и подстилке, и составляет 0,9 мг/кг. Связи между содержанием элемента в почве и подстилке, и почве и хвое не выявлено.

Среднее содержание кобальта в верхнем органогенном горизонте почв (1,0 мг/кг) ниже значения, характерного для лесных подстилок (2,18 мг/кг).

Это может указывать, в том числе и на то, что источник поступления кобальта в лесную подстилку имеет аэротехногенную природу. Содержание кобальта в хвое изменяется незначительно, среднее его содержание близко к почвенному, но связи между данными компонентами не установлено.

Концентрации фтора в почвах варьируют в пределах от 0,88 до 4,71 мг/кг, в лесной подстилке от 4,01 до 9,12 мг/кг, в хвое 2,01-5,27 мг/кг. Средние значения в компонентах также значительно отличаются между собой, в лесной подстилке оно составляет 5,52 мг/кг, что превышает аналогичное значение для верхнего почвенного горизонта на 3,88 мг/кг, для хвои – на 2,96 мг/кг. Меньшая концентрация фтора в почве по сравнению с подстилкой и хвоей обусловлена, в том числе, слабым накоплением фтора в подзолах иллювиально-железистых и иллювиально-гумусовых, подбурах, дерново-подзолистых иллювиально-железистых, борových песках. Для этих почв характерен быстрый вынос фтора за пределы ландшафта (Павлов, 2005). Возможен вынос фтора из почв в лесную подстилку, о чем говорит сильная положительная связь в содержании элемента между компонентами ( $r = 0,82$ ,  $p = 0,99$ ). Превышение концентрации фтора в хвое по отношению к почве может быть свидетельством его поглощения хвоей непосредственно из воздуха.

Валовое содержание ртути в почвах и лесной подстилке изменяется соответственно в пределах 0,027-0,032 мг/кг и 0,028-0,04 мг/кг, при этом среднее содержание металла в почвенном горизонте составило 0,029 мг/кг, что ниже среднего содержания элемента в подстилке (0,032 мг/кг). Кроме того, размах изменений концентраций ртути в лесной подстилке шире чем в почвенном горизонте. Наши исследования согласуются с литературными данными, согласно которым большая часть ртути накапливается именно в лесной подстилке (Mercury in the Swedish ..., 1991). Полученные нами средние концентрации ртути в почве Минусинского бора аналогичны концентрациям элемента для дерново-подзолистых почв Юга Сибири, полученных в работе Н. Л. Байдиной (2001).



Размах колебаний значений мышьяка в верхнем почвенном горизонте составляет 3,32-4,30 мг/кг, в лесной подстилке – 0,022-0,04 мг/кг. Среднее содержание элемента в почве (3,51 мг/кг) в сотню раз превышает среднюю концентрацию в подстилке (0,033 мг/кг). Содержание мышьяка в подстилочном горизонте бора характерно для растений, произрастающих на незагрязненных почвах с концентрациями 0,009-1,5 мг/кг сухой массы.

Как было установлено ранее, лесная подстилка является биогеохимическим барьером, препятствующим поступлению загрязнителей в сопредельные среды, кроме того лесные подстилки испытывают на себе большую антропогенную нагрузку, аккумулируя атмосферные выбросы и перемещенные вещества из почвенных горизонтов. Длительное техногенное воздействие способно неблагоприятно сказаться на защитных свойствах подстилок, вплоть до их полного угнетения. Для того, чтобы оценить защитную функцию подстилочного горизонта нами произведен расчет соотношений концентраций загрязнителей в лесных подстилках и почвах, результаты представлены в таблице 25.

Как видно из таблицы, лесная подстилка выступает геохимическим барьером по веществам железо, марганец, ванадий, молибден, кобальт, фтор и ртуть, содержание данных химических элементов в подстилке превышает аналогичное содержание в почвах не менее чем в 70% случаев по каждому веществу. Стоит отметить, что среднее соотношение концентраций элементов в лесной подстилке к содержанию в почве составляет по веществам: марганец – 1,02; железо – 1,05, ртуть – 1,13; ванадий – 1,21; кобальт – 2,17; фтор – 4,22.

Таблица 25 – Соотношение концентраций исследованных химических элементов в лесных подстилках и почвах

№ п/п	Характеристика пробной площади	Соотношение содержания химического элемента в лесной подстилке к содержанию в почве												
		Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F	Hg	As
1	5 км от г. Минусинска, за кафе «Полянка»	1,13	0,31	0,96	0,72	1,07	1,03	0,24	1,38	1,07	2,79	1,55	0,97	0,01
2	в 10 км от г. Минусинска	1,09	0,27	0,96	0,74	1,11	0,96	0,32	1,27	1,18	2,24	2,61	0,93	0,01
3	ст. Крупская – в 16 км от г. Минусинска	1,15	0,56	1,05	1,36	0,92	1,17	0,42	1,32	1,19	2,92	4,25	1,14	0,01
4	ст. Коньгино – в 22 км от г. Минусинска	1,01	0,43	1,01	0,82	0,85	0,95	0,47	1,22	1,04	2,11	4,79	1,38	0,01
5	до оз. Большой Кызыкуль – в 25 км от г. Минусинска	0,96	0,44	1,01	1,11	0,36	0,87	0,49	1,19	1,09	2,10	4,96	1,38	0,01
6	после оз. Большой Кызыкуль – в 30 км от г. Минусинска	1,02	0,44	1,01	0,78	0,53	0,90	0,46	1,22	1,04	1,93	5,14	1,33	0,01
7	оз. Малый Кызыкуль–в 35 км от г. Минусинска	1,00	0,43	1,02	0,83	0,37	0,83	0,46	1,23	1,07	1,84	4,63	1,03	0,01
8	40 км от г. Минусинска	1,06	0,42	1,05	0,83	0,34	0,89	0,50	1,22	1,05	2,02	4,50	1,03	0,01
9	ст. Жерлык – в 45 км от г. Минусинска	1,02	0,42	1,05	0,82	0,33	0,83	0,46	1,08	1,05	1,89	4,56	0,99	0,01
Фон	в 49 км от г. Минусинска	1,03	0,37	1,06	0,82	0,34	0,89	0,42	1,01	1,06	1,86	5,25	1,08	0,01

Валовое содержание элементов медь, цинк, свинец, никель, кадмий, мышьяк, напротив, больше в почвенном горизонте нежели в лесной подстилке, кроме того следует отметить значительное превышение по содержанию мышьяка в почве по отношению к подстилке – в 106,36 раз, меди – в 2,5 раза и кадмию – в 2,42 раз.

Следовательно, перед нами наглядное проявление высокой поглотительной способности подстилочного горизонта лесных экосистем по веществам кобальт, фтор и низкое по веществам мышьяк, медь, кадмий.

Проведенный корреляционный анализ между содержанием загрязнителей в хвое и лесной подстилке показал следующее. Выявлены достоверные положительные связи между содержанием в указанных компонентах железа ( $r = 0,82$ ,  $p = 0,99$ ), свинца ( $r = 0,82$ ,  $p = 0,99$ ), никеля ( $r = 0,77$ ,  $p = 0,99$ ), ванадия ( $r = 0,72$ ,  $p = 0,98$ ), молибдена ( $r = 0,71$ ,  $p = 0,95$ ). Так как основным компонентом лесных подстилок является хвоя, то можно сделать вывод о том, что загрязнение хвои данными элементами обуславливает последующее загрязнение лесной подстилки.

Для установления взаимосвязи между содержанием элементов в почве и хвое *Pinus sylvestris L.* были рассчитаны коэффициенты биологического поглощения (КБП), представляющие собой отношение средних концентраций исследованных элементов в хвое к средним концентрациям в почве (Второва, Холопова, 2009). Рассчитанные коэффициенты биологического поглощения занесены в таблицу 26.

Таблица 26 – Коэффициенты биологического поглощения

Химический элемент	Компонент лесной экосистемы	Среднее содержание	КБП
Железо	почва	514,39	0,11
	хвоя	54,34	
Медь	почва	6,94	0,37
	хвоя	2,56	
Марганец	почва	411,89	0,15
	хвоя	63,3	
Цинк	почва	33,7	1,59
	хвоя	53,7	
Свинец	почва	6,00	0,02

	хвоя	0,11	
Никель	почва	21,71	0,07
	хвоя	1,62	
Кадмий	почва	0,15	0,23
	хвоя	0,034	
Ванадий	почва	38,23	0,02
	хвоя	0,8	
Молибден	почва	2,81	0,32
	хвоя	0,9	
Кобальт	почва	1,00	0,89
	хвоя	0,89	
Фтор	почва	1,64	1,56
	хвоя	2,56	

Наиболее высокие значения КБП видим для фтора и цинка.

В экосистемах, куда Zn поступает в виде компонента атмосферных загрязнений, надземные части растений концентрируют, по-видимому, большую его часть (Гаранина, 2001). Превышение содержания цинка в хвое по отношению к почве может говорить о том, что хвоя аккумулирует цинк и возрастает роль атмосферы в качестве источника поступления данного элемента в растения.

В настоящее время влияние атмосферных выпадений фтора, как на поверхность почвы, так и на растения изучается достаточно интенсивно. Превышение концентрации фтора в хвое по отношению к почве может быть свидетельством его поглощения хвоей непосредственно из воздуха.

Полученные ранее в результате расчета коэффициенты концентрации элементов в компонентах Минусинского бора и ранжированные по порядку убывания имеют следующий вид:

$$\text{Pb} > \text{As} > \text{F} > \text{Cd} > \text{V} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Fe} > \text{Mo} > \text{Mn} \quad (1),$$

$$\text{F} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{As} > \text{V} > \text{Fe} > \text{Mo} > \text{Co} > \text{Mn} \quad (2),$$

$$\text{Pb} > \text{V} > \text{Cd} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{F} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Mo} > \text{Mn} \quad (3),$$

где (1) для подстилки, (2) для нижележащего минерального горизонта, (3) для хвои.

Анализ содержания химических элементов в лесной подстилке, отобранной одновременно с пробами почв, и рассчитанные по данным

значениям коэффициенты концентраций, показали, что подстилочный горизонт наиболее загрязнен свинцом, мышьяком, фтором, кадмием, ванадием, ртутью и медью.

Как видно из ранжирования коэффициентов концентраций химических элементов в почвах, загрязнение данного компонента обусловлено фтором, кадмием, ртутью, свинцом, медью, цинком и никелем.

Исследования загрязнения почвенного и подстилочного горизонтов Минусинского бора показывают, что вклад в основное загрязнение данных компонентов вносят практически идентичные наборы загрязнителей – фтор, кадмий, ртуть, свинец и медь.

Проведенное исследование закономерностей пространственного загрязнения двухлетней хвои сосны некоторыми компонентами выбросов, показало, что наибольший вклад в ее загрязнение вносят свинец, ванадий, кадмий, железо, цинк и фтор, кроме того, по содержанию в хвое цинка наблюдается превышение при сравнении с почвой и подстилкой. Сравнение рядов коэффициентов концентраций элементов в хвое и лесной подстилке, ранжированных по порядку убывания, а также проведенный корреляционный анализ, показали, что в загрязнении данных компонентов прослеживается тесная достоверная связь – изменение содержания пяти компонентов из одиннадцати исследованных в хвое и подстилке подвержено определенным закономерностям. Основной вклад в загрязнение хвои и лесной подстилки вносят свинец, кадмий, ванадий и фтор.

Исходя из вышеизложенного, можно говорить о том, что значительный вклад в загрязнение почвы, лесной подстилки и хвои вносят тяжелые металлы свинец и кадмий, и фтор. Превышение концентрации фтора в хвое и лесной подстилке по отношению к почве может быть свидетельством его поглощения непосредственно из воздуха.

По значению коэффициентов корреляции между загрязнением рассматриваемых компонентов лесных экосистем (хвоя, подстилка, почва) и расстоянием от города можно выделить 3 группы элементов, в первую

группу входит марганец, его концентрация увеличивается с расстоянием от ближайших источников выброса загрязняющих веществ, во вторую группу входят молибден и мышьяк, с различными знаками коэффициентов корреляции между содержанием в компонентах и расстоянием, и, третья группа, наиболее многочисленная, включающая остальные элементы – с отрицательным знаком корреляции (таблица 27).

Таблица 27 – Значения коэффициентов корреляции между содержанием загрязняющих веществ в компонентах лесных экосистем и расстоянием от ближайших источников выброса

Загрязняющее вещество	Хвоя	Подстилка	Почва
Железо	-0,45	-0,85	-0,13
Медь	-0,33	-0,47	-0,78
Марганец	0,49	0,92	0,89
Цинк	-0,78	-0,40	-0,47
Свинец	-0,83	-0,91	-0,93
Никель	-0,61	-0,83	-0,63
Кадмий	-0,55	-0,70	-0,90
Ванадий	-0,67	-0,95	-0,94
Молибден	0,60	-0,86	-0,75
Кобальт	-0,11	-0,83	-0,41
Фтор	-0,70	-0,88	-0,81
Мышьяк	н/д	0,11	-0,76
Ртуть	н/д	-0,33	-0,59

Как видно из таблицы, с расстоянием от источников негативного воздействия в хвое, подстилке и почве снижается содержание большинства загрязнителей, таким образом, результаты проведенных нами исследований подтверждают высказываемое ранее многими исследователями положение об уменьшении уровня загрязнения компонентов лесных экосистем в условиях воздействия промышленных выбросов с удалением от источников эмиссий. Концентрации таких элементов как свинец и фтор, напрямую зависят от расстояния до источников негативного воздействия, что говорит о техногенном пути их поступления в лесную экосистему. Поступление в лесную экосистему таких веществ как кадмий, ванадий и молибден также имеет техногенную природу, выявлена сильная отрицательная зависимость

их содержания в подстилке и почве от расстояния, связь содержания данных поллютантов в хвое с расстоянием менее выражена, но также присутствует.

Содержание марганца в хвое, подстилке и почве положительно коррелирует с расстоянием, что также подтверждает ранее проведенные исследования.

Можно говорить о наличии связи, хоть и слабо выраженной, между содержанием всех исследованных веществ в компонентах лесной экосистемы и расстоянием, за исключением железа в почве, кобальта в хвое и мышьяка в лесной подстилке, изменение концентраций которых не носит линейного характера.

Изменение концентраций загрязнителей в различных компонентах природных экосистем с удалением от источников негативного воздействия может и не носить строго линейного характера, что связано с большим числом источников выбросов, многокомпонентным составом выбросов, сложным рельефом местности и динамикой метеорологических характеристик.

### **5.5 Влияние загрязнения на физиологические и морфологические параметры хвои *Pinus sylvestris* L.**

Разнообразие загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду, наряду со значительным объемом пылегазовых эмиссий, затрудняет определение влияния конкретного загрязняющего вещества на растительный организм. Нами проведен статистический анализ, позволяющий выделить наиболее значимые вещества и наиболее чувствительные физиологические и морфологические параметры *Pinus sylvestris* L. из исследуемых, в условиях аэротехногенного воздействия.

Корреляционный анализ зависимостей параметров хвои от содержания химических веществ (таблица 28) показал, что содержание анализируемых химических элементов оказывает влияние на физиологические и

морфологические параметры хвои. На интенсивность фотосинтеза с 95%-ной вероятностью прогноза оказывает влияние содержание цинка ( $r = -0,64$ ) и ванадия ( $r = -0,68$ ), а на значение водного дефицита – содержание цинка ( $r = 0,72$ ,  $p = 0,98$ ). 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 *Pinus sylvestris L.*

Не выявлено достоверных зависимостей между содержанием химических элементов в хвое и интенсивностью дыхания.

Таблица 28 – Корреляционный анализ зависимостей физиологических и морфологических параметров хвои от содержания химических веществ в хвое

Содержание хим. элемента Параметр	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd	V	Mo	Co	F
	Физиологические параметры хвои										
Интенсивность фотосинтеза	-0,23	-0,30	0,29	-0,64	-0,43	-0,56	-0,28	-0,68	0,62	-0,42	-0,31
Интенсивность дыхания	-0,02	-0,29	0,12	-0,46	-0,23	-0,42	-0,07	-0,56	0,45	-0,50	-0,16
Водный дефицит	0,21	0,50	-0,21	0,72	0,62	0,46	0,43	0,59	-0,58	0,31	0,49
Морфологические параметры хвои											
Длина хвои	-0,75	0,24	0,78	-0,87	-0,37	-0,90	-0,7	-0,91	0,99	-0,45	-0,05
Площадь хвои	-0,73	0,21	0,72	-0,88	-0,31	-0,87	-0,73	-0,90	0,98	-0,52	0,06
Масса 500 хвоинок	-0,73	0,20	0,70	-0,86	-0,28	-0,89	-0,70	-0,92	0,94	-0,46	0,08
Процент поражения хвои относительно общей длины	0,59	0,33	-0,55	0,88	0,88	0,64	0,76	0,71	-0,62	0,08	0,67

Корреляционный анализ показал влияние цинка на все исследуемые морфологические параметры хвои, наибольшая связь наблюдается между содержанием элемента и площадью хвои ( $r = -0,88$ ,  $p = 0,99$ ), и процентом



поражения хвои относительно общей длины ( $r = 0,88$ ,  $p = 0,99$ ). Зависимости между содержанием элемента и остальными исследуемыми морфометрическими параметрами также имеют значительные силы связи, между содержанием цинка, длиной и массой хвои выявлены обратные зависимости –  $r = -0,87$  ( $p = 0,99$ ) и  $r = -0,86$  ( $p = 0,99$ ) соответственно.

Отрицательное влияние цинка на морфологические и физиологические параметры хвои, вероятно, обусловлено концентрацией данного элемента в хвое, превышающей в отдельных пробах порогового значения 62 мг/кг (Messenger, Stelford, 1997).

На сегодняшний день нет единого мнения о влиянии ванадия на рост и развитие растений. Наши исследования выявили обратную связь между содержанием элемента в хвое и интенсивностью фотосинтеза, таким образом, установлено влияние элемента на растительность в концентрациях около 1 мг/кг сухой массы, т.е. значительно ниже литературных данных, в которых отмечено токсическое действие при концентрациях около 2 мг/кг. Негативное воздействие ванадия подтверждается и установленными связями с исследуемыми морфометрическими параметрами хвои сосны, коэффициенты корреляции варьируют в пределах от 0,71 ( $p = 0,95$ ) – для процента поражения хвои относительно общей длины до  $r = -0,92$  – для массы 500 хвоинок.

Помимо цинка и ванадия на параметры длины, площади и массы хвои 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 (рисунки 20-21).

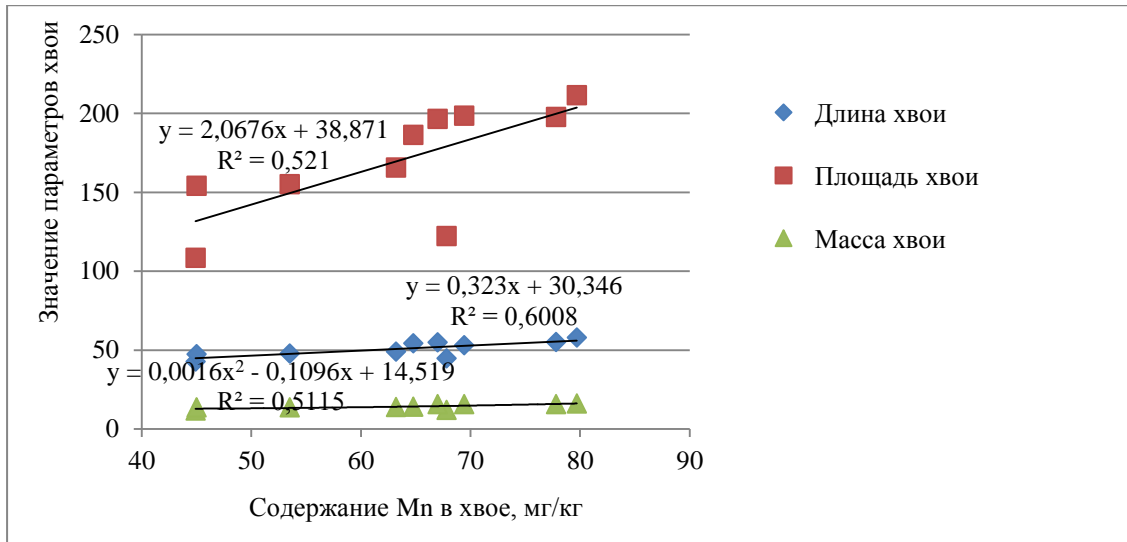


Рисунок 20 – Зависимость длины, площади и массы хвои от содержания Mn

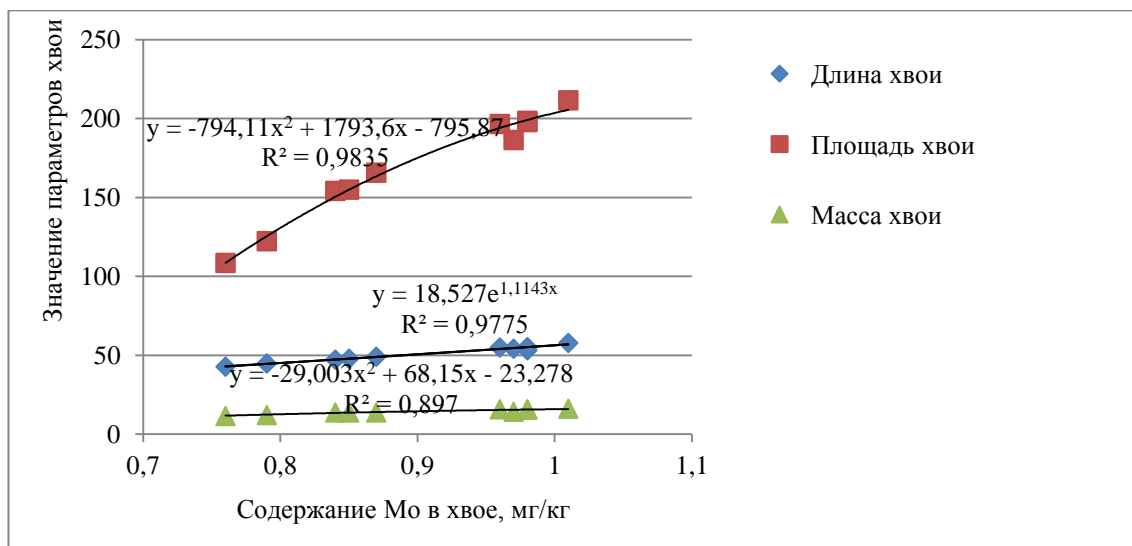


Рисунок 21 – Зависимость длины, площади и массы хвои от содержания Mo

Зависимости между содержанием марганца и молибдена в хвое и значениями длины, площади и массы хвои наиболее приближены к линейным и полиномиальным ( $n=2$ ), и являются корреляционными, о чем говорят небольшие величины достоверности аппроксимации. Приближение к функциональным характерно для зависимостей: содержание Mo в хвое – длина хвои и содержание Mo в хвое – площадь хвои. Марганец и молибден в установленных в хвое концентрациях являются элементами питания растений, а не загрязняющими (вредными) веществами и оказывают стимулирующее влияние на морфометрические параметры хвои сосны.

Содержание железа, никеля, кадмия, напротив, вызывает угнетение морфометрических параметров хвои (рисунки 22-24).

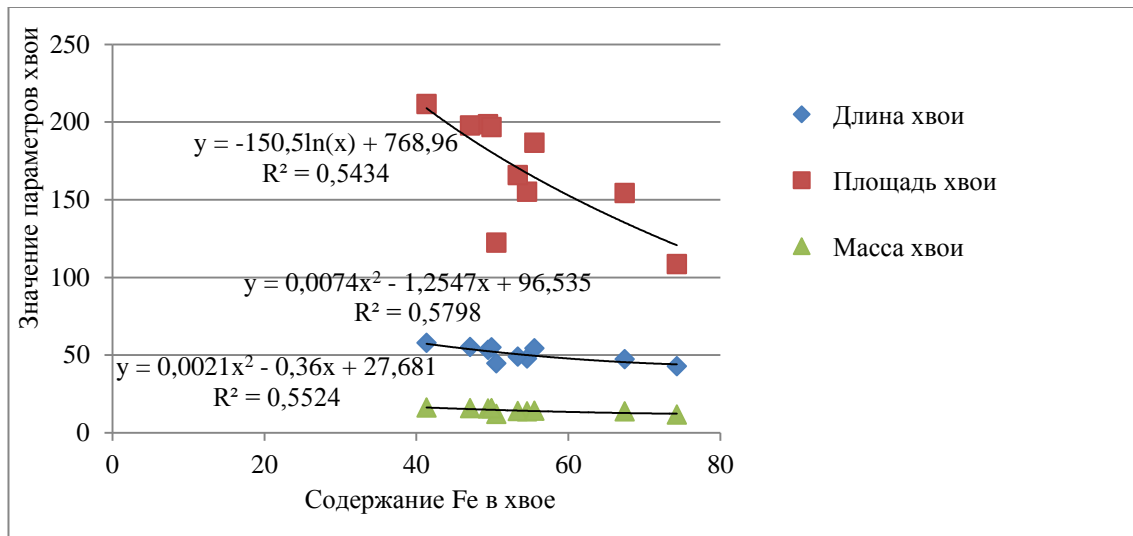


Рисунок 22 – Зависимость длины, площади и массы хвои от содержания Fe

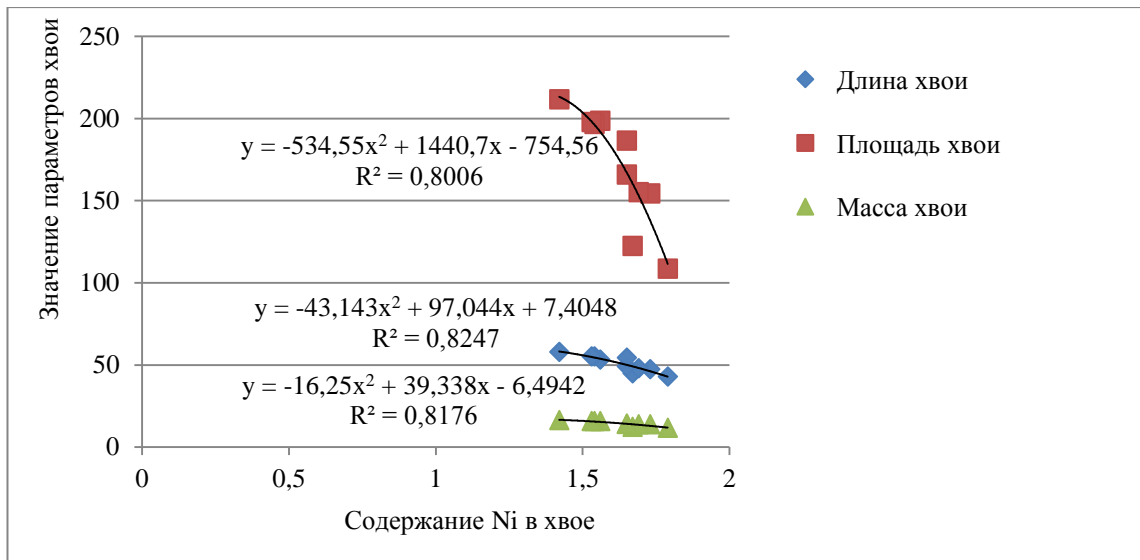


Рисунок 23 – Зависимость длины, площади и массы хвои от содержания Ni

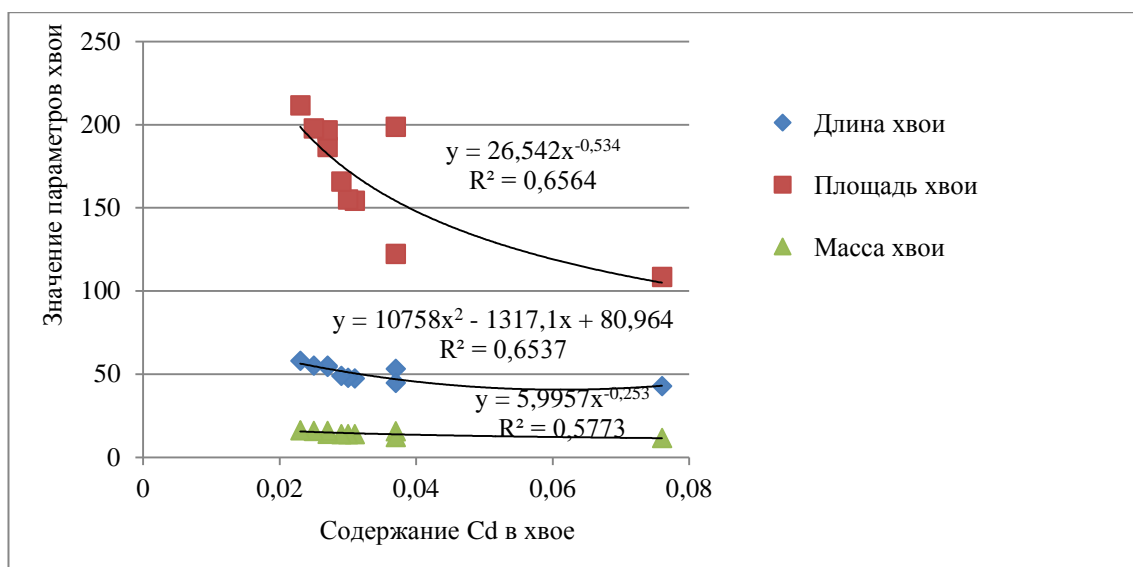


Рисунок 24 – Зависимость длины, площади и массы хвои от содержания Cd

Анализ величин  $R^2$  показал, что наиболее подходящими функциями для данных зависимостей является полиномиальная ( $n=2$ ), степенная и логарифмическая.

Содержание железа в хвое вносит вклад в угнетающее воздействие загрязняющих веществ на морфологические показатели хвои в целом, несмотря на то, что элемент является необходимым для растения, негативное воздействие, вероятно, обусловлено превышением нормальной концентрации микроэлемента на исследуемых пробных площадях вследствие поступления в лесную экосистему выбросов от источников негативного воздействия в виде окислов железа.

У нас отсутствуют данные, свидетельствующие о наличии выбросов никеля на крупных техногенных объектах в районе исследования. Содержание никеля в хвое на всем протяжении Минусинского бора и повышение его концентрации вблизи города свидетельствует о возможном влиянии иных техногенных объектов.

Зависимость между содержанием кадмия в хвое и изменением морфометрических характеристик не носит строго функционального характера, как и две предыдущие. Но стоит отметить значительные корреляционные связи, свидетельствующие о влиянии тяжелого металла на длину, площадь и массу хвои.

Содержание никеля и кадмия в хвое оказывает влияние на поражение хвои наряду с цинком, ванадием, свинцом и фтором (рисунки 25-26).

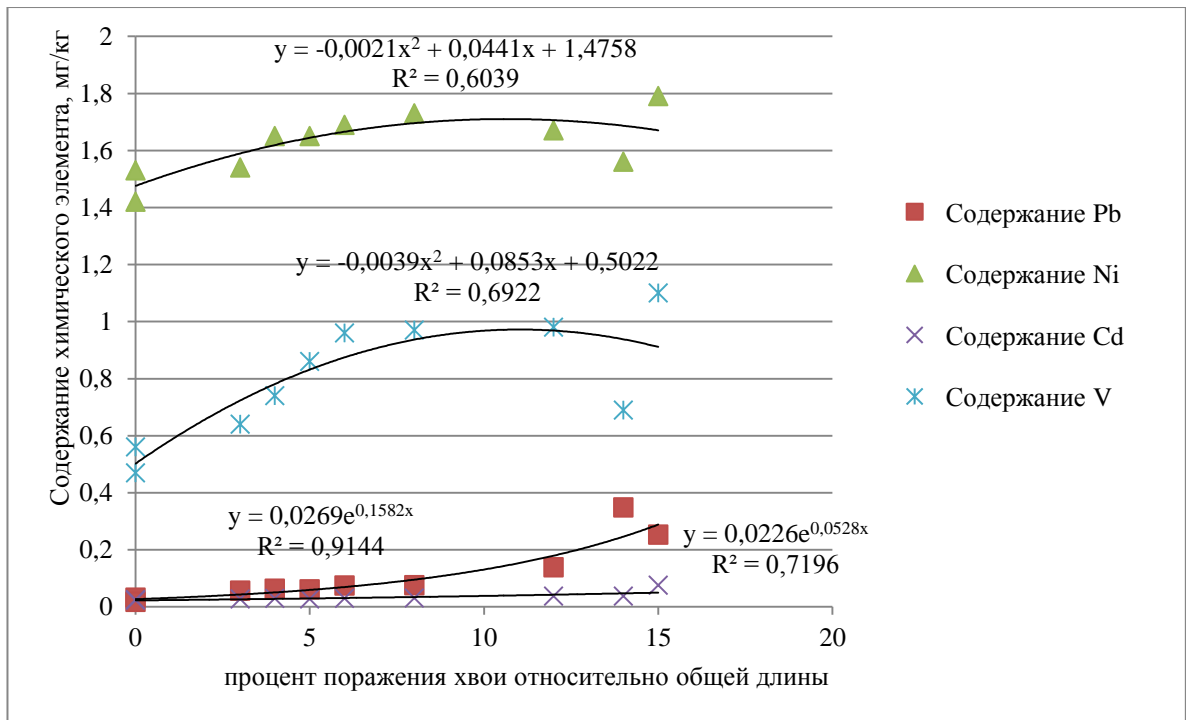


Рисунок 25 – Зависимость степени поражения хвои от содержания Pb, Ni, Cd, V

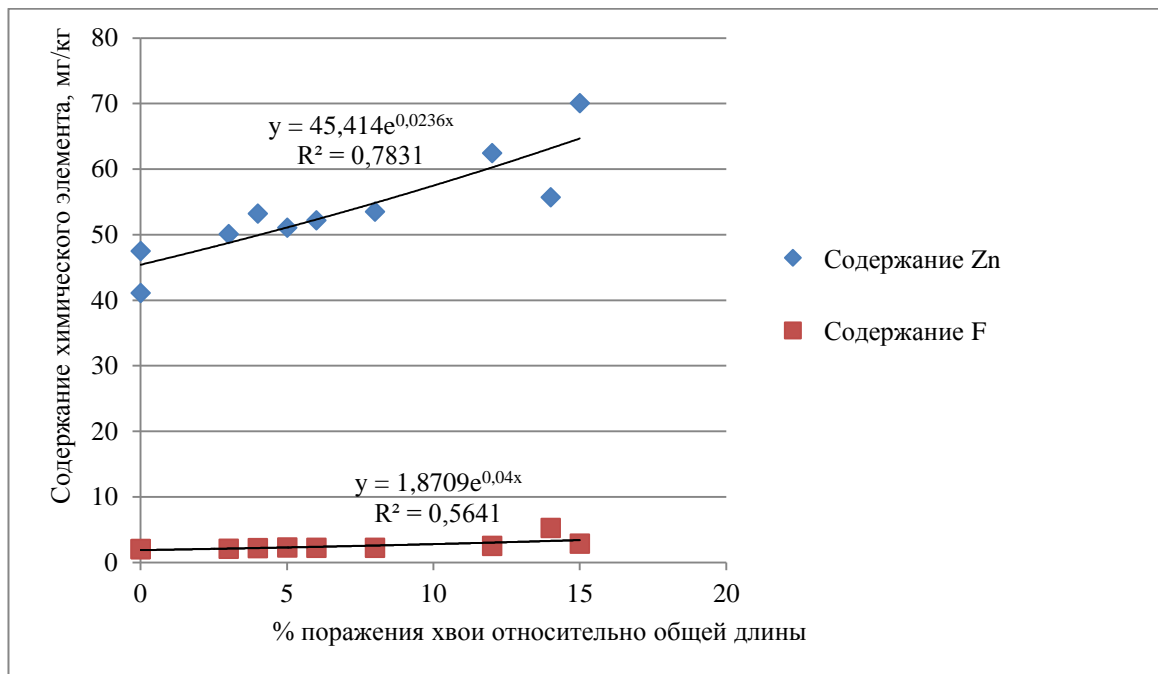


Рисунок 26 – Зависимость степени поражения хвои от содержания Zn, F

Наибольшее влияние на степень поражения хвои сосны оказывает содержание в ней свинца, цинка и кадмия. Воздействие цинка, как было описано ранее, связано с концентрацией элемента, вероятно, являющейся

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

Содержание фтора и никеля также оказывает воздействие, но 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 – АО «РУСАЛ Саяногорск».

## 5.6 Заключение к главе 5

Максимальные показатели суммарного загрязнения хвои второго года жизни *Pinus sylvestris l.* 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 лесной подстилки выявлены на расстоянии до 22 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ. Загрязнение почвы и лесной подстилки обусловлено, главным образом, концентрациями свинца, фтора, кадмия, ртути, цинка, ванадия, мышьяка и меди.

Максимальные концентрации кадмия и свинца в хвое, почве и лесной 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. 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 0,50ДК. Содержание тяжелых металлов свинца и кадмия в хвое оказывает прямое влияние на степень поражения хвои

( $r=0,88$  (для Pb),  $r = 0,76$  (для Cd). Значительное угнетающее влияние кадмий оказывает на размеры хвои ( $r= -0,7$  (для длины и массы), ( $r= -0,73$  (для площади)).

Увеличение содержание фтора в хвое, почве и лесной 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. Фтор оказывает влияние на поражение хвои ( $r=0,67$ ).

Максимальные концентрации железа, цинка, меди, никеля и ванадия в хвое, почве и лесной подстилке, мышьяка в почве и лесной подстилке на лесных участках, расположенных на расстоянии до 22 км от ближайших источников выброса загрязняющих веществ обусловлены, вероятно, осаждением пылегазовых эмиссий, содержащих указанные элементы, выделяющиеся в окружающую среду в результате единого производственного процесса (сжигания органического топлива). Содержание ванадия оказывает большее отрицательное влияние на морфометрические параметры хвои в сравнении с железом и никелем ( $r=-0,91$  (для длины хвои),  $r=-0,92$  (для массы хвои),  $r=-0,9$  (для площади хвои),  $r=0,71$ (для % поражения хвои)). Содержание ванадия оказывает влияние и на значение интенсивности фотосинтеза хвои ( $r=-0,68$ ).

За последние 40 лет в почве бора в 1,2 раз возросло содержание цинка, концентрации элемента на отдельных пробных площадях достигают значений 0,83ОДК. Превышение концентрации цинка в хвое по отношению к почве может говорить о том, что хвоя поглощает цинк непосредственно из воздуха. Цинк оказывает влияние на исследованные физиологические параметры хвои ( $r = -0,64$  (для интенсивности фотосинтеза),  $r = 0,72$  (для водного дефицита). Корреляционный анализ показал влияние цинка и на все исследуемые морфологические параметры хвои ( $r=-0,87$  (для длины хвои), ( $r=-0,86$  (для массы хвои),  $r=-0,87$  (для площади хвои),  $r=0,88$  (для %

поражения хвои). Превышение нормальной (достаточной) концентрации микроэлемента цинка в хвое на пробных площадях, на расстоянии 10 и 16 км от источников выброса, является возможной причиной усыхания хвои.

Наши исследования, проведенные в 2015 году, показали, что за период с 1975 года, в почвах наблюдается увеличение содержания мышьяка в 2,3 раз и никеля в 3,6 раз, отдельные концентрации мышьяка превышают ОДК в 2,15 раз, никеля – в 1,2 раз. Превышение ориентировочно-допустимых концентраций меди на всех исследованных участках, включая фоновый, возможно обусловлено высоким содержанием элемента в материнских породах.

Содержание ртути в почвах и лесной подстилке исследуемых участков повсеместно превышает фоновое, что свидетельствует о техногенном пути поступления элемента в лесную экосистему, вместе с тем, из-за широкого распространения антропогенного загрязнения металлом на сегодняшний день фоновые уровни ртути в почвах и лесных подстилках нелегко оценить.

С удалением от источников выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух в компонентах лесной экосистемы снижается содержание большинства загрязнителей.



## 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, здесь 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 аккумулирующей 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* L. 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* L. снижается на 13,84%, а величина водного дефицита, напротив, возрастает на 56%. Растущий под воздействием техногенного загрязнения атмосферного воздуха водный дефицит хвои *Pinus*

*sylvestris* L., оказывает отрицательное влияние на интенсивность фотосинтеза хвои ( $r=-0,95$ ).

Воздействие аэротехногенного загрязнения приводит к росту содержания эфирного масла хвои *Pinus sylvestris* L. 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,  $\alpha$ -pinene на 54 %, может являться необходимость противодействия 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* L.

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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Адерихин, П.Г. Агрофизические свойства вскрышных пород Лебединского карьера КМА под естественной растительностью / П.Г. Адерихин, Н.Г. Решетов, В.Б. Джегерис // Рекультивация земель в СССР. Т.2. М., 1982. – С. 45-47.
2. Алексеев, В.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / В.А. Алексеев, Л.С. Доченжер // Лесоведение. – 1981. – № 5. – С. 64-70.
3. Алексеев, В.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / В.А. Алексеев. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. – 197 с.
4. Алешин, Е.П. Физиология растений / Е.П. Алешин, А.А. Пономарев. – М.: Агропромиздат, 1985. – 255 с.
5. Алифанова, Т.И. Полезащитные лесные полосы Минусинской степи / Т. И. Алифанова. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. – 93 с.
6. Алиханова, О.И. Микроэлементы в почвах некоторых районов Западного Памира / О.И. Алиханова, А.Н. Зырянова, В.В. Чербарь // Почвоведение. – 1977. – №11. – С. 54-61.
7. Аминов, П.Г. Биогеохимия тяжелых металлов при горнопромышленном техногенезе (на примере Карабашской геотехнической системы, Южный Урал): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук (25.00.09) / П. Г. Аминов. – Новосибирск, 2010. – 18 с.
8. Ангальт Е.М., Биологический анализ хвои, шишек и семян сосны обыкновенной в условиях городской среды / Е.М. Ангальт, Н.А. Жамурина // Известия Оренбургского государственного аграрного университета.– 2014. – № 3. – С. 156-158.
9. Андреев, Д.Н. Биоиндикация загрязнения воздушной среды по замедленной флуоресценции хлорофилла сосны обыкновенной / Д.Н. Андреев // Естественные науки. – 2013. – № 4. – С. 048-052.

10. Анисимов, А.П. Использование и охрана атмосферного воздуха: вопросы теории / А.П. Анисимов, Е.А. Бабайцева, Г.Л. Землякова // Современное право. – 2013. – № 3. – С. 60-66.
11. Аношкина, Л.В. Анализ воздействия техногенной нагрузки на городские насаждения / Л.В. Аношкина // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 4. – С. 109-111.
12. Анучин Н.П. Лесная таксация: учебник для вузов. – 5-е изд. доп. – М.: Лесная промышленность, 1982. – 552 с.
13. Арманд, А.Д. Модель воздействия промышленных загрязнений на лесной биоценоз / А.Д. Арманд, М.А. Ведюшкин, А.М. Тарко // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду / отв. ред. Д.А. Криволицкий. – М., 1987. – С. 291-296.
14. Армолайтис, К. Э. Состояние хвойных древостоев в зоне влияния Ионавского ПО «Азот» / К.Э. Армолайтис, М.В. Вайчис // Влияние промышленного загрязнения на лесные экосистемы и мероприятия по повышению их устойчивости. Каунас: Гирионис. – 1984. – С.72-73.
15. Артамонов, В.И. Растения и чистота природной среды / В.И. Артамонов. – М.: Наука, 1986. – 173с.
16. Архипов, И.А. Микроэлементы (ванадий и никель) в педосфере бассейна р. Катунь // И.А. Архипов, А.В. Пузанов, О.А. Ельчинова // Ползуновский вестник. – 2005. – № 4-2. – С. 163-167.
17. Асылбаев, И.Г. Концентрация токсичных химических элементов в почвах и растениях северо-восточного региона Республики Башкортостан / И.Г. Асылбаев, Р.Б. Яубасаров, Э. Фархшатова // Российский электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 269-273.
18. Афанасьева, Л.В. Элементный состав хвои и морфометрические параметры сосны обыкновенной в условиях атмосферного промышленного загрязнения в западном Забайкалье / Л.В. Афанасьева, В.К. Кашин, А.С. Плешанов, Т.А. Михайлова, Н.С. Бережная // Хвойные бореальной зоны. – 2004. – № 1-2. – С.112-119.

19. Афанасьева, Л. В. Влияние атмосферного промышленного загрязнения на сосновые леса бассейна реки Селенги : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Л.В. Афанасьева; Бурят. гос. ун-т. – Улан-Удэ, 2005. – 19 с.
20. Афанасьева, Л.В. Влияние промышленного загрязнения на накопление серы в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Юго-Западном Забайкалье / Л.В. Афанасьева, В.К. Кашин, Т.А. Михайлова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13. – № 3. – С. 461-467.
21. Бадмаева, С.Э. Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха городов Красноярского края / С.Э. Бадмаева, В.И. Циммерман // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2. – С. 27-32.
22. Базилевская, Л.И. Современные направления исследований проблемы кислотных дождей / Л.И. Базилевская, Н.Б. Антонова // Проблемы ОС и природных ресурсов. – 1990. – № 2. – С. 51-73.
23. Байдина, Н.Л. Загрязнение городских почв и огородных культур ТМ / Н.Л. Байдина // Агрехимия. – 1995. – №12. – С.99-104.
24. Байдина, Н.Л. Содержание и формы ртути в почвах южной части западной Сибири / Н. Л. Байдина // Агрехимия – 2001. – № 11. – С. 59 -63.
25. Баранова, Л.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях вокруг ТЭЦ г. Тюмени / Л.А. Баранова, И.В. Дмитренко // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. – 2013. – № 3 (22). – С. 19-22.
26. Барахтенова, Л.А. Влияние сернистого газа на фотосинтез растений / Л.А. Барахтенова, В.С. Николаевский. – Новосибирск: Наука, 1988. – 86 с.
27. Барахтенова, Л.А. Влияние поллютантов на обмен веществ и состояние сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения: автореф. дисс. ...д-ра биол. наук. – Новосибирск, 1993. – 34 с.
28. Бардышев, И.И. О химическом составе живицы, продуцируемой индивидуальными деревьями вида сосны обыкновенной / И.И. Бардышев, А. Н. Булгаков, Б.Г. Ударов // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1978. – № 1. – С. 117-121.

29. Баскакова, Е.А. Подходы к использованию хвойных пород как индикаторов качества окружающей среды урбоэкосистем / Е.А. Баскакова (Дейнега), О.А. Савватеева // Электронное научное издание «ГЕОразрез». – 2009. – №2. – Режим доступа: [http://www.georazrez.ru/download/2009/04/BaskakovaKhvoynye\\_porody\\_kak\\_in\\_dikator\\_kachestva\\_okruzhayushey\\_sredy\\_urboekosistem.pdf](http://www.georazrez.ru/download/2009/04/BaskakovaKhvoynye_porody_kak_in_dikator_kachestva_okruzhayushey_sredy_urboekosistem.pdf).

30. Баскакова, С.И. Надзор за исполнением законодательства об охране атмосферного воздуха / С.И. Баскакова, С.Н. Гаджикурбанов // Законность. – 2009. – № 10. – С. 9-12.

31. Батовская, Е.К. Экотоксикологические аспекты загрязнения почв Прикаспийской низменности тяжелыми металлами / Е.К. Батовская, Н.А. Черных, В.П. Зволинский, В.П. Зволинский // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 6. – С. 100-109.

32. Башмаков, Д.И. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений / Д.И. Башмаков, А.С. Лукаткин. – Саранск: Мордов. ун-т, 2009. – 236 с.

33. Бекетов, В.Е. Рассеивание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и методики расчета приземных концентраций / В.Е. Бекетов, Г.П. Евтухова, Ю.Л. Коваленко. Конспект лекций. – Х.: ХНАГХ, 2011. – 74 с.

34. Белоусов, М.В. Влияние свинца и выбросов автотранспорта на сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris* L.) по данным цитогенетического анализа / М.В. Белоусов, О.С. Машкина, Е.Ю. Пардаева, Е.А. Зеленина, В.Н. Попов. – Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2013. – № 28. – С. 13-19.

35. Белоусова, Ю.С. Состояние меди и цинка в системе «почва-растение» в условиях загрязнения: автореферат дис. ... канд. биол. наук. – Москва, 2013. – 25 с.

36. Белюченко, И.С. Вопросы защиты почв в системе агроландшафта / И.С. Белюченко // Политематический сетевой электронный научный журнал

Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 95. – С. 232-241.

37. Бережная, Н. С. Трансформация сосновых лесов Верхнего Приангарья, загрязняемых фторсодержащими эмиссиями: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Иркутск, 2005. – 19 с.

38. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.

39. Бессолицына, Е.П. Экологический контроль за изменением биотических компонентов степных геосистем в условиях техногенной геохимической аномалии / Е.П. Бессолицына // Аридные экосистемы. – 2009. – Т. 15. – № 38. – С. 63-73.

40. Бобкова, К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского северо-востока / К.С. Бобкова. – Л.: Наука, 1987. – 156 с.

41. Боболева, Э.Е. Водно-физические свойства почв в сосняках Лугавского ленточного бора / Э.Е. Боболева // Агрофизические исследования почв Средней Сибири. – Красноярск: ИЛИД, 1975. – С.56-62.

42. Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок / Л.Г. Богатырев // Почвоведение. – 1990. – № 3. – С. 118-127.

43. Богатырев, Л.Г. Образование подстилок – один из важнейших процессов лесных экосистемах / Л.Г. Богатырев // Почвоведение. – 1996. – № 4. – С. 501-511.

44. Богданов, В.Ф. Проблемы охраны атмосферного воздуха от выбросов мусоросжигательных заводов / В.Ф. Богданов // Вологдинские чтения. – 2004. – № 46-2. – С. 39-40.

45. Большаков, В.А. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах / В.А. Большаков // Почвоведение. – 2002. – №7. – С.844-849.

46. Большаков, В.А. Методические рекомендации по оценке загрязненности городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами / В.А. Большаков, Ю.Н. Водяницкий, Т.И. Борисочкина, З.Н. Кахнович, В.В. Мясников. – Москва: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. – 1999. – 32 с.



47. Большаков, Н.М. Инновационные основы системного развития регионального лесного сектора экономики: методология, технологии, механизмы: монография / Н. М. Большаков [и др.]. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2015. – 312 с.

48. Бородкина, Т.А. Состояние и охрана атмосферного воздуха в Каменском районе Воронежской области / Т.А. Бородкина, Е.И. Ткачёва // Территория науки. – 2014. – Т. 5. – № 5. – С. 75-77.

49. Брукс, Р.Р. Загрязнение микроэлементами // Химия окружающей среды: Пер. с англ. / Под ред. А.П. Цыганкова. М.: Химия, 1982. – С. 371-413.

50. Бурлаченко, О.В. Анализ рассеивания выбросов в атмосферу строительных производств // О.В. Бурлаченко, Н.В. Мензелинцева, И.В. Кабаева // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 25. – С. 246-248.

51. Бухарина, И.Л. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде: монография / И.Л. Бухарина, Т.М. Поварнищина, К.Е. Ведерников. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007. – 216 с.

52. Ваганов, Е.А. Современные проблемы экологии леса и особенности подготовки лесоведов-экологов на биологических факультетах университетов / Е.А. Ваганов, Е.Н. Муратова, В.Б. Круглов // Вестник КрасГУ. – 2005. – С. 55-62.

53. Валетова, Е.А. Влияние техногенного загрязнения на репродуктивную способность сосны обыкновенной: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Е.А. Валетова. – Барнаул, 2009. – 19 с.

54. Васильев, А.А. Тяжелые металлы в почвах города Чусового: оценка и диагностика загрязнения: монография. / А.А. Васильев, А.Н. Чашин. – Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2011. – 197 с.

55. Васильева, Н.П. Мониторинг северотаежных лесов для оценки экологической ситуации при аэротехногенном загрязнении в субарктическом

регионе / Н.П. Васильева // Стратегия устойчивого развития регионов России. – 2015. – № 26. – С. 94-108.

56. Вахнина, И.Л. Влияние загрязнения снегового и почвенного покровов в зеленой зоне г. Читы на прорастание семян сосны обыкновенной / И.Л. Вахнина, Л.В. Замана // Лесоведение. – 2013. – № 2. – С. 38-44.

57. Верихов, Б.В. Гигиеническая оценка химического воздействия на состояние костно-мышечной системы у детей в промышленных городах Пермской области: автореф. ... дис. канд. мед. наук. (14.00.07) / Б.В. Верихов; Пермь, 2007. – 27 с.

58. Вишнякова, С.В. Влияние степени загрязнения выбросами автотранспорта на параметры хвои ели сибирской различных морфологических форм / С.В. Вишнякова, Л.И. Аткина, Т.Н. Фролова // Леса России и хозяйство в них. – 2008. – Вып. 1. – С.80-84

59. Владыкина, Д.С. Мониторинг состояния еловых насаждений г. Минска на основе терпеноидного состава эфирных масел / Д.С. Владыкина, С.А. Ламоткин // Вестник ИрГСХА. – 2011. – Т. 6. – № 44. – С. 42-49.

60. Водолажский, А.Н. Определение величин снижения лесного рекреационного ресурса в связи с техногенным влиянием / А.Н. Водолажский, М.Т. Сериков // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 4 (12). – С. 70-76.

61. Водяницкий, Ю.Н. Об опасных тяжелых металлах / металлоидах в почвах / Ю.Н. Водяницкий // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2011. – № 68. – С. 56-82.

62. Волкова, В. Г. Современное состояние степей Минусинской котловины: научное издание / В.Г. Волкова, Б.И. Кочуров, Ф.И. Хакимзянова. – Новосибирск: Наука, 1979. – 94 с.

63. Воробейчик, Е.Л. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень) / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов. – Екатеринбург: наука, 1994. – 280 с.

64. Воробейчик, Е.Л. Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения / Е.Л. Воробейчик // Экология. – 1995. – № 4. – С. 278-284.

65. Воробейчик, Е.Л. Микромасштабное пространственное варьирование фитотоксичности лесной подстилки / Е.Л. Воробейчик, В.Н. Позолотина // Экология. – 2003. – №6. – С. 420-427.

66. Ворон, В.П. Воздействие загрязнения атмосферы на сосновые леса восточного Донбасса / В.П. Ворон, Т.Ф. Стельмахова, И.М. Коваль // Лесоведение. – 2000. – № 1. – С. 46-50.

67. Воскресенская, О.Л. Физиология растений: Учебное пособие / О.Л. Воскресенская, Н.П. Грошева, Е.А. Скочилова. – Йошкар-Ола: Изд-во Мар. гос. ун-та, 2008. – 148 с.

68. Второва, В. Н. Влияние промышленных выбросов на растительный покров северных лесных экосистем / В.Н. Второва, Н.И. Пиявченко // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. – М., 1987. – С. 143-147.

69. Второва, В.Н. Концентрации химических элементов в растениях и почве и оценка состояния лесных экосистем / В.Н. Второва, Л.Б. Холопова // Лесоведение. – 2009. – № 1. – С. 11-17.

70. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Электронный ресурс). М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – 2014. – 1008 с. Режим доступа: [http://downloads.igce.ru/publications/OD\\_2\\_2014/v2014/htm/](http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/)

71. Выборов, С.Г. Оценка степени опасности загрязнения почв по комплексному показателю нарушенного геохимического поля / С.Г. Выборов, А.И. Павелко, В.Н. Щукин, Э.В. Янковская // Современные проблемы загрязнения почв: межд. научная конф. – М., 2004. – С. 195-197.

72. Вяйзенен, Г.Н. Мониторинг тяжелых металлов и радионуклидов в природных экосистемах / Г.Н. Вяйзенен, А.И. Токарь // Пищевые ресурсы

дикой природы и экологическая безопасность населения: материалы Междунар. конф., 16-18 ноября 2004 г., Киров: ВНИИОЗ, 2004. –221с.

73. Габитов, Р.Х. Теоретические проблемы правовой охраны атмосферного воздуха / Р.Х. Габитов // Пробелы в российском законодательстве. – 2008. – № 1. С. – 183-184.

74. Габович, Р.Д. Фтор и его гигиеническое значение / Р.Д. Габович. – М.: Медгиз, 1957. – 250 с.

75. Гавлина, Г.Б. Климат Минусинской впадины / Г.Б. Гавлина // Тр. Южно-Енисейской компл. экспедиции. – М., 1954. – Вып. 3. – С. 5-71.

76. Гаджиев, А.А. О санитарно-гигиенических показателях атмосферного воздуха, обуславливающих безопасность загрязнения земельных ресурсов / А.А. Гаджиев // Аридные экосистемы. –2013. – Т. 19. – № 1 (54). – С. 78-83.

77. Гайдукова, Н.Г. О возможности чернозема выщелоченного Кубани инактивировать особо опасные тяжелые металлы / Н.Г. Гайдукова, Н.А. Кошеленко, И.И. Сидорова, И.В. Шабанова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2010. – № 61. – С. 299-313.

78. Галибина, Н.А. Содержание углеводов в хвое сосны обыкновенной в условиях стресса / Н.А. Галибина, Т.А. Сазонова, Л.А. Чиненова // Экологический мониторинг лесных экосистем. Тезисы докладов Всероссийского совещания. Петрозаводск. – 1999. – С. 74.

79. Галибина, Н.А. Функциональная активность клеточной стенки хвои сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения / Н.А. Галибина, Е.Н. Терехова // В сборнике: Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды. Материалы Международной конференции. – 2011. – С. 29-31.

80. Гаранина, Н.С. Биогеохимическая характеристика луговых сообществ подмосковной мещеры: автореф. дисс. ... канд. биол. наук

(03.00.16) / Н.С. Гаранина ; Калуж. гос. пед. ун-т им. К. Э. Циолковского. – Москва, 2001. – 31 с.

81. Герасимова, М.И. Мелкомасштабные карты геохимических барьеров / М.И. Герасимова, М.Д. Богданова // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – С. 9-17.

82. Гераськина, Н.П. Биоиндикационная оценка устойчивости лесных экосистем к промышленному загрязнению среды / Н.П. Гераськина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2007. – № 1. – С. 61-65.

83. Гирс, Г.И. Физиология ослабленного дерева / Г.И. Гирс. – Новосибирск: Наука, 1982. – 255 с.

84. Гладкова, Н. С. Статистическая оценка пространственного варьирования содержания ртути в поверхностных горизонтах лесных почв / Н. С. Гладкова, М. С. Малинина // Почвоведение. – 1999. – №10. – С. 1265-1272.

85. Глазовская, М.А. Земельные ресурсы мира, их использование и охрана / М.А. Глазовская. – М.: Лига, 1978. – 150 с.

86. Голованов, Н.В. О подходах к охране атмосферного воздуха на Астраханском газоконденсатном месторождении / Н.В. Голованов, В.Н. Чертов, В.П. Спицин // Геология, география и глобальная энергия. – 2006. – № 1. – С. 46-48.

87. Головкин, Т. К. Дыхание растений (физиологические аспекты) / Т. К. Головкин. – СПб.: Наука, 1999. – 204 с.

88. Голубничий, А.А. Динамика загрязнения атмосферного воздуха города Черногорска // А.А. Голубничий, Т.С. Литюк, П.А. Тюкалов // Universum: химия и биология. – 2014. – № 2 (3). – С. 4.

89. Гольдфейн, М.Д., Безопасность жизнедеятельности. Курс лекций. Для студентов СГУ всех формы обучения / М.Д. Гольдфейн, Л.В. Гребенюк, М.В. Степанов. – Саратов, 2014. – 93 с.

90. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году». – М.: МПР РФ, 2015. – 473 с.

91. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году». – М.: Минприроды России; НИИ-Природа. – 2016. – 639 с.

92. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2015 году». – Абакан: Министерство промышленности и природных ресурсов, 2016. – 201 с.

93. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2015 году». – Красноярск: Министерство природных ресурсов и экологии Красноярского края. – 2016а. – 326 с.

94. Градобоева, Н.А. Фториды в почвах и растениях в радиусе действия Саяногорского алюминиевого завода [Хакасия] / Н. А. Градобоева, Л.П. Игнатенко, Н.В. Власова // Агрехим. вестн. – 2008. – № 5. – С. 4-7.

95. Грибков, А.М. Влияние выбросов Набережночелнинской ТЭЦ на приземный слой воздуха / А.М. Грибков, Д.С. Тюклин // Энергетика Татарстана. – 2010. – № 2. – С. 111-116.

96. Грибов, А.И. Об охране напочвенного покрова сосновых лесов Минусинской котловины / А.И. Грибов // Экология растений Средней Сибири. – Красноярск: ВБО, 1983. – С.9-10.

97. Грибов, А.И. Средообразующая роль лесных экосистем юга Средней Сибири: монография / А.И. Грибов. – А.: Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, 1997. – 160 с.

98. Грибов, А.И. Устойчивость лесов зеленых зон Хакасии и Минусинской котловины к хозяйственному воздействию /А.И. Грибов // Научная конференция, посвященная 100-летию плана В.В. Докучаева по борьбе с засухой и преобразования степей России. – Абакан: Изд-во ХГУ им. Н.Ф. Катанова, 2005. – С.18-25.

99. Григоренко, А.В. Влияние предприятия теплоэнергетики на селитебную территорию г. Минусинска / А. В. Григоренко // Экологические

проблемы промышленных городов: сб. науч. тр. по материалам 6-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Саратов, 2013. – Ч. 1. – С. 174-176.

100. Григоренко, А.В. Минусинский ленточный бор в условиях загрязнения неорганической пылью / А.В. Григоренко // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. – 2014. – № 1-3. Т.16. – С. 861-865.

101. Григоренко, А.В. Физиологические и морфологические показатели хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения / А.В. Григоренко // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4. – С. 15-19.

102. 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.

103. Григорьева, И.Г. Оценка влияния комплекса метеопараметров на рассеивание выбросов от стационарных источников загрязнения на примере территории города Нижнекамска / И.Г. Григорьева, Ю.А. Тунакова, Р.А. Шагидуллина, В.С. Валиев, О.Н. Кузнецова // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. № 15. – С. 268-270.

104. Гринь, С.А. Влияние соединений ванадия на окружающую среду / С.А. Гринь, П.В. Кузнецов, И.В. Питак // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6. – № 10 (60). – С. 9-12.

105. Гришина, А.В. Транслокация тяжелых металлов и приемы детоксикации / А.В. Гришина, В.Ф. Иванова // Агрехимический вестник. – 1997. – № 3. – С. 36-41.

106. Гудериан, Р. Загрязнение воздушной среды / Р. Гудериан. – М.: Мир, 1979. – 200 с.

107. Гусев, Н.Ф. К вопросу о содержании микроэлементов в сырье перспективных видов лекарственных растений Южного Предуралья / Н.Ф. Гусев, О.Н. Немерешина // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 12 (62). – С. 167-169.

108. Давыдова, Н.Д. Эколого-геохимическая оценка Братского и Саянско-Зиминского регионов / Н.Д. Давыдова // Экологический риск: анализ, оценка, прогноз. – Иркутск. – 1998. – С. 43-44.

109. Давыдова, Н.Д. Техногенные потоки и дифференциация веществ в геосистемах / Н.Д. Давыдова. – Географические исследования Сибири: в 5 т. Новосибирск: ГЕО, 2007. – Т. 2. – С. 261-277.

110. Данко, С.П. Оценка воздействия на окружающую среду на примере проектирования завода по производству сухих строительных смесей в Азовском районе Ростовской области / С.П. Данко, Л.А. Золотарева, Т.Н. Савускан, Т.Б. Гавриленко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11.– № 4 (55). – С. 588-591.

111. Денисова, Е. С. Озеленение санитарно-защитных зон нефтехимических предприятий Западной Сибири: монография / Е. С. Денисова. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 93 с.

112. Дмитриев, В.В. Прикладная экология: учебник для студентов высших учебных заведений / В.В. Дмитриев, А.И. Жиров, А.Н. Ласточкин. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 608 с.

113. Долгов, В.С. Охрана атмосферного воздуха в зоне крупных животноводческих объектов / В.С. Долгов // Ветеринария. – 2009. – № 8. – С. 45-46.

114. Долгова, Л.Г. Формы воды в растениях – показатели экологического состояния среды / Л.Г. Долгова // Вопросы биоиндикации и экологии. Межведомств. сб. научн. тр. – Запорожье. – 1997. – Вып. 2. – С. 115-120.



115. Дурнев, В.Ф. Климатообразующие процессы и их взаимодействие в условиях Минусинской котловины / В.Ф. Дурнев // Климат и воды Сибири. – Новосибирск: Наука. – 1980. – С. 59-76.

116. Егунова, Н.А. Мониторинг экологического состояния почв в зоне техногенного воздействия Саяногорского алюминиевого завода: автореф. дисс. ... канд. биол. наук (03.00.27) / Н.А. Егунова; Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова. – Красноярск, 2007. – 19 с.

117. Ершов, Г.Л. Оценка степени загрязнения снега вблизи автодорог с интенсивным движением автотранспорта / Г.Л. Ершов, Р.Г. Парасич // Вестник Омского государственного педагогического университета. – 2006. – № 41. – С. 5.

118. Загреев, В.В. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В.В. Загреев, В.И. Сухих, А.З. Щанденко и др. – М.: Колос, 1992. – 495 с.

119. Зайцев, Г.Н. Математический анализ биологических данных / Г.Н. Зайцев. – М.: Наука, 1991. – 184 с.

120. Залывская, О.С. Свинец в системе почва - древесное растение в урбанизированной среде / О.С. Залывская, С.В. Хрущева, Н.А. Бабиц // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2009. – № 1. – С. 39-43.

121. Замолодчиков, Д.Г. Лес и климат / Д.Г. Замолодчиков, К.Н. Кобяков, А.О. Кокорин, А.А. Алейников, Н.М. Шматков. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2015. – 40 с.

122. Замолодчиков, Д.Г. Система конверсионных отношений для расчета чистой первичной продукции лесных экосистем по запасам насаждений / Д. Г. Замолодчиков, А. И. Уткин // Лесоведение. – 2000. – № 6. – С. 54-63.

123. Захаров, В.М. [и др.]. Здоровье среды: методика оценки / В.М. Захаров. – М.: ЦЭПР, 2000. – 65 с

124. Здоровье среды: методика оценки / В.М. Захаров и др. – М.: ЦЭПР, 2000. – 65 с.

125. Знаменская, Т.И. Миграция и дифференциация поллютантов в степных ландшафтах Юга Минусинской котловины: автореф. дисс. ...канд. геогр. наук (25.00.23) / Т.И. Знаменская; Иркутск, 2015. –23 с.

126. Зоркина, Т.М. Мониторинг растительности засоленных лугов на основе наземных и спутниковых методов в условиях Койбальской степи (Хакасия) / Т.М. Зоркина, В.М. Жукова, Н.В. Кутькина, Е.Ю. Жукова, Н.А. Кононова // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева. – 2013. – № 3. – С. 229-234.

127. Евдокимова, Г.А. Биологическая активность почв в условиях аэротехногенного загрязнения на Крайнем Севере / Г.А. Евдокимова, Е.Е. Кислых, Н.П. Мозгова. – Л.: Наука, 1984. – 121 с.

128. Еремеева, В.Г. Водный режим растений в техногенной среде завода технического углерода / В.Г. Еремеева, Е.С. Денисова // Экология России: на пути к инновациям: межвузовский сборник научных трудов. Астрахань. – 2008. – С. 75-80.

129. Ермаков, Н.Б. Моделирование пространственной организации лесного покрова южной части Западного Саяна / Н.Б. Ермаков, К.С. Алсынбаев // Сибирский экологический журнал. – 2004. – Т. 11. № 5. – С. 687-702.

130. Ермаков, Н.Б. Ассоциации петрофитных степных сообществ из Алтае-Саянской горной области и сообщества *Selaginella sanguinolenta* Западного Саяна и Тувы / Н.Б. Ермаков, М.А. Полякова, А.Е. Сморгов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Биология, клиническая медицина. – 2009. – Т. 7. № 4. – С. 35-42.

131. Ермаков, Н.Б. Высшие синтаксоны настоящих и опустыненных степей Южной Сибири и Монголии / Н.Б. Ермаков // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Биология, клиническая медицина. – 2012. – Т. – 10. № 2. – С. 5-15.

132. Ерохин, Г.Н. Информационно-космические технологии для экологического анализа воздействий нефтедобычи на природную среду / Г.Н.

Ерохин, В.Н. Копылов, Ю.М. Полищук, О.С. Токарева // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2003. – № 71. – С. 1-98.

133. Есякова, О.А. Индикация загрязнения атмосферы Красноярска по морфометрическим и химическим показателям хвои ели сибирской / О.А. Есякова, Р.А. Степень // Химия растительного сырья. – 2008. – № 1. – С. 142-148.

134. Завьялов, К.Е. Состояние сосновых древостоев зелёной зоны г. Сатки, подверженных аэротехногенным выбросам магнезитового производства / К.Е. Завьялов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 6 (56). – С. 57-59.

135. Зайковская, Е.А. Аккумуляция свинца городскими растениями в условиях автотранспортной нагрузки / Е.А. Зайковская // Вестн. Ленингр. ун-та. – Л., 1980. – Вып. 3. – С. 29-37.

136. Закамская, Е.С. Изменение параметров ассимиляционных органов двух видов рода *Pinus* в зоне действия газоперерабатывающего завода / Е.С. Закамская // Вестник Марийского государственного университета. – 2014. – № 1 (13). – С. 15-18.

137. Залесов, С.В. Изменение морфометрических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэропромвыбросов / С.В. Залесов, А.В. Бачурина // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2008. – № 3. – С. 36-38.

138. Зиганшин, Р.А. Мониторинг лесных экосистем Таймыра / Р.А. Зиганшин, В.И. Воронин, Ю.М. Карбаинов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2011. – № 8. – С. 117-123.

139. Злотникова, О.В. Воздействие нефтепродуктов на состояние сосны обыкновенной в пригородной зоне поселка Кедровый Красноярского края / О.В. Злотникова, В.Н. Анпилогов, Л.А. Герасимова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2011. – № 12. – С. 160-164.

140. Зотикова, А.П., Сравнительная оценка структурно-функциональной организации листового аппарата хвойных растений на

территории г. Горно-Алтайска / А.П. Зотикова, О.Г. Бендер, Р.О. Собчак, Т.П. Астафурова // Вестник Томского государственного университета. – 2007. – № 299. – С. 197-200.

141. Ивакин, В.И. Юридическая ответственность за нарушение законодательства РФ об охране атмосферного воздуха / В.И. Ивакин // Аграрное и земельное право. – 2006. – № 9. – С. 69-78.

142. Иванов, А.А. Российское природоохранное законодательство и проблемы сохранения биологического разнообразия / А.А. Иванов // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2016. – Т. 25. № 2. – С. 93-140.

143. Иванов, В. В. Экологическая геохимия элементов / В.В. Иванов. – М.: Экология, 1996. – 352 с.

144. Иванов, Ю.В. Сосна обыкновенная как модельный объект для изучения механизмов адаптации хвойных к действию тяжелых металлов. 1. Изменение морфометрических и физиологических параметров при развитии сеянцев сосны в условиях хронического действия цинка / Ю.В. Иванов, Савочкин Ю.В., В.В. Кузнецов // Физиология растений. – 2011. – Т. 58. – № 5. – С. 728-736.

145. Иванова, Е.Ю. Оценка состояния атмосферного воздуха города Нововоронежа биологическими методами / Е.Ю. Иванова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2013. – № 1. – С. 157-162.

146. Игнатьева, О.В. Элементный состав хвои и морфофизиологические показатели сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях техногенного загрязнения: автореф. дис. ... канд. биол. наук (03.00.16) / О.В. Игнатьева; Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. – Красноярск, 2005. – 18 с.

147. Ильин, В. Б. Микроэлементы и тяжёлые металлы в почвах и растениях / В.Б. Ильин, А. И. Сысо. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.

148. Илькун, Г. М. Загрязнители атмосферы и растения / Г. М. Илькун. – Киев: Наукова думка, 1978. – 246 с.
149. Инструкция по экспедиционному лесопатологическому обследованию лесов СССР. – М.: Гослесхоз СССР, 1983. – 234 с.
150. Исаев, А.С. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России / А. С. Исаев [и др.] // Лесоведение. – 1993. – № 5. – С. 3-10.
151. Исмаилова, П.У. Проблемы совершенствования законодательства в области охраны атмосферного воздуха / П.У. Исмаилова // Пробелы в российском законодательстве. – 2008. – № 1. – С. 207.
152. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, – 1989. – 439 с.
153. Кадмий: экологические аспекты / ВОЗ. – М.: Медицина, 1994. – С.15-16.
154. Казнина, Н.М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства Роасеае к тяжелым металлам: дисс. ... д-ра биол. наук (03.01.05) / Н.М. Казнина; Ботанический институт им.В.Л.Комарова Российской академии наук. – Петрозаводск, 2016. – 358 с.
155. Кайгородова, С.Ю. Трансформация некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината / С.Ю. Кайгородова, Е.Л. Воробейчик // Экология. – 1996. – № 3. – С. 187-193.
156. Калабин, Г.В. Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в зоне влияния комбината «Североникель» в процессе снижения нагрузки на окружающую среду / Г.В. Калабин, Г.А. Евдокимова, В.И. Горный // Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 10-20.
157. Калманова, В.Б. Комплексная оценка функциональной значимости и экологического состояния дендрофлоры г. Биробиджан / Калманова В.Б. // Региональные проблемы. – 2005. – № 6-7. – С. 67-72.

158. Калугина, О.В. Сосна обыкновенная как биоиндикатор состояния техногенно загрязняемых лесных экосистем Байкальского региона / О.В. Калугина, Т.А. Михайлова, Е.Н. Тараненко // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1 (39). – С. 11-13.

159. Кананыкина, Е.С. Охрана атмосферного воздуха в законодательстве России и Канады / Е.С. Кананыкина // Журнал зарубежного законодательства и сравнительного правоведения. – 2012. – № 2. – С. 109-114.

160. Карелин, Д. В. К оценке запасов углерода в наземных экосистемах тундровой и лесотундровой зон Российского Севера: фитомасса и первичная продукция / Д. В. Карелин, Т. Г. Гильманов, Д. Г. Замолотчиков // Докл. Акад. наук. – 1994. – Т. 335, № 4. – С. 530-532.

161. Каримов, А.А. К вопросу о совершенствовании организационно-правовых форм охраны атмосферного воздуха / А.А. Каримов // Правовое государство: теория и практика. – 2013. – № 3 (33). – С. 170-175.

162. Кахраманова, Ш.Ш. О загрязнении атмосферы Апшеронского региона / Ш.Ш. Кахраманова // Градостроительство. – 2013. – № 1 (23). – С. 73-81.

163. Кашулина, Г.М. Физическая деградация и химическое загрязнение почв Северо-Запада Европы / Г.М. Кашулина, В.А. Чекушин, И.В. Богатырев // Современные проблемы загрязнения почв. II Межд. науч. конф. – М., 2007. – Т. 2. – С. 74-78.

164. Кизеев, А. Н. Влияние промышленных загрязнений на состояние ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на Кольском полуострове: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Петрозаводск, 2006. – 26 с.

165. Кизеев, А.Н. Влияние промышленных эмиссий предприятий Кольского полуострова на ассимиляционный аппарат сосны / А.Н. Кизеев, В.К. Жиров, А.Н. Никанов // Экология человека. – 2009. – № 1. – С. 9-14.

166. Кириченко, А.И. Качество воздуха в населенных пунктах Красноярского края / А.И. Кириченко, Л.А. Герасимова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1. – № 10. – С. 220-221.

167. Кирпичникова, Т.В. Состояние фотосинтетического аппарата хвои сосны и ели в зонах промышленного загрязнения при различных микроклиматических условиях / Т.В. Кирпичникова, С.А. Шавнин, А.А. Кривошеева // Физиология растений. – 1995. Т. 42. – № 1. – С. 107-113.

168. Ковалевская, Ю.О. Влияние КБ ТЭЦ и КБ Порты на современное состояние атмосферного воздуха Орджоникидзевского района / Ю.О. Ковалевская // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И Вернадского. География. Геология. – 2009. – Т. 22 (61). – № 2. – С. 221-229.

169. Ковригина, Л.Н. Хвойные породы в городской среде / Л.Н. Ковригина, Л.О. Петункина // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 44. – С. 73-80.

170. Ковылина, О.П. Оценка жизненного состояния сосны обыкновенной в зоне техногенного загрязнения / О.П. Ковылина, И.А. Зарубина, А.Н. Ковылин // Хвойные бореальной зоны. – 2008. Т. XXV. – № 3-4. – С. 284-289.

171. Колесников, С.В. Влияние вредных выбросов ТЭЦ на атмосферу / С.В. Колесников, Н.Ю. Долгих // В сборнике: Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» Материалы научно-практической конференции. Ответственный редактор М.В. Гравит. – 2015. – С. 191-194.

172. Колесников, С.И. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами / С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, В.Ф. Вальков // Почвоведение. – 2002. – № 12. – С. 1509-1514.

173. Коляго, С.А. Природные условия и почвенный покров правобережной части Минусинской впадины / С.А.Коляго // Почвы Минусинской впадины. –М.: Изд-во АН СССР, 1954. – С. 158-303.

174. Коляго, С.А. Правобережье Минусинской впадины. Опыт геоморфологического анализа в целях восстановления истории почвенного покрова. – М.: Наука, 1967. – 125 с.

175. Колясникова, Н.Л. Влияние аэротехногенного загрязнения на морфологические и эмбриологические признаки сосны обыкновенной / Н.Л. Колясникова, Т.Д. Карнажицкая, К.А. Паршакова // Вестник Удмуртского университета. – 2011. – № 6-2. – С. 31-35.

176. Колясникова, Н.Л. Изменчивость морфологических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения / Н.Л. Колясникова, К.А. Садакова // Научно-практический журнал Пермский аграрный вестник. – 2013. – № 4 (4). – С. 39-43.

177. Кондратюк, Е.Н. Промышленная ботаника / Е.Н. Кондратюк, В.П. Тарабрин, Р.И. Бурда и др. – Киев: Наукова думка, 1980. – 257 с.

178. Копцик, Г.Н. Трансформация и устойчивость почв лесных экосистем под воздействием атмосферного загрязнения: автореф. дисс. ... д-ра биол. наук (03.02.13) / Г. Н. Копцик. – Москва, 2012. – 46 с.

179. Копцик, Г.Н. Трансформация элементного состава растений лесных биогеоценозов северной тайги под воздействием атмосферного загрязнения / Г.Н. Копцик, С.В. Копцик, Д. Омлид // Вестник Московского университета. Сер. Почвоведение. – 1999. – № 3. – С. 37-49.

180. Копылова, Л.В. Оценка уровня загрязнения почв тяжёлыми металлами и интенсивность поглощения их древесными растениями / Л.В. Копылова // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2012. – № 1. – С. 70-75.

181. Корельский, Д.С. Мониторинг состояния почвенно-растительных комплексов, испытывающих стресс при аэротехногенной нагрузке / Д.С. Корельский // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2011. – № 9. – С. 42-47.

182. Коровин, Н.В. Изучение негативного влияния техногенного атмосферного загрязнения на лесные насаждения сосны обыкновенной и



разработка комплекса мероприятий по повышению их устойчивости, продуктивности и средозащитных функций (на примере Гомельского промышленного района): автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук (06.03.01) / Н. В. Коровин; Брян. гос. инж.-технол. акад. – Брянск, 2003. – 29 с.

183. Королев, А.А. Медицинская экология / А.А. Королев. – М.: Академия, 2003. – 189 с.

184. Королюк, А.Ю. Луговые степи Алтае-Саянской горной области. Общая характеристика / А.Ю. Королюк, Н.И. Макунина // Сибирский ботанический журнал. – 2000. – Т. 2. № 1. – С. 26-37.

185. Коротченко, И.С. Использование ассимиляционного аппарата ели сибирской для оценки состояния рекреационных зон г. Красноярска / Коротченко И.С. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-14. – С. 3102-3105.

186. Коршиков, И.И. Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды / И.И. Коршиков. – К.: Наук. думка, 1996. – 238 с.

187. Кочарян, К.С. Состояние озеленения улиц города Еревана и пути его улучшения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / К.С. Кочарян. – Минск, 1987. – 21 с.

188. Кравкина, И.М. Влияние атмосферных загрязнений на структуру листа / И.М. Кравкина // Ботанический журнал. – 1991. – №1. Т.76. – С. 3-9.

189. Крамер, П., Козловский Т. Физиология древесных растений / П. Крамер, Т. Козловский. – М., 1983. – 462 с.

190. Красная книга Красноярского края. В 2 т. Т. 2: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений и грибов / Н.В. Степанов, Е.Б. Андреева, Е.М. Антипова, А.Н. Васильев, М.П. Журбенко, А.И. Ирошников, О.Е. Крючкова, Г.В. Кузнецова, Н.П. Кутафьева, Д.И. Назимова, А.В. Пименов, Е.Б. Поспелова, Ю.А. Ребриев, А.Е. Сонникова, Н.Н. Тупицына, Г.П. Урбанавичюс, В.Э. Федосов, И.П. Филиппова, Д.Н. Шауло, С.С. Щербина, И.Е. Ямских; Отв. ред. Н.В.

Степанов; 2- изд., перераб. и доп.; Сибирский фед. ун-т. – Красноярск, 2012. – 576 с.

191. Кричко, А.А. Газификация угля – эффективный метод защиты окружающей среды / А.А. Кричко, И.И. Черненко, Т.В. Агеева // Уголь. – 1990. – № 2. – С. 7-10.

192. Крючков, В.А. Физиология растений с основами биохимии / В.А. Крючков. – Свердловск, 1989. – 115 с.

193. Крючков, В.А. Летучие метаболиты древесных растений / В.А. Крючков // Проблемы восстановления лесов на Урале. Екатеринбург. – 1992. – С. 5-7.

194. Крючков, В.А. Летучие метаболиты растений среднего Урала / В.А. Крючков, В.В. Озорнина // Леса России и хозяйство в них. – 2010. – № 36-2. – С. 42-51.

195. Кузьмина, Э.О. Охрана атмосферного воздуха в Орловской области / Э.О. Кузьмина, С.В. Резвякова // Russian Agricultural Science Review. – 2015. Т. 5. – № 5-1. – С. 111-113.

196. Курбатов, И.А. Анализ причин повышенного уровня загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха в районе котельной № 2 (с. Усть-Тарка) / И.А. Курбатов // В сборнике: Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых материалы Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 75-79.

197. Кусковский, В.С. Минеральные озера Сибири (Юг Красноярского края) / В.С. Кусковский, А.С. Кривошеев. – Новосибирск: Наука. – 1989. – 200.

198. Лавриненко, Е. А. Содержание и техногенное накопление фтора в почве и растениях на пастбище в трех и пяти километрах от Саяногорского алюминиевого завода [Хакасия] / Е. А. Лавриненко // Экология Юж. Сибири и сопред. территорий. – 2007. – Вып. 11, т. 2. – С. 25.

199. Лазаренков, А.М. Рассеивание выбросов вредных веществ от источников литейных цехов в окружающей среде / А.М. Лазаренков, С.А. Хорева // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 76-78.

200. Лакин, Г.Ф. Биометрия. Учебник для вузов. 4-е издание / Г.Ф. Лакин. – М.: Высшая школа. 1990. – 352 с.

201. Ламоткин, С.А. Влияние техногенных выбросов и радиоактивного загрязнения на состояние хвойных лесов Беларуси / С.А. Ламоткин, Е.Д. Скаковский, Л.Ю. Тычинская, С.И. Шпак, О.А. Гайдукевич, С.В. Рыков, О.В. Черняк, А.В. Воронин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 2. – С. 108-115.

202. Лебедева, А.Н. Природоохранное законодательство развитых стран: Аналит. обзор / А.Н. Лебедева, О.Л. Лаврик. – РАН. Сиб. отд-ние. ГПНТБ. В 3 ч. Ч. 2. Защита окружающей среды от загрязнения: методы контроля и регулирования. – Новосибирск, 1992. – 360 с.

203. Лебедева, Е.В. Микромицеты почв в окрестностях комбината цветной металлургии на Кольском полуострове / Е.В. Лебедева // Микология и фитопатология. – 1993. – Т.27. – вып. 1. – С.12-17.

204. Лесная энциклопедия: В 2-х т. / Гл.ред. Воробьев Г.И.; Ред.кол.: Анучин Н.А., Атрохин В.Г., Виноградов В.Н. и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1985. – 563 с.

205. Лесоводство и таксация леса: электронный учебно-методический комплекс дисциплины «Б.2.В.6 Лесоводство и таксация леса», направление подготовки: 250400.62 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» / сост.: О.С. Дядченко. – Благовещенск: ДГАУ, 2013. – 274 с.

206. Лесохозяйственный регламент Минусинского лесничества, утвержден приказом министерства природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края от 22.12.2008 № 115-о. – 81 с.

207. Лозановская, И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / И.Н. Лозановская, И.Н. Орлов, Л.К. Садовникова. – М.: Высш. шк., 1998. – 287 с.

208. Лосев, К. С. Фундаментальные причины неустойчивого использования ресурсов / К. С. Лосев, И. И. Потапов, И. В. Чеснокова // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов : обзор. информ. – 2009. – № 6. – С. 3.12.

209. Луганский, Н.А. Лесоведение: учебн. пособие / Н.А. Луганский, С.В. Залесов, В.Н. Луганский. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2010. – 432 с.

210. Лукина, Н.В. Типизация лесных экосистем в условиях техногенного загрязнения / Н.В. Лукина, В.В. Никонов // Эколого-географические проблемы Кольского Севера. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1992. – С. 8-20.

211. Лукина, Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения: В 2 ч. Апатиты, 1996. – Ч. 1. – 213 с.; Ч. 2. – 192 с.

212. Лукина, Н.В. Структура и запасы фитомассы напочвенного покрова хвойных лесов Кольского полуострова в условиях промышленного воздушного загрязнения / Н.В. Лукина, В.В. Никонов, Е.В. Смирнова // Известия РАН, сер. географ. – 1999. – № 3. – С. 77-86.

213. Лукина, Н.В. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах / Н.В. Лукина, Т.А. Сухарева, Л.Г. Исаева. – М.: Наука, 2005. – 245 с.

214. Ляшенко, Г.М. Загрязнение почв и растений свинцом в придорожных агроценозах чернозема обыкновенного приазовской зоны Ростовской области: автореф. дисс. ... канд. сельскохозяйств. наук / Г.М. Ляшенко; Дон. гос. аграр. ун-т. – п. Персиановский, 2007. – 26 с.

215. Максаковский, В.П. Географическая карта мира. Ч. 3. / В. П. Максаковский. – Ярославль, 1996. – 160 с.

216. Макунина, Н.И. Степи Минусинских котловин / Н.И. Макунина // Turczaninowia. – 2006. – Т. 9. – № 4. – С. 112-144.

217. Малахова, Е.С. Газоустойчивость и аккумуляционная способность растений в техногенной среде нефтехимических предприятий Западной Сибири: (на примере ОАО «Техуглерод»): автореф. дис. ... канд. биол. наук / Е.С. Малахова; Ом. гос. пед. ун-т. – Омск, 2004. – 17 с.

218. Маркин, С.В. Вопросы правовой охраны атмосферного воздуха в РФ / С.В. Маркин, Е.Е. Белоусова, О.П. Лыков, А.Ю. Недре, А.Г. Дедов // Нефть, газ и бизнес. – 2009. – № 7-8. – С. 88-90.

219. Мартынюк, А.А. Сосновые экосистемы в условиях аэротехногенного загрязнения / А.А. Мартынюк. Монография. – М.: ВНИИЛМ, 2004. – 160 с.

220. Мартынюк, З.П. Оценка баланса углерода лесного фитоценоза / З.П. Мартынюк, К.С. Бобкова, В.В. Тужилкина // Физиология растений. – 1998. – Т. 45. – С. 914-918.

221. Махатков, И.Д. Ассоциация олиготрофных сосновых лесов (*Pinetum sibiricae-sylvestris*) подзоны северной тайги Западно-Сибирской равнины / И.Д. Махатков, Н.Б. Ермаков // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Биология, клиническая медицина. – 2010. – Т. 8. – № 3. – С. 152-159.

222. Медведев, А.В. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в Тюменской области / А.В. Медведев, Л.М. Пилипенко // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 259.

223. Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов СССР. – М.: Пущине, ВНИИЛМ, 1987. – 45 с.

224. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – М.: ЦИНАО, 1992. – 31 с.

225. Методические указания по ионометрическому определению содержания фтора в растительной продукции, кормах и комбикормах. –М.: ЦИНАО, 1995. – 10 с.

226. Методические указания МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест». Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 07.02.1999.

227. Миляева, Л.С. Восточный Саян / Л.С. Миляева // Рельеф Алтае-Саянской горной области. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 120-146.

228. Миронов, О. А. Влияние диоксида азота на лесные посадки городов Южного Урала Миронов / О.А. Миронов, Н.Л. Коробова // Лесное хозяйство.– 2004. – № 4. – С. 27-28.

229. Михайлова, Т.А. Эколого-физиологическое состояние лесов, загрязняемых промышленными эмиссиями: автореферат дис. ... док-ра биол.наук (03.00.16) / Т. А. Михайлова. – Иркутск, 1997. – 48 с.

230. Михайлова, Т. А. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения: научное издание / Т. А. Михайлова, Н. С. Бережная, О. В. Игнатьева // Сиб. ин-т физиол. и биохим. растений СО РАН. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006. – 134 с.

231. Михайлова, Т.А. Тренды содержания химических элементов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в разных условиях произрастания и при техногенной нагрузке / Т.А. Михайлова, О.В. Калугина, Л.В. Афанасьева, О.И. Нестеренко // Сибирский экологический журнал. – 2010. – Т. 17. – № 2. – С. 239-247.

232. Михайлова, Т.А., Фитомониторинг атмосферного загрязнения в Байкальском регионе / Т.А. Михайлова, О.В. Калугина, О.В. Шергина // Сибирский экологический журнал. – 2013. – Т. 20. № 5. – С. 725-731.

233. Мокроносов, А.Т. Малый практикум по физиологии растений / А.Т. Мокроносов. – М.: МГУ, 1994. – 184 с.

234. Молчанов, А.А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон / А.А. Молчанов. – М.: Наука, 1971. – 275 с.

235. Молчанов, А. Г. Баланс CO<sub>2</sub> в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах / А. Г. Молчанов. – Тула: Гриф и К, 2007. – 284 с.

236. Морозов, А.Е. Состояние кедровых лесов Среднего Приобья под воздействием интенсивной нефтедобычи // А.Е. Морозов, С.В. Залесов, Е.А. Зотеева, А.П. Петров, А.В. Капралов, Л.М. Морозова // Альманах современной науки и образования. – 2007. – № 6. – С. 77-82.

237. Морозова, Г.Ю. Растения в урбанизированной среде / Г.Ю. Морозова. –Хабаровск: Изд-во ХГТУ. – 2003. – 104 с.

238. Мотылева, С.М. О накоплении тяжелых металлов в листьях и плодах различных сортов черной смородины в зависимости от фазы вегетации / С. М. Мотылева, М.В. Соснина // С.-х. биология. Сер. Биология растений. – 1996. – № 1.– С. 67-71.

239. Мохначев, П.Е. Использование показателей качества семян сосны обыкновенной для биоиндикации аэротехногенного загрязнения среды / П.Е. Мохначев, С.Г. Махнева, А.М. Потапенко, И.Е. Корчагин // В сборнике: Физиологические, педагогические и экологические проблемы здоровья и здорового образа жизни сборник научных трудов IX Всероссийской научно-практической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации. – 2016. –С. 227-230.

240. МУ 5178-90 «Методические указания по обнаружению и определению содержания общей ртути в пищевых продуктах методом беспламенной атомной абсорбции». – М., 1990, – 11 с.

241. Назлуханов, Д.В. Угрозы международной экологической безопасности: к постановке проблемы / Д.В. Назлуханов // Актуальные вопросы современной науки. – 2015. – № 44-1. – С. 20-29.

242. Настинова, Г.Э. Влияние загрязнения атмосферного воздуха взвешенными веществами на состояние здоровья населения республики

Калмыкия / Г.Э. Настинова, Д.А. Емельяненко // Геология, география и глобальная энергия. – 2013. – № 4 (51). – С. 112-122.

243. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 21. Книга 2. Красноярский край, Тувинская АССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 408 с.

244. Неверова, О.А. Биоэкологическая оценка загрязнения атмосферного воздуха по состоянию древесных растений / О.А. Неверова. – Новосибирск: Наука, 2001. – 119 с.

245. Неверова, О.А. Эколого-физиологическая оценка состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в условиях антропогенного загрязнения г. Кемерово / О.А. Неверова // Сиб. экол. журнал. – 2003. – Т. 10. – № 6. – С. 773-779.

246. Неверова, О.А. Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города (на примере г. Кемерово): автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.16 / О. А. Неверова. – М., 2004. – 37 с.

247. Недре, А.Ю. Математическое описание процесса рассеивания в атмосфере пылевых выбросов кирпичного производства / А.Ю. Недре // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2008. – № 12. – С. 89-95.

248. Немерешина, О.Н.. Оценка содержания тяжёлых металлов в тканях *Polygonum aviculare* L. на техногенно загрязнённых территориях / О.Н. Немерешина, А.А. Шайхутдинова // Экология и промышленность России. – 2012. – № 9. – С. 46-49.

249. Николаева, З. Н. О тенденциях климатических изменений Центральной Азии (Минусинская котловина) / З. Н. Николаева // Экосистемы Центральной Азии: исследования, проблемы охраны и природопользования: материалы IX Убсу-Нур. Междунар. симп. (Кызыл, 16-20 сент. 2008 г.). – Кызыл, 2008. – С. 285-287.



250. Николаевский, В.С. Некоторые вопросы методологии и методики фонового мониторинга. Опыт и методы экологического мониторинга / В.С. Николаевский. – Пушкино, 1978. – С. 53-54.

251. Николаевский, В. С. Биологические основы газоустойчивости растений / В.С. Николаевский. – Новосибирск: Наука, 1979. – 275 с.

252. Николаевский, В. С. Методика определения предельно допустимых концентраций вредных газов для растительности / В.С. Николаевский, Т.В. Николаевская.– М.: Гос. ком. СССР по лесу, 1988. – 15 с.

253. Николаевский, В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. – М.: МГУЛ, 1999. – 193 с.

254. Николаевский, В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации / В.С. Николаевский. – Пушкино, ВНИИЛМ, 2002. – 220 с.

255. Николайкин, Н.И. Экология / Н.И. Николайкин, Н.Е. Николайкина, О.П. Мелехова. – М.: Дрофа, 2004. – 624 с.

256. Обзор: Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, 2012. – 72 с.

257. Обзор: глобальная оценка лесных ресурсов 2015. Как меняются леса мира? Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций: Рим, 2015. –55 с.

258. Овечкина, Е. С. Морфологические изменения сосны обыкновенной на территории Нижневартовского района / Е. С. Овечкина, Р.И. Шаяхметова // Вестник Нижневартовского государственного гуманитарного университета.– 2013. – № 3. – С. 75–84.

259. Онучин, А.А. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района / А.А. Онучин, Т.А. Буренина, О.Н. Зубарева, О.В. Трефилова, И.В. Данилова // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 1025-1037.

260. Ордабаев, Ж.К. Рассеивание выбросов промышленных предприятий в атмосфере г. Актобе / Ж.К. Ордабаев, М.А. Ажмуратова, Б.В. Засорин, Ж.К. Сабирова // Медицинский журнал Западного Казахстана. – 2009. – № 1. – С. 85-87.

261. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2009 г.: Государственный доклад. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 456 с.

262. Осипенко, Г. Л. Биомониторинг и биоиндикация: практическое руководство / Г. Л. Осипенко. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – 39 с.

263. Оценка экосистем на пороге тысячелетия. Экосистемы и благосостояние человека: биоразнообразие. Институт мировых ресурсов, Вашингтон, округ Колумбия. – 2005. – 36 с.

264. Павлов, И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения / И.Н. Павлов. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2005. – 360 с.

265. Парибок, Т.А. Загрязнение растений металлами и его эколого-физиологические последствия // Растения в экстремальных условиях минерального питания. / Т.А. Парибок. – Л., 1983. – С. 82-100.

266. Парфенов, В.Г. Геоэкология: учебное пособие / В.Г. Парфенов, Ю.В. Сивков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 176 с.

267. Пахарькова, Н.В. Различия в акклимационных стратегиях сосны обыкновенной и ели сибирской на загрязнение воздушной среды / Н.В. Пахарькова [и др.] // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – № 3. – С. 231-236.

268. Пентегова, В.А. Терпеноиды хвойных растений / В.А. Пентегова, Ж.В. Дубовенко, В.А. Ралдугин, Э.Н. Шмидт. – Новосибирск: Наука, 1987. – 97 с.

269. Пережогин, А.Н. Гигиеническая оценка качества окружающей среды в городе Шелехов (Иркутской области) / А.Н. Пережогин, Н.П. Сафронов // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. – 2013. – № 3-1 (91). – С. 109-113.

270. Пивоваров, Ю.П. Экология человека / Ю.П. Пивоваров, Н.В. Полунина, О.И. Янушанец, А.А. Аль Сабунчи. – М.: МИА, 2008. – 736 с.

271. Писаренко, А.И. Проблемы восстановления лесных ресурсов Европейского Севера СССР / А.И. Писаренко, М.Д. Мерзленко // Междунар. симпозиум «Северные леса: состояние, динамика, антропогенное воздействие». Ч. V. – 1990. – С 3-10.

272. Племенков, В.В. Химия изопреноидов. Глава 5. Монотерпены / В.В. Племенков // Химия растительного сырья. – 2006. – № 2. – С. 63-87.

273. Племенков, В.В. Химия изопреноидов. Глава 5. Монотерпены (продолжение) / В.В. Племенков // Химия растительного сырья. – 2006а. – № 3. – С. 55-72.

274. Плешиков, Ф.И. Взаимосвязь почвенно-грунтовых условий, типов леса и продуктивности сосняков в Минусинских борах / Ф.И. Плешиков // Агрофизические исследования почв в Средней Сибири. – Красноярск, 1975. – С.44-56.

275. Плешиков, Ф.И. Особенности взаимосвязи леса и почвы в ленточных борах Минусинской котловины / Ф.И. Плешиков, В.А. Рыжкова // Плодородие почв Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1991. – С.110-119.

276. ПНД Ф 16.1.1-96 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой концентрации ртути в пробах почв методом беспламенной атомной абсорбции с термическим разложением проб (с Изменением N 1)». – М., 1996. – 10 с.

277. ПНД Ф 16.1.54-08 «Методика выполнения измерений массовой доли водорастворимых подвижных форм фтора (фторид-ионов) в пробах водной вытяжки почв методом прямой потенциометрии», утверждена Заместителем Председателя Государственного комитета РФ по охране окружающей среды А.А.Соловьяновым 2 апреля 1998 г. – М., 2008. – 11 с.

278. ПНДФ 14.1:2:4.254-2009 «Методика измерений массовых концентраций взвешенных веществ и прокаленных взвешенных

веществ в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом», утверждена Директором ФБУ «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия» В.И. Цукановым 28 августа 2012 г. – М., 2009. – М., 2009. – 14 с.

279. ПНДФ 14.1:2:4.254-2009 «Методика измерений массовых концентраций взвешенных веществ и прокаленных взвешенных веществ в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом», утверждена И.о. директора ФГУ «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия» И.Л.Феофановым 18 июня 2009 года. – М., 2009. – 15 с.

280. Побединский, А. В. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья / А. В. Побединский. – М., 1965. – 268 с.

281. Поварницина, Т.М. Эколого-физиологические особенности адаптации древесных растений к условиям крупных промышленных центров (на примере г. Ижевска): автореф. дис. ... канд. биол. наук / Т.М. Поварницина; Ин-т экологии Волж. бассейна РАН. – Тольятти, 2007. – 20 с.

282. Подзорова, А.А. Особенности правового регулирования охраны атмосферного воздуха: цели и проблематика / А.А. Подзорова // Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации. – 2014. – № 1-2 (32-33). – С. 122-125.

283. Полищук, Ю.М. Анализ биоиндикационных свойств сосны сибирской для оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на природную среду / Ю.М. Полищук, Н.В. Кокорина, А.М. Касаткин // Вестник Югорского государственного университета. – 2006. – № 3. – С. 87-92.

284. Полякова, Г.Г. Многолетняя динамика таксационной характеристики и категории состояния сосновых насаждений на постоянных пробных площадях / Г.Г. Полякова, М.В. Поляков, Н.М. Чебакова, А.А. Ибе, Н.В. Астраханцева // Лесная таксация и лесоустройство. – 2012. – № 1 (47). – С. 41-47.

285. Полякова, М.А. Классификация сосновых лесов боровых лент Минусинской межгорной котловины (Южная Сибирь) / М.А. Полякова, Н.Б. Ермаков // Растительность России. – 2008. – № 13. – С. 82-105.

286. Понамарева, И.Н. Экология растений с основами биогеоценологии / И. Н. Понамарева. – М.: Просвещение, 1978. – 207 с.

287. Попов, А.С. Влияние мезоклимата и атмосферных промышленных загрязнений на радиальный прирост сосны обыкновенной / А.С. Попов, В.В. Фомин, Ю.В. Шалаумова // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 4. – С. 15-17.

288. Пospelова, О.А. Проблемы охраны атмосферного воздуха в Ставропольском крае // О.А. Пospelова, Т.Г. Зеленская, Е.Е. Степаненко // В сборнике: Актуальные вопросы экологии и природопользования. – 2005. – С. 386-387.

289. Правдин, Л.Ф. Сосна обыкновенная / Л.Ф. Правдин. – М.: Наука, 1964. – 190 с.

290. Преловский, В.А. Оценка состояния экосистем в зоне влияния саяногорского промышленного комплекса / В.А. Преловский // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – № 347. – С. 204-207.

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

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

293. Прожерина, Н.А. Морфофизиологическая диагностика состояния хвойных в условиях аэротехногенного загрязнения (на примере

Архангельского промышленного узла): автореф. ... канд. биол. наук (03.00.16) / Н.А. Прожерина. – Архангельск, 2001. – 21 с.

294. Промышленная экологическая безопасность // Информационный орган Управления Ростехнадзора по Пензенской области. – 2007. – 14 с.

295. Протасова, Н.А. Соединение цинка, никеля, свинца и кадмия в обыкновенных черноземах каменной степи при длительном применении удобрений и фосфогипса / Н.А. Протасова, Н.С. Горбунова // Агрехимия.– 2010. – № 7. – С. 52-61.

296. Протопопов, В.В. Средообразующая роль темнохвойного леса / В.В. Протопопов. – Новосибирск: Наука, 1975. – 327 с.

297. Раднаев, А.Б.-Д. Влияние уровней загрязнения почв фторидами на циклы азота в агроэкосистемах на серых лесных почвах Предбайкалья: автоореф. дисс. ... канд. биол. наук (03.00.16) / А. Б.-Д. Раднаев. – Иркутск, 2002. – 22 с.

298. Рапута, В.Ф. Анализ загрязнения снежного покрова в окрестностях Новосибирских ТЭЦ / В.Ф. Рапута // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 5.– С. 162-166.

299. Растительный покров Хакасии // Ответственный редактор докт. биол. наук А. В. Куминова. – Н.: Наука, 1976. – 17 с.

300. РД 52.04.666-2005 «Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 10. Инспекция гидрометеорологических станций и постов. Часть I. Инспекция метеорологических наблюдений на станциях», утвержден Руководителем Росгидромета А.И.Бедрицким 21.11.2005. – М., 2005. – 18 с.

301. Решетникова, Т.В. Лесные подстилки как депо биогенных элементов / Т.В. Решетникова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2011. – № 12. – С. 75-82.

302. Роговенко, Е.С. Экологический контроль антропогенного загрязнения снегового покрова одного из промышленных районов г. Красноярска / Е.С. Роговенко, Н.В. Блинникова, А.А. Шубин, Л.Г. Бондарева

// Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 387-394.

303. Рожков, А.С. Смолистые вещества хвойных и насекомые-ксилофаги / А.С. Рожков, Г.И. Массель. – Новосибирск: Наука, 1982. – 148 с.

304. Рожков, А.С. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья / А.С. Рожков, Т.А. Михайлова. – Новосибирск: Наука, 1989. – 156 с.

305. Розломий, Н.Г. Влияние техногенного загрязнения на состояние культур сосны обыкновенной на территории исторически значимых объектов г. Уссурийск / Н.Г. Розломий, М.С. Титова, Г.В. Гуков // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2014. – № 2. – С. 99-101.

306. Рощина, В.Д. Выделительная функция высших растений / В.Д. Рощина, В.В. Рощина. – М.: Наука, 1989. – 192 с.

307. Рунова, Е.М. Зеленые насаждения в условиях урбоэкосистемы и перспективы озеленения г. Братска / Е.М. Рунова, И.И. Гаврилин // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2010. – № 25. – С. 153-156.

308. Рунова, Е.М. Влияние длительного загрязнения промышленными выбросами на жизнеспособность светлохвойных таежных лесов / Е.М. Рунова, С.А. Чжан, О.А. Пузанова // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 1 (25). – С. 162-168.

309. Рябец, О.П. Охрана воздушного бассейна города Барнаула / О.П. Рябец, Л.В. Щербакова // Труды молодых ученых Алтайского государственного университета. – 2015. – Т. 2. – № 12. – С. 122-124.

310. Рябошапка, А.Г. Потенциальная роль «негативной эмиссии» CO<sub>2</sub> в решении климатической проблемы / А.Г. Рябошапка, А.П. Ревокатова // Метеорология и Гидрология. – 2015. – № 7. – С. 18-36.

311. Савченко, В.А. Экологические проблемы Таймыра / В.А. Савченко. – М.: СИП РИА, 1998. – 194 с.

312. Саэт Ю.Е. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

313. Сазонова, Т.А. Влияние техногенного загрязнения на содержание углеводных соединений сосны обыкновенной / Т.А. Сазонова, Н.А. Галибина, Л.А. Чиненова // IV Съезд Общества физиологов растений России. - Тезисы докладов. – Т. 1. – 1999. – С. 173.

314. Сазонова, Т.А. Морфофизиологическая реакция деревьев сосны обыкновенной на промышленное загрязнение / Т.А. Сазонова, В.Б. Придача, Е.Н. Терехова, С.М. Шредерс, С.В. Колосова, Т.Ю. Таланова // Лесоведение. – 2005. – № 3. – С. 11-19.

315. Сазонова, Т.А. Влияние промышленного загрязнения на минеральный и водный режим сосны и ели / Т.А. Сазонова, В.Б. Придача // Труды Карельского научного центра Российской академии наук.– 2009. – № 3. – С. 75-85.

316. Самылина, В.Г. Анализ состояния и охраны атмосферного воздуха на территории Вологодской области / В.Г. Самылина // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2016. – № 3 (13). – С. 32-52.

317. Сараев, В.Г. Уровни содержания фтора в почвах и биологических объектах Южно-Минусинской котловины при воздействии алюминиевого завода / В.Г. Сараев, С.И. Харахинова. – Деп.: ВИНТИ, 1992. – № 57 с.

318. Семихатова, О. А. Эколого-физиологические исследования темнового дыхания растений: прошлое, настоящее и будущее / О.А. Семихатова // Бот. журн. – 2000. – Т. 85. – С. 15–32.

319. Сергейчик, С.А. Эколого-физиологическая диагностика состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в техногенной среде / С.А. Сергейчик, А.А. Сергейчик, С. Карвета, Б. Выжголик // Archiwum ochrony srodowiska. – 1993. – № 3–4.– С. 155-172.

320. Сергейчик, С.А. Эколого-физиологический мониторинг устойчивости сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в техногенной среде / С.А. Сергейчик // Биосфера. – 2015. – Т. 7. – № 4. – С. 384-391.



321. Сибиркина, А.Р. Биогеохимическая оценка содержания тяжелых металлов в сосновых борах Семипалатинского Прииртышья Сибиркина: автореф. дис. ... д-ра биол. наук (03.00.16) / А. Р. Сибиркина. – Омск, 2014. – 37 с.
322. Сибирская советская энциклопедия. Т. 2: З — К / под общ. ред. М. К. Азадовского и др. – Зап.-Сиб. отд-ние ОГИЗ, 1931. – 1152 стб.
323. Симачев, И.В. Дендроклиматический анализ роста лиственницы в зоне выбросов Норильского горно-металлургического комбината / И.В. Симачев, Е.А. Ваганов, Л.Г. Высоцкая // География и природные ресурсы. – 1992. – № 4. – С. 65-73.
324. Скрипальщикова, Л.Н. Пылеулавливающие свойства лесных экосистем в лесостепных районах Средней Сибири: автореф. дис.... канд. биол. наук (03.00.16) / Л.Н. Скрипальщикова; Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН.– Красноярск, 1997.– 19 с.
325. Скрипальщикова, Л.Н. Сосновые древостои в техногенных ландшафтах / Л.Н. Скрипальщикова, Н.В. Грешилова // Хвойные бореальной зоны. – 2008. – Т. XXV.– № 1-2. – С. 150-154.
326. Смашевский, Н.Д. Экология фотосинтеза / Н.Д. Смашевский // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 2 (28). – С. 165-180.
327. Смирнов, А.А. К вопросу о снижении поступления тяжелых металлов в продукцию растениеводства / А.А. Смирнов, З.А. Кирасиров, Н.В. Криушин и др. // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – №5. – С.24-26.
328. Смирнова, Н.В. Влияние свинца и кадмия на фитотоксичность почвы / Н.В. Смирнова, Л.В. Шведова, А.В. Невский // Экология и промышленность России. – 2005. – № 4. – С. 32-35.
329. Смит, У.Х. Лес и атмосфера: Взаимодействие между лесными экосистемами и примесями атмосферного воздуха / У.Х. Смит. – М.: Прогресс, 1985. – 432 с.

330. Собчак, Р.О. Диагностика состояния видов хвойных в зонах техногенного загрязнения Республики Алтай / Р.О. Собчак // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 325. – С. 185-190.

331. Собчак, Р.О. Морфофункциональные особенности видов хвойных в условиях урбанизированной среды / Р.О. Собчак, Л.В. Куровская // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 327. – С. 214-217.

332. Сорокина, Г.А. Биоиндикация атмосферного загрязнения с использованием флуоресцентного метода / Г.А. Сорокина, К.В. Фидельская, А.Ю. Даниленко, Н.В. Пахарькова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2012. – №10. – С. 121-126.

333. Состояние зеленых насаждений и городских лесов в Москве: аналит. докл. М.: Прима Пресс-М, 2000. – 276 с.

334. Сотникова, О.В., Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды / О.В. Сотникова, Р.А. Степень // Химия растительного сырья. – 2001. – № 3. – С. 79-84.

335. Сотникова, О.В. Влияние аэрогенного загрязнения на рост и химический состав вегетативных органов сосны обыкновенной: автореф. дис. ... канд. биол. наук (05.21.03) / О. В. Сотникова. – Красноярск, 2004. – 19 с.

336. Сотникова, М.В. Анализ и прогнозирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспортного комплекса / М.В. Сотникова, В.С. Демьянова, Р.А. Дярькин, А.Ш. Канеева // Экология и промышленность России. – 2008. – № 7. – С. 29-31.

337. Спицына, Н.Т. Лесоводственная оценка и пылеаккумулирующие свойства березняков в районе карьера по добыче известняка / Н.Т. Спицына, О.Н. Зубарева, В.Д. Перевозникова // ИВУЗ. «Лесной журнал». – 2001. – № 5-6 –С. 35-42

338. Спицына, С.Ф. Зависимость содержания цинка в растениях от его содержания в почвах Алтайского края / С.Ф. Спицына, А.А. Томаровский, Г.В. Оствальд // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 9 (107). – С. 020-023.

339. Степанок, В.В. Влияние высоких доз свинца на элементный состав растений / В.В.Степанок //Агрoхимия. – 1998. – № 7. – С.69-76.

340. Степень, Р.А. Влияние техногенных выбросов на состояние пригородных лесов Красноярска / Р.А. Степень, Р.А. Коловский, Г.С. Калачева // Экология. – 1996. – № 6. – С. 410-414.

341. Сторожев, В. П. Влияние фторсодержащих аэропромвыбросов ОАО «Русал Саяногорск» на растительный покров (определение содержания фтора в лесной флоре с учетом господствующих ветров) / В. П. Сторожев, М.Г. Бондарь // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. – Новосибирск, 2012. – Вып. 2. – С. 128-134.

342. Страхов, В.В. Состояние лесных ресурсов Европейско-Уральской части России / В.В. Страхов // Совещ. «Леса Русской равнины». – 1993. – С. 201-208.

343. Судацкова, Н.Е. Биохимические индикаторы стрессового состояния древесных растений / Н.Е. Судацкова, И.В. Шеин, Л.И. Романова и др. – Новосибирск: Наука, 1997. – 176 с.

344. Сухова, М.Г. Особенности природных условий и экологические проблемы котловин Алтае-Саянской горной страны / М.Г. Сухова // Мир науки, культуры, образования: межд. науч. журнал. – Барнаул – Горно-Алтайск, 2008. – №2 (9). – С. 21–27.

345. Таксация леса: методические указания по учебной практике для подготовки бакалавров по направлению 35.03.01 «Лесное дело» / сост.: Л. С. Ветров, С. В. Вавилов, И. В. Никифорчин. – СПб.: СПбГЛТУ, 2011. – 58 с.

346. Танделов, Ю.П. Фтор в системе почва–растение. – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.П. Танделов; под ред. акад. РАСХН В.Г. Минеева. – Красноярск, 2012. – 146 с.

347. Тарабрин, В. П. Водный режим и устойчивость древесных растений к промышленным загрязнениям / В. П. Тарабрин // Газоустойчивость растений. – Новосибирск: Наука, 1980. – 243 с.

348. Тараканов, В.В. Влияние естественных и антропогенных факторов на генетическую изменчивость сосны в Приобье: состав терпентинных масел хвои // В.В. Тараканов, А.Е. Самсонова, Ю.Н. Ильичев // Лесоведение. – 2004. – № 5. – С. 50-57.

349. Тарханов, С.Н. Влияние атмосферного загрязнения на фотосинтезирующий аппарат *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* ledeb. × *P. abies* (L.) karst в северной тайге бассейна Северной Двины / С.Н. Тарханов, С.Ю. Бирюков // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2014. – № 1(337). – С.20-26.

350. Татаринцев, А.И. Лесопатологическое состояние сосняков в зеленой зоне г. Красноярска / А.И. Татаринцев, Л.Н. Скрипальщикова // Хвойные бореальной зоны. – 2009. Т. XXVI. – № 1. – С. 42-47.

351. Тейлор, Р. Доклад всемирного фонда дикой природы (WWF) «Живые леса» / Р. Тейлор // Устойчивое лесопользование. – 2012. – № 3 (32). – С. 18-35.

352. Тимофеев, В.В. Влияние алюминиевой промышленности на содержание ПАУ в атмосферном воздухе городов Красноярского края / В.В. Тимофеев, О.В. Тасейко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2012. – Т. 1. – № 8. – С. 246-247.

353. Тимофеева, А.В. Использование дендрохронологического метода для оценки степени атмосферного загрязнения в пригородных лесах Тольятти / А.В. Тимофеева // Леса Русской равнины. – М., 1993. – С. 215-217.

354. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения / А.Ф. Титов, Н.М. Казнина, В.В. Таланова. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.

355. Титова, М.С. Влияние аэрогенного загрязнения на содержание пигментов в хвое сосны обыкновенной / М.С. Титова // Естественные и технические науки. – 2010. – № 6 (50). – С. 114-116.

356. Торлопова, Н.В. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса) / Н.В. Торлопова, Е.А. Робакидзе. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 138 с.

357. Трубников, В.В. Закономерность распределения микроэлементов-биофилов и тяжёлых металлов в системе почва-растение в урбанизированной среде / В.В. Трубников, Ю.М. Злобина, И.В. Федосова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – №04 (42). – С.211-213.

358. Туева, О.В. Правовая охрана атмосферного воздуха от загрязнения / О.В. Туева // Аграрное и земельное право. – 2006. – № 6. – С. 137-146.

359. Тужилкина, В.В. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение / В.В. Тужилкина // Экология. – 2009. – № 4. – С. 243-248.

360. Тутыгин, Г.С. Оценка зависимости морфометрических показателей хвои сосны от концентрации тяжелых металлов / Г.С. Тутыгин, А.Г. Тутыгин, Ю.И. Поташева / Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2009.№ 1. С. 64-67.

361. Тютюнник, Ю.Г. О зависимости содержания тяжелых металлов в городских почвах от уровня загрязнения атмосферы / Ю.Г. Тютюнник // Агрохимия. – 1992. – № 7. – С.115-117.

362. Усольцев, В. А. Оценка углерододепонирующей способности лесов: от пробной площади – к автоматизированной системе пространственного анализа / В. А. Усольцев [и др.] // Лесная таксация и лесоустройство. – 2008. – № 1 (39). – С. 183-190.

363. Федорец, Н.Г. Воздействие эмиссий Костомукшского горно-обогатительного комбината на лесные подстилки сосняков в Северотаежной подзоне Карелии / Н.Г. Федорец, А.Н. Солодовников // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2013. – № 6. – С. 143-152.

364. Федулов, Ю. П. Устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды: учеб. пособие / Ю. П. Федулов, В. В. Котляров, К. А. Доценко. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 64 с.

365. Феклистов, П.А. Насаждения деревьев и кустарников в условиях урбанизированной среды г. Архангельска / П.А. Феклистов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – 112 с.

366. ФР.1.31.2004.01119 «Методика выполнения измерений массовой концентрации мышьяка в пищевых продуктах и продовольственном сырье, биологически активных добавках к пище методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА» (свидетельство об аттестации №31-05/04 от 17.02.04 г.), введена в действие Постановлением Госстандарта России от 29 ноября 2002 г. N 438-ст. – М., 2004. – 16 с.

367. ФР.1.31.2005.02119 ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.48-06 «Методика выполнения измерений массовой концентрации цинка, кадмия, свинца, меди, марганца, мышьяка и ртути в почвах, тепличных грунтах, сапропелях, илах, донных отложениях, твердых отходах методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА» (свидетельство об аттестации №31-11/05 от 02.11.2005 г.), утверждена заместителем Председателя Государственного комитета РФ по охране окружающей среды А.А.Соловьянов 25 июня 1998 г. – М., 2006. – 14 с.

368. Фрей, Т. Э. А. Экофизиологические аспекты проблемы усыхания лесов / Т. Э. А. Фрей // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду. – М.: Наука, 1987. – С. 139-142.

369. Фролова, Н.В. Экологическая оценка правового состояния охраны атмосферного воздуха / Н.В. Фролова, А.Г. Чувашев // Актуальные проблемы естественнонаучного образования, защиты окружающей среды и здоровья человека. – 2016. –Т. 2. –№ 2. – С. 407-411.

370. Фуксман, И.Л. Физиолого-биохимическая индикация состояния сосны обыкновенной в связи с воздействием промышленных поллютантов /

И.Л. Фуксман, Я. Пойкалайнен, С.М. Шредерс // Экология. – 1997. – № 3. – С.213-217.

371. Харук, В.И. Техногенные повреждения притундровых лесов Норильской долины / В.И. Харук, К. Винтенбергер, Г.М. Цибульский [и др.] // Экология. – 1996. – № 6. – С. 424-429.

372. Хвастунов, А.И. Экологические проблемы малых и средних промышленных городов: оценка антропогенного воздействия / А.И. Хвастунов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1999. – 248 с.

373. Хмелевская, И.А. Эколого-физиологические исследования древесных пород в г. Пскове / И.А. Хмелевская // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2008. – № 6. – С. 37-57.

374. Цветков, В. Ф. Структура и запасы фитомассы хвои в сосновых молодняках Кольского полуострова / В.Ф. Цветков, В.В. Никонов // Лесоведение. – 1985. – № 1. – С. 32-39.

375. Цельникер, Ю.Л. Модельный анализ влияния факторов среды на фотосинтез хвойных Предбайкалья / Ю.Л. Цельникер, М.Д. Корзухин, Г.Г. Суворова, Л.С. Янькова // VI съезд физиологов России: Материалы докл. Сыктывкар. – 2007. – Ч. 3. – С. 117-119.

376. Чегаев, М.М. Содержание тяжелых металлов в растениях Ирафского района / М.М. Чегаев, Л.Ч. Гагиева // Известия Горского государственного аграрного университета. – 2014. – Т. 51. – № 3. – С. 314-318.

377. Черепнин, Л.М. История исследования растительного покрова южной части Красноярского края / Л.М. Черепнин // Ученые записки Красноярского государственного педагогического института. Красноярск: Красноярский рабочий. – 1954. – Т. 3. – Вып. 1. – С. 3-80.

378. Черненькова, Т.В. Динамика биологического разнообразия таежных лесов в условиях промышленного загрязнения: автореф. дис. ...

докт. биол. наук. (11.00.11) / Т.В. Черненко; Ин-т проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Рос. акад. наук. – Москва, 2000. – 42 с.

379. Чернодубов, А.И. Эфирные масла сосны: состав, получение, использование / А.И. Чернодубов, Р.И. Дерюжкин. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1990. – 112 с.

380. Чернышенко, О.В. Экофизиологические аспекты водного обмена растущего дерева / О.В. Чернышенко // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 1998. – № 1. – С. 116-12.

381. Чжан, С.А. Мощность лесной подстилки сосновых насаждений в условиях длительного техногенного пресса / С.А. Чжан, Е.М. Рунова, О.А. Пузанова, Л.А. Чжан // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 12. – С. 157-162.

382. Чжан, С.А. Лесоводственная оценка сосновых насаждений в условиях длительного техногенного загрязнения / С.А. Чжан, О.А. Пузанова, Л.А. Чжан // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 2 (18). – С. 164-167.

383. Чжан, С.А. Лесоводственная оценка состояния сосновых насаждений в условиях длительного техногенного загрязнения: автореферат дис. ... д-ра сельскохозяйств. наук (06.03.02) / С.А.Чжан; ФГБОУ ВПО «Сиб. гос. технол. ун-т». – Красноярск, 2014. – 31 с.

384. Чупахина, Г.Н. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта / Г.Н. Чупахина, П.В. Масленников, Л.Н. Скрыпник [и др.] // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. – 2012. – № 2(18). – С. 171-185.

385. Чурагулов, Р.С. Экология лесов Южного Урала / Р.С. Чурагулов. – М.: ПОЛТЕКС, 1999. – 418 с.

386. Шанина, Е.В. Обзор изменений федерального закона «Об охране атмосферного воздуха» / Е.В. Шанина, А.Е. Косова // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 11 (55). – С. 751-752.



387. Шашко Д.И. Агроклиматическое районирование СССР. / Д.И. Шашко. – М.: Колос, 1967. – 335 с.

388. Шеховцов, А.А. Загрязнение воздуха в России: 1992-2006 / А.А. Шеховцов // Россия в окружающем мире. – 2008. – № 11. – С. 68-96.

389. Шильцова, Г.В. Тяжелые металлы и сера в почвах Валаамского архипелага / Г.В. Шильцова, Р.М. Морозова, П.Ю. Литинский. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. – 140 с.

390. Шипунов, Ф. Я. Организованность биосферы / Ф.Я. Шипунов. - М.: Мысль, 1980. – 290 с.

391. Шубина, Н.В. Влияние выбросов металлургического производства на микроэлементный состав хвои сосны / Н.В. Шубина, Ю.Л. Юрьев // Химия растительного сырья. – 2009. – № 3. – С. 173-176.

392. Шувалов, Ю.В. Обеспечение охраны атмосферного воздуха при ведении буровзрывных работ / Ю.В. Шувалов, А.Л. Губенко, А. Мохамад, А.П. Бульбашев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2001.– № 2. С. – 163-164.

393. Шугалей, Л.С. Биологическая рекультивация нарушенных земель КАТЭЖа / Л.С. Шугалей, Г.И. Яшихин, В.К. Дмитриенко. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1996. – 186 с.

394. Щепашенко, Д. Г. Площадь лесов России и ее динамика на основе синтеза продуктов дистанционного зондирования / Д.Г. Щепашенко, А.З. Швиденко, М.Ю. Лесив, П.В. Онтиков, М.В. Щепашенко, Ф. Краксер // Лесоведение. – 2015. – № 3. – С. 163-171.

395. Щербенко, Т.А. Поглощение элементов сосной и елью в лесных экосистемах северной тайги в условиях атмосферного загрязнения: автореф. ... канд. биол. наук (03.00.27) / Т.А. Щербенко; МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2008. – 172 с.

396. Щербенко, Т.А. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения / Т.А. Щербенко, Г.Н.

Копцик, Б.Я. Гроненберг, Н.В. Лукина, С.Ю. Ливанцова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2008. – № 2. – С. 9-16.

397. Щербов, Б.Л. Роль лесной подстилки в миграции химических элементов и искусственных радионуклидов при лесных пожарах в Сибири / Б.Л. Щербов // Сибирский экологический журнал. – 2012. – Т. 19. – № 2. – С. 253-265.

398. Щетников, А. И. Формирование ситуации экологического неблагополучия в районе размещения Саянского алюминиевого завода / Щетников А. И., Зайченко О. А. // Экологический риск: анализ, оценка, прогноз: Материалы Всерос. конф. Иркутск. – 1998. – С. 49-50.

399. Экологическая ситуация в Карелии / Под. ред. С.С. Зябченко. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1993. – 208 с.

400. Эрна, А. Хвойные деревья индикаторы техногенной нагрузки в промышленном ландшафте / А. Эрна, Ю. Раук // Изв. АН ЭССР. Сер. биол. – 1986. – Т.35. – №2. – С. 131-141.

401. Янченко, Н.И. Изменение рН и электропроводность снежного покрова Братска / Н.И. Янченко, А.Н. Баранов, В.А. Ершов, Е.В. Тимкина // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 190-192.

402. Ярмишко, В.Т. Корневая система как индикатор техногенного загрязнения / В.Т. Ярмишко // Ботанический журнал. – 1987. – Т. 72. – № 3.– С. 340-346.

403. Ярмишко, В.Т. Состояние и продуктивность растений напочвенного покрова сосновых лесов в условиях аэротехногенного загрязнения на европейском Севере / В.Т. Ярмишко // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 1. – ч.1. – С. 18-21.

404. Ярмишко, В.Т. Многолетняя динамика параметров и состояния хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения на Европейском Севере / В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2013. – № 203.– С. 30-46.

405. Aamlid, D. Changes of forest health in Norwegian boreal forests during 15 years / D. Aamlid, K. Torseth, K. Venn, A.O. Stuanes, S. Solberg, G. Hylen, N. Christophersen, E. Flamstad // *Forest Ecology and Management*. – 2000. – Vol. 127. – P. 103-118.
406. Aktuelle Probleme des Immissionsschutzrechts. – Baden-Baden. – 1998. – P.25.
407. Bocola, W. Emission of air pollutants by combustion processes: an analysis of the Italian situation / W. Bocola, M.C. Cirillo // *Sci. Tot. Env.* – 1987. – Vol. 67, N 2 -3. – P. 227-245.
408. Bowen, B.J.M. Environmental chemistry of the elements / B.J.M. Bowen // Academic Press. London. – 1979. – 333 p.
409. Brown, G.E. Surface and bioavailability of heavy metals: a molecular scale perspective / G.E. Brown, A.L. Foster, J.D. Ostergren // *Mineral Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, PNAS*, 1999.– vol. 96, – P. 3388–3395.
410. Burton, K.W. The influence of heavy metals upon the growth of sitka-spruce in South Wales forests / K.W. Burton, E. Morgan // *Plant Soil* 78. – 1984. P. 271–282.
411. Congress Record. – 1990. – Vol. 136, N 150. – P. 16953.
412. Davies, T. C. Heavy metal distribution in laterites, Southwest of Regent / T.C. Davies, T.W. Bloxam. – *Freetown Igneous Complex Sierra Leone, Econ. Geol*, 1979. – 638 p.
413. Dochinger, L.S. Interception of airborne particles by tree plantings / L.S. Dochinger. – *Journal of Environmental. Quality*, 1980. – P. 265–268.
414. Farago, M. Nickel and plants / M. Farago, M. Cole // *Metal ions in biological systems*. – Marsel. N.Y. Basel. – 1988. – Vol. 23. – P. 47-82.
415. Gadde, R.R. Studies of heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese oxides / R.R. Gadde, H.A. Laitinen. – *Anal. Chem.*, 46, 2022, 1974. – P. 18-34.

416. Garrec, J.P. Uptake of particulate fluorides from an aluminum smelter by plants effects of humidity of the air / J.P. Garrec, N. Passera // *Fluoride*. 1980. – Vol. 13. – P. 95-117.

417. GEMS (Global Environment Monitoring System), Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forest. Manual on methodologies and criteria for harmonized sampling, assessment / monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Programme Coordinating Centres. – Hamburg; Geneva: UN ECE, 1998. – 90 p.

418. Golubnichiy, A.A. Review and analysis of the modelling of the atmospheric air pollution for urban air basins / A.A. Golubnichiy, D.O. Nedelina // *Интернет-журнал Науковедение*. – 2015. – Т. 7. – № 5 (30). – С. 120.

419. Hsieh, D.P. Genotoxic agents in the agro-ecosystem. Chairman's comments / D.P. Hsieh // *Genet. Toxicol.: Agr. Perspect. Proc. Symp.*, Davis, Calif., 1–5 Nov., 1981. – N. Y., London, 1982. – P. 117-118.

420. Innes, J. *Forest Dynamics in Heavily Polluted Regions* / J. Innes, J. Oleksyn // Oxford: CABI Publishing. – 2000. – P. 248.

421. IPCC, 2013. Fifth Assessment Report, vol. 1. *Climate Change 2013, The Physical Science Basis*. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

422. Ivshin, A.P. The assessment of subtundra forests degradation by dendrochronological methods in the Norilsk industrial area / A.P. Ivshin, S.G. Shiyatov // *Dendrochronologia*. – 1995. Vol. 13. – P. 113-126.

423. Jones, J. B. Plant tissue analysis for micronutrients, in: *Micronutrients in Agriculture* / J.B. Jones, J.J. Mortvedt, P.A. Giordano, W.L. Lindsay. – Soil Science Society of America, Madison, Wis, 1972, P. 319.

424. Khudsar, T. Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua* / T. Khudsar, Mahmooduzzafar, M. Iqbal, R.K. Sairam // *Biol. Plant*. – 2004. – V. 48, N 2. – P. 255-260.

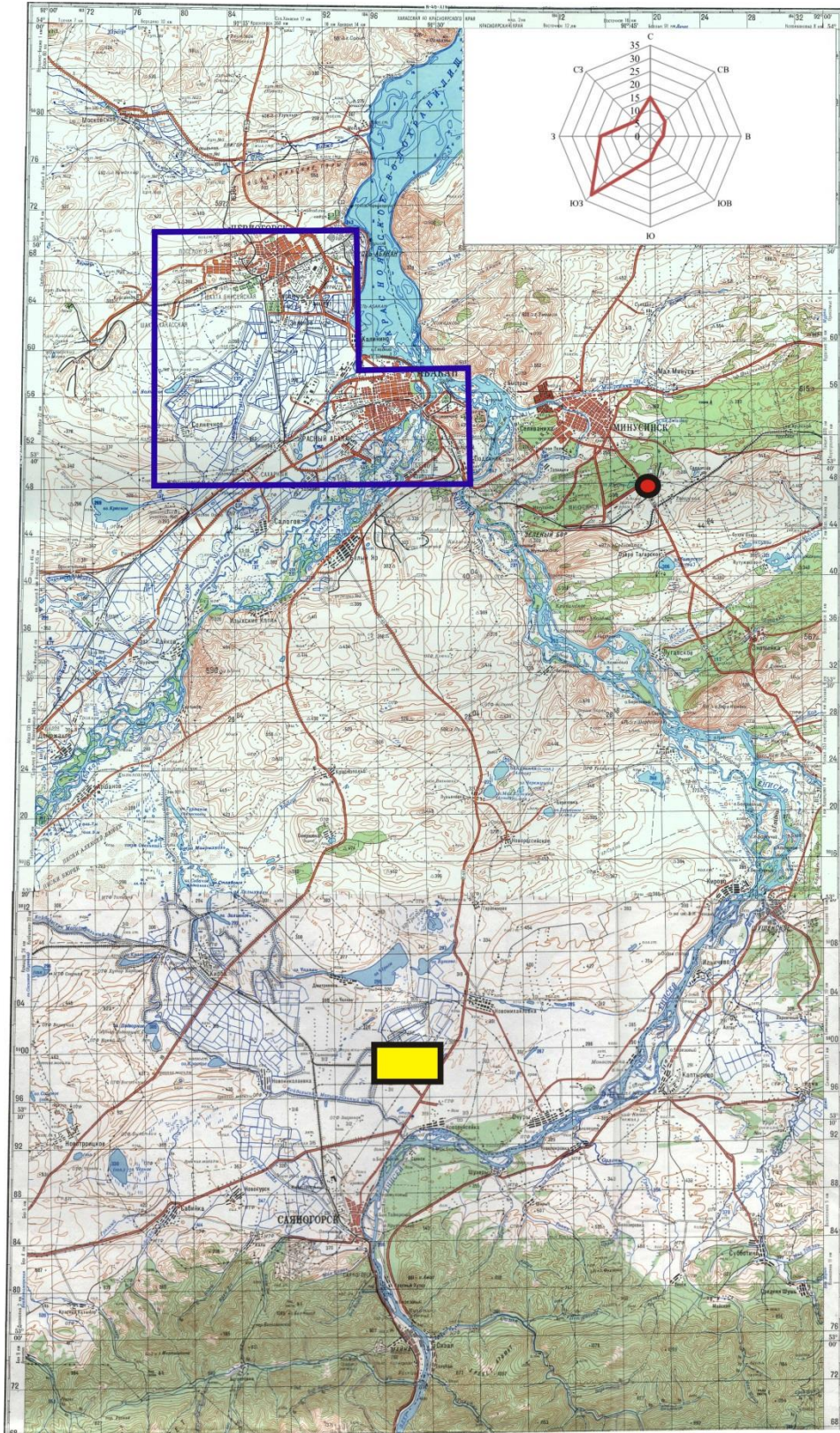
425. Koch, H.-J. *Zwanzig Jahre Bundes-Immissionsschutzgesetz* / H.-J. Koch, R. Lechelt (Hrsg.). Baden-Baden. – 1994. – P.10.




426. Коруцсія, І.М. Нормування як засіб правового регулювання у сфері охорони атмосферного повітря / І.М. Коруцсія // Проблеми законності. – 2015. – № 128. – С. 189-196.
427. Ludwig, H. La politique de lutte centre la pollution atmospherique en Republique fiderale d'Allemagne / H. Ludwig // Ann. mines. real. ind. – 1990. – Nov. – P. 81-83, 126.
428. Luk'yanov, O.V. Dispersion of extrass from the caldrons of the in-plants systems of heat supply in the conditions of city building / O.V. Luk'yanov // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2006. – Т. 2. – № 3. – С. 115-120.
429. Lux, A. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review / A. Lux, M. Martinka, M. Vaculík, P. J. White // J. Exp. Bot. – 2011. – V. 62, – N 1. – P. 21–37.
430. MacLean, A. J. Amounts of mercury of some golf course sites / A. J. MacLean, B. Stone, W. E. Cordukes, J. Can. – Soil Science Society of America, Madison, Wis, 1973. – P. 53.
431. Marschner, H. Strategies of plants for acquisition of iron / H. Marschner, V. Roemheld // Plant and Soil. – 1994. – vol. 165. – P. 261–274.
432. Mercury in the Swedish environment – resent research on causes, consequences and corrective methods / Lindquist [at al.] // Water, air and soil pollution. – 1991. – V.55. – 157 p.
433. Messenger, A. White pine chlorosis in northern illinois: iron deficiency or not? / A. S. Messenger, M. W. Stelford // Journal of Arboriculture. – 1997. – V. 23(5). – P. 191.
434. Meusel, H. Vergleichende Chorologie der zentaleuropäischen Flora / H. Meusel, E. Jäger, E. Weinert. Karten. Bd.1. Jena, 1965. – 583 s.
435. Mikhailova, T.A. The physiological condition of pine trees in the Prebaikalia (East Siberia) / T.A. Mikhailova // Forest Pathology. – 2000. – Vol. 30. – P. 345-359.

436. Mitchell, M.J. Sulfur Chemistry, Deposition and Cycling in Forests / M.J. Mitchell, S.E. Lindberg // Atmospheric Deposition and Nutrient Cycling in Forest Ecosystems. Chapter 5. SpringerVerlag, New York. – 1992.– 72-149.
437. Nieminen, T. M. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to a long-term Cu and Ni exposure / T. M. Nieminen // Academic dissertation, Helsinki. – 2005. – P. 63.
438. Nriagu, J.O. Emissions of lead and zinc from candles with metal-core wicks / J.O. Nriagu, M.J. Kim // Sci. Total Environ., Sci. Total Environ. – 2000. – P. 37-41.
439. Panda, S.K. Heavy metals induce lipid peroxidation and affect antioxidants in wheat leaves / S.K. Panda, I. Chaudhury, M.H. Khan // Biol. Plant. – 2003. – V. 46. P. 289-294.
440. Petkovšek S. Norway Spruce Needles as Bioindicator of Air Pollution in the Area of Influence of the Sostanj / S. Petkovšek, F. Batiè, C. Lasni // Thermal Power Plant, Slovenia. Environ Pollut – 2008. P. 287-291.
441. Quincke, J. P. *Agaricus bitorquis*, un champignon accumulateur de mercure, de selenium et de cuivre / J. P. Quincke. – Rev. Suisse Vitic Arboric Hortic, 1979. – P. 11-189.
442. Ramankutty, N. The global distribution of cultivatable lands: current patterns and sensitivities to possible climate change / N. Ramankutty et al. // Global Ecology and Biogeography. – 2002. – P. 377-397.
443. Robson, A. D. Zinc uptake from soils in Zinc in soils and plants / A.D. Robson // Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. – 1993. – 208 p.
444. Schulz, R. K. On the availability of carrier-free Ru-106 from soils / R. K. Schulz, K.L. Babcock. – Soil Science Society of America, Madison, Wis, 1974. – P. 171.
445. Shimazaki, K. Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO<sub>2</sub> – fumigated leaves of spinach / K. Shimazaki, T. Sakaki, N. Kondo, K. Sugahara // Plant & Cell Physiology. – 1980. Vol. 21. – N 7. – P. 1193-1204.

446. Souza, J.F. Maize and radish sequester excess cadmium and zinc in different ways / J.F. Souza, W.E. Rauser // *Plant Sci.* – 2003. – V. 165. – P. 1009-1022.
447. Tiffin, L.O. The Form and Distribution of Metals in Plants: An Overview / L.O. Tiffin // *In Biological Implications of Metals in the Environment. Proc. 15th Annual Hanford Life Sciences Symp. ERDA-TIC Conf.* – 1977. – № 750929 (NTIS). – P. 434.
448. Tyler, G. The impact of heavy metal pollution on forest: a case study of Gusum / G. Tyler // *Sweden. Ambio.* – 1984. – Vol. 13. – № 1. – P. 18-24.
449. Uraguchi, S. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice / S. Uraguchi, S. Mori, M. Kuramata, A. Kawasaki, T. Arao, S. Ishikawa // *J. Exp. Bot.* – 2009. – V. 60, – N. 9. – P. 2677-2688.
450. Veselov, D. Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings / D. Veselov, G. Kudoyarova, M. Symonyan, St. Veselov // *Bulg. J. Plant Physiol.* – 2003. – Special issue. – P. 353-359.
451. Wiersma, D. Chemical forms of nickel and cobalt in phloem of *Ricinus communis* / D. Wiersma, B. J. Van Goor. *Physiol.* – 1979. – P. 440-442.
452. Williams, M. *Deforesting the Earth: From prehistory to global crisis* / M. Williams // *The University of Chicago Press, USA.* – 2006. – 561 p.

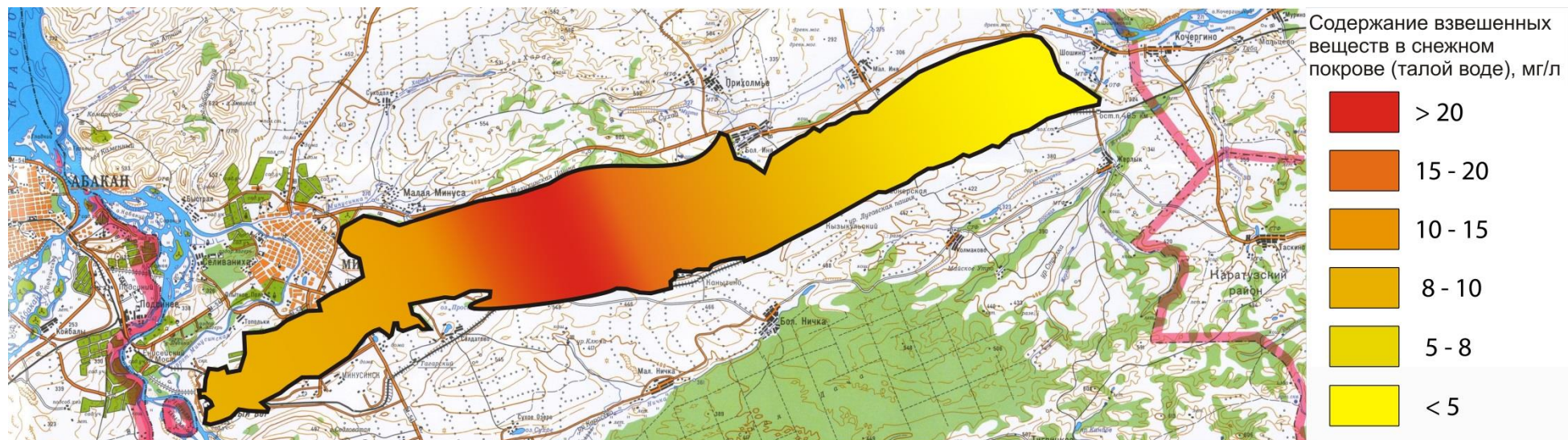
## Приложение 1 – Карта-схема расположения техногенных источников



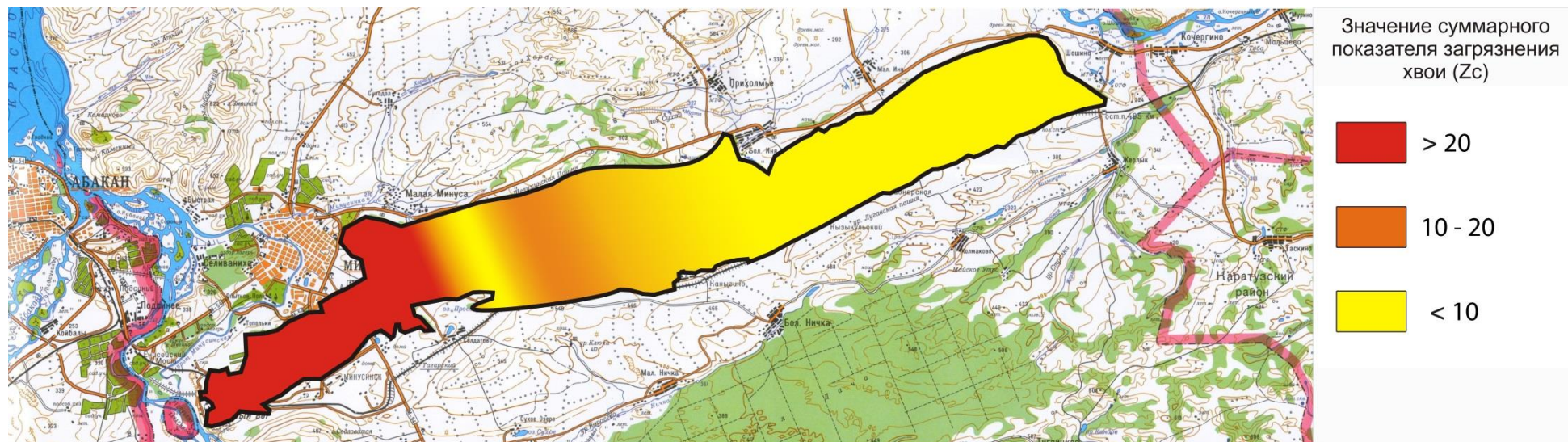
-  - Абакано-Черногорский промузел (включая Филиал "Абаканская ТЭЦ", ООО Хакасский ТеплоЭнергоКомплекс", АО "УК "Разрез Степной", ООО "СУЭК-Хакасия)
-  - Филиал "Минусинская ТЭЦ"
-  - АО "РУСАЛ Саяногорск"



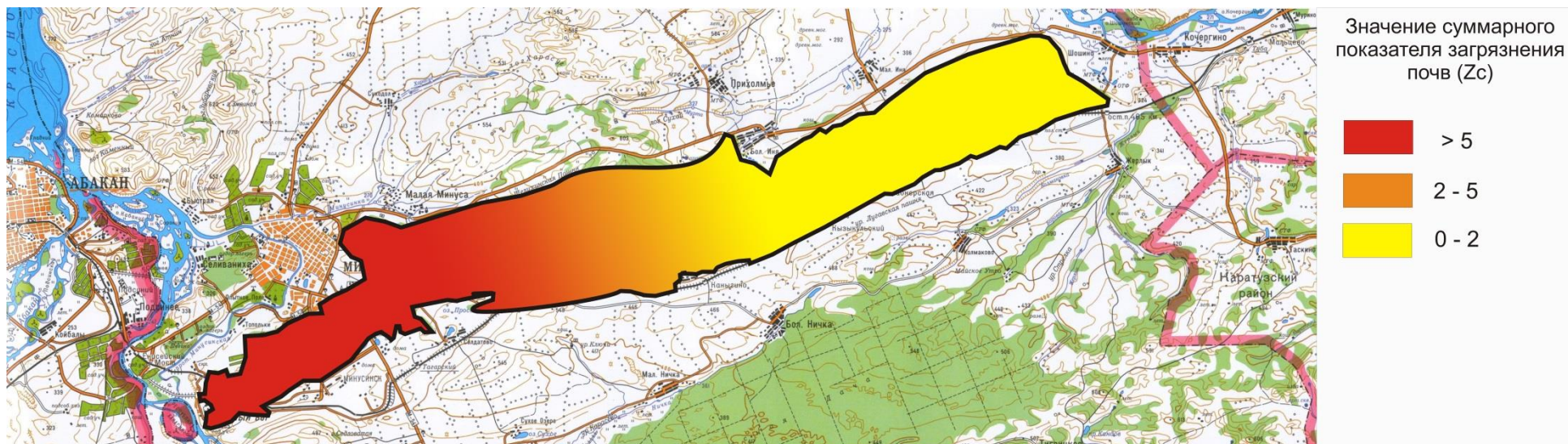
Приложение 2 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения снежного покрова на всем протяжении Минусинского ленточного бора



Приложение 3 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения хвои на всем протяжении Минусинского ленточного бора



Приложение 4 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения почвы на всем протяжении Минусинского ленточного бора



Приложение 5 – Карта-схема, отражающая уровень загрязнения лесной подстилки на всем протяжении Минусинского ленточного бора

