

На правах рукописи



Рыкова Татьяна Владимировна

**ЛЕСОВОДСТВЕННО - ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ
СОСНОВЫХ ЭКОСИСТЕМ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ
МЕТАЛЛАМИ**

4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация,
озеленение, лесная пирология и таксация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Москва – 2024

Диссертация выполнена в Федеральном бюджетном учреждении «Все-
российский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации
лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ)

Научный руководитель: **Мартынюк Александр Александрович** -
доктор сельскохозяйственных наук,
академик РАН, директор ФБУ ВНИИЛМ

Официальные оппоненты: **Менщиков Сергей Леонидович** - доктор
сельскохозяйственных наук, ведущий
научный сотрудник лаборатории экологии
техногенных растительных сообществ
ФГБУН Ботанический сад Уральского от-
деления Российской академии наук
Кулагин Андрей Алексеевич - доктор
биологических наук, профессор кафедры
инженерной защиты окружающей среды
Института гражданской защиты ФГБОУ
ВО «Удмуртский государственный уни-
верситет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования «Воронежский государствен-
ный лесотехнический университет имени
Г.Ф. Морозова»

Защита диссертации состоится «28» июня 2024г. в 10.00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.331.15 при ФГБОУ ВО «Московский государ-
ственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный иссле-
довательский университет)» по адресу: Российская Федерация, 141005, г. Мы-
тищи, улица 1-я Институтская, 1, ауд. 1222.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образо-
вания «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Ба-
умана (национальный исследовательский университет)» <https://bmstu.ru/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. с.-х. н.



М.А. Лавренов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сохранение лесов относится сегодня к приоритетной задаче лесного хозяйства. Одной из причин их ослабления и гибели является влияние техногенного загрязнения окружающей среды, в том числе выбросами тяжелых металлов (ТМ), которое может существенно ухудшать экологическую обстановку в промышленно развитых регионах страны. Согласно данным Росгидромета, за период с 2011 – 2020 гг. около 14 % обследованных зон (включая населенные пункты) вокруг источников загрязнения (в пределах 5 км) относятся к опасной и умеренно опасной категории загрязнения почв тяжелыми металлами. Площадь земель, подвергающихся воздействию различных техногенных факторов составляет более 75 млн га, из них около 18 млн га занимают зоны с загрязненными почвами вблизи промышленных комплексов.

Значительная часть техногенно загрязненных земель занята лесными насаждениями, имеющими не только лесосырьевое значение, но и выполняющими, в первую очередь, важнейшие для промышленных районов средообразующие, экологические и социальные функции. Несмотря на то, что проблеме взаимодействия лесных экосистем с тяжелыми металлами промышленных выбросов посвящены многочисленные научные работы, до настоящего времени сохраняют актуальность исследования особенностей влияния тяжелых металлов на динамику состояния, на структуру и видовое биоразнообразие фитоценозов, реакции видов лесных растений и сообществ на техногенное воздействие в условиях контролируемых нагрузок, а также вопросов количественного определения допустимого загрязнения для снижения вреда лесным насаждениям от промышленного воздействия. Остается важным дальнейшее развитие методологии оценки влияния загрязнителей на состояние лесных насаждений и разработки технологий нормирования допустимого загрязнения лесов тяжелыми металлами, что повысит эффективность управленческих решений по корректировке системы мероприятий, ориентированных на сохранение и реабилитацию ослабленных загрязнением лесов.

Цель работы – изучение устойчивости сосновых экосистем к загрязнению среды тяжелыми металлами для совершенствования экологического нормирования допустимого загрязнения ими лесов (на примере цинка).

Задачи исследований:

- анализ проведенных ранее исследований по загрязнению тяжелыми металлами лесов, произрастающих в зоне влияния промышленных предприятий;
- оценка влияния тяжелых металлов на состояние сосновых экосистем на объекте исследований;
- проведение экспериментальных работ по изучению воздействия тяжелых металлов (на примере цинка) на сосновые экосистемы и их компоненты;
- исследование реакции насаждений сосны обыкновенной деревьев, подроста, самосева, всхожести семян, напочвенного покрова на воздействие цинка;
- экспериментальное обоснование уровня допустимых выпадений цинка для сосновых экосистем района исследований.

Научная новизна:

Разработана методика оценки тяжелых металлов на состояние сосновых насаждений с использованием статистического анализа корреляции между уровнем загрязнения и индексом состояния древостоев.

Экспериментально установлены закономерности изменения параметров роста деревьев, повреждения хвои в древостоях сосны, жизнеспособность самосева и подроста сосны, видового состава напочвенного покрова при разном уровне нормируемых выпадений цинка.

Впервые в условиях полевого эксперимента обоснованы допустимые уровни выпадений цинка для сосновых экосистем региона.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Дополнены научные результаты о реакции компонентов сосновых экосистем на загрязнение их тяжелыми металлами промышленных выбросов.

Разработаны методические подходы по обоснованию допустимых выпадений тяжелых металлов экспериментальным путем при контролируемых величинах нагрузок загрязнителей. Результаты исследований могут быть использованы для прогноза последствий техногенного загрязнения лесных экосистем, а также оценки воздействия промышленных предприятий (ОВОС) на леса.

Материалы исследований использовались ФБУ ВНИИЛМ при совершенствовании нормативной правовой базы по ведению лесного хозяйства в лесах, ослабленных промышленными выбросами, а также комплексном мониторинге состояния лесов в Московской области, при организации мониторинга лесных насаждений и ведению лесного хозяйства в насаждениях музея–усадьбы Л.Н. Толстого «Ясная Поляна».

Методология и методы исследования. Исследования предусматривали проведение комплекса полевых, лабораторных работ, включая полевое экспериментальное изучение влияния различных уровней выпадения цинка на сосновые экосистемы. Использованы общенаучные методы проведения исследований, организации экспериментов и химико-аналитических работ в лесоведении, лесной таксации, метеорологии, почвоведении, геоботанике, а также современные методы статистической обработки результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Особенности миграции цинка в сосновых экосистемах при различных величинах нагрузки.
2. Методические подходы к оценке влияния загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами на состояние сосновых насаждений.
3. Реакция компонентов сосновых экосистем (древостой, подрост, самосев, живой напочвенный покров) на воздействие различных уровней контролируемых выпадений цинка.
4. Экспериментально обоснованные уровни допустимых выпадений цинка для компонентов сосновых экосистем района исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждается наличием достаточного объема экспериментального материала, выполнением полевых и аналитических работ в строгом соответствии с апробированными методиками и стандартами, использованием сертифицированного приборного оборудования, применением современных прикладных компьютерных программ.

Апробация работы. Материалы, представленные в диссертационной работе докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях (Мытищи, МГУЛ, 2002, 2006, 2010), VIII Международной научно-технической конференции «ЛЕС-2006» (Брянск, 2007), VIII Международной

научно-технической конференции «Лесной комплекс, состояние и перспективы развития» (Брянск, БГИТА, 2007), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы лесного комплекса» (Брянск, БГИТА, 2013, 2014, 2018), Международной научно-практической конференции «Развитие «зеленой экономики» и сохранения биоразнообразия» (Республика Казахстан, Щучинск, 2013 год), Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы совершенствования лесоводственных мероприятий в защитных лесах» (Пушкино, ВНИИ ЛМ, 2013), Международной научно-практической конференции по актуальным проблемам экологии и природопользования (Киров, Вятская ГСХА, 2017), Международной научной конференции «Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности» (Краснодар, КубГАУ, 2018), VIII Всероссийской научной конференции с международным участием (Москва, ЦЭПЛ РАН, 2019), XII международной конференции «Охрана и рациональное использование лесных ресурсов» (КНР, г. Хайхе, провинция Хейлунцзян, 2023).

В полном объеме диссертационная работа рассмотрена и рекомендована к защите научно-методической секцией Ученого совета ФБУ ВНИИЛМ.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 26 работ, в том числе 6 статей в журналах перечня ВАК. Результаты исследований использовались при проработке научной тематики ВНИИЛМ.

Личный вклад автора в полученные результаты. Диссертация является индивидуальным трудом автора, самостоятельно подготовлена «Программа и методика работ», автор самостоятельно проводил обработку экспериментальных данных исследований, анализ и интерпретацию полученных результатов. Изучение загрязнения компонентов лесных экосистем, планирование и закладка экспериментальных объектов, полевые, и лабораторные исследования выполнены лично автором или в составе рабочей группы отдела экологии леса ВНИИЛМ. Все основные результаты и выводы получены лично автором. В статьях, опубликованных в соавторстве, часть личного вклада автора диссертации составляет 70–80%.

Объем и структура работы. Материалы диссертационной работы представлены на 171 стр. включая введение, шесть глав, заключение, список использованной литературы и приложения. Материалы содержат 22 таблицы, 13 рисунков, 4 приложения. Список использованной литературы включает 231 источников, из них 29 иностранных.

Автор выражает особую признательность научному руководителю, д.с.-х.н., академику РАН А.А.Мартынюку за научное руководство и поддержку в исследованиях, к.с.-х.н. В.М.Сидоренкову за помощь в обработке данных и полезные советы. Автор благодарен своим коллегам из отдела экологии леса и охраны природы ВНИИЛМ: к.с.-х.н. В.Д. Касимову, к.б.н. В.Н. Кураеву, к.с.-х.н. Л.Л. Коженкову, И.Ю. Омехиной, Е.В.Дорониной, Л.Ф.Лизуновой, коллегам из отдела лесной пирологии, научно – методического и издательского отделов за помощь, оказанную в разные годы, при проведении полевых, лабораторных и камеральных работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены обоснование актуальности темы диссертационной работы, цель и задачи исследований, научная новизна, основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен аналитический обзор литературных источников, отражающий особенности загрязнения природной среды основными тяжелыми металлами (ТМ) и их воздействие на лесные экосистемы. Приведен анализ объемов естественных и антропогенных выбросов, характеристика источников загрязнения, оценка их геохимических свойств, особенностей миграции и локализации в компонентах природной среды, растительных организмах, сведений по фоновому содержанию в отдельных компонентах лесных экосистем (Алексеев, 1987; Виноградов, 1957; Бандман и др. 1988; Глазовская, 1988; Добровольский, 1983; Иванова, 1975; Кулагин, 1974; Мартынюк, 2004; Перельман, 1972; Прохорова, 1998; Рассеянные элементы..., 2004; Смит, 1985; Снакин, 1998; Хомич, 2004; Черненко, 2002; Баркан, 2008; Водяницкий, 2012; Вертинский, 2020; и др.).

Обобщены литературные данные по фитотоксичности основных тяжелых металлов для лесной растительности, рассмотрены особенности их биологической значимости, симптомы повреждения и механизмы металлоустойчивости растений (Бухаринова, 2019; Башмаков, 2022; Влияние загрязнений..., 1981; Влияние..., 1984; Алексеев, 1987; Гуральчук, 1990; Дьякова, 2020; Ильин, 1991; Устойчивость ..., 1991; Степанюк, Голенецкий, 1991; Черных, 1991; Тяжелые металлы..., 1994; Техногенное загрязнение..., 1995; Мартынюк, Щепашенко, 1996; Матвеев, 1997; Николаевский, 1998; Биоиндикация..., 1988; Прохорова, 1998; Титов, 2014; и др.).

Предложена оригинальная классификация фитотоксичных веществ, содержащихся в промышленных выбросах в зависимости от их агрегатных форм, химических свойств, особенностей миграции и влияния на растительность.

Системно рассмотрен комплекс мероприятий по сохранению и повышению устойчивости лесов к техногенному загрязнению (Илькун, 1978; Гудериан, 1979; Кулагин, 1980; Капралов, 1981; Влияние загрязнителей..., 1981; 1989; Тарасенко, 1991; Рекомендации..., 2001; Цветков, 2003; Автухович, 2006; Мартынюк, 2009; Podrazsky, 1995; Экологическое..., 2013; Chibuike, 2014; и др.). Сделан вывод, что гарантированная эффективность лесохозяйственных мероприятий может быть достигнута только при сокращении техногенных нагрузок загрязнителей до безвредных для лесной растительности объемов. Такой подход подразумевает в качестве первоочередной меры определение значений допустимого воздействия фитотоксикантов на леса.

В главе 2 представлена характеристика природных условий района исследований, программа и методика исследований, описание объектов работ. Научные исследования проводились в сосновых насаждениях Воскресенского научно-исследовательского стационара ВНИИЛМ, Виноградовского и Куровского лесничеств Московской области.

Изучаемые леса относятся к району хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации. Согласно почвенно-географическому районированию территория входит в состав Средне-Русской провинции подзоны дерново-подзолистых и зоны серых лесных почв.

Загрязнение окружающей среды и лесов на объекте исследований формировалось за счет выбросов более 30 предприятий по производству минеральных удобрений, цемента, строительных материалов, металлообработки и машиностроения, расположенных как в г. Воскресенске и муниципальном районе, а также на сопредельных территориях.

Исследования предусматривали комплекс лабораторных работ и полевое экспериментальное изучение влияния различных уровней выпадения (нагрузок) цинка на сосновые насаждения.

Для полевых исследований в лесных экосистемах использовались постоянные пробные площади (пр.пл.), заложенные в разные годы отделом экологии леса и охраны природы ВНИИЛМ (автор диссертации принимал участие в закладке и описании пр.пл.): 26 пр. пл., в т.ч. в молодняках и средневозрастных – 13, в приспевающих, спелых и перестойных насаждениях – 13. Большинство пр.пл. представлено сосняками сложными (17), на сосняки зеленомошниковые приходится 9 пробных площадей.

Лесоводственно-геоботаническое описание насаждений на пробных площадях выполнялось по В.Н. Сукачеву и С.В. Зонну (Сукачев, Зонн, 1964). Таксационные измерения в насаждениях на пробных площадях выполнялись по Н.П. Анучину (Анучин, 1977). Визуальная оценка состояния древостоев сосны проводили по методике ВНИИЛМ (Временная..., 1986).

Для проведения полевых экспериментов по изучению влияния цинка на сосновые экосистемы были заложены три стационарных опытных участка в сосняках зеленомошниковых (в 15-летних культурах, средневозрастных и спелых насаждениях), имеющих фоновые показатели по уровню загрязнения, состоянию и таксационным характеристикам древостоя, характеру возобновления, травяному и напочвенному покрову. Цинк в виде соли азотнокислого цинка ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) вносили на поверхность почвы по вариантам нагрузок (выпадений) элемента: в молодняках: 1) контроль (0 г/м²); 2) 7 г/м²; 3) 30 г/м²; 4) 90 г/м²; 5) 150 г/м²; 6) 225 г/м²; 7) 300 г/м²; в средневозрастных насаждениях варианты 1-7 и 8) 600 г/м²; в спелых насаждениях: 1-8 и 9) 900 г/м².

Методика исследований предусматривала отбор проб почвы в пятикратной повторности по слоям (0-5, 5-10; 10- 20; 20-40 и 40-60 см) на стационарных участках два раза за вегетационный сезон для изучения перераспределения цинка по почвенному профилю.

В средневозрастном насаждении (участок II) в пределах площадок с разными нагрузками цинка устанавливались лизиметры конструкции Шиловой, что позволило оценить миграцию элемента с почвенными водами. Под пологом насаждения был заложен эксперимент по изучению влияния выпадений цинка на состояние и развитие самосева и подроста сосны (учетные площадки 2×2 м, повторность двукратная, азотнокислый цинк внесен по следующим вариантам: 1) контроль (0 г/м²); 2) 7 г/м²; 3) 30 г/м²; 4) 90 г/м²; 5) 150 г/м²; 6) 225 г/м²; 7) 300 г/м²). Учет состояния самосева и подроста проводили по следующей шкале: 1 – без признаков ослабления; 2 – ослабленные; 3 – усыхающие; 4 – сухие.

Динамика радиального прироста деревьев устанавливалась по кернам, отбираемым приростным буром на высоте груди (1.3 м). Ход роста насаждений по высоте характеризовался измерениями прироста по мутовкам деревьев.

Содержание тяжелых металлов в почвенных образцах определялось на атомно-абсорбционном спектрометре «КВАНТ-З.ЭТА». Пробоподготовку почвенных образцов осуществляли по методике ЦИНАО.

Видовой состав и проективное покрытие напочвенного покрова ценозов изучали на участках эксперимента, закладывая по их диагоналям пять площадок размером 1 × 1 м, на которых учитывали все виды травяного и мохового покрова, фиксировали их состояние, фазу развития.

Обработка данных проводилась на современных компьютерных средствах с применением методик вариационной статистики, использованием стандартного статистического пакета Microsoft Office – Microsoft Excel 2007, STATISTICA 12.

В главе 3 представлена оценка загрязнения тяжелыми металлами некоторых компонентов лесных экосистем. Обобщая опубликованные научные результаты исследований загрязнения природной среды на территории стационара (Мартынюк и др., 2011; Мартынюк, Рыкова, 2013; Мартынюк, Рыкова, 2014), следует отметить щелочной характер реакции снеговых вод, что обусловлено, прежде всего, пылевыми выбросами промышленных предприятий.

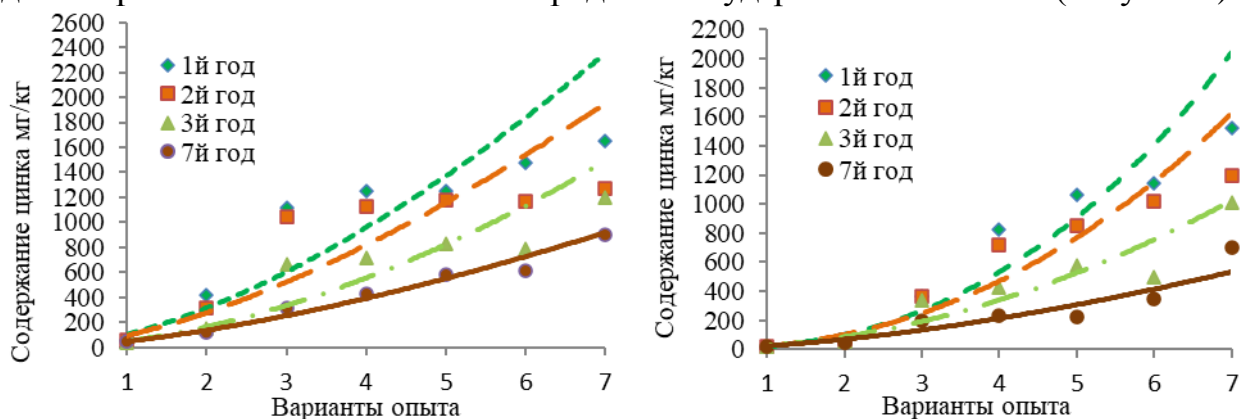
Наибольшее содержание приходится на взвешенные вещества. В составе растворимой части снеговых вод стационара среди изученных катионов преобладает железо, среди анионов – сульфаты и хлориды. Среднее содержание растворимого цинка в снеговых водах на территории района в 2,5 раза выше фоновых (на удалении 25 км и более от г. Воскресенска) значений, кобальта – в 8 раз, никеля и кадмия – в 5 раз. По уровню средних концентраций в растворимой части снеговых вод изученные тяжелые металлы образуют следующий ряд: Zn > Ni > Co > Cu = Cr > Cd.

Повышенное содержание цинка в снеговых водах (в диссертационном исследовании данный элемент изучался более детально, в том числе в экспериментах по воздействию на компоненты лесных экосистем) тяготеет к городской территории. Вблизи стационарных участков, заложенных для целей научных экспериментов, содержание цинка не превышает 0,027-0,037 мг/л, то есть примерно в два раза ниже фоновых значений, что подтверждает пригодность их для проведения полевых экспериментальных работ.

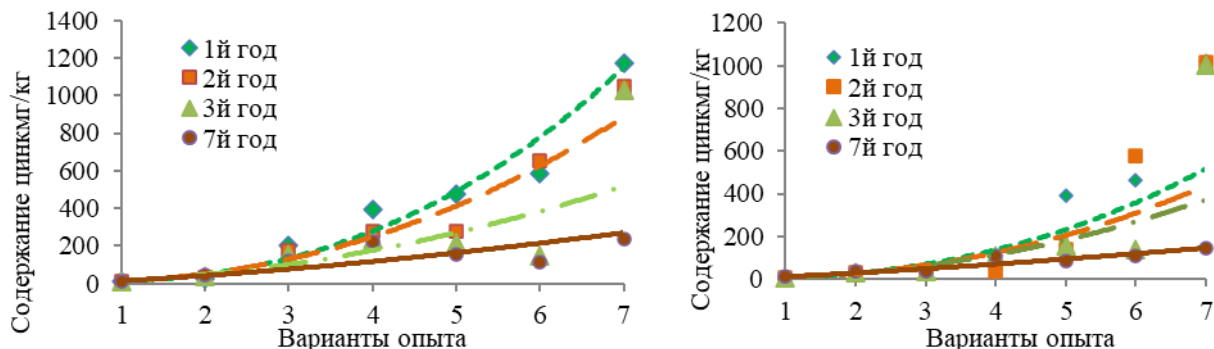
Согласно нашим расчетам, в среднем за год в насаждения стационара с природными осадками выпадает 2,6 кг/га изучаемых тяжелых металлов, из них в наибольших количествах цинка (1 кг/га), никеля (0,8 кг/га) и кобальта (0,5 кг/га). Максимальные оценки общих выпадений металлов с осадками составляют 46 кг/га в год (4,6 г/м²), в том числе по цинку и кобальту – около 15 кг/га (1,5 г/м²), никелю – 12 кг/га (1,2 г/м²), меди – около 4 кг/га (0,4 г/м²).

На территории района исследований по среднему содержанию ТМ в подстилке сосновых насаждений наблюдается следующий ряд: Zn > Pb > Cu > Ni > Co > Cd. Аналогичное распределение элементов характерно и для лесных почв (Методические...1981; Реуце, 1986; Черных, 1991; Экологическое..., 2013). Следовательно, для изученных компонентов окружающей среды (снег, лесная подстилка, почва), цинк среди тяжелых металлов является основным загрязняющим веществом (Мартынюк, Рыкова, 2014; Рыкова, 2019).

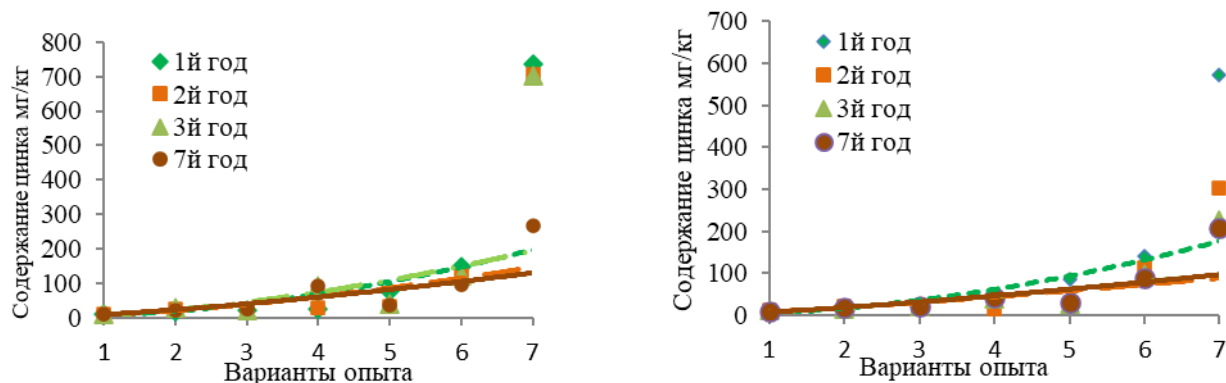
В полевом эксперименте при внесении цинка на поверхность почвы установлено, что распределение элемента по почвенному профилю в целом и его динамика во времени коррелируют с объемами поступления на поверхность почвы. При небольших уровнях выпадения (до 90 г/м²) в молодняках сосны цинк почти полностью поглощался верхним слоем почвы 0-20 см. С увеличением нагрузки до 150-300 г/м² более половины его удерживалось в верхнем слое, а остальное количество поступало вглубь почвы или частично поглощалось корнями растений. С течением времени происходило постепенное выщелачивание избыточных концентраций цинка вниз по почвенному профилю, что подтверждается содержанием металла в пробах, отобранных в разных слоях почвы. Концентрация элемента в слое почвы 0–60 см на второй – седьмой годы после его внесения на поверхность постепенно уменьшалась, однако даже через 7 лет около 35–75 % Zn продолжало удерживаться почвой (Рисунок 1).



а – глубина отбора проб 0-1 см (лесная подстилка) б – глубина отбора проб 1-5 см



в–глубина отбора проб 5-10см г–глубина отбора проб 10-20см



д – глубина отбора проб 20-40 см е – глубина отбора проб 40-60 см

Рисунок 1. Динамика содержания подвижного цинка в почве по вариантам опыта на стационарном участке I (сосновые молодняки)

Концентрация цинка в слое 0-20 см почвы средневозрастного насаждения сосны, при одинаковых величинах его выпадения, была в 1,2-1,5 раза меньше по сравнению с молодыми культурами, что, по-видимому, обусловлено наличием в древостое хорошо сформированного слоя лесной подстилки, перехватывающей поступление атмосферных выпадений в минеральные горизонты почвы, а также поглощением элемента более развитой корневой системой деревьев.

Указанные выводы подтверждаются результатами лизиметрических исследований. Следовательно, значительно большая часть поступающего цинка аккумулируется в лесной подстилке, закрепляется в почве, а также поглощается растениями лесной экосистемы в процессе жизнедеятельности.

Глава 4 посвящена изучению изменения показателей состояния и роста сосновых древостоев при различных уровнях загрязнения среды. На основе статистического анализа корреляции между накоплением загрязнителей в снеговом покрове и индексом состояния древостоев разработана методология оценки влияния загрязнения окружающей среды ТМ на состояние сосновых насаждений. Показано, что невысокая теснота связи между индексами состояния древостоев и накоплением в снеге растворимых форм тяжелых металлов, а также незначимость коэффициентов корреляции этой связи для всех изученных возрастных групп насаждений, свидетельствует о несущественном влиянии ТМ на состояние сосновых насаждений района исследований (Таблица 1).

Таблица 1

Величины коэффициентов корреляции между накоплением тяжелых металлов в снеговом покрове (кг/га) и индексом состояния древостоев (ИС)

Показатели	Cu	Zn	Ni	Co	Cd	Сумма ТМ
1. Молодняки, средневозрастные насаждения						
ИС, баллы	-0,40	0,44	0,01	- 0,29	- 0,51	- 0,03
t _{расч.}	1,45	1,62	0,03	1,00	1,97	0,10
t _{табл.} P=0,95	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
2. Приспевающие, спелые насаждения						
ИС, баллы	0,54	- 0,12	0,07	0,05	0,34	0,07
t _{расч.}	2,12	0,40	0,23	0,16	1,20	0,23
t _{табл.} P=0,95	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2

Результатами полевого эксперимента доказано увеличение степени дехромации хвои сосны под влиянием цинка, что может быть обусловлено разрушением хлорофилла (Рисунок 2). В сосновых молодняках спустя год после внесения $Zn(NO_3)_2$ дехромация хвои наблюдалась при нагрузках 150-225-300 г/м² у 13%, 47% и 94% деревьев соответственно. Существенное ухудшение биометрических показателей хвоинок (их длины и массы) наблюдалось при нагрузках 225 и 300 г/м².

В молодняках сосны спустя два года после внесения $Zn(NO_3)_2$ индекс состояния древостоя начал ухудшаться с нагрузки 30 г/м², снизившись при 90 – 150 г/м² до ИС=1,7 балла – слабая степень ослабления, при 225 и 300 г/м² – до ИС=3.45 и 4.0 балла – сильное ослабление, близкое к усыханию (Рисунок 3).

Выпадения цинка изменяют распределение деревьев в древостое по категориям состояния: при нагрузках 30–150 г/м² в молодняках через год после внесения элемента на 20–35% возрастает количество деревьев 2-й категории состояния (слабое ослабление). На третий год число здоровых деревьев стабилизиру-

ется в пределах 5-8% во всех вариантах опыта. При 30–150 г/м² доля ослабленных деревьев (2-я категория) достигает 85–95%; при 225–300 г/м² древостой на 50 – 70% состоит из усыхающих и сухих деревьев, т.е. фактически распадается.

Состояние средневозрастных сосняков характеризуется снижением индекса состояния древостоев в 2–3,4 раза при нагрузках цинка 225–300–600 г/м². Ухудшение состояния спелых сосняков наблюдается на участках с нагрузкой цинка в 600 и 900 г/м² (на 0,8–2,0 балла).

Увеличение техногенной нагрузки цинка приводит к ухудшению состояния древостоев (повышению среднего индекса состояния), которое выражается в пропорциональном изменении распределения деревьев по состоянию в направлении повышения доли категорий разной степени ослабления, вплоть до усыхающих. При этом скорость перехода деревьев к более высокому ослаблению и увеличение отпада в древостоях увеличиваются по градиенту техногенной нагрузки.

Выпадение цинка приводило к снижению линейного прироста молодняков сосны почти на всех вариантах опыта, за исключением контроля и варианта с нагрузкой 7 г/м². Наибольшее снижение прироста произошло в вариантах с максимальными уровнями выпадений – 225 г/м² и 300 г/м² на 43% и 74% относительно контроля соответственно. Спустя 3–5 лет рост деревьев на участках с уровнями выпадений цинка 30 г/м², 90 и 150 г/м² постепенно восстановился и практически приблизился к контролю. В то же время на вариантах эксперимента с более высокими нагрузками (225 и 300 г/м²) сохранилось значительное его отставание от контрольных значений.



Рисунок 2. Дехромация деревьев сосны на участке с нагрузкой цинка 300 г/м²

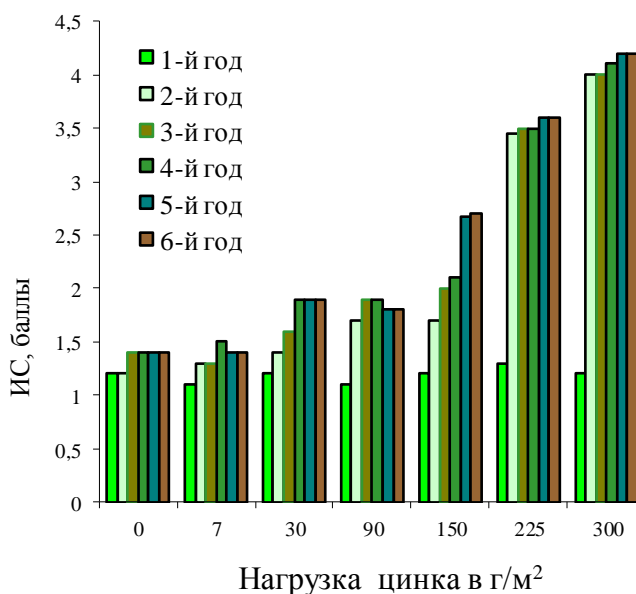


Рисунок 3. Динамика состояния древостоев молодняков сосны при различных величинах нагрузок цинка по годам наблюдения

В условиях загрязнения цинком при формировании ежегодного радиального прироста на фоне сниженной камбиальной активности возрастает доля поздней древесины, достигая максимума при наибольших величинах нагрузок. Этот показатель может служить дополнительным неспецифическим индикатором при оценке состояния древостоев в условиях загрязнения почвы.

В главе 5 представлена реакция подчиненных ярусов соснового фитоценоза на загрязнение среды металлами. В условиях полевого эксперимента установлено устойчивое снижение количества всходов сосны под пологом древостоя с нагрузки 30 г/м² цинка и более. Данное обстоятельство обусловлено отрицательным влиянием цинка на энергию прорастания и всхожесть семян, что подтверждено результатами лабораторного опыта: даже низкие нагрузки цинка (7г/м²) снижали энергию прорастания семян на 25 % и их всхожесть на 30 %. С повышением уровня нагрузок данные показатели ухудшались, а при 225 – 300 г/м² – снижались до минимальных и даже нулевых значений.

На участке II в средневозрастных сосняках зеленомошниковых сохранность самосева и подроста в течение трех лет наблюдений при нагрузке цинка в 30 г/м² снижалась на 20 %, причем, в основном, за счет более низких градаций по высоте (6-10 и 10-20 см). С увеличением нагрузок до 225 г/м² отмечено устойчивое снижение сохранности по всем градациям высот. Максимальная нагрузка 300 г/м² уже на второй год наблюдений вызывала гибель всего самосева и подроста (Рисунок 4).

При нагрузке 150 г/м² отмечалось уменьшение числа видов в травяном покрове до 38%, 300 г/м² – 71%, 600 г/м² – 73% (Рисунок 5). Повышенной устойчивостью к загрязнению, по сравнению с другими группами травянистых растений, отличаются злаки. Достаточно устойчивы напочвенные лишайники – *Cetraria islandica* и *Cladonia rangiferina*.

В главе 6 на принципах экологических подходов к нормированию техногенного воздействия на леса (Воробейчик, 1994; Цветков, Цветков, 2003; Мартынюк, 2009; 2018) проведено обоснование допустимого уровня выпадений цинка для сосновых экосистем района исследований. Для этих целей использованы результаты, полученные при изучении влияния различных нагрузок элемента (г/м²) на показатели состояния молодняков сосны. Выбор молодняков для данных целей определен в связи с наиболее полным объемом выполненных исследований, что позволило сформировать ряды наблюдений, статистическая обработка которых обеспечивает необходимый уровень значимости результатов.

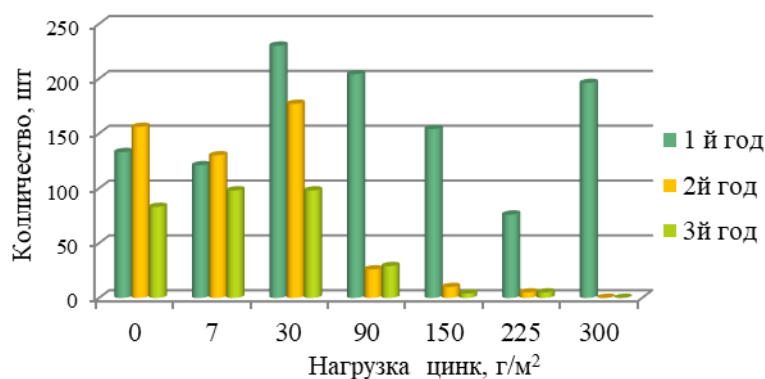


Рисунок 4. Динамика изменения количества самосева и подроста в зависимости от нагрузки цинка

В качестве параметров состояния экосистем при определении зависимости «доза-эффект» использовались такие показатели как индекс состояния, отпад деревьев, средний прирост по высоте, длина и дехромация хвои 1-го года

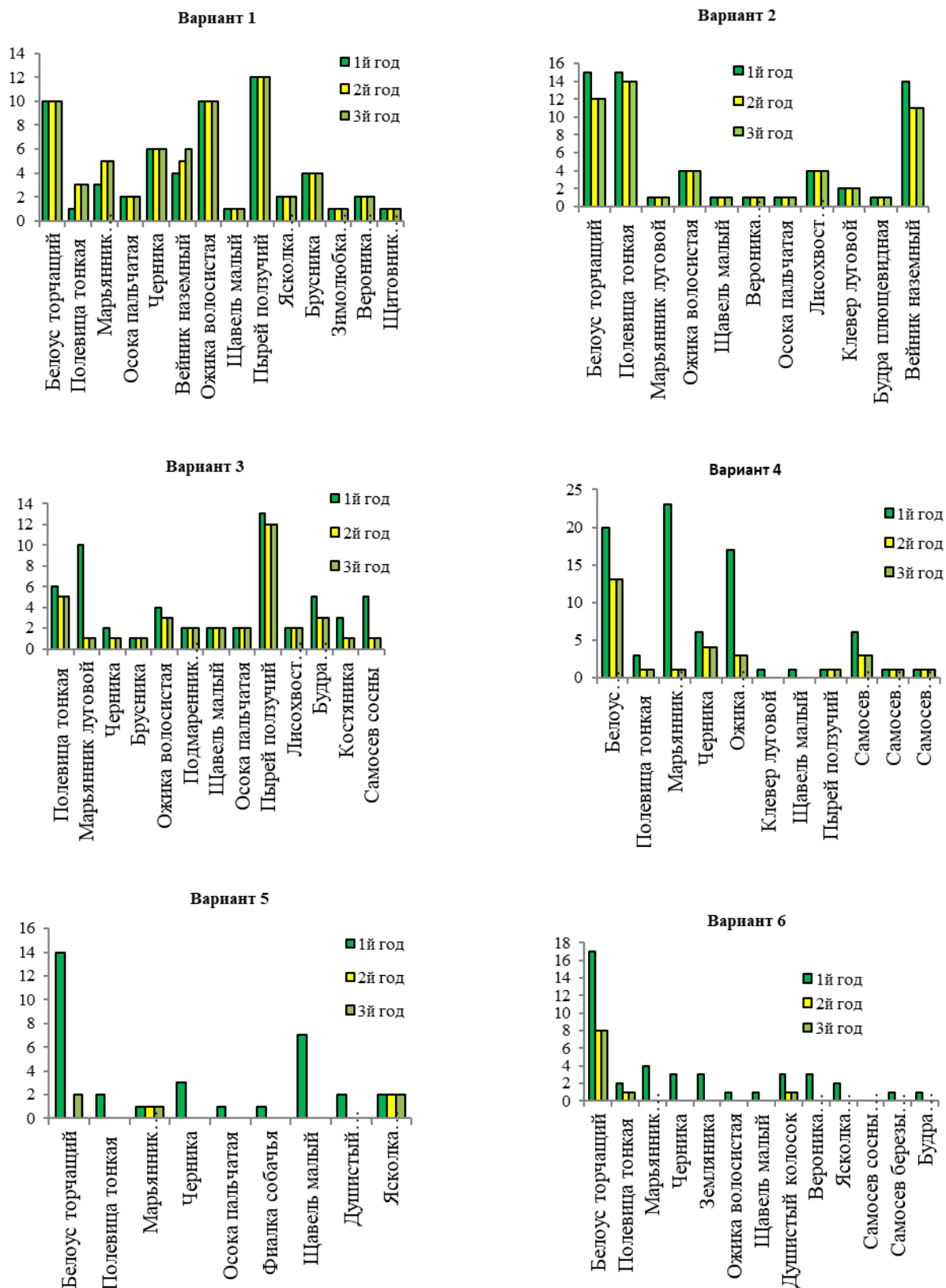


Рисунок 5. Динамика количества видов (шт.) травянистой растительности в средневозрастных сосняках

жизни, всхожесть семян сосны, количество и сохранность всходов и самосева сосны под пологом средневозрастных древостоев, доля выпавших видов и процент пожелтения мохового яруса при оценке травяного и напочвенного покрова. Данный набор показателей- индикаторов состояния позволил достаточно полно характеризовать реакцию сосновых экосистем на воздействие нагрузок цинка (Таблица 2).

Таблица 2

Оценка допустимого уровня выпадений цинка сосновых насаждений

Показатели состояния древостоя	Уравнения	R ²	Референсные значения показателей ⁽¹⁾	Допустимый уровень выпадений Zn, г/м ² ⁽²⁾
Показатели древостоя				
Дехромация хвои, %	$y = 22,31 + 1,33x + 0,014x^2$	0,91	0 – 5	$\frac{22 - 29}{26}$
Длина хвои, мм	$y = -199,50 + 0,96x + \frac{15150,92}{x} - \frac{98,93}{x^2}$	0,61	$\frac{53 - 82}{69}$	$\frac{137 - 62}{86}$
Средний линейный прирост, см/год	$y = 279,52 - 31,92\sqrt{x}$	0,69	$\frac{10 - 69}{44}$	$\frac{179 - 14}{68}$
Отпад (доля погибших деревьев), %	$y = 54,00 + 4,09x - 0,008x^2$	0,78	0 – 2	$\frac{54 - 62}{58}$
Индекс состояния, баллы	$y = -32,36 + 44,08x + 3,57x^2$	0,76	1,50	42
Возобновление сосны				
Всхожесть семян сосны, шт.	$y = 516,77 - 14,74x + 0,11x^2$	0,81	65	23
Количество всходов сосны в насаждении, шт.	$y = 329,01 + 1,69x - 46,56x^{-2}$	0,80	$\frac{95 - 199}{130}$	$\frac{36 - 9}{18}$
Количество самосева сосны в насаждении, шт.	$y = 261,79 + 5,39x - 74,97\sqrt{x}$	0,87	$\frac{9 - 64}{31}$	$\frac{85 - 7}{11}$
Сохранность самосева, % от контроля	$y = 297,87 + 3,89x - 67,61\sqrt{x}$	0,95	$\frac{65 - 81}{72}$	$\frac{7 - 4}{5}$
Травяной и моховой покров				
Дехромация мхов, %	$y = 16,76 - 1,47x + 0,037x^2$	0,96	0	17
Количество выпавших видов травяного покрова, %	$y = 4,60 + 1,99x - 0,06x^2 + 0,0007x^3$	0,97	$\frac{13 - 14}{14}$	$\frac{22 - 23}{23}$

Примечание: 1 – в числителе даны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние значения показателей; 2 – значения допустимого уровня выпадений цинка округлены до целого числа

За величину предельно допустимого (критического) выпадения (нагрузок) предлагается принимать минимальные расчетные значения, поскольку они характеризуют начало структурно-функциональных перестроек в лесном насаждении. По изученным показателям значения предельно допустимых выпадений

цинка для сосновых экосистем будут следующие: сохранность самосева – $4\text{г}/\text{м}^2$ (40 кг/га), количество самосева сосны $7\text{ г}/\text{м}^2$ (70 кг/га), количество всходов сосны – $9\text{ г}/\text{м}^2$ (90 кг/га), дехромация мхов – $17\text{ г}/\text{м}^2$ (170 кг/га), дехромация хвои – $22\text{ г}/\text{м}^2$ (220 кг/га), ежегодный прирост по высоте – $14\text{ г}/\text{м}^2$ (140 кг/га), индекс состояния древостоя – $42\text{ г}/\text{м}^2$ (420 кг/га), отпад деревьев – $54\text{ г}/\text{м}^2$ (540 кг/га), длина хвои – $62\text{ г}/\text{м}^2$ (620 кг/га).

Выводы и предложения

1. Несмотря на многочисленные исследования, остаются не до конца раскрытыми закономерности загрязнения тяжелыми металлами отдельных компонентов лесных экосистем, особенности их влияния на состояние и динамику структуры лесного фитоценоза, а также вопросы определения пороговых значений их допустимого воздействия как первоочередной меры по сокращению ущерба лесам от техногенного загрязнения.

2. По уровню средних концентраций в растворимой части снеговых вод изученные тяжелые металлы на объекте исследований образуют следующий ряд: $\text{Zn} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Cu} = \text{Cr} > \text{Cd}$; в лесной подстилке и почвах: $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Cd}$.

Цинк является основным загрязняющим элементом лесных экосистем среди изучаемых тяжелых металлов.

3. В полевом эксперименте с внесением азотнокислого цинка на поверхность почвы установлено, что распределение элемента по почвенному профилю и его динамика во времени коррелируют с объемами поступления. При небольших нагрузках (до $90\text{ г}/\text{м}^2$) цинк почти полностью поглощается верхним слоем почвы (0–20 см). С увеличением нагрузки до $150\text{--}300\text{ г}/\text{м}^2$ более половины его удерживалось в верхнем слое, а остальное количество поступает вглубь почвы или частично поглощается корнями растений. Концентрация цинка в слое почвы 0 – 60 см постепенно уменьшается, однако даже через 7 лет около 35–75 % Zn, в зависимости от объема первоначальных выпадений, удерживается почвой.

4. Вынос цинка за пределы корнеобитаемого слоя деревьев с лизиметрическими водами увеличивается с возрастанием его техногенной нагрузки. Даже при максимальной нагрузке в $600\text{ г}/\text{м}^2$ значение выноса не превышает 1,6 % от вносимой нагрузки, что свидетельствует о преимущественной аккумуляции элемента в лесной подстилке и почве, а также поглощении растениями лесной экосистемы в процессе жизнедеятельности.

5. Разработана методика оценки аэротехногенного влияния тяжелых металлов на состояние сосновых насаждений с использованием статистического анализа корреляции между накоплением загрязнителей в снежном покрове и индексом состояния древостоев. Предложения позволяют доказательно оценивать воздействие техногенного загрязнения на состояние лесов.

6. Невысокая теснота связи между индексами состояния древостоев и накоплением в снеге растворимых форм тяжелых металлов, а также незначительность коэффициентов корреляции этой связи для изученных возрастных групп насаждений свидетельствует, что наблюдаемый уровень загрязнения лесов тяжелыми металлами оказывает несущественное влияние на состояние сосновых насаждений района исследований.

7. Полевыми экспериментами установлено, что избыточное поступление цинка в организм деревьев приводит к дехромации (хлорозу) ассимиляционных органов, которая возрастает с увеличением интенсивности воздействия. В молодняках сосны, спустя год после внесения цинка, хлороз хвои наблюдался при нагрузках 150–225–300 г/м² у 13%, 47% и 94% деревьев соответственно. Нагрузки цинка 225 и 300 г/м² существенно уменьшали длину и массу хвоинок.

8. После двух лет воздействия цинка индекс состояния молодняков сосны начал ухудшаться с нагрузки в 30 г/м², снизившись при 90 – 150 г/м² до ИС=1,7 балла (слабо ослабленное насаждение), при 225 и 300 г/м² – до ИС=3.45 (сильно ослабленное насаждение) и ИС = 4.0 балла (усыхающее насаждение) соответственно. Ухудшение состояния древостоев приводит к перераспределению деревьев различных категорий в составе, причем интенсивность перехода от более здоровых деревьев к более ослабленным и интенсивность образования отпада возрастают с увеличением нагрузки металла. К завершению эксперимента при выпадениях цинка 225 – 300 г/м² древостой на 50 – 70% состоял из усыхающих и сухих деревьев, т.е. фактически распался. Состояние средневозрастных сосняков при нагрузках цинка 225–300–600 г/м² снижалось в 2–3,4 раза, по сравнению с контролем. Ухудшение состояния спелых сосняков наблюдалось на участках с нагрузкой цинка в 600 и 900 г/м² (на 0,8–2,0 балла).

9. Загрязнение почвы цинком отрицательно влияет на энергию прорастания семян сосны и количество их всходов, снижаясь со 100 % на контроле до 11 % при нагрузке 300 г/м² и 0 % – при 600 г/м². Практически необратимые изменения в состоянии естественного возобновления сосны (всходы, самосев, подрост) наблюдались при нагрузке цинка 90 г/м² и более.

10. Реакция флористического состава травяно–кустарничкового и мохового ярусов растительности сосняков зеленомошниковых на загрязнение проявлялась в уменьшении числа видов в травяном покрове. Компоненты подпологовых ярусов и отдельных видов растений по чувствительности к воздействию нагрузок цинка составляют последовательность: всходы сосны > моховой ярус > злаки > самосев, молодой подрост > черника.

11. За величину предельно допустимого (критического) выпадения (нагрузок) рекомендуется принимать минимальные расчетные значения, которые характеризуют начало структурно–функциональных перестроек в древостое. Величины установленных допустимых нагрузок, отражающих чувствительность разных компонентов древостоя к воздействию цинка, образуют следующий ряд: сохранность самосева сосны (4 г/м²) > количество самосева сосны (7 г/м²) > количество всходов сосны (9 г/м²) > ежегодный прирост по высоте (14 г/м²) > дехромация мхов (17 г/м²) > количество выпавших видов травяного покрова = дехромация хвои деревьев (22 г/м²) > индекс состояния древостоя (42 г/м²) > отпад деревьев (54 г/м²) > длина хвои (62 г/м²).

12. Предложена технология определения допустимого воздействия тяжелых металлов на лесные насаждения на основе полевых экспериментальных работ, что значительно повышает объективность экологического нормирования техногенного воздействия на леса. Разработанные подходы могут быть использованы для прогноза последствий техногенного загрязнения лесных

экосистем, а также оценки воздействия промышленных предприятий на леса.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Рыкова Т.В.** Изменение параметров сосновых экосистем подмосковной Мещеры под воздействием цинка (модельный эксперимент) // Лесной Вестник Московского государственного университета леса, 2006. №6 (48). С.12-18. (0,38 п.л.).

2. Мартынюк А.А., Дороничева Е.В., **Рыкова Т.В.**, Таран В.С. О некоторых экологических закономерностях в сосновых насаждениях при атмосферных осадках // Вестник РУДН. Сер.: Проблемы комплексной безопасности, 2007. №3(11). С.43-47. (0,32 п.л./0,08 п.л.).

3. **Рыкова Т.В.** Изучение реакции сосновых фитоценозов на выпадение тяжелых металлов в условиях полевого эксперимента. // Лесохоз. информ.: электрон.сетевой журн. 2015. №1. С. 62-71. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>. (0,63 п.л.).

4. Мартынюк А.А., **Рыкова Т.В.** Обоснование допустимых выпадений тяжелых металлов на сосновые экосистемы в полевом эксперименте // Лесной вестник, 2016. № 1. С. 99-104. (0,31 п.л./0,16 п.л.).

5. **Рыкова Т.В.** Оценка реакции древостоя сосновых молодняков на внесение азотнокислого цинка в полевом эксперименте // [Электронный ресурс] /Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2019. № 1.С. 125-136. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>. (0,75 п.л.).

6. **Рыкова Т.В.** Фитотоксичность выпадений цинка для сосновых фитоценозов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 246. С. 177-190. (0,88 п.л.).

Публикации в рецензируемых изданиях и материалы конференций

7. Фитотоксичность солей цинка для насаждений сосны обыкновенной при почвенном внесении в полевом эксперименте/А.А.Мартынюк, **Т.В. Рыкова**, Л.Л. Коженков, Е.В. Дороничева, И.Ю. Омехина // Мониторинг состояния лесных и урбо-экосистем. – Международная научная конференция /Тезисы докладов. М.: МГУЛ.2002. С.49-51. (0,18п.л./0,036п.л.).

8. Дороничева Е.В., Мартынюк А.А., **Рыкова Т.В.**, Коженков Л.Л. Изучение влияния кислотных осадков на листовые экосистемы Подмосковья // Мониторинг состояния лесных и урбо-экосистем. – Международная научная конференция. Тезисы докладов. М.: МГУЛ. 2002. С.47-49. (0,18 п.л./0,046 п.л.).

9. Техногенное загрязнение окружающей среды и итоги экологического нормирования химического воздействия на леса/ Мартынюк А.А, Коженков Л.Л., Дороничева Е.В., **Рыкова Т.В.**, Михайлова А.С. // Сборник трудов, посвященный 70-летию Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства. – Пушкино: ВНИИЛМ, 2004. С.88-99. (0,75п.л./0,15 п.л.).

10. **Рыкова Т.В.**, Касимов В.Д., Омехина И.Ю. Формирование структуры древесины сосны обыкновенной в условиях почвенного загрязнения природной среды (модельный опыт). //Актуальные проблемы лесного комплекса. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 17. Брянск: БГИТА, 2007. С.225-227. (0,18 п.л./0,06 п.л.).

11. **Рыкова Т.В.**, Мартынюк А.А., Касимов В.Д. Состояние самосева и подроста сосны обыкновенной при загрязнении лесных почв цинком (модельный опыт) //

Актуальные проблемы лесного комплекса / Под ред. Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 19. – Брянск: БГИТА, 2007. С.151-154. (0,25п.л./0,08п.л.).

12. Оптимизация антропогенных нагрузок на лесные биогеоценозы при экологическом туризме / **Т.В. Рыкова**, В.Д. Касимов, В.Н. Кураев, И.Ю. Омешина // Экологический туризм- инструмент устойчивого развития территорий и защиты окружающей среды.: СПбГЛУ им. С.М.Кирова, 2012. С.32-39. (0,5п.л./0,12п.л.).

13. Мартынюк А.А., **Рыкова Т.В.** Подходы к экологическому нормированию техногенного воздействия на леса в условиях «зеленой экономики». // В кн.: Материалы Международной научно-практической конференции «Развитие «зеленой экономики» и сохранение биологического разнообразия», 8-10 октября 2013г. Щучинск, 2013. С. 201-206. (0,37п.л./0,18п.л.).

14. Мартынюк А.А., **Рыкова Т.В.** Закономерности загрязнения компонентов лесных экосистем и нормирование техногенного воздействия на леса. // Сб. науч. трудов по итогам Международной научно-технической конференции «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития», 1-30 ноября 2013 г. – Брянск: БГИТА. 2013. С. 54-57. (0,25п.л./0,12п.л.).

15. Мартынюк А.А., **Рыкова Т.В.** Особенности пространственного загрязнения лесных экосистем выбросами промышленных предприятий// Сб.: Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 38. – Брянск: БГИТА, 2014. С. 104-110. (0,43п.л./0,22п.л.).

16. Мартынюк А.А., **Рыкова Т.В.** Закономерности динамики состава и структуры сосновых фитоценозов в условиях аэротехногенного загрязнения. // Актуальные проблемы экологии и природопользования в современных условиях: Материалы Международной научно-практической конференции, 5–7 декабря 2017 г. Часть 1. Киров: Вятская ГСХА, 2017. С.228-231. (0,25п.л./0,12п.л.).

17. Мартынюк А.А., **Рыкова Т.В.** Основные направления повышения устойчивости лесов и защитных лесных насаждений в засушливых регионах России // Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности: сб. ст. по материалам Междунар. науч. экол. конф. Краснодар: КубГАУ, 2018. С.465-468. (0,25п.л./0,12п.л.).

18. **Рыкова Т.В.** Лесоводственно-экологическая оценка устойчивости сосновых экосистем Подмосковной Мещеры к загрязнению среды тяжелыми металлами // Сб.: Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 51. Брянск: БГИТА, 2018.С.161-166. (0,37 п.л.).

19. **Рыкова Т.В.**, Мартынюк А.А. Изучение реакции лесных почв и компонентов фитоценозов сосны обыкновенной на техногенные выпадения цинка в условиях контролируемого полевого эксперимента. //Лесные почвы и функционирование лесных экосистем: материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: ЦЭПЛ РАН, 24-27 сентября 2019. С.51-54. (0,25п.л./0,125 п.л.).

20. **Рыкова Т.В.** Лесоводственно-экологическая оценка устойчивости сосновых лесов к загрязнению среды тяжелыми металлами//Материалы XII международной конференции «Охрана и рациональное использование лесных ресурсов». КНР, провинция Хэйлуцзян, Хайхе, 1-4 августа 2023. С.76-84. (0,56 п.л.).