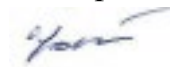


Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН)

На правах рукописи



Кладько Юлия Вадимовна

**ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНОГО РОСТА ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ В
УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ Г. КРАСНОЯРСКА**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук,
В.Е. Бенькова

Красноярск — 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА	9
1.1 Функциональная роль зеленых насаждений на урбанизированных территориях	9
1.2 Воздействие техногенного загрязнения на древесные растения	11
1.3 Показатели состояния древесных растений в зеленых насаждениях	16
1.4 Радиальный рост древесных растений в условиях урбанизированной среды	18
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИСЛЕДОВАНИЯ	27
2.1. Природные условия города Красноярска	27
2.2. Техногенное загрязнение города Красноярска	37
ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	41
3.1. Объекты исследования	41
3.2. Материалы и методы исследований	48
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РАДИАЛЬНОГО РОСТА ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ	54
4.1 Скорость роста по диаметру древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска	54
4.2. Древесно-кольцевые хронологии древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска	65
4.3. Влияние климатических факторов на погодичную изменчивость радиального прироста древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска	77
4.3.1 Анализ корреляционной связи индексов радиального прироста с температурой воздуха	77
4.3.2 Анализ корреляционной связи индексов прироста с количеством осадков.	81
4.4. Модификация климатического отклика индексов радиального прироста древесных видов при произрастании в условиях техногенного загрязнения	85

4.5 Динамика радиального роста сосны обыкновенной в зеленых насаждениях г. Красноярска в условиях техногенного загрязнения.....	93
4.6. Обсуждение полученных результатов.....	102
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	105
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. В последние десятилетия происходит интенсивная урбанизация территорий. Им присущ целый комплекс экологических проблем: загрязнение атмосферного воздуха и вод, деструкция почв, уменьшение биоразнообразия, в том числе, древесно-кустарниковой растительности и др. (Алексеев и др., 1990; Авдеева, 2008; Мартыненко и др., 2009; Alekseeva et al., 2016; Хлебоброс и др., 2012, Тулюш, Коротченко, 2018, Onuchin et al., 2020 и др.). Зеленые насаждения на урбанизированных территориях предназначены для решения множества проблем, возникших в процессе интенсивной урбанизации. Объекты озеленения выполняют важные средообразующие, санитарно-гигиенические и эстетические функции, формируя комфортную для проживания населения среду. В то же время, их состояние в индустриальных центрах, в том числе в г. Красноярске, вызывает огромное беспокойство. Четко выражена тенденция к снижению количества, и устойчивости зеленых насаждений, к снижению их видового разнообразия (Попова, 2007; Шабалина, 2009; Беланова и др., 2016; Васенев, 2016 и др.). В связи с этим, возникла острая необходимость в проведении исследований роста древесных растений в зеленых насаждениях (Лисотова и др., 2018), в разработке критериев оценки их состояния и устойчивости к техногенному воздействию. Существующие методики оценки жизненного состояния древесных растений зачастую не используют признаки—индикаторы техногенного воздействия. Включение такого количественного показателя, как радиальный годичный прирост стволовой древесины, который демонстрирует изменение интенсивности роста древесных растений в онтогенезе, является перспективным. Динамика радиального прироста отражает рост дерева на различных этапах онтогенеза (Машуков, Бенькова, 2014 и др.), влияние на рост комплекса экологических факторов, в том числе, погодных условий и техногенных воздействий (Innes, Cook, 1989; Авдеева, Кузьмичев, 1997; Арсеньева, Чавчавадзе, 2001; Чжан и др., 2011; Gillner et al., 2013; Артемьев,

Арсентьева, 2014; Kirduyanov et al., 2014; Уразгильдин, Кулагин, 2021). В связи с выше сказанным, тема диссертационного исследования является актуальной.

Цель работы: выявить особенности динамики радиального роста восьми древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска в условиях техногенного загрязнения различного характера.

Задачи исследования:

1. Определить скорость роста по диаметру ствола у восьми древесных видов (сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., ели колючей *Picea pungens* Engelm., березы повислой *Betula pendula* Roth., вяза приземистого *Ulmus pumila* L., тополя бальзамического *Populus balsamifera* L., рябины обыкновенной *Sorbus aucuparia* L., черемухи Маака *Padus maackii* Rupr., яблони ягодной *Malus baccata* (L.) Borkh.), произрастающих в условиях техногенного загрязнения различного характера.

2. Дифференцировать исследованные древесные виды по толерантности процесса радиального роста к влиянию техногенно загрязненных условий места произрастания.

3. Выявить периоды в пределах сезона роста, когда климатические факторы (температура воздуха и осадки) существенно влияют на радиальный прирост исследованных видов.

4. Установить особенности модификации климатического отклика индексов радиального прироста исследованных видов в условиях техногенного загрязнения различного характера.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Исследованные древесные виды различаются по толерантности процесса радиального роста к влиянию техногенно загрязненных условий места произрастания г. Красноярска.

2. Техногенное загрязнение модифицирует реакцию радиального прироста исследованных видов на влияние климатических факторов.

Научная новизна. Впервые для восьми видов древесных растений (сосны обыкновенной, ели колючей, березы повислой, вяза приземистого, тополя

бальзамического, рябины обыкновенной, черемухи Маака, яблони ягодной), широко используемых в зеленых насаждениях г. Красноярска, выявлены особенности динамики радиального роста в связи с различным характером техногенного загрязнения места произрастания.

Выявлен климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях исследованных видов и особенности его модификации в условиях техногенного загрязнения различного характера.

Теоретическая и практическая значимость. Задачи, решенные в диссертации, имеют фундаментальный характер и практическую значимость. Основные результаты исследований имеют непосредственное отношение к развитию системы зеленого строительства, необходимой для формирования комфортных и безопасных для человека условий жизни в промышленных городах.

Полученные данные о динамике радиального роста исследованных видов расширяют и конкретизируют информацию об особенностях их ксилогенеза при произрастании в зеленых насаждениях г. Красноярска, характеризующейся высокой мозаичностью техногенного загрязнения. Используемый подход дает возможность проведения анализа особенностей процессов роста и развития зеленых насаждений и отдельных деревьев в течение длительного времени, начиная от момента посадки, без проведения многолетнего мониторинга как в рамках научных исследований, так и в практической деятельности специалистов в сфере озеленения урбанизированных территорий.

Результаты и выводы, полученные при решении поставленных задач, имеют практическую значимость и могут быть использованы при разработке предложений по оптимизации агротехнических мер ухода за зелеными насаждениями г. Красноярска с учетом характера техногенного загрязнения места произрастания.

Достоверность результатов исследования обуславливается представительным объемом материала, использованием современного высокоточного оборудования для измерения, применением стандартных методов

обработки первичных данных в программных средах и дальнейшей статистической обработкой конечных результатов, согласованностью результатов с литературными источниками, апробацией работы на конференциях разного уровня и публикациями.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно проведен анализ литературных данных и определены цель и основные задачи исследования. Сбор материала для исследования, первичная обработка образцов, датировка, измерения ширины годичных колец образцов, обработка данных выполнены лично автором. Анализ и интерпретация результатов проводились лично автором, либо при его участии. Иллюстративные материалы подготовлены лично автором.

Апробация работы. Материалы работы докладывались на V международной научно-практической конференции «Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития» (Ишим, 2010); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной науки и образования. Биологические науки» (Уфа, 2010); VIII всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского «Молодежь и наука» (Красноярск, 2012); VII молодежной школе-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН «Наука, промышленность, экология» (Красноярск, 2017); конкурсе-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов, секции «Исследование компонентов лесных экосистем Сибири (Красноярск, 2018); VI международном симпозиуме имени Б. Н. Уголева, посвященном 50-летию Регионального координационного совета по современным проблемам древесиноведения «Строение, свойства и качество древесины – 2018» (Красноярск, 2018); всероссийской конференции с международным участием «Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски» (Красноярск, 2019); междисциплинарной конференции молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVI) (Красноярск, 2023).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 работ, из них, 4 – статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 8 – материалы конференций.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.б.н., с.н.с, Беньковой В.Е и к.ф.-м.н., в.н.с. Шашкину А.В. за ценные советы, обсуждение и обобщение материала, а также всестороннюю поддержку на всех этапах работы. Автор очень признательна к.б.н., н.с. Беньковой А.В., заведующему лабораторией структуры древесных колец к.б.н., с.н.с Машукову Д.А. и с.н.с, к.б.н. Овчинникову Д.В. за ценные советы и рекомендации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, предложений по практическому применению результатов исследования, списка литературы. Текст работы изложен на 131 странице, иллюстрирован 12 таблицами, 22 рисунками. Список использованной литературы содержит 192 источника, из которых 44 работы на иностранных языках.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА

1.1 Функциональная роль зеленых насаждений на урбанизированных территориях

В последнее время происходит интенсивный рост урбанизированных территорий. На них, как правило, формируется сложная экологическая обстановка, связанная с острым или хроническим загрязнением атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод, а также с неблагоприятным воздействием искусственного освещения, с локальным повышением температуры воздуха и почвы вблизи теплотрасс и других объектов инженерной инфраструктуры и др. В результате происходит снижение природно-ландшафтного потенциала, в том числе, сокращение разнообразия флоры и фауны (Шергина, Михайлова, 2007; Мартыненко и др., 2009; Васенев, 2016 и др.). В этой связи роль насаждений естественного и искусственного происхождения на урбанизированных территориях трудно переоценить.

Зеленые насаждения входят в систему озеленения территории индустриальных городов. Система представляет собой равномерное и взаимоувязанное размещение озелененных территорий, определяемое архитектурно-планировочной организацией города и планом его дальнейшего развития. При этом предусматривается функциональная и планировочная связь городского озеленения с пригородными рекреационными зонами.

Зелёные насаждения выполняют важные для комфортной жизни горожан средообразующие, санитарно-гигиенические и эстетические функции.

Средообразующие функции. Городская среда является результатом взаимодействия различных микроклиматических комплексов, основными компонентами которых являются: характер застройки, количество и профиль промышленных объектов, характер озеленения (Alekseeva et al., 2016). Древесная растительность вырабатывает кислород, регулирует режим влажности, замедляет подвижность воздуха, снижает интенсивность солнечной радиации (Машинский,

1973), значительно влияет на температуру приземного слоя воздуха. Так, в жаркое время года древесные растения затеняют поверхность почвы и тем самым обеспечивают более низкую температуру относительно открытых участков (Рязанов, 1965; Du et al., 2017; Holt, Vorsuk, 2020). В городских зонах с обильными зелеными насаждениями температура воздуха на 10-12% ниже, что формирует комфортный для человека микроклимат (Протопопова, 1972).

Санитарно-гигиеническая функция зеленых насаждений общеизвестна, но в связи интенсификацией процесса урбанизации значение ее в последнее время неуклонно возрастает. Растительность индустриальных центров вовлекает в биохимический круговорот веществ токсичные соединения из окружающей среды. Зачастую городской автотранспорт является основным источником загрязнения воздушной среды (Тутыгин, 2009), но посадки деревьев вдоль крупных магистралей смягчают его негативные воздействия (Ai, Mak, 2015; Huang et al., 2021). Древесные растения сорбируют из воздуха пыль и связывают 50-60% токсичных газов, в то время как атмосферная влага связывает из них лишь 5-20%, почва - 5-10%, водоемы и животные - до 5% (Горышина, 1991). Помимо того, что зеленые насаждения поглощают из воздуха углекислый газ, обогащают его кислородом и фитонцидами, уменьшают содержание токсичных газов и пылевых частиц в атмосфере, они снижают интенсивность городского шума (Кусова, 2016; Ayala-Azcárraga et al., 2019; Chaudhuri, Kumar, 2022).

Эстетическая функция зеленых насаждений заключается в том, что городская система озеленения в виде больших и малых массивов, а также рядовых, групповых и одиночных посадок древесной растительности придает планировке города разнообразие и выразительность (Лунц, 1971; McGovern, Pasher, 2016, Gao et al., 2017).

В связи с вышесказанным, очевидна актуальность создания на урбанизированных территориях зеленых насаждений, эффективно выполняющих свои функции. Этому способствует оптимизация и расширение ассортимента древесных растений, устойчивых в условиях техногенной нагрузки.

1.2 Воздействие техногенного загрязнения на древесные растения

В современной ситуации, характеризующейся постоянным повышением антропогенной нагрузки, происходят резкие изменения в состоянии и развитии зеленых насаждений. Промышленное и автотранспортное загрязнение, асфальтовое покрытие улиц, механическое повреждение корневой системы при прокладке канализационных систем и тепломагистралей, сбор и уничтожение листовой подстилки, недостаток питания и влаги в уплотненной городской почве, обрезка и поранение стволов негативно влияют на выполнение зелеными насаждениями основных функций (Протопопова, 1972; Ходжаева, 2017).

Особое место среди техногенных факторов, влияющих на рост и развитие зеленых насаждений, занимает загрязнение воздуха (Алексеев и др., 1990). Его негативное воздействие может проявляться у хвойных пород снижением степени охвоенности и усилением процесса некротизации хвои, а у лиственных - снижением степени облиственности, некрозом листьев и уменьшением живой площади листа (Неверова, Николаевский, 2003).

В городской среде наблюдаются как острые, так и хронические повреждения растений газами (например, такими как NO_2 , CO_2 , H_2S , NH_3 и др.). Острое повреждение отчетливо определяется визуально по появлению ожогов, снижению тургора листьев и, в дальнейшем, к их опаданию (Кулагин, 1964, 1974; Николаевский, 1966, 1979). Последствия повреждения зависят от устойчивости породы древесного растения, фенофазы, интенсивности воздействия и могут диагностироваться в течение 3-10 лет. Внешнее проявление хронических повреждений выражено слабее. Скрытые повреждения сопровождаются хроническим ослаблением и усыханием отдельных деревьев (Серебрякова, 1980). Характерными признаками хронического поражения являются сокращение плотности облиствения крон деревьев, уменьшение линейных размеров ассимиляционных органов, преждевременный листопад (Кулагин, 1964, 1974).

В первую очередь техногенное загрязнение у деревьев и кустарников вызывает повреждение листовых пластин. Промышленные газы в значительной

мере проникают в лист через устьица и концентрируются в хлоропластах. Поэтому под их влиянием происходит постепенное изменение профиля хлоропластов от эллипсоидального до овального или округлого, нарушение гранулярной структуры, набухание и деградация тилакоидов, разбухание ламелл. При высоких дозах токсикантов и на заключительных этапах их действия наблюдается разрушение мембран, грануляция цитоплазмы и пластидного матрикса, дезинтеграция рибосом и эндоплазматического ретикулула, агглюцинация хроматина, разрушение органоидов и клеточный плазмолиз (Николаевский, 1979).

Атмосферные токсиканты могут накапливаться в листе, при этом подавляется рост листьев, повышается количество и степень их некротических повреждений, что сопровождается снижением оводненности тканей и увеличением количества в них золы. Изменялось и содержание фотосинтетических пигментов: уменьшалось накопление хлорофиллов а и b, увеличивалось накопление каротиноидов (Маракаев и др., 2006). Исследование влияния токсичных выбросов Братского алюминиевого завода (БрАЗа) на фотосинтетический аппарат лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) показало, что в хвое деревьев, по сравнению с фоновым уровнем, с ростом уровня загрязнения снижается содержание пигментов: хлорофилла а – на 68 %, хлорофилла b – на 72 %, каротиноидов – на 67 % (Оскорбина и др., 2024).

Накопление токсикантов в листе видоспецифично. Например, цинк в значительных дозах накапливается в листе видов березы, а свинец — в кронах кедра и тальника, произрастающих вдоль автомагистралей (Кирилюк и др., 2004). Избыток свинца вызывает токсикоз, который сопровождается задержкой роста растения, повреждением корневой системы и хлорозом листьев (Ильин, Сысо, 2001). Высокое содержание тяжелых металлов может привести к уменьшению числа устьиц в листовой пластинке (Garcia-Sanchez et al., 2019). Данное явление авторами рассматривается как приспособительный механизм дерева, направленный на уменьшение ассимиляции загрязняющих веществ.

Исследования состояния древесных растений, произрастающих в условиях загрязненного атмосферного воздуха Рудного Алтая, выявили значительное увеличение толщины эпидермиса и палисадной (столбчатой) паренхимы, а также уменьшение толщины губчатой паренхимы и объема межклетников листовой пластинки (Рахимбаев, Дашкевич, 1982).

Техногенное загрязнение в условиях городской среды вызывает изменения не только в хвое и листовых пластинах, но заметно влияет и на другие органы древесных растений. Так, было зафиксировано удлинение годичных приростов побегов у ряда лиственных видов, в частности, у рябины обыкновенной, яблони ягодной, березы повислой, тополя бальзамического, подвергающихся техногенному воздействию (Ведерников, Бухарина, 2010). В то же время, у лиственницы сибирской наблюдалось уменьшение длины годичных приростов побегов и уменьшение их охвоенности (Шабалина, 2009). У пихты одноцветной на участках с высоким уровнем автотранспортного загрязнения, наоборот, отмечено увеличение плотности охвоения побегов. Авторы предполагают, что этот эффект может рассматриваться как способ поддержания фотосинтезирующей поверхности ассимиляционного аппарата на оптимальном для растения уровне (Шобанова, Судейная, 2009).

Токсиканты воздействуют и на генеративные органы растений. Достаточно часто отмечается частичная или полная потеря плодоношения, в отдельных случаях формирование нежизнеспособных семян (Антипов, 1957; Томас, 1962 и др.). Например, техногенное загрязнение места произрастания вызывает у семенного потомства березы повислой и ели колючей цитогенетические нарушения, в том числе патологии митоза (Вострикова, 2010). В пыльце лиственницы сибирской выявлено пониженное содержание крахмала; размеры ее семян меньше, чем у деревьев, произрастающих на фоновой территории (Грачев, Третьякова, 2001). Под влиянием токсикантов меняются анатомические свойства ксилемы. Часто отмечалось снижение прироста ствола деревьев по высоте и диаметру, что является результатом комплекса нарушений в физиологических процессах на клеточном и тканевом уровне (Павлов, 2006; Стасова и др., 2011).

Важное место среди факторов, влияющих на рост и развитие зеленых насаждений, занимает техногенное загрязнение почв. Естественные почвы, длительное время находящиеся под сильным антропогенным влиянием, постепенно превращаются в антропогенно-преобразованные (Земляницкий, 1963; Шишов и др., 2004; Лебедева, 2017). В них развиваются негативные процессы, ухудшающие их качество вследствие нарушения и разрушения почвенного профиля, дегумификации, переуплотнения, нарушения водно-воздушного, теплового, пищевого и газового режимов, химического и биологического загрязнения, сокращения биоразнообразия. Немаловажную негативную роль играет захламление поверхности почв строительным мусором и извлеченными на дневную поверхность горными породами и минералами, в связи с чем возникают техногенные поверхностные образования (Ковалева и др., 2012; Еремченко и др., 2016). Антропогенно-преобразованные почвы в обновленной классификации почв Российской Федерации продолжают рассматривать в единой системе с естественными почвами как один из этапов естественно-антропогенной эволюции почв. В единую систему не входят техногенные поверхностные образования (ТПО), представляющие собой выходящие на поверхность непочвенные образования (Шишов и др., 2004).

Негативное влияние почвенных токсикантов известно. Почвенные токсиканты могут откладываться в подземных органах растений в повышенной концентрации. Например, содержание серы в тонких корнях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в местах произрастания, близко расположенных к источникам загрязнения, превышает содержание этого элемента в контроле на 10-15%. Содержание серы в корнях положительно коррелирует с ее концентрацией в подкроновых осадках (Ярмишко и др., 2007). Гидротермические свойства урбанизированной почвы обуславливают нарушение водного обмена «растение-почва» аналогично тому, как это происходит при засухе. Оба фактора (фитотоксиканты и дефицит воды), действуя одновременно, усиливают влияние каждого из них (Тарабрин, 1980). Древесные растения, характеризующиеся мелкоклеточным строением органов и тканей, а значит, повышенной

водоудерживающей способностью (Baas, 1986), оказываются более устойчивыми к загрязнению воздуха и почвы (Тарабрин, 1980).

Степень негативных изменений в органах и тканях зависит от интенсивности воздействия и состава загрязняющих веществ. Установлено, например, что превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) в воздухе оксидов, соединений галогенов, полициклических органических соединений, соединений тяжелых металлов и сажи со временем приводит к общему ухудшению жизненного состояния, гибели растений и целых насаждений (Кулагин, 1974; Николаевский, 1979; Elling et al., 2009; Kirdyanov et al., 2014 и др.). В то же время, техногенное воздействие может вызвать адаптивную реакцию древесных растений, которая выражается в изменении состава и видового разнообразия древесных сообществ с увеличением доли видов, устойчивых к техногенному стрессу (Danielson et al., 2023).

На основе того, что на разные древесные виды, на разные органы и ткани растений воздействие техногенного загрязнения различно, их часто используют в качестве биоиндикаторов загрязнения компонентов окружающей среды. Биоиндикация — выявление уже состоявшегося или происходящего загрязнения окружающей среды по функциональным характеристикам особей и экологическим характеристикам сообществ организмов (Дажо, 1975; Неверова, 2002; Николаевский, 2002). Биоиндикация техногенного загрязнения осуществляется по ответной реакции представителей древесных видов, наиболее чувствительных к отдельным составляющим загрязнения, или по накоплению определенных вредных веществ в тканях растений (Неверова, 2009; Балычев, Курбанов, 2016). Каждому конкретному случаю соответствует свой биоиндикатор. Например, из дальневосточных видов, используемых в озеленении, в качестве био(фито)индикаторов уровня загрязнения свинцом рекомендовано использовать корни и листья черемухи Маака (*Padus maackii* Rupr.), березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.), вяза японского (*Ulmus japonica* (Rehder) Sarg.), робинии лжеакации (*Robinia pseudoacacia* L.), пузыреплодника калинолистного (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.) (Шихова, 2012). В качестве

биоиндикатора загрязнения вблизи промышленной зоны г. Архангельска было рекомендовано использовать хвою ели, которая накапливает значительное количество биофильных элементов и экотоксикантов (Надеин и др., 2005). Исследование в парковых и лесопарковых зонах г. Иркутска показало, что содержание серы в хвое (листьях) деревьев и почве служит адекватным биоиндикационным критерием интегральной оценки загрязнения городской среды (Михайлова и др., 2007). Исследователями было выявлено, что сосна является перспективным видом для биогеохимической оценки экологического риска (Рыбаков, 2016), использования в качестве чувствительного биоиндикатора загрязнения окружающей среды газообразными токсикантами (Булыгин, 2001; Kalugina et al., 2017; Рунова, Шиверских, 2018), тяжелыми металлами (Федорков, 2006; Воронин, Соболева, 2018), а также индикатором радиационного воздействия (Мусаев, 1996).

Из сказанного выше следует, что, несмотря на довольно большое число публикаций, вопрос определения видоспецифической реакции древесных растений на загрязнение различного состава и интенсивности остается недостаточно разработанным.

1.3 Показатели состояния древесных растений в зеленых насаждениях

В большинстве случаев оценка жизненного состояния деревьев проводится визуально, с учетом уровня конкретных морфометрических показателей, таких как архитектура, густота кроны, отклонения в строении ствола, кроны и побегов, размер и цвет листьев, целостность и состояние коры и др. Дополнительными признаками являются пораженность деревьев вредителями и другими негативными природными и антропогенными факторами среды. Прогнозная ценность перечисленных признаков неравнозначна. Так, степень поврежденности ассимиляционного аппарата характеризует современное состояние индивидуальных лиственных деревьев, но далеко не всегда характеризует состояние этих же деревьев в последующие годы. Повреждение

хвои у представителей вечнозеленых хвойных видов более длительно сказывается на жизнедеятельности дерева. Для компенсации повреждений требуется 3–5 лет и более, в течение которых наращивается достаточное количество и нормальное качество фотосинтезирующих элементов. Наиболее информативным является состояние верхней половины кроны дерева. Значительное разрушение кроны вследствие усыхания ветвей требует, даже после полного прекращения воздействия вызвавших это явление факторов, длительной, иногда на протяжении десятков лет, восстановительной деятельности дерева, причем у особей большинства видов возвращение к первоначальному состоянию невозможно (Алексеев, 1989). Таким образом, использование нескольких признаков жизненного состояния, взаимно дополняющих друг друга, усиливает надежность оценки состояния здоровья деревьев (Андреева и др., 2002; Артемьев, 2003; Авдеева, Кривоносенко, 2013; Шевелина и др., 2016).

Весь комплекс действий по оценке жизненного состояния деревьев, принципы и методы исследований для древостоев достаточно давно разработаны и детально описаны (Красинский, 1950; Алексеев, 1989; Ситникова, 1990 и др.). Оценка имеет специфические черты в зависимости от того, как и с какой целью она проводится и где расположено конкретное насаждение. В большинстве работ по оценке жизненного состояния древесных растений в зеленых насаждениях городов целью являлась оценка успешности интродукции, повышение декоративных свойств или она была обусловлена необходимостью проведения лесопатологической или предпроектной экологической оценки загрязнения среды, а не с воздействием техногенных токсикантов (Лапин, Сиднева, 1973; Николаевский, 1999; Пирогова, 2017 и др.). Так, в методике оценки успешности интродукции (Лапин, Сиднева, 1973) учитывались преимущественно показатели зимо- и морозостойкости: степень обмерзания годичных побегов, побегообразовательная способность, способность сохранять присущую виду жизненную форму. При оценке адаптационных свойств древесных растений-интродуцентов, применяемых в зеленом строительстве северных городов, используются такие параметры как одревеснение побегов к зиме, зимостойкость,

морозоустойчивость и иные показатели. (Бабич и др., 2008). В исследованиях Центрального сибирского ботанического сада СО РАН г. Новосибирска для оценки устойчивости и жизненного состояния лиственных деревьев в разных экологических зонах города использовалась методика В.С. Николаевского с соавторами (1999), по которой учитывались доля живых ветвей в кроне, степень ее облиственности, количество поврежденных листьев (Беланова и др., 2016 и др.).

Следует, однако, отметить, что визуальная оценка габитуса древесных растений позволяет определить их состояние на текущее время (год проведения исследования). Для мониторинга их жизненного состояния требуется периодическое повторение наблюдений: раз в год или в несколько лет. В связи с этим, при оценке состояния древесных растений в условиях загрязнения целесообразно использовать численную характеристику – ширину годичных колец стволовой древесины, которая позволяет ретроспективно, от начала роста дерева до момента наблюдения, судить об изменении его состояния под влиянием комплекса изменяющихся факторов окружающей среды, в том числе, и техногенного загрязнения.

1.4 Радиальный рост древесных растений в условиях урбанизированной среды

В связи с периодичностью деятельности камбия, которая контролируется годовым сезоном, в умеренном климате древесина имеет достаточно четкое слоистое строение. Ежегодный прирост древесины называется годичным слоем. На поперечном срезе годичные слои представлены в виде годичных колец, и возраст ствола может быть определен по их числу (Яценко-Хмелевский, 1954). Продолжительность роста деревьев, в процессе которого формируется годичное кольцо, называется «сезоном радиального роста» или просто «сезоном роста» (Лобжанидзе, 1961). У каждого рода (или вида) древесных растений ксилотомическая структура годичных колец имеет свои особенности (Чавчавадзе,

1992; Benkova, Schweingruber, 2004; Sellier, Segura, 2020 и др.). В то же время ширина и ксилотомическое строение годичных колец отражают влияние множества факторов (возраст, климат, погодные условия, географическое положение места произрастания, почвенные условия и иные факторы). По словам А.А. Яценко-Хмелевского (1954), «...ширина годичного кольца — это один из наиболее вариабельных признаков, немедленно реагирующих на изменение условий произрастания дерева».

Из многочисленных факторов неантропогенной природы, влияющих на ширину годичного кольца, климатические факторы (температура воздуха и количество осадков) сезона являются одними из наиболее важных (Fritts, 1976). Температура воздуха и количество осадков, характеризующиеся погодичной и внутрисезонной динамикой, определяют даты начала клеточных делений в меристемах, то есть начало сезонного радиального роста, а также скорость роста в отдельные промежутки сезона и даты окончания роста (Лобжанидзе, 1961; Смирнов, 1964; Larson, 1994 и др.). Как правило, на территории городов теплее на 2-3⁰С, чем за их пределами, поэтому сезон радиального роста начинается раньше. Повышенные температуры приводят к сдвигу фенофаз относительно внегородского места произрастания или наложение одной фенофазы на другую. Фенофазы не только сдвигаются по срокам, но и изменяются по продолжительности. Часто они короче и завершаются раньше, чем у растений, произрастающих на окраине города и за городом, которые характеризуются более широкими кольцами (Вараксин, Кладько, 2010; Ходжаева, 2017).

Количество осадков и их распределение в течение сезона роста также является фактором, определяющим ширину годичного кольца. Продолжительные засушливые периоды могут «спровоцировать» раннюю остановку сезонного роста и индуцируют образование узких годичных колец (Смирнов, 1964 и др.). В городских условиях растения часто испытывают водный дефицит не только в связи со скудными осадками. Закрытие приствольных кругов асфальтовым и иным покрытием, а также переуплотнение почв, конструкция систем водоотведения — все это усиливает водный дефицит (Рысин, Рысин, 2012).

Для оценки влияния техногенного загрязнения на радиальный прирост используются различные методы, в том числе дендрохронологические. Результативность применения этих методов показана в многочисленных работах (например, Innes, Cook, 1989; Chandorkar, Demgler, 1987; Мусаев, 1996; Неверова, 2002; Кучеров, Мулдашев, 2003; Стасова и др., 2011; Чжан и др., 2011; Wertz, 2012; Gillner et al., 2013; Щетинкин, Щетинкина, 2014; Duszyński, 2014; Kirdyanov et al., 2014; Sensula et al., 2015; 2017; Мюльгаузен, Панкратова, 2016; Barniak, Krapiec, 2016; Данченко и др., 2018; Уразгильдин и др., 2018; Kirdyanov et al., 2020; Novakova et al., 2021 и др.). В их основу положено выявление статистических связей ширины и других структурных характеристик годовых колец с загрязнением среды обитания токсикантами разной природы.

Ниже приведены некоторые результаты исследований по данному направлению.

1. В ряде случаев воздействие атмосферных загрязнителей вызвало снижение интенсивности работы камбия и, как следствие, уменьшение радиального прироста стволовой древесины:

- у березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в березняках разнотравных, произрастающих в пригороде Красноярска в зоне влияния атмосферного загрязнения от предприятий цветной металлургии, наблюдалось уменьшение ширины годовых колец наряду с изменениями в микроструктуре тканей древесины: выявлена тенденция к увеличению количества сосудов на единицу площади кольца (Стасова и др., 2011);

- у сосны обыкновенной, произрастающей под влиянием выбросов предприятий нефтехимического комплекса (г. Томск), наблюдалось уменьшение радиального прироста, в то же время относительная плотность древесины при удалении или приближении к источникам выбросов не менялась (Данченко и др., 2018);

- выявлена тесная отрицательная корреляционная связь R (при $P \geq 0.95$) между индексами прироста сосны и объемами выбросов комбината

«Печенганикель» (Мурманская обл.): диоксида серы ($R = -0,94$), никелевой пыли ($R = -0,65$) и медной пыли ($R = -0,78$) (Мюльгаузен, Панкратова, 2016);

- радиальный прирост сосны обыкновенной, произрастающей в спелых сосновых насаждениях в зоне влияния Архангельского целлюлозно-бумажного комбината и ТЭЦ, при приближении к источнику выбросов уменьшался, а плотность древесины увеличивалась (Арсеньева, Чавчавадзе, 2001; Schekalev et al., 2020);

- у сосны обыкновенной, произрастающей в спелых сосновых насаждениях вблизи заводов синтетического каучука, горно-обогатительного оборудования и ТЭЦ (г. Воронеж), наблюдалось уменьшение радиального прироста (Таранков, Матвеев, 1994);

- у сосны обыкновенной, произрастающей в 40-летних сосновых древостоях Воронежской области радиальный прирост уменьшался при приближении к автотрассе. При этом более глубокие и длительные депрессии роста были отмечены в последнем десятилетии по сравнению с предыдущим периодом. Установлено, что чем выше интенсивность автомобильного движения, тем быстрее уменьшался прирост (Матвеев, Акулов, 2012);

- у сосны и ели было выявлено значительное уменьшение радиального прироста в период, характеризующийся крупными объемами выбросов щелочной пыли с цементного завода в Эстонии. Сокращение объемов выбросов в последующие годы сопровождалось увеличением прироста до прежнего уровня (Parn, Mandre, 2011);

- соединения тяжелых металлов, попавшие в растения сосны обыкновенной из почвы через корневую систему, вызвали уменьшение радиального прироста стволовой древесины (Федорков, 2006; Белов, 2017);

- существенное загрязнение окружающей среды комплексом газообразных токсикантов (SO_2 , CO , NO_2 и H_2S) и твердых примесей в промышленных центрах тяжелого машиностроения Польши сопровождалось резким уменьшением радиального прироста сосны, ели, пихты, лиственницы (особенно, вблизи от источников загрязнения) и накоплением в годичных кольцах металлов в

значительных концентрациях. После введения технологий снижения уровня загрязнения воздуха, произошло резкое восстановление радиального прироста (Wertz, 2012; Godek et al., 2015; Sensula et al., 2015, 2017; Luszczynska et al., 2018);

- у ельников, произрастающих в окрестностях металлургического производства «Североникель» (Мурманская область) получена значимая отрицательная связь прироста деревьев с объемами поступающих в атмосферу выбросов предприятия (Черенькова, Бочкарев, 2013);

- у лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.), произрастающей в зоне влияния автотранспортного загрязнения Московской кольцевой автомобильной дороги, в возрасте от 20 до 55 лет радиальный прирост стволовой древесины на 53-57% меньше прироста на контрольном участке (Рыбакова, Глазунов, 2023).

2. Между тем, тенденция к уменьшению радиального прироста древесных растений в зоне влияния техногенного загрязнения относительно «чистых» зон выполняется не во всех случаях. Ниже приводятся примеры положительного влияния загрязнителей на радиальный прирост:

- у лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.)), произрастающей в зоне предприятий цветной металлургии г. Норильска, до 1979 года радиальный прирост был на 29% выше, чем в фоновых условиях (контроль в 11 км к северу от г. Норильска). После запуска новых мощностей в 1980-е годы прирост уменьшился и к 1990 г. составил всего 42% по сравнению с контролем. На контроле прирост деревьев за это время фактически не изменился. Авторы считают, что эпизодические и в малых дозах выбросы (главным образом, двуокись серы) в период до 1979 г. повлияли на рост лиственницы как удобрения, в то же время, большие объемы и концентрации, наоборот, оказали отрицательное действие на рост деревьев (Демьянов и др., 1996);

- в ельниках и сосняках, расположенных в зонах интенсивного промышленного загрязнения от завода азотных удобрений «Achema» на расстоянии 3–10 км, низкий уровень эмиссии CO, SO₂, NO₂ и NH₃ стимулировал радиальный прирост сосны обыкновенной на 15–25% относительно контроля. Однако при повышении объемов выбросов до 37–40 тысяч тонн в год в зоне

интенсивного промышленного загрязнения прирост уменьшился на 40–60% в ельниках и на 30–50% в сосняках (Республика Литва), (Стравинскене, 1987; Stravinskiene et al., 2013);

- у сосны обыкновенной, находящейся в зоне предприятий со смешанным составом пылегазовых выбросов (г. Братск) выявлено значительное увеличение радиального прироста по мере приближения от зоны слабого к зоне экстремального загрязнения. В зоне экстремального загрязнения общий прирост возрос в 1,8 раза по сравнению с зоной слабого загрязнения (Чжан и др., 2011);

- у сосны обыкновенной, произрастающей в антропогенно измененных условиях г. Екатеринбурга и пригорода, воздействие городских условий выражается в изменении связи диаметра ствола и развитости ассимиляционного аппарата деревьев (Монтиле и др., 2024).

3. Среди исследователей не существует единого мнения относительно того, как сказывается и сказывается ли техногенное загрязнение на «чувствительности» радиального прироста к влиянию климатических факторов. В ряде работ было выявлено уменьшение чувствительности прироста, однако, по результатам других работ, напротив, деревья, произрастающие вокруг крупных источников техногенного загрязнения, продемонстрировали более сильную реакцию на изменение погодных условий, чем на контроле:

- в сосняках, произрастающих в зоне загрязнения от Карабашского медеплавильного комбината, было выявлено, наряду со значительным уменьшением радиального прироста, ослабление корреляционной связи прироста с температурой и осадками по сравнению с контролем (Кучеров, Мулдашев, 2003);

- в условиях нефтехимического загрязнения (г. Уфа) чувствительность радиального прироста разных видов хвойных к климатическим факторам снижена относительно контроля (Уразгильдин и др., 2018);

- на 40-летних древостоях сосны было показано, что при приближении к автотрассе (г. Воронеж) чувствительность радиального прироста к климатическим факторам резко возросла (Матвеев, Акулов, 2012);

- реакция радиального прироста сосны и ели на климатические факторы (на температуру воздуха и количество осадков) в период больших объемов выбросов пыли от цементного завода (Эстония) была значительно снижена (Parn, Mandre, 2011);

- у сосны обыкновенной, произрастающей в зоне загрязнения железорудного комбината, не выявлена связь с температурой или количеством осадков. (Рыбаков, 2016);

- исследование влияния температуры и осадков на изменение радиального прироста древесины тополя берлинского (*Populus ×berolinensis* Dipp.) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в зеленых насаждениях Санкт-Петербурга показало, что температура не оказывает значимого воздействия на радиальный прирост исследованных видов. Летние осадки оказывают положительное, но не определяющее воздействие (в некоторых случаях радиальный прирост древесины увеличивается с ростом количества осадков) (Зайцев и др., 2023).

4. С использованием дендрохронологических методов исследователями было показано, что реакция радиального прироста древесных видов на влияние техногенного загрязнения видоспецифична. Приведем следующие примеры.

- выявлено, что достаточно сильные техногенные воздействия могут у одних видов древесных растений ускорить, а у других — притормозить переход от одного этапа онтогенеза к следующему. Это, как считают авторы работ, обуславливается разными онтогенетическими стратегиями адаптации у древесных видов к экстремальным факторам окружающей среды. Показано, например, что в зоне нефтехимического комбината (г. Уфа) углеводородное загрязнение использовалось деревьями хвойных (ель, лиственница, сосна) в качестве «корневой подкормки», что обусловило повышение интенсивности радиального роста относительно контроля. У лиственных пород, напротив, наблюдалась неоднозначная тенденция: у дуба и липы — подавление прироста на протяжении всего онтогенеза, у березы — значительное увеличение прироста в ювенильном и виргинильном периодах, но по мере взросления различия между деревьями березы в зоне загрязнения и контроля нивелировались. Различие

реакций на техногенное воздействие у хвойных и лиственных авторы объясняют эколого-биологическими особенностями: поскольку у лиственных видов площадь контакта с токсикантами, а значит и поглощение через ассимиляционный аппарат значительно больше, чем у хвойных, то и негативное воздействие на первые проявляется сильнее (цит. по Уразгильдин, Кулагин, 2021).

- в зоне интенсивного загрязнения от завода азотных удобрений (Литва) в первые десять лет после пуска завода радиальный прирост у ряда лиственных видов не изменился, и ощутимое его снижение проявилось только в последующие пять лет: у дуба и ясеня — на 75% к контролю, у осины – до 71%, у березы и ольхи черной – до 76%, у ольхи серой – до 79%. В последующие годы прирост этих видов в зоне интенсивного загрязнения стабилизировался, а в зоне умеренного загрязнения прирост дуба и ольхи черной увеличился, у осины и березы несколько снизился, у ольхи серой и тополя канадского не изменился. У тополя канадского прирост оказался самым стабильным: он оставался на одном и том же уровне в течение 30 лет. (Стравинскене, 1987).

- по мере приближения к наиболее загрязненным промышленным объектам в индустриальном центре г. Кемерово радиальный рост сосны подвержен угнетению в значительно большей мере, чем березы. Вблизи источников техногенного загрязнения у сосны прирост был на 62.2% меньше, а у березы — на 42.1% меньше по сравнению с контролем (Неверова, 2002).

- под воздействием техногенного загрязнения в центрах тяжелого машиностроения Польши снизилась чувствительность радиального прироста хвойных деревьев (ель, сосна, лиственница) к экологическим, в том числе и климатическим факторам. Среди этих представителей ель оказалась самой чувствительной, а лиственница — наименее чувствительной породой к влиянию на радиальный прирост климатических факторов (Wertz, 2012 и др.).

- у сосны обыкновенной климатический сигнал в индексированных хронологиях радиального прироста сосны обыкновенной в загрязненных местах произрастания модифицируется в зависимости от характера техногенного загрязнения (Кладько и др., 2023).

- радиальный прирост лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.), произрастающей в зоне загрязнения ртутью (Чехия), характеризуется относительно высокой чувствительностью к изменению атмосферных концентраций ртути по сравнению с приростом сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (Novakova et al., 2021).

Из обзора литературных источников следует, что результаты влияния техногенного загрязнения на радиальный прирост и его чувствительность к климатическим факторам видоспецифичны. То есть, в конкретном зеленом насаждении, расположенном на урбанизированной территории, динамика радиального роста растения зависит от его видовой принадлежности и факторов внешней среды (в том числе и характера техногенного загрязнения в месте произрастания). Для г. Красноярска, крупного промышленного центра, эти вопросы остались недостаточно разработанными. В то же время, современное состояние зеленых насаждений в городе вызывает огромное беспокойство (Лисотова и др., 2018). Немногочисленные публикации по этой тематике посвящены, как правило, представителям отдельных древесных видов. Так, например, известны работы по исследованию влияния урбанизированной среды на рост по диаметру тополя бальзамического (Россинина и др., 2008 и др.); влияние выбросов автотранспорта на рост по диаметру ели сибирской и лиственницы сибирской рассматривалось, в частности, в работах О.С. Артемьева и А.А. Арсентьевой (2014), О.С. Артемьева и О.В. Терентьевой (2018). Особенности использования сосны кедровой сибирской в озеленении г. Красноярска рассматривались в работе Н.П. Братиловой и др. (2021).

Из всего сказанного следует, что тема диссертационного исследования особенностей радиального роста древесных растений относительно широкой видовой принадлежности в зеленых насаждениях г. Красноярска, подверженных техногенной нагрузке, представляется весьма актуальной и своевременной.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИСЛЕДОВАНИЯ

2.1. Природные условия города Красноярска

Город Красноярск ($56^{\circ} 00'43''$ с.ш., $92^{\circ} 52'17''$ в.д.), крупный промышленный центр Сибири, расположен в долине на стыке Восточного Саяна, отрогов Енисейского кряжа и Западно-Сибирской равнины, по обоим берегам р. Енисей. Современный Красноярск протянулся с запада на восток на 18-20 км по левобережью Енисея и до 25 км - по правому берегу. Площадь города составляет 348 км^2 .

Рельеф. Орография района разнообразна (Природные условия..., 1961; Кириллов, 1977; Антоненко и др., 2017 и др.). На юге расположены покрытые тайгой предгорья Восточного Саяна. К западу, востоку и юго-востоку от г. Красноярска выделяется предгорная полоса, сложенная среднедевонскими эффузивно-осадочными образованиями. Городская агломерация расположена на всхолмленной равнине с высотными отметками менее 400 м и относительными превышениями до 200 м. Абсолютные отметки междуречий достигают здесь 750 – 800 м.

Рельеф территории расчлененный. Значительную часть площади занимает река Енисей, пересекающая после отрогов Солгонского кряжа неотектоническую Красноярскую котловину. Красноярск в значительной своей части расположен в котловине, образованной долиной р. Енисей, к которой прилегают плато и предгорья Саян, Ширина правобережной и левобережной частей долины неодинакова. В правобережье она изменяется от 1 км у ручья Лалетина до 6-8 км при впадении р. Березовки. Левобережная долина значительно расширяется от 2 до 8 км только в северной (в районе с. Песчанка) и центральной ее части (при впадении р. Кача).

Рельеф возвышенных частей местности существенно различается в левобережной и правобережной частях долины Енисея. В левобережной части максимальные отметки находятся на горе Первая (Николаевская) Сопка (505 м),

сложенной вулканитами среднего-позднего ордовика. По северной периферии города отметки господствующих вершин – 250-310 м. Наибольшим распространением пользуются денудационные и эрозионно-денудационные склоны, в совокупности, занимающие около 65 % территории. По крутизне преобладают пологие (менее 15°) и умеренные (15 – 25°) склоны. Крутосклонные (более 25°) участки развиты незначительно и контролируются в своем распространении геолого-структурными факторами.

Рельеф правобережья более возвышенный, предгорный. Самой высокой точкой в восточной части площади является гора Чёрная Сопка (691 м), представляющая собой отпрепарированный останец штокообразной субвулканической интрузии щелочных долеритов и тингуаитов. Здесь на пологих междуречных поверхностях и склонах с крутизной от умеренной до большой располагаются знаменитые Красноярские Столбы. Вершины Торгашинского хребта имеют отметки 580-610 м.

Большую часть долины р. Енисей составляет комплекс террас, образовавшихся в результате геологической деятельности реки и притоков (Кириллов, 1977; Безруких, 2015; Антоненко и др., 2017). Выделены пойма и девять надпойменных террас, которые объединены в три комплекса: верхний, средний и нижний. Террасы левобережной части города ограничены плато («Караульная гора») в северной части города, с запада ограничены лесистой Гремячинской гривой с абсолютными отметками до 240 м. В правобережной части города долину окаймляют предгорья Восточного Саяна – Куйсумские горы высотой от 400 до 700 м (Природные условия..., 1961; Климат Красноярска, 1982). В городе участками выражен техногенный рельеф. Особенно характерно ступенчатое, псевдотеррасное оформление набережной между городским парком и речным вокзалом. К другим техногенным формам относятся насыпи, карьеры кирпичных и цементного заводов, дамбы по берегам реки Качи. Правобережная часть долины Енисея и северные склоны Торгашинского хребта также изобилуют техногенными формами рельефа, к которым относятся крупные карьеры по добыче кембрийских известняков.

Климат. Климат резко континентальный, с высокой среднегодовой (38°C) и среднесуточной ($12\text{--}14^{\circ}\text{C}$) амплитудой колебаний температуры воздуха. Средняя годовая температура воздуха в г. Красноярске положительная и равна $0.5\text{--}0.6^{\circ}\text{C}$. Самая низкая температура в году приходится на январь (-16.8°C). Самым жарким месяцем является июль. Средняя температура июля $+19.4^{\circ}\text{C}$, при этом вторая и третья декады месяца — самые теплые в году. Оттепели зимой, когда температура в дневное время поднимается выше нуля, происходят ежегодно. Весенние заморозки бывают довольно часто, особенно в апреле, реже в мае, но случаются и летом — в июне и конце августа.

Наглядное графическое представление о климате Красноярска дает климатограмма, построенная по доступным в сети Интернет данным по метеостанции «Красноярск. Опытное поле» (официальный сайт ВНИИГМИ-МЦД, URL: <http://meteo.ru>) за 1950-2022 гг. (рис. 2.1).

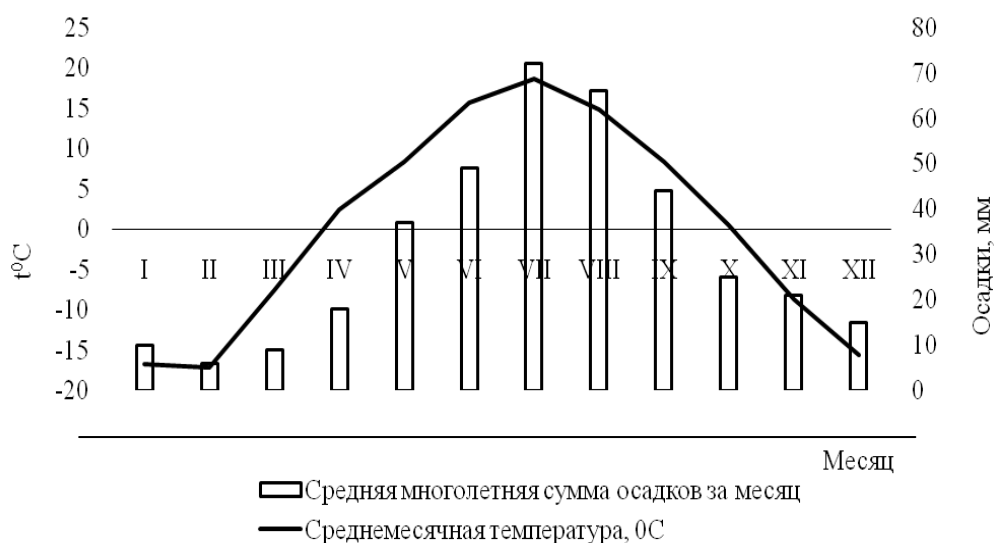


Рисунок 2.1. Климатограмма г. Красноярска, построенная по среднемесячным данным метеостанции «Красноярск. Опытное поле» за 1950-2022 гг.

В ней приводятся среднемноголетние месячные значения температуры и количества осадков. В данных по среднесуточной температуре воздуха за период 1950-2022 гг. отразилось текущее потепление климата (рис. 2.2). Оно проявляется, главным образом, в положительном тренде минимальных (зимних) суточных

температур воздуха (прямая «в» на рис. 2.2), четко выделяющемся с начала 1980-х гг.

Тенденция потепления климата в г. Красноярске с 1980-х гг. выражается в более теплых зимах по сравнению с предшествующим временным периодом (рис. 2.2). Отметим, что с этого времени интенсивное потепление климата было зарегистрировано повсеместно на Северном полушарии (Оценочный доклад..., 2008).

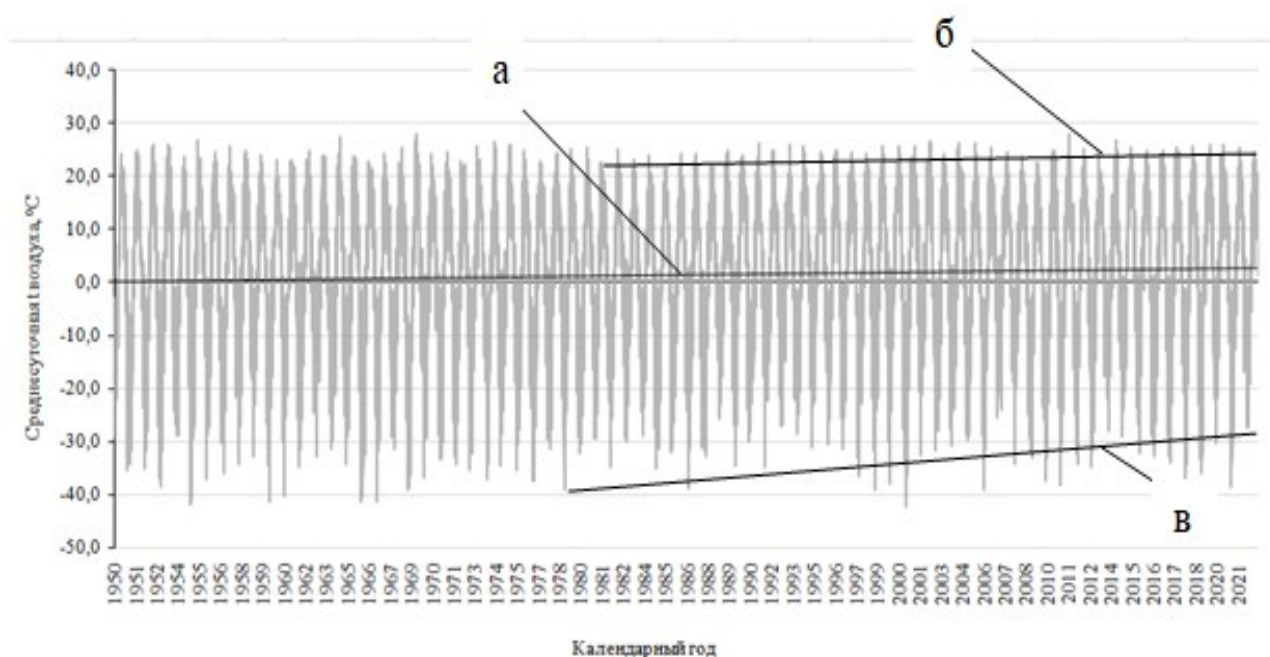


Рисунок 2.2. Среднесуточные температуры воздуха по данным метеостанции «Красноярск. Опытное поле» за 1950-2022 гг.

а, б, в – линии трендов среднесуточных, максимальных суточных и минимальных суточных температур воздуха, соответственно.

Для наглядности на рисунке 2.3 приведены не абсолютные температуры воздуха на «микрочастьках» или в зонах, а их отличие относительно опорной точки, которой является в данном случае метеостанция «Красноярское опытное поле». Разность отсчетов относительно опорной точки имеет как положительные, так и отрицательные значения. Как видно из рисунка, резкой температурной границей внутри города является р. Енисей. Его влияние хорошо выражено во все

сезоны. Летом в дневные часы на набережной и островах на $2.5-3.0^{\circ}\text{C}$ прохладнее, чем в городе. На левобережье «островами тепла» выделяются застроенные и наименее озелененные районы (например, Центральный район). Здесь температура приземного слоя воздуха на $2.0-2.5^{\circ}\text{C}$ выше, чем на опорном пункте «Красноярское опытное поле», расположенном вдали от центра города. К относительно теплым относятся районы «Космос» и «ул. Фрунзе». Здесь температура нагретого воздуха днем на $1-1.5^{\circ}\text{C}$ выше, чем на прохладной набережной и в парке им. Максима Горького.

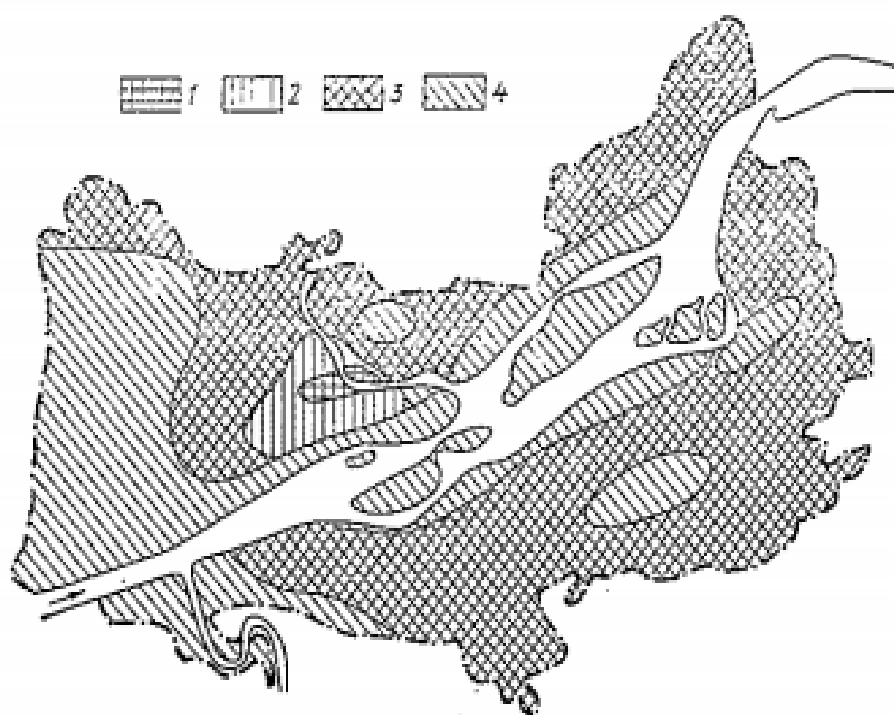


Рисунок 2.3. Микроклиматические различия в температурах атмосферного воздуха в Красноярске (лето, день). Зоны на рисунке выделены штриховкой по разности температур воздуха относительно опорной станции «Красноярское опытное поле»: 1) $2.1\div 2.5^{\circ}\text{C}$; 2) $1.1\div 2.0^{\circ}\text{C}$; 3) $0.1\div 1.0^{\circ}\text{C}$; 4) $-0.5\div 0.0^{\circ}\text{C}$ (Климат Красноярска, 1982).

Среднее многолетнее годовое количество осадков в Красноярске составляет 372 мм. Самый влажный период приходится на летние месяцы, при этом наибольшее количество осадков выпадает в июле (72 мм). Самый засушливый

период приходится на январь-март, при этом наименьшее количество осадков выпадает в феврале (6 мм).

В зависимости от типа атмосферных осадков год может быть разделен на два периода:

1) период выпадения преимущественно твердых осадков (холодный) – с ноября по март;

2) период выпадения преимущественно жидких осадков (теплый) – с апреля по октябрь.

В переходные месяцы (март, апрель, октябрь и ноябрь) часто выпадают смешанные осадки: дождь со снегом, мокрый снег, ледяной дождь (около 9% годового количества осадков) (Климат Красноярска, 1982).

Снежный покров появляется в г. Красноярске в середине октября и очень редко устанавливается сразу. Средняя многолетняя дата образования устойчивого снежного покрова – 4 ноября. Высота снежного покрова может варьировать в диапазоне 12—69 см. Средняя дата разрушения устойчивого снежного покрова приходится на 4 апреля (Климат Красноярска, 1982).

Ветровой режим в Красноярске в течение всего года довольно однороден, что объясняется особенностями рельефа. В январе суммарная повторяемость западных и юго-западных ветров достигает 80%. Усредненный показатель скорости ветра в течение года составляет 2.2 м/с. Самым спокойным месяцем является сентябрь, а самым ветреным апрель.

Средняя продолжительность солнечного сияния в Красноярске составляет 1833 часа в год, что сравнимо с г. Сочи. Максимальное число часов солнечного сияния приходится на июнь. В среднем за год наблюдается 75 дней, когда солнечные лучи в дневное время не достигают поверхности Земли из-за облачности и тумана (Климат Красноярска, 1982).

Концентрация основных промышленных предприятий и высокая плотность застройки на правобережье (район Цементного завода, Первомайский поселок) являются причиной того, что летняя температура воздуха примерно на 1-1.5°С выше, а в зимний период — на 2.0-3.3° выше, чем в соседних районах города.

Устойчивая температурная разница наблюдается между юго-западной и юго-восточной частями правобережья. Юго-восточная часть на 0.6-0.8°C теплее юго-западной, что объясняется сильным антропогенным влиянием (промышленная зона, плотная застройка). Установлению более прохладного температурного режима юго-западной части правобережья способствует близость садов, зон отдыха, тайги (район заповедника «Столбы»). Правобережье прохладнее левобережья на 0.4-0.7°C. В то же время, в микрорайонах левобережья Северо-Западный, Студгородок, Академгородок, расположенных на окраинах города, температура на 1-1.5°C ниже, чем в центральной его части.

Озелененные зоны в жаркие дни прохладнее открытых участков без растительности. Так, например, в парке «ДК 1 Мая» прохладнее по сравнению с прилегающими улицами, на 0.9-2.0°C. В зимний период термические различия более выражены, чем в летний, что связано с дополнительными тепловыделениями от сжигания большого количества топлива зимой. Самыми теплыми зонами являются остров Отдыха и прибрежная часть правобережья в районе станции «Енисей». Теплыми районами являются и районы, примыкающие к берегам Енисея. В тихую ясную погоду пригород на 3-4°C прохладнее центральных частей города. В связи с разной плотностью городской застройки, ветра часто изменяют локальное направление и скорость, что вносит свой вклад в высокую неоднородность температурного режима на территории Красноярска (Климат Красноярска, 1982).

Почвы. В Красноярске зональным типом почв являются черноземы. Встречаются также серые лесные, дерново-подзолистые и пойменные почвы. Мощность гумусового горизонта (A1+A1B) невелика, изменяется в пределах от 20 до 50 см. Верхний слой слабо структурирован в связи с большой пылеватостью породы. Механический состав обыкновенных черноземов по профилю однородный, со значительным процентом крупной пыли, со слабой микроагрегированностью, хорошо развитой поглотительной способностью и повышенным увлажнением в нижней его части (Бугаков с соавт., 1981 и др.).

Естественные почвы, длительное время находившиеся под сильным

антропогенным влиянием городской среды, в г. Красноярске превратились в антропогенно-преобразованные. Выделено несколько типов антропогенно-преобразованных почв непостоянной структуры и характера: урбаноземы, культуроземы, индустриоземы и некроземы.

В связи с характерным расположением промышленных предприятий, городские почвы характеризуются высокой гетерогенностью накопленных техногенных токсичных веществ (Попова и др., 2007). Они характеризуются высокой гетерогенностью гидрогеологических и термических свойств, которая обусловлена неоднородностью механических свойств грунта, мозаичностью растительности и связана с неоднородной мощностью снежного покрова, локальным переуплотнением отдельных участков перед асфальтированием и бетонированием, устройством стационарных дренажей и водостоков, с локальным прогревом почвы вблизи теплотрасс и неодинаковым радиационным балансом на затененных и солнечных участках и иными факторами (Крашенинникова, 2008).

Растительность. Естественная растительность города обусловлена расположением в зоне Красноярской лесостепи и представлена лесными, степными, луговыми, кустарниковыми, водными сообществами и болотами. Наибольшая доля флоры г. Красноярска представлена группами, входящими в степной комплекс (41.6 %); группа лесостепных видов составляет 19.5 %, что соответствует зонально-климатическим условиям места произрастания. Группы лесного комплекса составляют 25.7 % от общего состава флоры с преобладанием видов бореальной группы (19.7 %). Для городской флоры группа полизональных видов – самая многочисленная (18.2 % от всей флоры), группа адвентивных видов составляет 14.2 %, доля видов неморальной группы — 4.4 % (Лесные растительные ресурсы..., 1986).

Растительность левобережья Енисея (место расположения Красноярского алюминиевого завода (далее - КрАЗ) - типичная лесостепь, а правобережье - тайга. Вершины и склоны гор по р. Кача покрывают каменистые степи, где на маломощных, щебенистых почвах произрастают полынь морская (*Artemisia glauca* Pall.), лапчатка бесстебельная (*Potentilla acaulis* L.), скерда сибирская

(*Crepis sibirica* L.) и др. Разнотравно-луговые степи характерны для предгорной части окрестностей Красноярска. Северные склоны и высокие террасы Енисея занимают березовые и сосновые леса. На террасах встречаются отдельными пятнами осинники. Растительность горной части окрестностей города – таежная, представлена сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), пихтой сибирской (*Abies sibirica* Ldb.), тополем дрожащим (*Populus tremula* L.), сосной сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.), лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ldb.). В подлеске встречаются черемуха обыкновенная (*Padus racemosa* Gilib.), ольха кустарниковая (*Alnus fruticosa* Rupr.), бузина сибирская (*Sambucus sibirica*), рябина сибирская (*Sorbus sibirica* Hedl.), дерен белый (*Swida alba* L.). Кустарниковый ярус представлен спиреей средней (*Spiraea media* F.Schmidt), розой иглистой (*Rosa acicularis* Lindl.), смородиной красной (*Ribes spicatum* Robson.), смородиной черной (*Ribes nigrum* L.), боярышником кроваво-красным (*Crataegus sanguinea* Pall.), кизильником черноплодным (*Cotoneaster melanocarpus* L.), жимолостью синей (*Caprifoliaceae coerulea* L.).

Современная растительность естественного происхождения непосредственно в городе далека от ее исходного состояния и характеризуется сравнительно скудным видовым разнообразием (Рябовол, Антипова, 2012; Степанов, 2016). Это связано с сильным антропогенным воздействием: вырубкой естественных древостоев, плотной многоэтажной застройкой, асфальтовым покрытием, интенсивным автотранспортным трафиком на улицах Красноярска и высокой рекреационной нагрузкой на городские объекты озеленения и пригородные зеленые зоны. Искусственные насаждения созданы во всех районах города и значение их для жизни горожан трудно переоценить (Мальков, 1985).

Для озеленения города Красноярска, при относительно бедном видовом составе используют как аборигенные древесные виды, так и интродуценты (Встовская, Коропачинский, 2003). В таблице 2.1 представлены древесные виды, по нашим личным наблюдениям и литературным данным, широко используемые на момент проведения исследований в зеленом строительстве г. Красноярска (Булыгин, Ярмишко, 2001; Встовская, Коропачинский, 2003; Кладько, Романова,

2007; Вараксин, Кладько, 2009; Вараксин и др., 2010а, б; Кладько, 2012; Кладько, Силкин, 2017).

Таблица 2.1. Древесные виды, широко распространенные в искусственных объектах озеленения г. Красноярска

Вид	Происхождение
Береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth)	аборигенный вид
Вяз приземистый (<i>Ulmus pumila</i> L.)	интродуцент (южное Приморье, Даурье)
Груша уссурийская (<i>Pyrus ussuriensis</i> Maxim.)	интродуцент (Дальний Восток)
Ель колючая (<i>Picea pungens</i> Engelm.)	интродуцент (Северная Америка)
Ель сибирская (<i>Picea obovata</i> Ledeb.)	аборигенный вид
Карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i> Lam.)	аборигенный вид
Клен татарский (<i>Acer tataricum</i> L.)	интродуцент (Европейская часть России)
Клен ясенелистный (<i>Acer negundo</i> L.)	интродуцент (Северная Америка)
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	интродуцент (Европейская часть России, Западная Сибирь)
Лиственница сибирская (<i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	аборигенный вид
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	аборигенный вид
Орех маньчжурский (<i>Juglans mandshurica</i> Maxim.)	интродуцент (Приамурье и Приморье)
Рябина обыкновенная (<i>Sorbus aucuparia</i> L.)	интродуцент (Европейская часть России)
Рябина сибирская (<i>Sorbus sibirica</i> Hedl.)	аборигенный вид
Тополь белый (<i>Populus alba</i> L.)	интродуцент (юг Западной Сибири)
Тополь бальзамический (<i>Populus balsamifera</i> L.)	интродуцент (Северная Америка, Чукотка)
Черемуха обыкновенная (<i>Padus avium</i> Mill.)	аборигенный вид
Черемуха Маака (<i>Padus maackii</i> (Rupr.) Kom.)	интродуцент (Дальний Восток)
Яблоня ягодная (<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	аборигенный вид

Как показывают исследования, большинство древесных видов-интродуцентов, а том числе и перечисленные в таблице, хорошо адаптируется к

природно-климатической и антропогенной нагрузке г. Красноярска (Протопопова, 1972; Лоскутов, 1991; 1993; Коропачинский, Лоскутов, 2014).

2.2. Техногенное загрязнение города Красноярска

Город Красноярск регулярно занимает верхние строки в рейтингах самых загрязненных городов России. Индекс загрязнения атмосферы, средний по Красноярску, соответствует высокому и очень высокому уровню (Государственный доклад..., 2020, 2021, 2022, 2023 и др.). В 2021 г. индекс загрязнения атмосферы ИЗА₅, рассчитанный по пяти веществам (оксид азота, диоксид азота, взвешенные вещества, формальдегид, бенз(а)пирен) с наибольшими нормированными значениями ПДК с учетом их класса опасности, превысил значение 14 (ИЗА₅≥14); стандартный индекс (СИ) был равен 24.36 по бенз(а)пирену; наибольшая повторяемость (НП) превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) – 24.0 % по формальдегиду. Выбросы в атмосферу в 2021 году от стационарных источников составили 108.7 тыс. т с удельными значениями на уровне 0.31 т/км², от передвижных источников загрязнения — 78.5 тыс. т (Государственный доклад..., 2022).

В связи с количеством промышленных предприятий и их производственной направленностью, степень техногенного загрязнения варьирует на городской территории от незначительной до очень высокой. Так, наиболее интенсивные выбросы в 2011 г. произвели промышленные объекты Советского района (Корректировка сводного..., 2012). Их годовое значение составило 58.8 % от общегородского (96673.406 т/год). На остальные районы города приходилось менее половины: в Свердловском районе – 16.55 % (26334.7 т/год), в Ленинском – 16.46% (26195.8 т/год), в Октябрьском – 4.17 % (6628.5 т/год), в Железнодорожном – 3.35 % (5333.2 т/год), в Кировском – 1.44 % (2294.6 т/год) и в Центральном районе – 0.59 % (940.9 т/год) (Корректировка сводного..., 2012).

Ранжирование промышленных предприятий г. Красноярска по массе выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (т/год) в 2011 г. показало

следующее. Выбросы 15 предприятий составили более 1000 т/год. Основными предприятиями, загрязняющими атмосферный воздух города, являются:

- в Советском районе: ОАО «РУСАЛ Красноярск» (65771.179 т/год), дающий 72,0% выбросов по району и 40,0% от общегородских промышленных выбросов, Красноярская ТЭЦ-3 (12655.981 т/год), ООО «Региональная тепловая компания» (6789.9 т/год), ООО «КрамзЭнерго» (2709.6 т/год);

- в Свердловском районе: Красноярская ТЭЦ-2 (18218.3 т/год), «Красноярский цемент» (4489.2 т/год), ООО «ФармЭнерго» (2221.0 т/год), котельная ОП КФ «СибЭНТЦ» (579.1 т/год);

- в Ленинском районе: Красноярская ТЭЦ-1 (21165.6 т/год), котельная ОАО «Красмашзавод» (1839.6 т/год), ООО «Енисейский ЦБК» (1662.5 т/год);

- в Октябрьском районе: котельная № 12 (539.1 т/год), ОАО «Санаторий «Енисей» (229.9 т/год), ОАО «Краслесмаш» (157.8 т/год);

- в Железнодорожном районе: ОАО «ЭВРЗ» (1755.3 т/год), ООО «Первый кирпичный завод» (159.0 т/год);

- в Кировском районе: котельная ЗАО «Сибтяжмаш» (921.0 т/год), котельная ООО «БытЭнерго» (650.1 т/год), ООО «Сибстройкерамика» (298.9 т/год), ООО «Сибизвесть» (162.9 т/год), филиал «Красноярский судоремонтный центр ОАО «ЕнУРП» (113.1 т/год);

- в Центральном районе: ООО «КрасКом» - котельная № 4 (108.5 т/год) (Корректировка сводного..., 2012).

В целях проведения сводных расчётов загрязнения атмосферного воздуха в 2018 г. был актуализирован банк данных стационарных источников, который включает 848 промышленных объектов, 6681 источник выбросов из них 4145 – организованных и 2536 – неорганизованных.

От стационарных источников наибольшие вклады в расчетные максимальные приземные концентрации диоксида азота и по группе суммации № 6010 вносят источники выбросов Красноярского РДУ филиала АО «СО ЕЭС», ООО «Красноярский цемент» пл. 1, ООО «Карена» пл. 1, филиал ОАО «ЕРП» КСЦ – пл. 1, АО «Красноярская ТЭЦ-1», АО «Красноярский

машиностроительный завод». Основной вклад в расчетные максимальные приземные концентрации фторидов газообразных и по группе суммации № 6053 (фтористый водород и плохо растворимые соли фтора) вносят источники выбросов АО «РУСАЛ Красноярск». Основной вклад в расчетную максимальную приземную концентрацию пыли неорганической с содержанием SiO_2 70-20 % вносят источники АО «Красноярская ТЭЦ-1», ООО «Красноярский цемент» (пл. 1 - производственная база). Основной вклад в расчетную максимальную приземную концентрацию пыли абразивной вносят источники АО «Красноярский машиностроительный завод» (основная площадка). Учтено 12669 печей частного сектора, суммарные выбросы загрязняющих веществ (ЗВ) от которых составляют 16284,6 т/год. Анализ проводился по 271 наименованию выбросов (Информационная справка..., 2018).

Результаты расчетов максимальных приземных концентраций в атмосферном воздухе в 58 контрольных точках по 8 загрязняющим веществам, для которых установлены ПДК_{м.р.} (диоксид азота, оксид азота, сажа, диоксид серы, оксид углерода, формальдегид, бензин нефтяной, керосин), и 1 группе суммации № 6204 (диоксид азота, диоксид серы), поступающих от автотранспорта, показали, что по диоксиду азота значения максимальных разовых концентраций (м.р.) превышают ПДК_{м.р.} в жилой застройке. Результаты расчетов максимальных приземных концентраций в жилых районах от автономных источников теплоснабжения (АИТ) по семи загрязняющим веществам, для которых установлены ПДК_{м.р.} (диоксид азота, оксид азота, сажа, диоксид серы, оксид углерода, взвешенные вещества, пыль неорганическая 20-70% SiO_2), и двум группам суммации № 6046 (оксид углерода и пыль цементного производства) и № 6204 (диоксид азота, диоксид серы), поступающих от АИТ, показали, что по углерод оксиду и углероду (саже) значения максимальных концентраций превышают критерий 1.0 ПДК_{м.р.} (Информационная справка..., 2018).

Из изложенного выше материала следует, что зеленые насаждения в различных частях города испытывают разную техногенную нагрузку. Она

определяется, главным образом, местоположением, автотранспортным трафиком и производственной направленностью промышленных предприятий.

При этом на каждом конкретном участке техногенная нагрузка трансформируется рельефом местности, ветровым режимом, особенностями хозяйственного использования и застройки и др.

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Объекты исследования

На территории г. Красноярска в 2012 г. в зеленых насаждениях, расположенных в контрастных по антропогенной нагрузке зонах (сильного, среднего загрязнения и в условно чистой) было заложено 5 пунктов наблюдения (далее - ПН). Зоны (по состоянию на 2012 г., рис. 3.1) были выделены на основании опубликованных ранее данных мониторинга окружающей среды г. Красноярска (Скрипальщикова и др., 2009; Корректировка сводного..., 2012; Хлебопрос и др., 2012). Заложенные ПН располагались в четырех административных районах города: Октябрьском, Центральном, Советском и Ленинском (рис. 3.2).

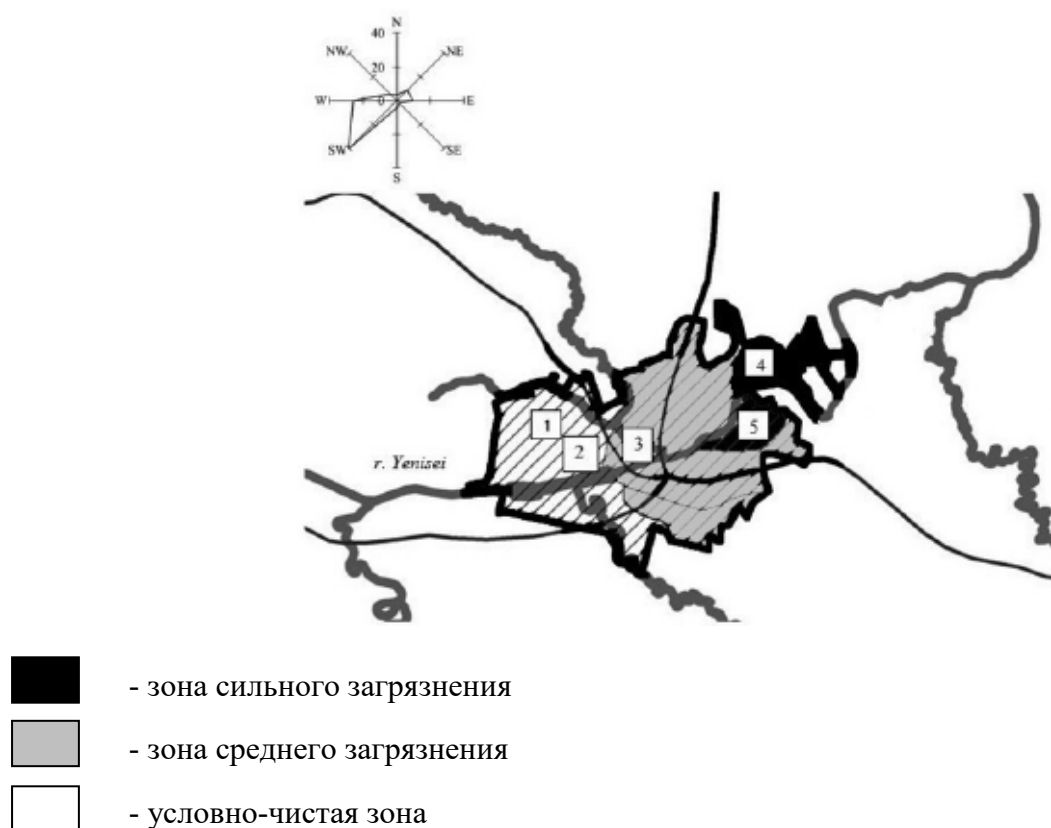


Рисунок 3.1. Уровни загрязнения зон расположения пунктов наблюдения на территории г. Красноярска: 1 – ПН «Ветлужанка», 2 – ПН «Академгородок», 3 – ПН «Центр», 4 – ПН «КрАЗ», 5 – ПН «КрасТЭЦ» (из публикации Kladko et al., 2020).

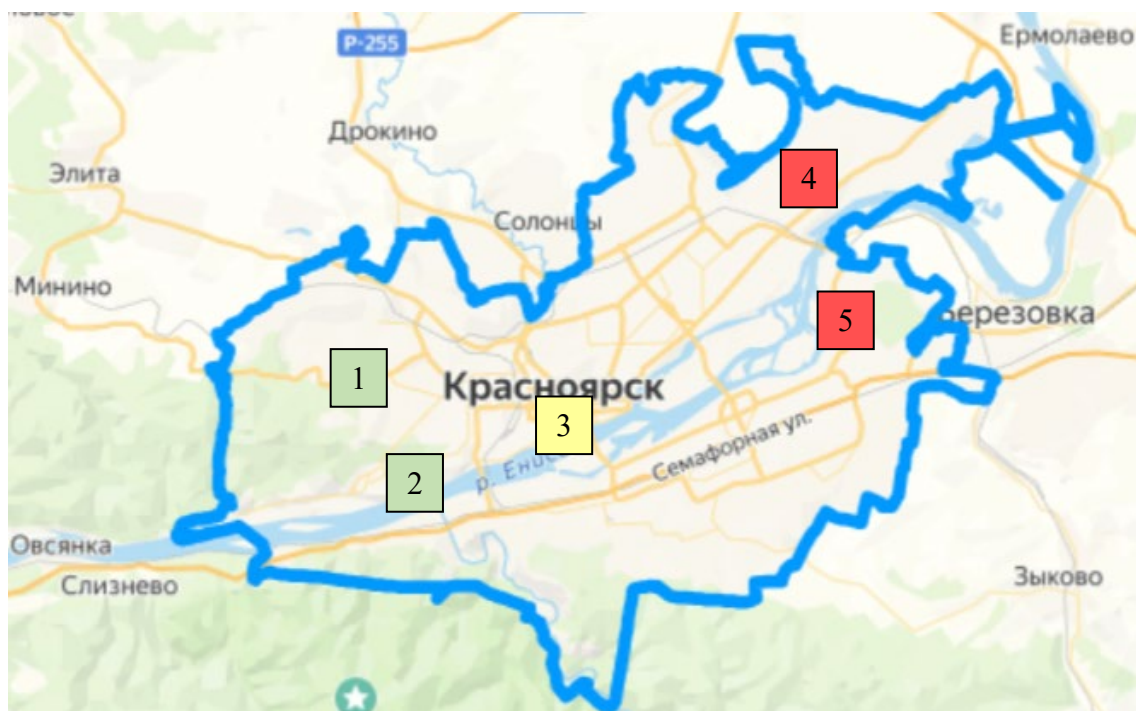


Рисунок 3.2. Расположение пунктов наблюдения (ПН) на территории г. Красноярск: 1 – ПН «Ветлужанка», 2 – ПН «Академгородок», 3 – ПН «Центр», 4 – ПН «КрАЗ», 5 – ПН «КрасТЭЦ».

Цветовое обозначение: зеленый – условно чистая зона, желтый – зона среднего загрязнения, красный – зона сильного загрязнения. (Картографическая подоснова: Интерактивная карта города Красноярск, 2024 URL: <https://web-gis.admkrsk.ru/portal/map/imap/app.html>).

В таблице 3.1 приведена информация о ряде компонентов техногенного загрязнения на ПН. Комплексная оценка уровня загрязнения дана в таблице 3.1 исходя из сравнительной характеристики содержания токсикантов на ПН относительно друг друга. Из оценки следует, что относительный уровень загрязнения зон, где расположены ПН, с 2012 года не изменился.

ПН «Ветлужанка» и «Академгородок» (1 и 2 на рис. 3.1, рис. 3.2) находятся в условно чистой зоне, на подветренной западной части города, вдали от промышленных предприятий, в кластере рекреационных зон (Onuchin et al., 2020). Незначительное техногенное загрязнение обусловлено автомобильным движением невысокой интенсивности (Скрипальщикова и др., 2009; Хлебопрос и др., 2012, Государственный доклад... 2020, 2021, 2022);

Таблица 3.1. Техногенная нагрузка пунктов наблюдения

Пункты наблюдения	Загрязнение атмосферного воздуха отдельными веществами, доли ПДК _{с.с} (Государственный доклад..., 2021)	Характеристика загрязнения снежного покрова (Onuchin et al., 2020)	Характеристика загрязнения почвы (Тулюш, Коротченко, 2018)	Комплексная оценка уровня загрязнения
ПН «Ветлужанка», ПН «Академгородок (Октябрьский район)	SO ₂ - 0.03 NO ₂ – 0.05	Al<10 мг/м ² /день	-	незначительный уровень
ПН «Центр» (Центральный район)	SO ₂ – 0.66, NO ₂ -0.55 свинец – 4.6 бенз(а)пирен – 4.6	Al 11-30 мг/м ² /день, пыль 132-187 мг/м ² /день	Pb - 19.90 мг/кг, Cd - 0.24 мг/кг, Zn - 33.16 мг/кг	средний уровень
ПН «КрАЗ» (Советский район)	SO ₂ – 0.48, NO ₂ -0.75 фториды – 0.14 бенз(а)пирен – 3.0	Al>200 мг/м ² /день, пыль 460-810 мг/м ² /день	Pb - 9.15 мг/кг, Cd - 0.21 мг/кг, Zn - 25.59 мг/кг	очень высокий уровень
ПН «КрасТЭЦ» (Ленинский район)	SO ₂ – 0.44, NO ₂ – 0.55 формальдегид – 3.9 бенз(а)пирен – 3.9	Al<51-100 мг/м ² /день, пыль 154-478 мг/м ² /день	Pb - 46.61 мг/кг, Cd - 0.85 мг/кг, Zn - 47.67 мг/кг	очень высокий уровень

Примечание: ПДК_{с.с} – предельно допустимая концентрация среднесуточная

ПН «Центр» (3 на рис. 3.1, рис. 3.2) расположен в зоне техногенного загрязнения средней интенсивности, в историческом центре города с большой плотностью населения, в низине, где скапливаются и слабо рассеиваются загрязняющие атмосферу вещества. Относится к зоне долгосрочной урбанизации (Onuchin et al., 2020). Основным источником загрязнения — интенсивное движение автотранспорта. Основные компоненты загрязнения атмосферы — CO, NO, NO₂, SO₂, бенз(а)пирен, тяжелые металлы (Скрипальщикова и др., 2009; Хлебопрос и др., 2012, Государственный доклад... 2020, 2021, 2022);

ПН «КрАЗ» (4 на рис. 3.1, рис. 3.2) расположен на левобережье, в зоне *очень сильного* загрязнения. Основные источники загрязнения атмосферы — предприятия алюминиевой промышленности. ПН относится к промышленно-транспортной зоне (Onuchin et al., 2020). Основными компонентами загрязнения атмосферы являются химические вещества, входящие в состав выбросов предприятий: фтористые соединения, бенз(а)пирен, CO, соединения кальция, магния, серы, пылевые частицы (Скрипальщикова и др., 2009; Хлебопрос и др., 2012; Kalugina et al., 2017; Государственный доклад... 2020, 2021, 2022);

ПН «КрасТЭЦ» (5 на рис. 3.1, рис. 3.2) расположен на правобережье, в зоне *очень сильного* загрязнения. Основные источники загрязнения — предприятия химической промышленности и теплоэнергетического комплекса. В комплекс входит ТЭЦ, работающая на бурых углях Бородинского разреза Красноярского края. ПН относится к промышленно-транспортной зоне (Onuchin et al., 2020). Основные компоненты загрязнения атмосферы — пропеннитрил, альдегиды, бутадиен, сероводород, формальдегид, CO, NO, NO₂, SO₂, сажа, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) (Скрипальщикова и др., 2009; Хлебопрос и др., 2012, Государственный доклад... 2020, 2021, 2022).

В качестве объектов исследования нами выбраны восемь древесных видов, наиболее часто используемых для озеленения сибирских городов, в том числе, и г. Красноярска, (Встовская, Коропачинский, 2003): сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L., сем. *Pinaceae*); ель колючая (*Picea pungens* Engelm., сем. *Pinaceae*); береза повислая (*Betula pendula* Roth., сем. *Betulaceae*), ильм (вяз) приземистый

(*Ulmus pumila* L., сем. *Ulmaceae*); тополь бальзамический (*Populus balsamifera* L., сем. *Salicaceae*); рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L., сем. *Rosaceae*); черемуха Маака (*Padus maackii* Rupr., сем. *Rosaceae*); яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) Borkh., сем. *Rosaceae*).

Пункты наблюдения закладывали так, чтобы на каждом из них по возможности произрастали все выбранные виды, но не всегда это было возможно. Так, на ПН «Академгородок» отсутствовал вяз приземистый. Сосна обыкновенная отсутствовала на ПН «Ветлужанка», «Центр», «КрАЗ» и «КрасТЭЦ».

На каждом пункте наблюдения для исследования отбирали 10 представителей одного вида. Модельные экземпляры на ПН произрастали на расстоянии 3-5 метров друг от друга согласно нормативам озеленения, располагались рядами и небольшими группами. В пределах одного ПН представители одного и того же вида имели одинаковый класс возраста.

Деревья для исследования отбирали в соответствии с инженерно-топографическими планами территорий таким образом, чтобы вблизи них не проходили подземные коммуникации. Всего было отобрано 370 кернов с 370 деревьев. На ПН «КрАЗ» и «КрасТЭЦ» исследовались деревья на расстоянии более 20 метров от автомагистралей, чтобы свести к минимуму негативный влияние на растения автотранспорта и сконцентрироваться на эффекте от промышленных выбросов. На условно-чистых ПН «Ветлужанка» и «Академгородок» выбирали деревья на расстоянии более 500 метров от магистралей, чтобы нивелировать их влияние. Напротив, для выявления влияния автотранспорта на ПН «Центр» деревья отбирались на расстоянии не более 20 метров от крупных магистралей.

В диссертационной работе отдельно рассматривается вопрос о выявлении особенностей динамики радиального роста сосны обыкновенной в техногенно загрязненных зеленых насаждениях г. Красноярска. В настоящее время резко увеличилось использование этого вида для создания зеленых насаждений в индустриальных городах и на иных территориях, подверженных техногенному загрязнению, в том числе, в черте г. Красноярска. Ранее ее применение в

озеленении было не столь широко распространено (Протопопова, 1972; Кулагин, 1974; Кучеров, Мулдашев, 2003; Павлов, 2006; Stravinskiene et al., 2018; Михайлова и др., 2020 и др.). Хорошо известно, что этот вид по своим физиологическим характеристикам неустойчив к воздействию интенсивного техногенного загрязнения (Авдеева, Панов, 2017; Павлов, 2006; Stravinskiene et al., 2018; Михайлова и др., 2020 и др.).

Было рекомендовано использовать ее для посадки в пригородных зонах, расположенных в отдалении от источников дыма и газа (см. ссылки выше), а также для создания крупных городских и загородных парков и лесопарков (Лоскутов, 1993 и др.).

Тем не менее, в последнее время при создании городских объектов озеленения к сосне обыкновенной проявляется значительный интерес. Однако, опыт по ее интенсивному использованию трудно считать удачным: в городе наблюдается множество ослабленных и усыхающих сосновых саженцев, и крупномеров. Очевидно, что продолжение исследований устойчивости вида к техногенному загрязнению является своевременным.

Для получения информации об особенностях радиального роста сосны обыкновенной в черте г. Красноярска в 2020 г. нами дополнительно были заложены 4 пункта наблюдения в условиях загрязнения разного характера (рис. 3.3.) так как на пунктах наблюдения, заложенных ранее и описанных выше, этот вид не был представлен или встречался в единичном экземпляре.

Контрольный (условно чистый) ПН, расположен в «кластере рекреационных зон» (Onuchin et al., 2020), в Академгородке (Октябрьский район), в дендрарии Института леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН (далее – ПН «Дендрарий»). На ПН отобрано 5 деревьев;

ПН «Ул. Е. Стасовой» (Октябрьский район) со средним уровнем загрязнения выбросами автотранспорта, расположен также «в кластере рекреационных зон» (Onuchin et al., 2020). На ПН отобрано 5 деревьев;

ПН «Ул. 9 Мая» (Советский район) с высоким уровнем комплексного загрязнения выбросами автотранспорта и промышленных предприятий цветной

металлургии, относится к промышленно-транспортной зоне (Onuchin et al., 2020). На ПН отобрано 5 деревьев;

ПН «Парк «Гвардейский»» (Советский район) с высоким уровнем загрязнения выбросами промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса, относится к промышленно-транспортной зоне (Onuchin et al., 2020). На ПН отобрано 5 деревьев.

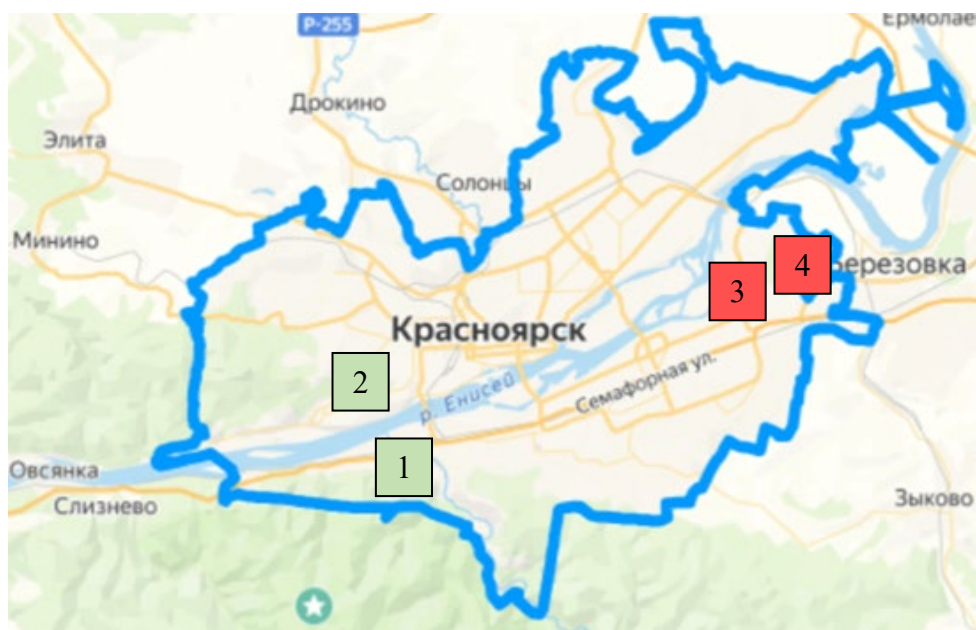


Рисунок 3.3. Расположение дополнительных пунктов наблюдения (ПН), заложенных с целью изучения радиального роста сосны обыкновенной: 1 – ПН «Дендрарий», 2 – ПН «Ул. Е. Стасовой», 3 – ПН «Ул. 9 Мая», 4 – ПН «Парк «Гвардейский»» (Картографическая подоснова: Интерактивная карта города Красноярска, 2024 URL: <https://web-gis.admkrsk.ru/portal/map/imap/app.html>).

Модельные деревья сосны обыкновенной на ПН произрастали на расстоянии 3-5 метров друг от друга. На ПН «Дендрарий» и ПН «Парк «Гвардейский»» деревья были высажены группами (на расстоянии более 500 метров от крупных магистралей); на ПН «Ул. Е. Стасовой» и ПН «Ул. 9 Мая» – рядами, на расстоянии не более 20 метров от крупных магистралей. В пределах одного ПН деревья имели одинаковый класс возраста. Всего на дополнительных ПН было исследовано 20 деревьев сосны обыкновенной.

3.2. Материалы и методы исследований

Для проведения дендрохронологического исследования с выбранных растений на высоте 1,3 м от поверхности почвы буравом Пресслера перпендикулярно волокнам были взяты образцы древесины — керны диаметром 5 мм по одному радиусу.

Керны помещали в бумажные футляры и высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре и влажности. Затем, для удобства обработки и измерения и для предотвращения разлома керны закреплялись клеем «Момент Кристалл» (Henkel) на деревянную рейку с продольным желобом глубиной 2 мм. Скальпелем со сменными одноразовыми лезвиями проводили подрезку перпендикулярно волокнам древесины. Образованную при подрезке поверхность зачищали; качество зачищенной поверхности должно быть таким, чтобы при увеличении в 30-60 раз под микроскопом была четко различима клеточная структура образца (Шиятов и др., 2000).

Дендрохронологические методы, использованные в исследовании

После зачистки «рабочей поверхности» на кернах и контрастирования годовичных колец проводили их *предварительную датировку* от коры к сердцевине. Зная год формирования последнего годовичного кольца (это год, предшествовавший году отбора образцов), обратным отсчетом определяли календарные даты образования всех предыдущих последовательных колец. Датировка и маркировка колец считаются предварительными, так как на этом этапе фиксируются только видимые кольца (Шиятов и др., 2000).

Датировку и измерение ширины годовичных колец проводили с использованием полуавтоматических установок LINTAB v 3.0 и LINTAB v 5.0 «Frank-Rinn tech» (Германия) (рис. 3.4) с точностью до 0,01 мм, снабженных стандартным пакетом программного обеспечения TSAP Win v4.68. Установка включает в себя оптический блок (бинокулярный микроскоп LEICA GZ6), механический блок, осуществляющий равномерную прецизионную подачу образца в одном направлении (направление измерения) и компьютерный блок,

который фиксирует измеренные данные в электронном виде, проводит их преобразование в необходимые для дальнейшей работы форматы и предварительную обработку. После выявления ошибок измерения, а также ложных и выпавших колец с применением метода перекрестной датировки получали окончательную датировку годовых колец на кернях.



Рисунок 3.4. Полуавтоматическая установка LINTAB v3.0

В основу *метода перекрестного датирования* положено утверждение, что древесные растения, произрастающие в пределах одного участка, сходно реагируют на изменение факторов внешней среды. Так, в благоприятные для роста годы (по сравнению с предыдущим и последующим рядом лет) формируются сравнительно широкие годовые кольца, в неблагоприятные – узкие. Таким образом, при перекрестном датировании осуществляется поиск и оценка степени синхронности в изменчивости ширины годовых колец у деревьев на участке (Fritts, 1976; Schweingruber, 1996; Шиятов и др., 2000). Перекрестная датировка осуществляется при помощи общепринятой в дендрохронологии компьютерной программы COFESHA (Holmes, 1983).

Метод построения индексированных древесно-кольцевых хронологий (Fritts, 1976; Ваганов и др., 1996). На ширину годовых колец (ШГК) дерева, помимо погодных условий, влияет целый ряд иных факторов: возрастные изменения, почвенные условия, конкуренция за свет и питание, антропогенные воздействия и

др. В формальном виде влияние разных факторов на ШГК представляется уравнением:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D_{1t} + \delta D_{2t} + E_t, \quad (3.1)$$

где R_t – ширина кольца t -го календарного года; A_t – радиальный прирост, зависящий от возраста дерева; C_t – климатическая компонента; δD_{1t} – обусловлено эндогенными факторами; δD_{2t} – обусловлено экзогенными факторами неклиматической природы (пожары, насекомые и др.); E_t – добавка, обусловленная влиянием неучтенных факторов; δ – коэффициент, принимающий значение либо 0, либо 1.

В дендрохронологии применяется специальная методика индексирования (или стандартизации), позволяющая исключить или, по крайней мере, значительно снизить влияние факторов, которые не варьируют погодично. Этот прием математической обработки переводит абсолютные значения ширины годичных колец (в мм) в нормированные (или индексированные). По индексированным (а не абсолютным) значениям ширины годичных колец проводится сравнительный анализ разного рода: сравниваются деревья на одном участке, на различных по условиям роста участках, разной видовой принадлежности и др. и выделяется внешний сигнал, который обеспечивает синхронность ответной реакции прироста у совокупности деревьев.

Нормировка абсолютных величин последовательных ШГК проводится относительно их временного тренда:

$$I_t = \frac{R_t}{G_t}, \quad (3.2)$$

где I_t – нормированная ширина (индекс) годичного кольца, образованного в t -й календарный год; R_t – абсолютное значение ширины годичного кольца (мм); G_t – соответствующее значение на кривой временного (возрастного) тренда (мм).

Изменение G_t , обусловленное временем (в календарных датах) или возрастом дерева, можно представить функцией, которая описывает зависимость

временного тренда от перечисленных в уравнении 3.1 факторов за исключением климатической компоненты («возрастной» тренд):

$$G_t = f_t(A_t, \delta D_{1t}, \delta D_{2t}) \quad (3.3).$$

Правильно подобранная функция G_t преобразует нестационарные ряды абсолютных (измеренных) значений ширины годичных колец (мм) в стационарные ряды индексов прироста, где математическое ожидание и дисперсия постоянны, а, значит, к таким рядам может быть применен весь набор инструментов статистики случайных стационарных процессов (Fritts, 1976; Мазепа, 1982; Cook, Kairiuktis, 1990).

Стандартизация выполняется с применением стандартной в дендрохронологии компьютерной программы ARSTAN. Программа автоматически преобразовывает абсолютные значения ШГК в индексы ШГК. При этом она позволяет выбрать вид функции, посредством которой убирается «возрастной» тренд. В диссертационной работе возрастной тренд убирали наиболее подходящей в нашем случае экспоненциальной убывающей функцией.

С помощью программы ARSTAN мы получили индексированные индивидуальные серии радиальных годичных приростов для всех деревьев всех исследованных видов, представленных на пунктах наблюдения. Далее для каждого вида на каждом ПН была получена усредненная индексированная древесно-кольцевая хронология и статистические коэффициенты, характеризующие эти хронологии.

Метод построения корреляционной функции отклика индексов радиального прироста на влияние климатических факторов. Климатические факторы, значимо влияющие на годичный прирост деревьев, в дендрохронологии принято выявлять с использованием эмпирического метода построения и анализа «климатических корреляционных функций отклика индексов ширины годичных колец». Для их построения применяют, как правило, один из двух подходов (Fritts, 1976; Cook, Kairiuktis, 1990):

1. Анализ парных корреляций между параметрами радиального прироста (шириной или индексами ширины годовых колец) и климатическими переменными;

2. Анализ множественной регрессии:

$$x = \sum_i \alpha_i y_i \quad (3.4)$$

где x – индексированная хронология, y_i – климатические переменные, α_i – коэффициенты пропорциональности.

Вычисляют и анализируют корреляции между индексами прироста и климатическими переменными за продолжительный период времени. Из климатических переменных обычно используют среднемесячные значения температуры воздуха и суммарное за месяц количество осадков. Однако по таким (стандартным) функциям отклика зачастую невозможно выявить разницу в реакции радиального прироста на климатические факторы у деревьев, растущих в одинаковых климатических, но разных локальных экологических условиях, у деревьев, растущих в местах с очень коротким сезоном радиального роста (высокие широты) или у деревьев, испытывающих сильное (до экстремальных) внешнее влияние продолжительностью менее месяца. Чтобы выделить значимое влияние климатических факторов на радиальный прирост в более короткий, чем месяц, период времени, применяют известный в математической статистике метод «скользящего среднего». Рассчитывают корреляцию индексов ширины годовых колец с сериями, усредненных в «окне» (в днях) среднесуточных температур и суточных осадков. «Окно» скользит по временной шкале (обычно в пределах вегетационного сезона) с некоторым шагом. Под «шагом» понимается область перекрытия «окон» (в днях), при этом шаг должен быть значительно короче, чем «окно». Продолжительность «окна» и шага выбирает исследователь. Набор коэффициентов корреляции, рассчитанных таким способом за продолжительный календарный период, был назван, по аналогии с традиционным названием, «скользящими корреляционными климатическими функциями отклика» (Shashkin et al., 2010, Бенькова и др., 2012).

Для расчета скользящих корреляционных климатических функций отклика в работе использовали значения среднесуточных температур и суточных осадков по метеостанции «Красноярское опытное поле» за период 1950-2019 гг. (официальный сайт ВНИИГМИ-МЦД: URL: <http://meteo.ru>).

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ РАДИАЛЬНОГО РОСТА ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

4.1 Скорость роста по диаметру древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска

Ход роста дерева по диаметру (изменение диаметра его ствола с возрастом) в общем случае представляется сигмоидной (S-образной) кривой (Кузьмичев, 2013). Впервые понятие об S-образной кривой было дано в 1873 г. Саксом. Эта кривая адекватно описывает три стадии роста диаметра ствола по мере взросления дерева: первоначальный медленный рост, быстрый рост и медленный рост в завершающей жизненной стадии. Таким образом, S-образная кривая отражает стадии естественного снижения физиологической активности деревьев в связи с возрастом, которые проявляются, например, в постепенном уменьшении средней ширины годовых радиальных приростов. Сигмоидную кривую обычно (для простоты математического описания) представляют в виде двух ветвей: возрастающей экспоненциальной и затухающей логарифмической. Соотношение их может быть очень разнообразным, так как зависит от множества внешних и внутренних факторов (Кузьмичев, 2013). Поэтому исследование изменения интенсивности роста по диаметру по S-образной кривой особенно перспективно, если речь идет о городской среде произрастания (Shoda et al., 2020). Анализ хода роста по диаметру выбранных для исследования видов древесных растений, произрастающих на территории г. Красноярска в условиях техногенного загрязнения — одна из задач диссертационного исследования.

Кривую хода роста дерева по диаметру строили по серии значений ширины последовательных годовых колец. Для определения диаметра ствола дерева в i -ом возрастном году значения ширины годовых колец с 1-го до i -го кольца суммировали, затем сумма умножалась на 2. (Под «возрастом» дерева здесь и далее мы имеем в виду «камбиальный возраст», то есть возраст ксилемы в месте взятия керна со ствола). Далее, значения диаметра в i -м году у модельных

деревьев на пункте наблюдения, принадлежащих одному виду, усредняли по деревьям. Таким образом, мы получили набор последовательных средних значений диаметров для каждого вида на пункте наблюдения начиная с «первого» года (первое кольцо на керне) до года взятия образцов.

Кривые хода роста по диаметру (зависимости среднего диаметра от возраста, построенные для каждого исследованного вида на каждом ПН (рис. 4.1—4.5), имеют более или менее выраженную S-образную форму со «сглаженной» погодичной вариабельностью диаметра. Для упрощения анализа хода роста мы не описывали кривые возрастающей экспоненциальной и затухающей логарифмической функциями, а на каждой кривой выделяли последовательные линейные отрезки — тренды — соответствующие стадиям роста наших объектов. По тангенсу угла наклона этих линейных отрезков к оси возраста оценивали среднюю скорость роста по диаметру (мм/год) за промежутки времени (годы), соответствующие стадиям: первоначальному росту после высадки, интенсивному росту и замедленному росту в завершающей жизненной стадии. Однако не на всех кривых хода роста по диаметру четко выражены все 3 стадии (рис. 4.1 - 4.5).

Сосна обыкновенная (рис. 4.1).

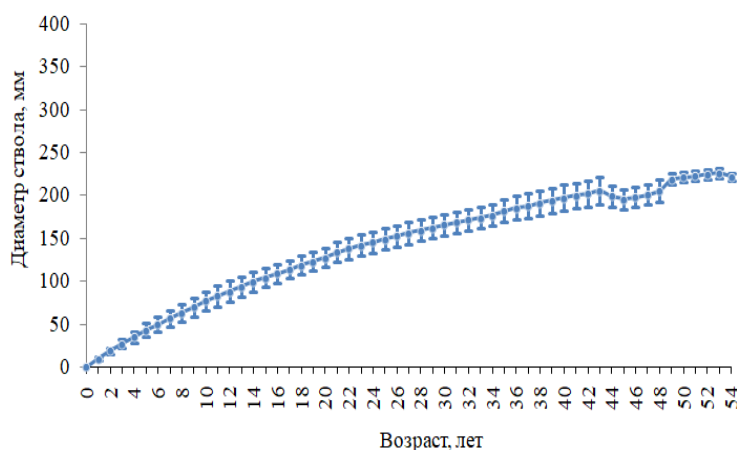


Рисунок 4.1. Ход роста по диаметру сосны обыкновенной на ПН «Академгородок».

Деревья, произрастающие на ПН «Академгородок», имели средний возраст 54 года, на момент взятия кернов имели средний диаметр стволов 22,1 см (кривая 2). Рост по диаметру с относительно высокой интенсивностью (6.5 ± 1.1 мм/год) продолжался до 8-летнего возраста (кривая 2). С возрастом этот показатель постепенно уменьшался: в возрасте 15-25 лет он составил 4.3 ± 0.8 мм/год, а затем снизился до 2.4 ± 0.3 мм/год.

Ель колючая (рис. 4.2, А). Сравнительно высокая скорость роста по диаметру отмечена у деревьев, произрастающих на условно чистых ПН «Ветлужанка» (кривая 1) и ПН «Академгородок» (кривая 2): 7.5 ± 0.5 и 8.3 ± 0.7 мм/год, соответственно. Эти значения заметно не менялись с возрастом. Различие между кривыми незначимо ($P \geq 0.95$).

На ПН «Центр» (кривая 3), характеризующейся средним уровнем загрязнения, усредненная скорость роста в первые 4 года составила 4.0 ± 0.6 мм/год, затем, предположительно в связи с адаптацией к новым условиям произрастания после высаживания и хорошим агротехническим уходом за зелеными насаждениями в центре города, возросла до 7.0 ± 0.6 мм/год.

На сильно загрязненном ПН «КрАЗ» (кривая 4) скорость роста деревьев ели сибирской по диаметру — самая низкая по сравнению с другими ПН; с возрастом менялась слабо и до года наблюдения становилась 3.4 ± 1.0 мм/год.

На ПН «КрасТЭЦ» с очень высоким уровнем загрязнения (кривая 5) модельные деревья в течение первых 7 лет росли медленно (3.1 ± 1.0 мм/год). Затем следует период роста с весьма высокой скоростью (9.4 ± 1.0 мм/год), не меняющейся до года наблюдения. Одной из причин резкого повышения скорости роста, вероятно, может быть то, что специфическое загрязнение ель воспринимает как стимулятор роста.

Береза повислая (рис. 4.2, Б). На ПН «Ветлужанка» (кривая 1) и ПН «Академгородок» (кривая 2) деревья имеют относительно высокую среднюю скорость роста по диаметру: 9.4 ± 1.0 мм/год и 8.0 ± 1.0 мм/год, которая не менялась с возрастом.

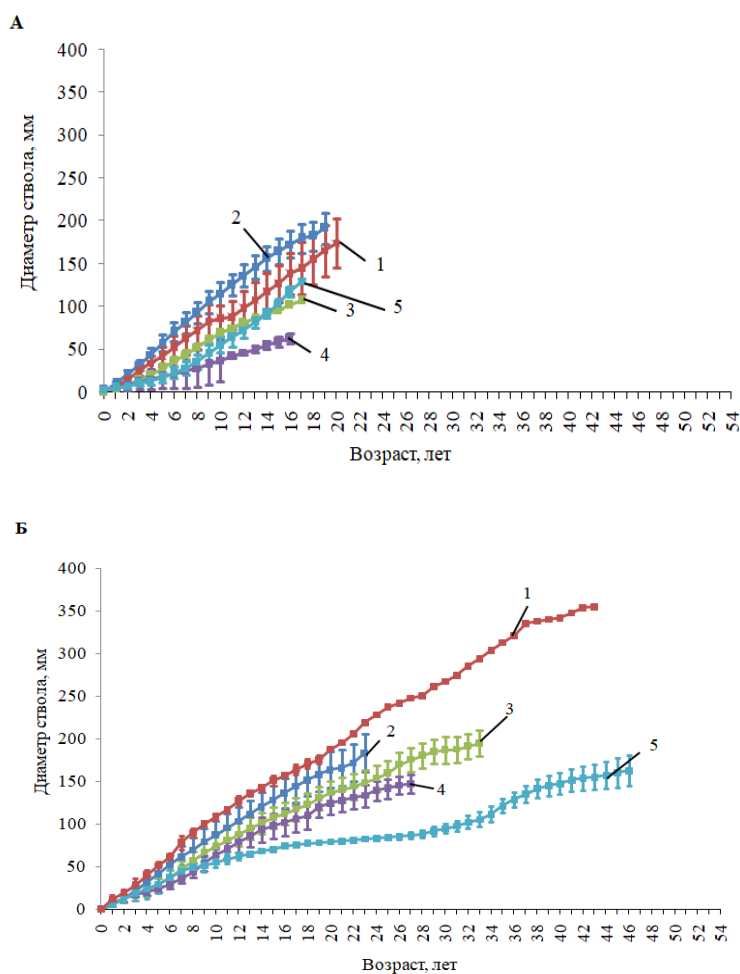


Рисунок 4.2. Ходы роста деревьев по диаметру: А – ель колючая, Б – береза повислая (1 - ПН «Ветлужанка», 2 - ПН «Академгородок», 3 - ПН «Центр», 4 - ПН «КраЗ», 5 - ПН «КрасТЭЦ»).

На среднезагрязненном ПН «Центр» (кривая 3) и сильнозагрязненном ПН «КраЗ» (кривая 4) прирост по диаметру у деревьев до 18-летнего возраста был примерно одинаков: 6.5 ± 1.1 мм/год. С увеличением возраста этот показатель снизился до 4.3 ± 0.1 мм/год на ПН «Центр» и в большей степени - до 3.0 ± 0.3 мм/год - на ПН «КраЗ» (очевидно, сказался эффект сильного загрязнения).

На ПН «КрасТЭЦ» (кривая 5) с очень высоким уровнем техногенного загрязнения самая низкая скорость роста по сравнению с остальными ПН: в первые восемь лет после посадки — 5.6 ± 1.1 мм/год, а затем снизился до 3.0 ± 1.0 мм/год.

Вяз приземистый (рис. 4.3, А). Модельные деревья на ПН «Ветлужанка» (кривая 1) от года посадки до года взятия образцов (18 лет) прирастали в диаметре с наибольшей относительно других ПН средней скоростью 8.3 ± 1.1 мм/год.

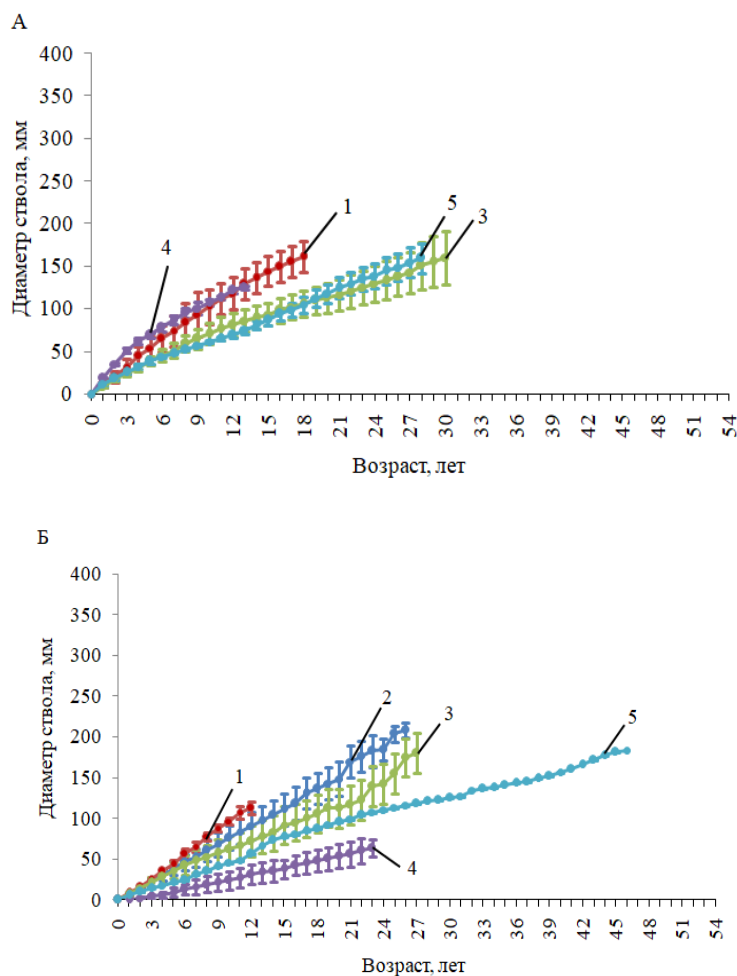


Рисунок 4.3. Ходы роста деревьев по диаметру: А – вяз приземистый, Б – тополь бальзамический (1 - ПН «Ветлужанка», 2 - ПН «Академгородок», 3 - ПН «Центр», 4 - ПН «КрАЗ», 5 - ПН «КрасТЭЦ»).

На ПН «Центр» (кривая 3) саженцы в течение примерно первых 7-8 лет имели среднюю скорость роста 6.3 ± 1.1 мм/год. Затем она уменьшилась до 4.8 ± 1.0 мм/год и стабилизировалась до года взятия образцов (до 30-летнего возраста). Схожая динамика роста диаметру с соответствующими скоростями у экземпляров на сильно загрязненном ПН «КрасТЭЦ» (кривая 5).

На ПН «КрАЗ» (кривая 4) скорость роста вяза была выше, чем на загрязненных ПН «Центр» и «КрасТЭЦ». Саженцы в начальный период (до 5-

летнего возраста) прирастали в диаметре с высокой скоростью — 11 ± 0.5 мм/год, предположительно, из-за комплекса агротехнических мер при пересадке (полив, подкормка) и хорошего состояния посадочного материала. Положительный эффект со временем снизился, и в возрасте от 6 до 13 лет (возраст отбора кернов) скорость роста стабилизировалась на значении 6.2 ± 0.6 мм/год.

Тополь бальзамический (рис. 4.3, Б). Средняя скорость роста по диаметру от момента посадки до момента наблюдения у модельных деревьев этого вида на всех ПН оставалась стабильной.

У деревьев на ПН «Ветлужанка» (кривая 1) и ПН «Академгородок» (кривая 2) — самая высокая по сравнению с другими ПН скорость роста — 10.1 ± 0.5 и 7.7 ± 1.1 мм/год, соответственно.

У деревьев, произрастающих на ПН «Центр» (кривая 3), этот показатель несколько ниже, чем на условно-чистых, — 5.3 ± 1.0 мм/год, еще ниже — на ПН «КрасТЭЦ» (кривая 5) — 3.4 ± 0.1 мм/год. Самая низкая скорость роста по диаметру у тополя на ПН «КрАЗ» — 2.8 ± 0.8 мм/год (кривая 4).

Рябина обыкновенная (рис. 4.4, А). На условно-чистых ПН «Ветлужанка» (кривая 1) и «Академгородок» (кривая 2) средние скорости роста деревьев до 15-летнего возраста (до года взятия образцов на ПН «Ветлужанка») были одинаковыми (при $P \geq 0.95$) 4.9 ± 1.5 мм/год и 5.4 ± 0.8 мм/год. На ПН «Академгородок» (кривая 2) у деревьев старше 15 лет средняя скорость роста уменьшилась до 3.9 ± 0.6 мм/год.

На ПН «Центр» (кривая 3) средняя скорость роста деревьев по диаметру до 4-летнего возраста составила 9.0 ± 1.1 мм/год, что превысило значения этого показателя для моделей на других пунктах наблюдения (кривые 1, 2, 4 и 5). Предположительно, это — следствие применения эффективных агротехнических приемов при посадке и усиленное внимание к состоянию саженцев. В возрасте от 5 до 8 лет (до года взятия образцов) этот показатель несколько снизился до 7.0 ± 1.1 , оставаясь сравнительно высоким.

На ПН «КрАЗ» и «КрасТЭЦ» (кривые 4 и 5) прирост по диаметру был довольно низким в течение первых шести лет — 2.9 ± 0.3 мм/год и 2.0 ± 0.2 мм/год,

соответственно. Затем эти показатели существенно увеличились до 4.6 ± 0.4 мм/год и 5.4 ± 0.2 мм/год, соответственно.

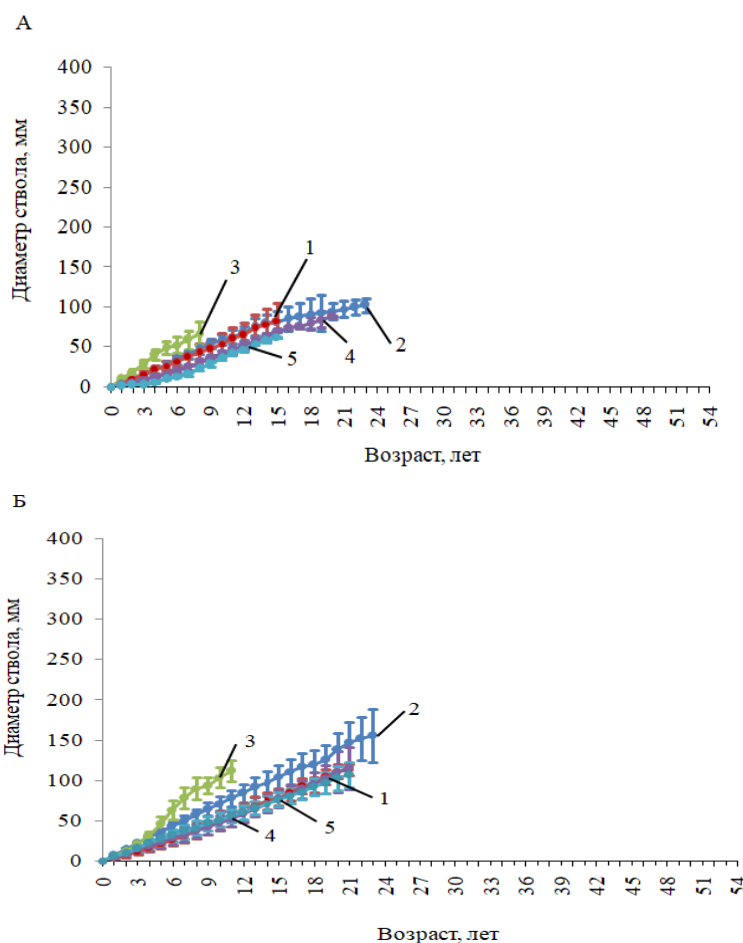


Рисунок 4.4. Ходы роста деревьев по диаметру: А – рябина обыкновенная, Б – черемуха Маака (1 - ПН «Ветлужанка», 2 - ПН «Академгородок», 3 - ПН «Центр», 4 - ПН «КрАЗ», 5 - ПН «КрасТЭЦ»).

Черемуха Маака (рис. 4.4, Б). На ПН «Ветлужанка», «Академгородок», «КрАЗ» и «КрасТЭЦ», скорость роста деревьев по диаметру оставалась неизменной от года посадки до года отбора образцов: на ПН «Ветлужанка», «КрАЗ» и «КрасТЭЦ» (кривые 2, 4 и 5) — 5.1 ± 0.6 мм/год, а на ПН «Академгородок» — несколько выше, 6.1 ± 0.6 мм/год.

На ПН «Центр» деревья до 4-летнего возраста прирастали в диаметре со скоростью 6.1 ± 0.8 мм/год. В возрасте 5-11 лет скорость роста увеличилась до 8.0 ± 0.8 мм/год, что существенно превысило значения для представителей этого вида на других ПН.

Отметим, что интенсивность роста черемухи Маака и рябины обыкновенной на ПН «Центр» выше, чем на других ПН (рисунок 4.4, А, кривая 3 и рисунок 4.4, Б, кривая 3). Можно предположить, что эти виды-интродуценты имеют повышенную чувствительными к агротехническим приемам и усиленному вниманию к состоянию саженцев в центре города, и это положительно сказалось на скорости роста по диаметру.

Яблоня ягодная (рисунок 4.5). На ПН «Ветлужанка» и «Академгородок» (кривые 1 и 2) до 17-летнего возраста скорость роста была 5.7 ± 0.3 и 4.8 ± 0.6 мм/год (различие недостоверно при $P \geq 0.95$), а затем — немного уменьшились до 4.0 ± 1.2 мм/год.

У деревьев, произрастающих на ПН «Центр» (кривая 3) величина прироста была постоянной на протяжении всего периода онтогенеза — 2.7 ± 0.7 мм/год.

На ПН «КрАЗ» (кривая 4) до 10-летнего возраста средняя скорость роста моделей по диаметру была постоянной (6.6 ± 1.1 мм/год) и наибольшей среди модельных деревьев этого вида на других ПН. Затем этот показатель снизился до 4.0 ± 0.4 мм/год.

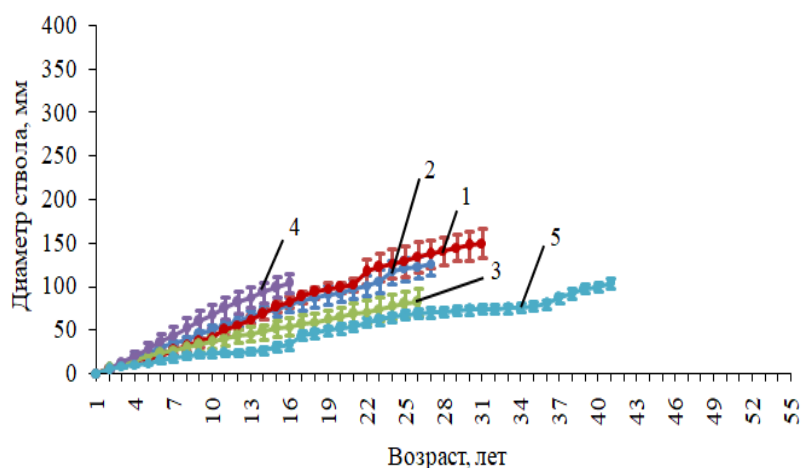


Рисунок 4.5. Ходы роста деревьев по диаметру яблони ягодной (1 - ПН «Ветлужанка», 2 - ПН «Академгородок», 3 - ПН «Центр», 4 - ПН «КрАЗ», 5 - ПН «КрасТЭЦ»).

На ПН «КрасТЭЦ» (кривая 5) самая низкая среди ПН интенсивность роста деревьев по диаметру — 2.5 ± 0.3 мм/год, не меняющаяся за весь период.

Обсуждение результатов. По тангенсу угла наклона линейных отрезков к оси возраста на кривых хода роста по диаметру оценивали среднюю скорость роста по диаметру (мм/год) за промежутки времени (годы), соответствующие стадиям: первоначальному росту после высадки, интенсивному росту и замедленному росту в завершающей жизненной стадии. Интерпретация изменения трендов средней скорости по ходу роста в диаметре (рис. 4.1-4.5), может заключаться в следующем. В начальный период (первая стадия роста) продолжительностью 4-5 лет после пересадки саженцы приживаются и адаптируются к новым условиям. Радиальный прирост довольно низкий и существенно зависит от качества посадочного материала, почвенных условий, от приемов, используемых при уходе за свежими посадками и др. В следующий период времени (вторая стадия роста) деревья имеют максимальную (от начала роста до года взятия образцов) интенсивность роста по диаметру, на которую в значительной степени влияют условия произрастания, в том числе эдафические, техногенные и климатические факторы. Третий период (третья стадия роста) характеризуется снижением темпов роста деревьев. Причины снижения могут быть разные: старение, накопленный негативный эффект техногенного загрязнения, обрезка, повреждение корневой системы при хозяйственных работах и др. Все сказанное выше относится к кривым, на которых выделяются все 3 стадии роста. Однако, как было отмечено выше, на некоторых кривых хода роста, приведенных на рисунках 4.1-4.5, четко не выделяется 1-я и/или 3-я стадии. Поэтому для проведения сравнительного анализа особенностей роста представителей определенного вида в различающихся условиях в дальнейшем использован общий для всех кривых показатель — скорость роста с максимальной интенсивностью на второй стадии.

Для того, чтобы представить информацию об этом показателе в удобной для практического использования форме, составлена таблица 4.1. В ней приведены значения искомого показателя для растений каждого вида на каждом ПН. По t-

критерию значения скорости роста каждого вида разделили на три статистически различимых уровня ($P \geq 0.95$), обозначающих высокую, пониженную и низкую скорость роста. В таблице 4.1 ячейки со сравнительно высокой, пониженной и низкой скоростью роста растений одного вида на разных пунктах наблюдения окрашены в зеленый, желтый и красный цвет. *Рост древесного вида по диаметру принимается устойчивым (толерантным) к условиям произрастания на техногенно загрязненном участке, если его скорость достоверно не ниже скорости роста на условно-чистых ПН.*

Зеленые насаждения в центре города (на примере ПН «Центр»), зона загрязнения средней интенсивности; основные источники — автотранспорт и высокая рекреационная нагрузка. Низкая толерантность роста по диаметру к соответствующим условиям произрастания относительно условно чистых у вяза приземистого и яблони ягодной, пониженная — у ели колючей, березы повислой и тополя бальзамического, высокая — у рябины обыкновенной и черемухи Маака.

Зеленые насаждения (на примере ПН «КрАЗ») в зоне сильного загрязнения от предприятий цветной металлургии. Низкая «устойчивость» (толерантность) роста по диаметру к условиям у ели колючей и тополя бальзамического, пониженная у березы повислой и вяза приземистого, высокая — рябины обыкновенной, черемухи Маака, яблони ягодной.

Зеленые насаждения в зоне сильного загрязнения от предприятий теплоэнергетического комплекса (на примере ПН «КрасТЭЦ»). Низкая толерантность роста по диаметру к условиям произрастания у березы повислой, тополя бальзамического и яблони ягодной, пониженная у вяза приземистого, высокая — у ели колючей, рябины обыкновенной и черемухи Маака.

Таким образом, результаты исследования трендов на кривых хода роста по диаметру указывают на то, что:

- имеются характерные особенности динамики роста по диаметру у восьми древесных видов, произрастающих в техногенно загрязненных условиях относительно условно чистых;

Таблица 4.1. Скорость роста по диаметру у исследованных древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска

Вид	Скорость роста по диаметру, мм/год				
	ПН «Ветлужанка»	ПН «Академгородок»	ПН «Центр»	ПН «КрАЗ»	ПН «КрасТЭЦ»
Сосна обыкновенная	-	3.8-4.8	-	-	-
Ель колючая	7.0-8.0	7.5-9.0	6.4-7.6	1.9-4.9	8.4-9.4
Береза повислая	6.4-8.4	7.0-9.0	6.1-6.9	5.4-7.6	2.0-4.0
Вяз приземистый	7.2-9.4	-	3.8-5.8	5.6-6.8	4.0-6.4
Тополь бальзамический	10.6-11.6	6.6-8.8	4.3-6.3	3.1-4.7	3.3-3.5
Рябина обыкновенная	3.4-6.4	4.6-6.2	5.9-8.1	4.2-5.0	5.2-5.6
Черемуха Маака	5.9-7.1	4.5-5.7	10.2-11.8	4.5-5.7	4.5-5.7
Яблоня ягодная	5.4-6.0	4.2-5.4	2.0-3.4	5.5-7.7	2.0-3.4

- рябина обыкновенная и черемуха Маака на ПН «Центр», «КрАЗ» и «КрасТЭЦ», а также яблоня ягодная на ПН «КрАЗ» и ель колючая на ПН «КрасТЭЦ» — характеризуются высокой толерантностью роста ствола по диаметру к влиянию условий роста, в том числе и соответствующего техногенного загрязнения;

- для двух из исследованных видов — березы повислой и тополя бальзамического — четко выполняется зависимость: «скорость роста по диаметру в условиях техногенного воздействия меньше, чем в незагрязненных, независимо от природы загрязнения (Кладько, 2018; Кладько и др., 2018; Кладько и др., 2019; Kladko et al., 2020).

4.2. Древесно-кольцевые хронологии древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска

Абсолютные древесно-кольцевые хронологии исследованных видов. Зависимость ширины годичных колец (ШГК) от времени их формирования в календарных датах в дендрохронологии имеет название «абсолютной древесно-кольцевой хронологии радиального прироста» (Kaennel, Schweingruber, 1995). В абсолютной древесно-кольцевой хронологии выражена погодичная вариабельность ШГК, связанная, в частности, с погодными условиями, и в то же время она может отражать долговременное изменение климата (Наурзбаев и др., 2003; Kharuk et al., 2023). Абсолютные древесно-кольцевые хронологии в ряде случаев имеют убывающий тренд, обусловленный возрастными изменениями в тканях деревьев. Возрастной тренд может быть выражен в разной степени у разных видов (Яценко-Хмелевский, 1954).

Полученные при измерении индивидуальные серии ширины годичных колец деревьев каждого вида на каждом ПН достоверно коррелируют между собой: межсерийные коэффициенты корреляции варьируют в пределах 0.57—0.63 при $P \geq 0.95$. Это значит, что их можно использовать для усреднения и получения абсолютной (обобщенной) древесно-кольцевой хронологии радиального прироста

для каждого вида на каждом ПН. Полученные абсолютные хронологии характеризуют собранный материал с дендрохронологической точки зрения. Они имеют более или менее выраженный убывающий тренд. Примеры представлены на рисунке 4.6. Некоторые статистические характеристики приведены в таблице 4.2.

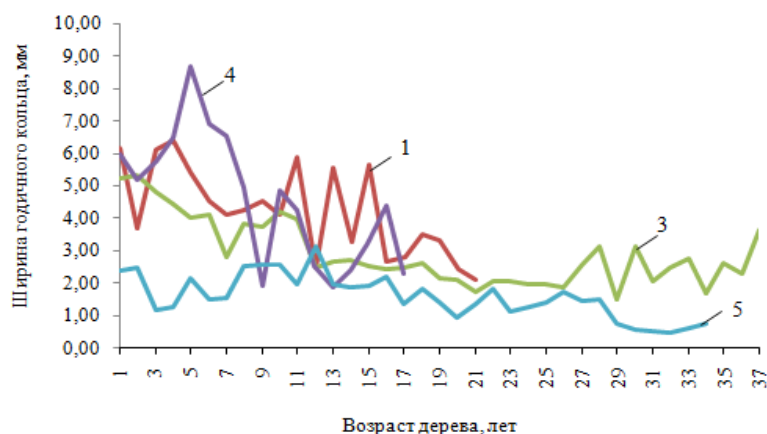


Рисунок 4.6. Пример абсолютных древесно-кольцевых хронологий радиального прироста в зеленых насаждениях г. Красноярска: вяз приземистый на ПН «Ветлужанка» (1), ПН «Центр» (3), ПН «КрАЗ» (4), ПН «КрасТЭЦ» (5) (Кладько, Бенькова, 2018).

Таблица 4.2. Характеристики абсолютных древесно-кольцевых хронологий радиального прироста исследованных видов на пунктах наблюдения

Пункт наблюдения	Средняя ШГК, мм	Среднее станд. отклонение, мм	Средний коэффициент вариации
1	2	3	4
Сосна обыкновенная			
«Академгородок»	1.93	0.86	0.44
Ель колючая			
«Ветлужанка»	4.32	1.64	0.38
«Академгородок»	5.11	1.54	0.30
«Центр»	3.29	1.27	0.39
«КрАЗ»	1.77	0.66	0.37

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
«КрасТЭЦ»	3.78	1.98	0.52
Береза повислая			
«Ветлужанка»	3.16	1.30	0.41
«Академгородок»	3.75	1.63	0.43
«Центр»	3.14	1.89	0.60
«КрАЗ»	2.34	1.66	0.71
«КрасТЭЦ»	1.77	1.41	0.80
Вяз приземистый			
«Ветлужанка»	4.33	2.20	0.51
«Центр»	2.59	1.53	0.59
«КрАЗ»	4.04	2.23	0.55
«КрасТЭЦ»	1.58	0.79	0.50
Тополь бальзамический			
«Ветлужанка»	5.59	1.89	0.34
«Академгородок»	3.55	1.62	0.46
«Центр»	1.90	1.24	0.65
«КрАЗ»	1.64	1.16	0.71
«КрасТЭЦ»	2.02	1.42	0.70
Рябина обыкновенная			
«Ветлужанка»	2.47	0.68	0.28
«Академгородок»	2.50	0.97	0.39
«Центр»	4.52	1.04	0.23
«КрАЗ»	2.14	0.88	0.41
«КрасТЭЦ»	1.88	1.06	0.56
Черемуха Маака			
«Ветлужанка»	3.09	1.49	0.48
«Академгородок»	3.62	1.17	0.32

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
«Центр»	5.48	3.03	0.55
«КрАЗ»	2.64	1.19	0.45
«КрасТЭЦ»	2.83	1.34	0.47
Яблоня ягодная			
«Ветлужанка»	2.58	1.18	0.46
«Академгородок»	2.13	1.12	0.53
«Центр»	1.26	0.80	0.63
«КрАЗ»	3.41	1.57	0.46
«КрасТЭЦ»	2.33	1.47	0.63

По данным таблицы 4.2, только у березы повислой и тополя бальзамического средняя скорость роста в период от года посадки до года взятия образцов на техногенно загрязненных ПН («Центр», «КрАЗ» и «КрасТЭЦ») меньше, чем в условно-чистых местах. Этот вывод согласуется с выводом, полученным по максимальной интенсивности роста по диаметру на второй стадии онтогенеза (разд. 4.1, табл. 4.1).

Средний коэффициент вариации характеризует изменчивость ШГК, среднюю по деревьям одного вида в пределах отдельно взятого ПН. Уровень изменчивости ШГК по эмпирической шкале С.А. Мамаева (1972) у исследованных видов, произрастающих на всех ПН, характеризуется как высокий и очень высокий.

Индексированные древесно-кольцевые хронологии (рисунок 4.7). Каждую индивидуальную серию ширины годичных колец (полученную для каждого дерева) индексировали. При индексировании (стандартизации) мы нивелировали возрастной убывающий тренд наиболее подходящей в нашем случае убывающей экспоненциальной функцией.

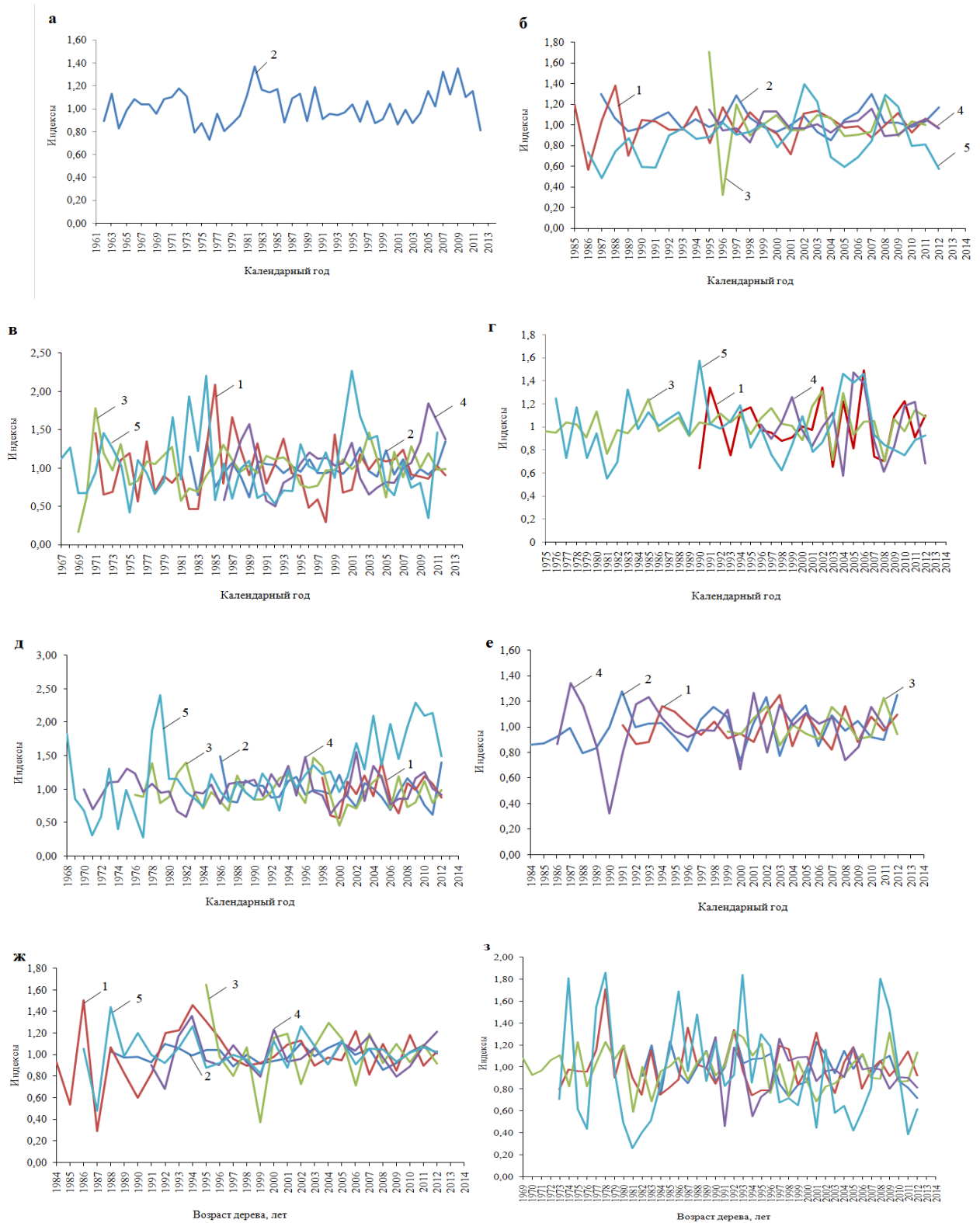


Рисунок 4.7. Индексированные древесно-кольцевые хронологии сосны обыкновенной (а), ели колючей (б), березы повислой (в), вяза приземистого (г), тополя бальзамического (д), рябины обыкновенной (е), черемухи Маака (ж), яблони ягодной (з) на ПН «Ветлужанка» (1), «Академгородок» (2), «Центр» (3), «КрАЗ» (4), «КрестЭЦ» (5).

Межсерияльная корреляция индивидуальных индексированных хронологий отдельного вида в пределах каждого ПН, достаточно тесная ($0.53 \leq \bar{R} \leq 0.60$ при $P \geq 0.95$). На этом основании построены средние для каждого вида на каждом ПН средние индексированные древесно-кольцевые хронологии радиального прироста (рис. 4.7). Статистические характеристики средних индексированных хронологий приведены в таблице 4.3. Значения среднего индекса и его стандартного отклонения показывают, что индексирование проведено корректно.

Таблица 4.3. Средние статистические характеристики индексированных древесно-кольцевых хронологий радиального прироста

Пункт наблюдения	Средний индекс	Среднее станд. отклонение	Средний коэфф. чувствительности	Средний коэфф. вариации
1	2	3	4	5
Сосна обыкновенная				
«Академгородок»	1.01	0.16	0.15	0.14
Ель колючая				
«Ветлужанка»	0.96	0.19	0.17	0.17
«Академгородок»	0.96	0.17	0.17	0,11
«Центр»	0.91	0.30	0.29	0.27
«КрАЗ»	1.01	0.34	0.31	0.29
«КрасТЭЦ»	0.91	0.38	0.23	0.22
Береза повислая				
«Ветлужанка»	1.01	0.27	0.22	0.21
Академгородок»	0.98	0.19	0.18	0.16
«Центр»	0.95	0.26	0.27	0.27
«КрАЗ»	0.95	0.43	0.43	0.32
«КрасТЭЦ»	0.95	0.56	0.32	0.48

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5
Вяз приземистый				
«Ветлужанка»	0.93	0.27	0.22	0.23
«Центр»	1.01	0.24	0.23	0.13
«КрАЗ»	1.03	0.32	0.29	0.26
«КрасТЭЦ»	0.96	0.37	0.23	0.24
Тополь бальзамический				
«Ветлужанка»	0.97	0.27	0.30	0.22
«Академгородок»	0.97	0.20	0.23	0.27
«Центр»	1.01	0.54	0.42	0.29
«КрАЗ»	0.93	0.22	0.22	0.30
«КрасТЭЦ»	1.04	0.62	0.31	0.53
Рябина обыкновенная				
«Ветлужанка»	1.00	0.12	0.170	0.14
«Академгородок»	0.99	0.24	0.211	0.17
«Центр»	1.01	0.20	0.250	0.12
«КрАЗ»	0.95	0.27	0.304	0.24
Черемуха Маака				
«Ветлужанка»	1.40	1.38	0.364	0.15
«Академгородок»	0.97	0.26	0.170	0.17
«Центр»	0.86	0.34	0.318	0.24
«КрАЗ»	0.95	0.21	0.195	0.19
«КрасТЭЦ»	0.96	0.14	0.162	0.21
Яблоня ягодная				
«Ветлужанка»	1.00	0.52	0.336	0.25
«Академгородок»	1.02	0.30	0.244	0.16
«Центр»	0.95	0.34	0.406	0.29
«КрАЗ»	0.87	0.36	0.373	0.37

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5
«КрасТЭЦ»	0.89	0.26	0.229	0.45

Коэффициент чувствительности характеризует относительную величину погодичной изменчивости индексов прироста в индивидуальных индексированных хронологиях. Индексированные хронологии, имеющие коэффициент чувствительности больше 0.20 по критерию С.Г. Шиятова (Шиятов и др., 2000), содержат выраженный климатический сигнал. Судя по коэффициентам чувствительности, ель колючая, береза повислая и рябина обыкновенная, произрастающие на загрязненных ПН (независимо от характера загрязнения), более чувствительны к влиянию климатических факторов по сравнению с таковыми, произрастающими на условно чистых ПН. Для остальных видов имеет значение характер загрязнения (табл. 4.3).

Коэффициент вариации характеризует отклонение индексов радиального прироста от средних значений. У всех видов, кроме рябины обыкновенной и вяза приземистого, вариабельность индексов прироста на загрязненных ПН выше, чем на условно-чистых ПН. Высокая погодичная вариабельность индексов может быть обусловлена не только климатическими, но и иными погодично меняющимися факторами окружающей среды.

О синхронности погодичной изменчивости индексов радиального прироста исследованных видов, растущих в пределах одного пункта наблюдения, можно судить по коэффициентам парной корреляции (табл. 4.4 при $P \geq 0.90$). На ПН «Ветлужанка» погодичная изменчивость индексов прироста синхронна у ели колючей, вяза приземистого и черемухи Маака; на ПН «Академгородок» — у ели колючей и сосны обыкновенной, у черемухи Маака и ели колючей, у яблони ягодной и рябины обыкновенной (коэффициенты парной корреляции принимают значения от 0.45 до 0.66, $P \geq 0.90$).

Таблица 4.4. Коэффициенты парных корреляций между средними индексированными хронологиями радиального прироста древесных видов, произрастающих в пределах каждого пункта наблюдения ($P \geq 0.90$)

«Ветлужанка»							
Вид	Ель	Береза	Вяз	Тополь	Рябина	Черемуха	Яблоня
Ель	1.00	-0.13	0.68	-0.01	-0.24	0.53	-0.25
Береза	-0.13	1.00	0.19	0.25	-0.41	0.13	0.28
Вяз	0.68	0.19	1.00	-0.07	0.35	-0.29	0.38
Тополь	-0.01	0.25	-0.07	1.00	0.47	0.47	0.24
Рябина	-0.24	-0.41	0.35	0.47	1.00	0.15	0.33
Черемуха	0.53	0.13	-0.29	0.47	0.15	1.00	0.22
Яблоня	-0.25	0.28	0.38	0.24	0.33	0.22	1.00
«Академгородок»							
Вид	Сосна	Ель	Береза	Тополь	Рябина	Черемуха	Яблоня
Сосна	1.00	0.66	0.19	-0.09	0.15	0.23	0.19
Ель	0.66	1.00	0.20	-0.39	-0.06	0.45	0.05
Береза	0.19	0.20	1.00	-0.11	-0.07	0.04	0.03
Тополь	-0.09	-0.39	-0.11	1.00	-0.26	-0.10	-0.01
Рябина	0.15	-0.06	-0.07	-0.26	1.00	-0.30	0.48
Черемуха	0.23	0.45	0.04	-0.10	-0.30	1.00	-0.17
Яблоня	0.19	0.05	0.03	-0.01	0.48	-0.17	1.00
«Центр»							
Вид	Ель	Береза	Вяз	Тополь	Рябина	Черемуха	Яблоня
Ель	1.00	-0.10	0.04	0.48	0.14	-0.18	-0.07
Береза	-0.10	1.00	0.37	-0.21	0.34	-0.24	0.07
Вяз	0.04	0.37	1.00	-0.12	0.28	0.32	-0.17
Тополь	0.48	-0.21	-0.12	1.00	-0.20	-0.41	0.24
Рябина	0.14	0.34	0.28	-0.20	1.00	0.29	-0.11
Черемуха	-0.18	-0.24	0.32	-0.41	0.29	1.00	-0.35
Яблоня	-0.07	0.07	-0.17	0.24	-0.11	-0.35	1.00

Продолжение таблицы 4.4

«КрАЗ»							
Вид	Ель	Береза	Вяз	Тополь	Рябина	Черемуха	Яблоня
Ель	1.00	-0.44	-0.45	-0.27	-0.08	-0.15	-0.38
Береза	-0.44	1.00	0.35	0.22	-0.07	0.26	0.20
Вяз	-0.45	0.35	1.00	-0.01	0.19	-0.09	0.03
Тополь	-0.27	0.22	-0.01	1.00	0.01	0.08	-0.24
Рябина	-0.08	-0.07	0.19	0.01	1.00	-0.28	-0.12
Черемуха	-0.15	0.26	-0.09	0.08	-0.28	1.00	-0.23
Яблоня	-0.38	0.20	0.03	-0.24	-0.12	-0.23	1.00
«КрасТЭЦ»							
Вид	Ель	Береза	Вяз	Тополь	Черемуха	Яблоня	
Ель	1.00	0.22	0.00	0.07	-0.22	-0.20	
Береза	0.22	1.00	-0.13	-0.01	0.03	0.42	
Вяз	0.00	-0.13	1.00	0.19	0.32	-0.38	
Тополь	0.07	-0.01	0.19	1.00	0.54	0.09	
Черемуха	-0.22	0.03	0.32	0.54	1.00	-0.12	
Яблоня	-0.20	0.42	-0.38	0.09	-0.12	1.00	

На загрязненных ПН «Центр» и «КрАЗ» значимой корреляции между индексированными хронологиями не выявлено (при $P \geq 0.90$). В то же время, на загрязненном ПН «КрасТЭЦ» индексы прироста синхронно варьируют у тополя бальзамического и черемухи Маака, у яблони ягодной и березы повислой (при $P \geq 0.90$ коэффициенты парной корреляции принимают значения 0.42 и 0.54).

Синхронность индексированных хронологий одних и тех же видов, растущих на разных ПН, характеризуют коэффициенты парной корреляции, приведенные в таблице 4.5.

Хорошая синхронность погодичной изменчивости индексов радиального прироста выявлена только у ели колючей, произрастающей на ПН «Ветлужанка» и на ПН «Центр», а также у березы повислой, произрастающей на ПН «Ветлужанка» и на ПН «КрАЗ» (при $P \geq 0.90$).

Таблица 4.5. Коэффициенты парных корреляций между индексированными хронологиями радиального прироста каждого вида, произрастающего на разных ПН ($P \geq 0.90$)

Ель колючая					
ПН	«Ветлужанка»	«Академгородок»	«Центр»	«КрАЗ»	«КрасТЭЦ»
«Ветлужанка»	1.00	-0.04	0.52	-0.30	0.06
«Академгородок»	-0.04	1.00	0.23	0.45	-0.25
«Центр»	0.52	0.23	1.00	0.32	0.16
«КрАЗ»	-0.30	0.45	0.32	1.00	-0.11
«КрасТЭЦ»	0.06	-0.25	0.16	-0.11	1.00
Береза повислая					
ПН	«Ветлужанка»	«Академгородок»	«Центр»	«КрАЗ»	«КрасТЭЦ»
«Ветлужанка»	1.00	-0.20	0.06	-0.43	0.20
«Академгородок»	-0.20	1.00	0.26	0.00	-0.23
1	2	3	4	5	6
«Центр»	0.06	0.26	1.00	0.25	-0.12
«КрАЗ»	-0.43	0.00	0.25	1.00	-0.31
«КрасТЭЦ»	0.20	-0.23	-0.12	-0.31	1.00
Вяз приземистый					
ПН	«Ветлужанка»	«Центр»	«КрАЗ»	«КрасТЭЦ»	
«Ветлужанка»	1.00	-0.04	-0.36	-0.03	
«Центр»	-0.04	1.00	0.23	-0.06	
«КрАЗ»	-0.36	0.23	1.00	0.22	
«КрасТЭЦ»	-0.03	-0.06	0.22	1.00	
Тополь бальзамический					
ПН	«Ветлужанка»	«Академгородок»	«Центр»	«КрАЗ»	«КрасТЭЦ»
«Ветлужанка»	1.00	0.18	0.16	-0.08	0.29
«Академгородок»	0.18	1.00	-0.20	-0.01	-0.07
«Центр»	0.16	-0.20	1.00	0.10	-0.05
«КрАЗ»	-0.08	-0.01	0.10	1.00	-0.28
«КрасТЭЦ»	0.29	-0.07	-0.05	-0.28	1.00

Продолжение таблицы 4.5

Рябина обыкновенная					
ПН	«Ветлужанка»	«Академгородок»	«Центр»	«КрАЗ»	
«Ветлужанка»	1.00	-0.28	-0.01	-0.18	
«Академгородок»	-0.28	1.00	0.01	-0.21	
«Центр»	-0.01	0.01	1.00	-0.04	
«КрАЗ»	-0.18	-0.21	-0.04	1.00	
Черемуха Маака					
ПН	«Ветлужанка»	«Академгородок»	«Центр»	«КрАЗ»	«КрасТЭЦ»
«Ветлужанка»	1.00	-0.22	0.30	-0.22	-0.24
«Академгородок»	-0.22	1.00	0.20	-0.35	0.38
«Центр»	0.30	0.20	1.00	-0.44	-0.08
«КрАЗ»	-0.22	-0.35	-0.44	1.00	0.50
«КрасТЭЦ»	-0.24	0.38	-0.08	0.50	1.00
Яблоня ягодная					
ПН	«Ветлужанка»	«Академгородок»	«Центр»	«КрАЗ»	«КрасТЭЦ»
«Ветлужанка»	1.00	0.08	-0.20	-0.10	0.21
«Академгородок»	0.08	1.00	-0.29	-0.31	-0.19
«Центр»	-0.20	-0.29	1.00	0.32	0.01
«КрАЗ»	-0.10	-0.31	0.32	1.00	-0.28
«КрасТЭЦ»	0.21	-0.19	0.01	-0.28	1.00

Таким образом, можно констатировать, что между индексированными хронологиями радиального прироста древесных видов в пределах одного ПН и между хронологиями одного вида, произрастающего на разных ПН синхронность погодичной вариабельности индексов радиального прироста в целом довольно низкая. В наличии или отсутствии корреляционной связи проявилась видоспецифичность реакции радиального прироста на влияние погодично изменяющихся внешних (в том числе и климатических) факторов. Для того, чтобы выделить влияние климатических факторов, использовали анализ скользящих корреляционных климатических функций отклика.

4.3. Влияние климатических факторов на погодичную изменчивость радиального прироста древесных видов в зеленых насаждениях г. Красноярска

Скользящие корреляционные климатические функции отклика позволяют выделить периоды времени в течение сезона роста со значимым влиянием климатических факторов на радиальный прирост.

Скользящие функции отклика индексов радиального прироста отобранных для исследования видов (за исключением сосны обыкновенной, которая будет рассмотрена в следующем разделе) на климатические факторы (температуру воздуха и количество осадков) рассчитывались с «окном» в 20 дней и шагом в 5 дней. При расчете использовался период с 1 апреля по 30 сентября, так как в это время можно ожидать заметное влияние погодных условий на ширину годовичных колец.

4.3.1 Анализ корреляционной связи индексов радиального прироста с температурой воздуха

На рисунках 4.8 и 4.9 приведены скользящие корреляционные функции отклика индексов радиального роста на температуру воздуха и количество осадков. Представлены только значимые коэффициенты корреляции при $R \geq 0.95$.

Ель колючая. Радиальный прирост ели имеет положительную корреляционную связь с температурой воздуха на условно-чистом ПН «Ветлужанка» в первой декаде мая, на ПН «Центр» — с конца апреля до конца мая и на ПН «КрасТЭЦ» — в середине мая. На ПН «Центр» выявлена положительная связь с температурой во второй половине августа. То есть, при повышенных температурах воздуха в указанные периоды сезона у ели колючей на этих ПН формируется более широкое годовичное кольцо.

В то же время, достоверной корреляции прироста с температурой воздуха на ПН «Академгородок» и ПН «КрАЗ» не выявлено: прирост оказался нечувствителен к температуре сезона.

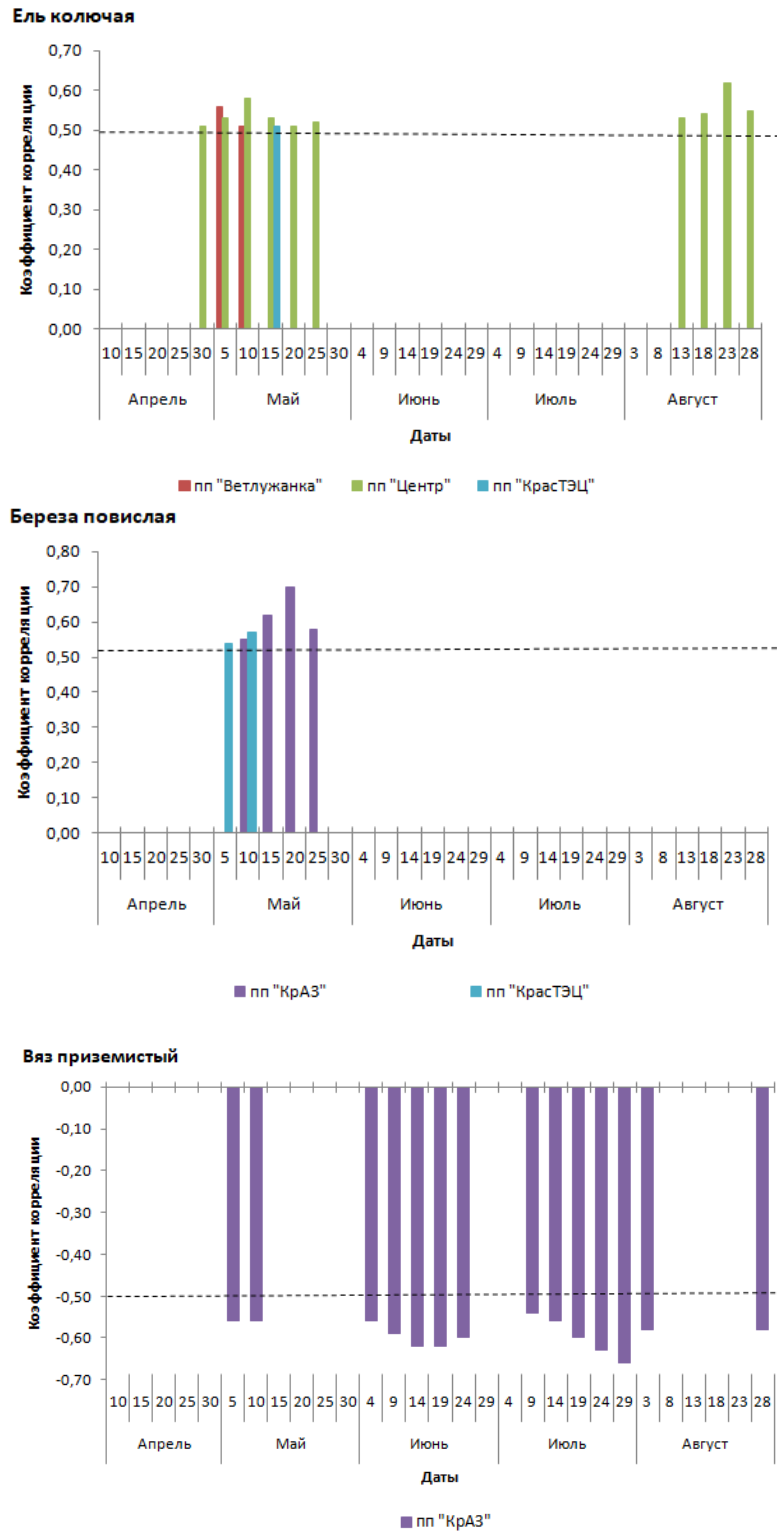


Рисунок 4.8. Скользящие 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста ели колючей, березы повислой и вяза приземистого на пунктах наблюдения на температуру воздуха (представлены только значимые коэффициенты корреляции при $P \geq 0.95$; пунктиром обозначены пределы значимости).

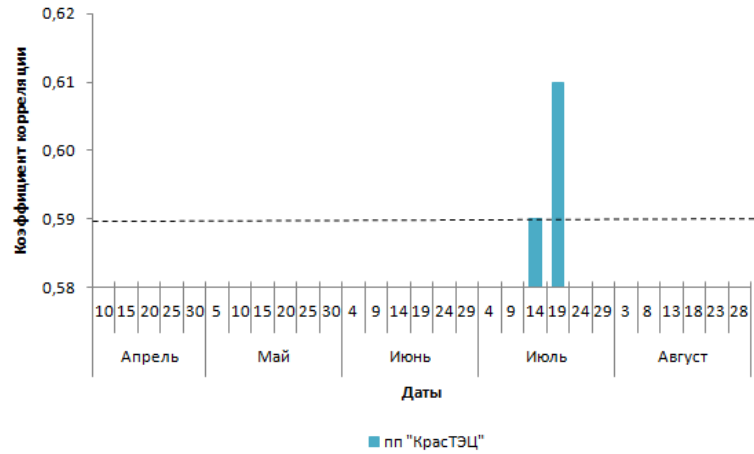
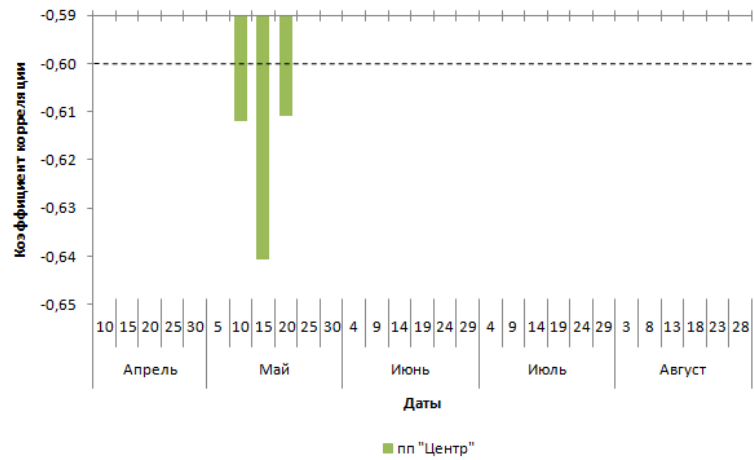
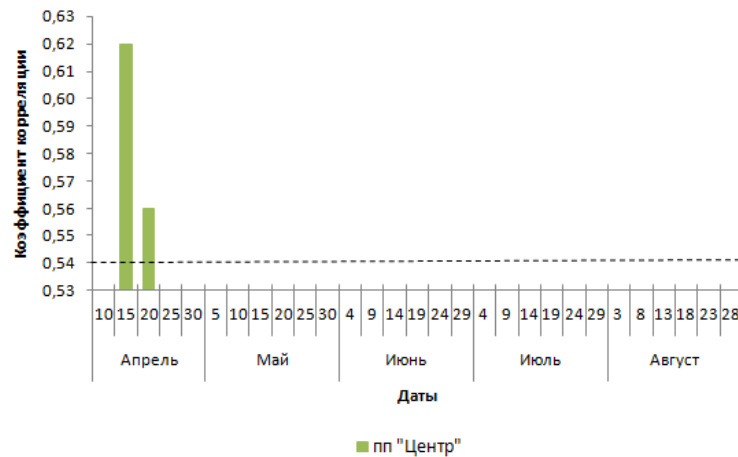
Рябина обыкновенная**Черемуха Маака****Яблоня ягодная**

Рисунок 4.9. Скользящие 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста рябины обыкновенной, черемухи Маака и яблони ягодной на пунктах наблюдения на температуру воздуха (представлены только значимые коэффициенты корреляции при $P \geq 0.95$; пунктиром обозначены пределы значимости).

Береза повислая. Выявлена положительная корреляционная связь температуры воздуха с радиальным приростом в первой декаде мая на ПН «КрасТЭЦ» и во второй-третьей декадах мая на ПН «КрАЗ», то есть повышенные температуры в этот период времени положительно сказываются на ширине годичного кольца.

На обоих условно-чистых ПН и на ПН «Центр» достоверной связи прироста с температурой сезона роста не выявлено.

Вяз приземистый. На ПН «КрАЗ» выявлена отрицательная связь радиального прироста с температурой воздуха в течение всего сезона роста. То есть, повышенная температура сезона отрицательно сказывается на радиальном приросте вяза на ПН «КрАЗ», в то время как на других ПН заметной реакции прироста на температуру не выявлено.

Тополь бальзамический. Достоверная корреляционная связь индексов радиального прироста с температурой воздуха не выявлена ни на условно чистых, ни на загрязненных ПН. То есть, радиальный прирост тополя нечувствителен к изменчивости температуры воздуха.

Рябина обыкновенная. В середине июля выявлена сильная положительная корреляционная связь индексов прироста с температурой воздуха на ПН «КрасТЭЦ»: повышенные температуры в этот период сезона положительно сказываются на радиальном приросте на ПН «КрасТЭЦ». На других ПН достоверной связи с температурой не выявлено.

Черемуха Маака. На ПН «Центр» выявлена выраженная отрицательная корреляционная связь прироста с температурой в первой половине мая: (повышенные температуры мая отрицательно сказываются на приросте). На других ПН, в том числе и на условно-чистых, заметной реакции прироста на посезонную изменчивость температуры не выявлено.

Яблоня ягодная. На ПН «Центр» выявлена положительная корреляционная связь прироста с температурой в середине апреля: сравнительно теплый апрель положительно сказывается на радиальном приросте. На других ПН, в том числе и на условно-чистых, достоверной связи прироста с температурой не выявлено.

4.3.2 Анализ корреляционной связи индексов прироста с количеством осадков.

Корреляционная связь индексов прироста с количеством осадков приведена на рисунках 4.10, 4.11 и 4.12.

Ель колючая. На условно-чистых ПН «Ветлужанка» и «Академгородок» радиальный прирост положительно связан с количеством осадков в весенне-раннелетний период (третья декада мая-начало июня). Кроме того, на ПН «Академгородок» выявлена отрицательная связь с осадками во второй половине июня. На остальных ПН достоверной связи (при $P \geq 0.95$) с количеством осадков не выявлено.

Береза повислая. На ПН «Академгородок» выявлена отрицательная связь радиального прироста с осадками во второй декаде апреля. Выявлена положительная связь с осадками на ПН «Ветлужанка» в первой половине мая, на ПН «Академгородок» — во второй половине мая—начале июня. На ПН «Центр» выявлена отрицательная связь с осадками в первой декаде июня. Положительная связь с осадками проявилась на ПН «КрасТЭЦ» в середине июня и на ПН «Центр» в середине июля. В конце сезона роста (вторая половина августа—начало сентября) выявлена отрицательная связь с осадками на ПН «Центр», положительная на ПН «Академгородок», «Ветлужанка» и «КрАЗ».

Вяз приземистый. На ПН «КрАЗ» выявлена отрицательная связь радиального прироста с осадками во второй декаде апреля. Положительная связь с осадками выявлена на ПН «КрасТЭЦ» во второй половине мая—первой декаде июня и на ПН «Ветлужанка» в первой—второй декадах июня. На ПН «Центр» достоверной связи прироста с осадками не было выявлено.

Тополь бальзамический. На ПН «Ветлужанка» и «КрАЗ» заметной реакции радиального прироста на количество осадков не выявлено. На ПН «Центр» во второй декаде июня связь прироста с осадками положительная, а во второй-третьей декадах июля — отрицательная.

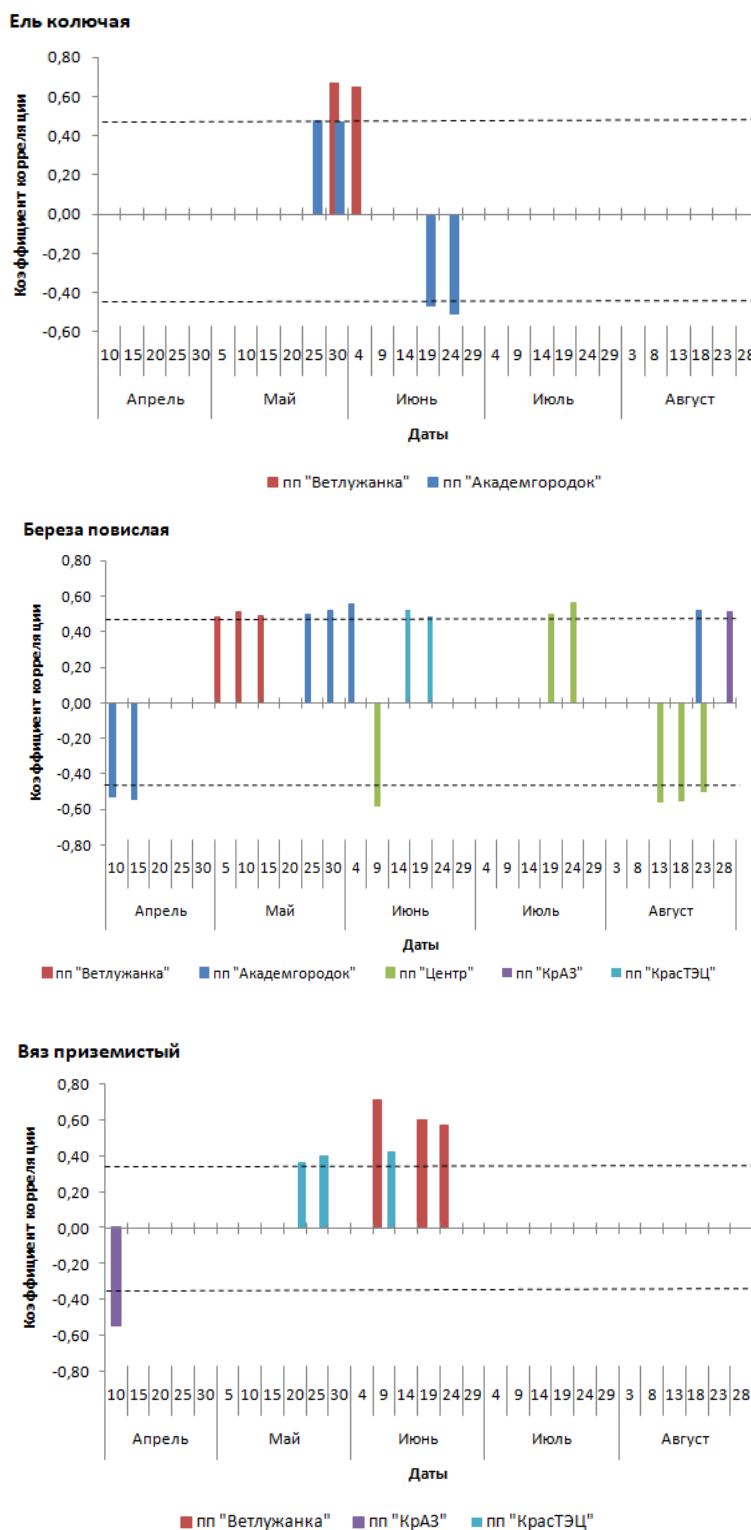
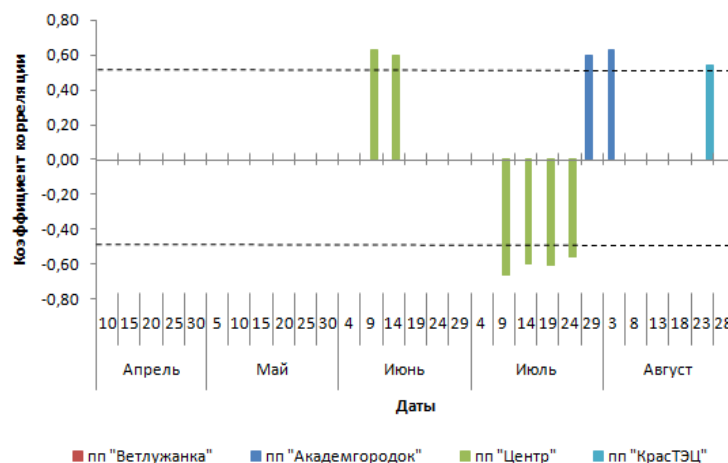
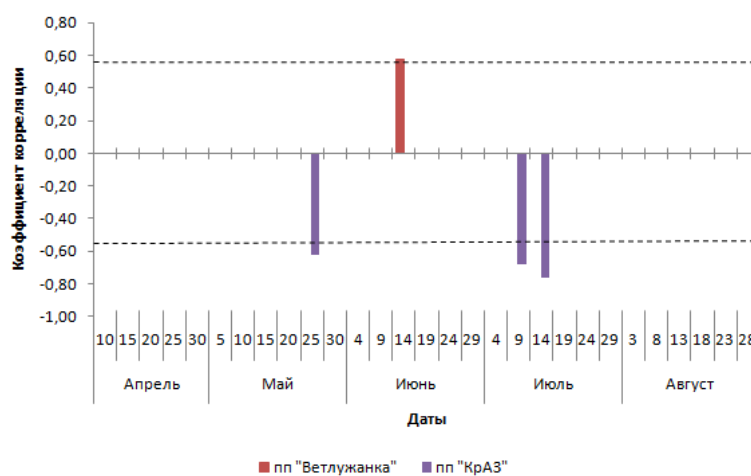


Рисунок 4.10. Скользящие 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста ели колючей, березы повислой и вяза приземистого на пунктах наблюдения на количество осадков (представлены только значимые коэффициенты корреляции при $P \geq 0.95$; пунктиром обозначены пределы значимости коэффициентов корреляции).

Тополь бальзамический



Рябина обыкновенная



Черемуха Маака

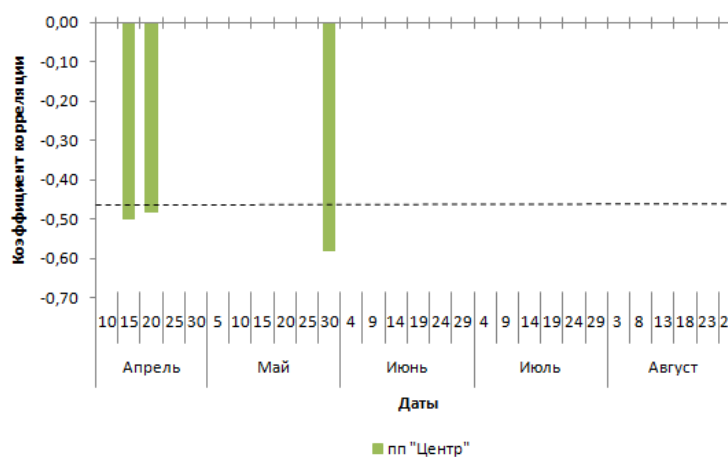


Рисунок 4.11. Скользящие 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста тополя бальзамического, рябины обыкновенной и черемухи Маака на пунктах наблюдения на количество осадков (представлены только значимые коэффициенты корреляции при $P \geq 0.95$; пунктиром обозначены пределы значимости коэффициентов корреляции).

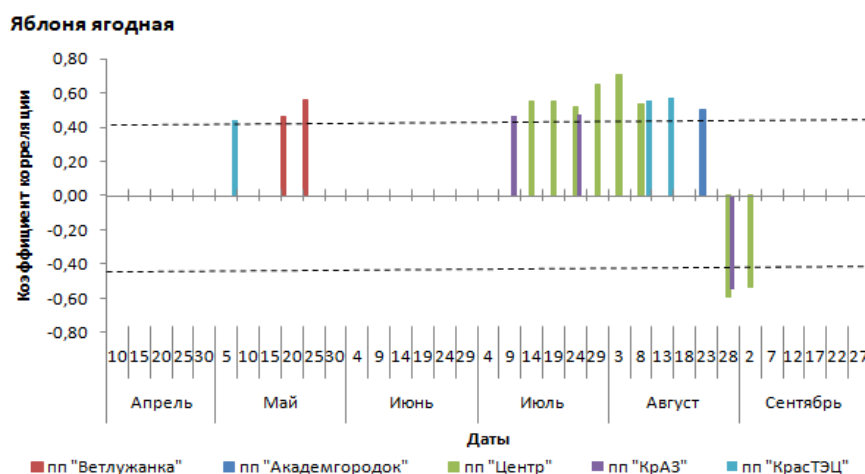


Рисунок 4.12. Скользящие 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста яблони ягодной на пунктах наблюдения на количество осадков (представлены только значимые коэффициенты корреляции при $P \geq 0.95$; пунктиром обозначены пределы значимости коэффициентов корреляции).

Положительная связь с осадками на ПН «Академгородок» выявлена в конце июля-начале августа. На «КрасТЭЦ» слабое положительное влияние осадков сказалось в конце августа.

Рябина обыкновенная. На ПН «Ветлужанка» довольно слабая положительная связь с осадками выявлена в третьей декаде июня и в третьей декаде сентября (на графике отсутствует). На ПН «КРАЗ» отрицательная связь с осадками выявлена в конце мая и в первой половине июля. Достоверной связи прироста с осадками на условно-чистом ПН «Академгородок» и загрязненных ПН «Центр» и «КрасТЭЦ» в течение сезона роста не выявлено.

Черемуха Маака. На ПН «Центр» выявлена отрицательная связь с осадками во второй декаде апреля и в конце мая. Достоверной связи количества осадков с приростом черемухи Маака на всех остальных ПН не выявлено.

Яблоня ягодная. В весенний период выявлена положительная связь радиального прироста с осадками на ПН «Ветлужанка» (вторая половина мая) и ПН «КрасТЭЦ» (начало мая). Положительная связь с осадками выявлена во второй—третьей декаде июля на ПН «КрАЗ», во второй декаде июля—первой декаде августа на ПН «Центр», во второй декаде августа на ПН «КрасТЭЦ» и в

конце августа на ПН «Академгородок». В конце августа-начале сентября отрицательная связь с осадками выявлена на ПН «Центр» и «КрАЗ».

Анализ климатических функций отклика выявил, что у видов, произрастающих на одном ПН, так же, как и у вида, произрастающего на разных ПН (в условиях разного техногенного загрязнения), периоды времени в пределах сезона роста со значимым влиянием на прирост климатических факторов (температуры воздуха и количества осадков) могут существенно различаться.

Положительная корреляционная связь индексов прироста с количеством осадков может означать, что растения испытывают дефицит доступной почвенной влаги в месте произрастания в выделенные периоды сезона, и на обильные осадки растение реагирует увеличением прироста. Полученную информацию можно использовать в практическом применении – вводить в систему агротехнического ухода за насаждениями дополнительный полив в выявленные периоды сезона роста.

4.4. Модификация климатического отклика индексов радиального прироста древесных видов при произрастании в условиях техногенного загрязнения

Вопрос о том, модифицируют ли условия произрастания на техногенно загрязненных ПН климатический отклик индексов радиального прироста исследуемого вида, решался путем сравнения с климатическим откликом того же вида на условно-чистом ПН. Различие в откликах интерпретировалось как модификация климатического отклика условиями произрастания (Кладько, 2023). Для наглядности и упрощения в проведении сравнительного анализа составлены таблицы 4.6 и 4.7. Для этого календарный сезон радиального роста разделили на три периода: 1-й — весенне-раннелетний (с начала мая до середины июня), соответствующий начальному периоду сезона роста, 2й — летний период (с середины июня до конца июля), время интенсивного роста и формирования годичного кольца, и 3-й — осенний период (в августе—сентябре), соответствующий концу сезона радиального роста.

Таблица 4.6. Корреляционная связь индексов радиального прироста древесных видов на пунктах наблюдения с температурой воздуха («+» — положительная, «-» — отрицательная при $P \geq 0.95$)

Вид	Название ПН				
	ПН «Ветлужанка»	ПН «Академгородок»	ПН «Центр»	ПН «КрАЗ»	ПН «КрасТЭЦ»
Ель колючая	«+» 1-я декада мая	климатический сигнал не выявлен	«+» конец апреля—май	климатический сигнал не выявлен	«+» середина мая
			«+» 2-я половина августа		
Береза повислая	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	«+» 1-я декада мая	«+» 1-я декада мая
Вяз приземистый	климатический сигнал не выявлен	вид отсутствует на ПН	климатический сигнал не выявлен	«-» 1-я декада мая	климатический сигнал не выявлен
				«-» июнь- июль	
				«-» конец августа- начало сентября	
Тополь бальзамический	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен
Рябина обыкновенная	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	«+» середина июля
Черемуха Маака	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	«-» 1-я и 2-я декады мая	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен
Яблоня ягодная	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	«+» середина апреля	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен

Таблица 4.7. Корреляционная связь индексов радиального прироста древесных видов на пунктах наблюдения с количеством осадков («+» — положительная, «-» — отрицательная при $P \geq 0.95$)

Вид	Название ПН				
	ПН «Ветлужанка»	ПН «Академгородок»	ПН «Центр»	ПН «КрАЗ»	ПН «КрасТЭЦ»
1	2	3	4	5	6
Ель колючая	«+» конец мая-начало июня	«+» конец мая-начало июня	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен
		«-» вторая половина июня			
Береза повислая	«+» первая половина мая	«-» 2-я декада апреля; «+» вторая половина мая-начало июня	«-» 1-я декада июня	«+» конец августа	«+» середина июня
	«+» конец августа-начало сентября	«+» конец августа-нач. сент.	«+» середина июля		
			«-» вторая декада августа		
Вяз приземистый	«+» 1-я -2-я декады июня	вид отсутствует на ПН	климатический сигнал не выявлен	«-» 2-я декада апреля	«+» 2-я половина мая-1-я декада июня

Продолжение таблицы 4.7

1	2	3	4	5	6
Тополь бальзамический	климатический сигнал не выявлен	«+» конец июля- начало августа	«+» 2-я декада июня	климатический сигнал не выявлен	«+» конец августа
			«-» 2-3-я декады июля		
Рябина обыкновенная	«+» 3-я декада июня	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	«-» конец мая	климатический сигнал не выявлен
	«+» конец сентября			«-» 1-я половина июля	
Черемуха Маака	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен	«-» 2-я-3-я декада апреля, «-» конец мая	климатический сигнал не выявлен	климатический сигнал не выявлен
Яблоня ягодная	«+» 2-я половина мая	«+» конец августа	«+» 2-я половина июля- 1-я декада августа	«+» 2-я и 3-я декада июля	«+» начало мая
	«-» начало августа		«-» конец августа- начало сентября	«-» конец августа- начало сентября	«+» 2-я декада августа

При разделении сезона на периоды учитывались результаты исследования сезонного роста сосны обыкновенной вблизи г. Красноярска Г.Ф. Антоновой и В.В. Стасовой (Antonova, Stasova, 2015); сведения по другим видам, отобранным нами для исследования, в литературе отсутствуют.

В ячейках таблиц указывалась положительная (+) или отрицательная (-) корреляционная связь индексов радиального прироста с температурой воздуха и количеством осадков для каждого вида на каждой ПН в выделенные выше периоды сезона роста. Ячейки окрашены в три цвета в соответствии с календарным периодом: 1-й — зеленый, 2 — желтый и 3 — красный; ячейки, обозначающие отсутствие климатического сигнала окрашены в серый цвет (табл. 4.6 и 4.7).

Вывод о наличии модификации климатического отклика радиального прироста определенного вида на загрязненных ПН, делается по таблицам 4.6 и 4.7, при усилении или ослаблении, а также при изменении знака корреляционной связи индексов прироста с температурой воздуха и/или количеством осадков по сравнению с таковыми на условно чистых ПН.

По данным таблицы 4.6 выявлено, что отклик радиального прироста на температуру воздуха имеет особенности модификации на загрязненных ПН с разным характером загрязнения.

На ПН «Центр», находящейся в зоне со средним уровнем загрязнения, изменение температурного отклика радиального прироста относительно условно чистых ПН, выявлена на видах:

Ель колючая: повышена чувствительность к температуре воздуха в конце сезона роста по сравнению с условно-чистыми ПН.

Черемуха Маака и яблоня ягодная: повышена чувствительность к температуре воздуха в начале сезона роста.

На ПН «КрАЗ», находящемся в зоне с очень высоким уровнем загрязнения изменение температурного отклика радиального прироста относительно условно чистых ПН выявлена на видах:

Ель колючая: снижена чувствительность к температуре воздуха в весенний период.

Береза повислая: повышена чувствительность к температуре воздуха в начале сезона роста по сравнению с условно-чистыми ПН.

Вяз приземистый: повышена чувствительность к температуре воздуха в течение всего сезона роста.

На ПН «КрасТЭЦ» в зоне с очень высоким уровнем загрязнения изменение температурного отклика радиального прироста относительно условно чистых ПН выявлена на видах:

Береза повислая: повышена чувствительность к температуре воздуха в начале сезона роста.

Рябина обыкновенная: повышена чувствительность к температуре воздуха в середине сезона.

По данным таблицы 4.7 выявлено, что отклик радиального прироста на количество осадков имеет особенности модификации на загрязненных ПН с разным характером загрязнения.

На ПН «Центр»

Ель колючая: снижена чувствительность к количеству осадков весной и в середине лета (в начале и середине сезона роста) по сравнению с условно-чистыми ПН.

Береза повислая: противоположная реакция на осадки весной и осенью (чем больше осадков, тем шире годичное кольцо на условно-чистых ПН, но тем уже годичное кольцо на ПН «Центр»). Повышена чувствительность к осадкам в середине сезона роста.

Вяз приземистый: снижена чувствительность к осадкам в раннелетний период (1-я-2-я декады июня).

Тополь бальзамический: повышена чувствительность к осадкам весной. Противоположная реакция (по сравнению с условно чистым ПН «Академгородок») на осадки в середине лета.

Рябина обыкновенная: снижена чувствительность к осадкам в середине и конце сезона (в летне-осенний период) по сравнению с условно чистыми ПН.

Черемуха Маака: повышена чувствительность к осадкам весной, в начале сезона роста.

Яблоня ягодная: снижена чувствительность к осадкам весной, в начале сезона роста. Противоположная реакция (по сравнению с условно чистыми ПН) на осадки в середине и конце сезона роста.

На ПН «КрАЗ»

Ель колючая: снижена чувствительность к осадкам весной и в середине лета, то есть в начале и середине сезона роста, по сравнению с условно-чистыми ПН.

Береза повислая: снижена чувствительность к осадкам весной, в начале сезона роста.

Вяз приземистый: повышена чувствительность к осадкам ранней весной, снижена в раннелетний период.

Тополь бальзамический: снижена чувствительность к осадкам в середине лета.

Рябина обыкновенная: повышена чувствительность к осадкам весной и понижена осенью, в конце сезона роста. Противоположная (по сравнению с условно-чистым ПН «Ветлужанка») реакция на осадки в середине лета.

Яблоня ягодная: снижена чувствительность к осадкам в весенний период. Противоположная реакция (по сравнению с условно чистыми ПН) на осадки в середине и конце сезона роста.

На ПН «КрасТЭЦ»

Ель колючая: снижена чувствительность к осадкам в весенне-летний период (по сравнению с условно чистыми ПН).

Береза повислая: снижена чувствительность к осадкам в августе (в конце сезона роста).

Вяз приземистый: повышена чувствительность к осадкам весной снижена в летний период.

Тополь бальзамический: повышена чувствительность к осадкам в конце августа и снижена — в середине лета.

Рябина обыкновенная: снижена чувствительность к осадкам в середине лета и осенью.

Яблоня ягодная: снижена (по сравнению с условно чистыми ПН) чувствительность к осадкам в середине лета и повышена в конце сезона, в августе.

Результаты сравнения климатического отклика соответствующих видов, произрастающих на техногенно загрязненных и условно чистых ПН, указывают на то, что у некоторых видов «чувствительность» радиального прироста к влиянию погодных условий не изменилась или стала слабее по сравнению с условно чистыми местами произрастания. Это значит, что изменение (уменьшение или увеличение) интенсивности роста по диаметру у этих видов относительно условно чистых мест произрастания (табл. 4.1) не связано с климатическими изменениями. Выявлено, что скорость роста по диаметру уменьшилась по сравнению с условно чистыми местами (при слабом влиянии климатических факторов) у видов:

- ель колючая на ПН «КрАЗ»;
- вяз приземистый на ПН «Центр»;
- тополь бальзамический на ПН «КрАЗ» и «КрасТЭЦ»;
- яблоня ягодная на ПН «КрасТЭЦ».

Характерное техногенное загрязнение на упомянутых ПН мы рассматриваем как один из основных негативных факторов, обусловивших относительное уменьшение интенсивности роста.

Скорость роста по диаметру увеличилась или не изменилась (при слабом влиянии климатических факторов) по сравнению с условно чистыми местами произрастания у видов:

- ель колючая на ПН «КрасТЭЦ»;
- рябина обыкновенная на ПН «Центр»;
- черемуха Маака на ПН «КрАЗ» и «КрасТЭЦ»;
- яблоня ягодная на ПН «КрАЗ».

В то же время на прирост черемухи Маака, произрастающей на среднезагрязненной ПН «Центр» положительно влияют и условия места произрастания, при определенных погодных условиях (прохладный и сухой период в начале сезона роста, табл. 4.7).

Таким образом, сравнительный анализ климатического сигнала в древесно-кольцевых хронологиях исследованных видов, произрастающих на загрязненных ПН относительно условно чистых ПН показал, что его модификация зависит от видовой специфики и условий произрастания техногенно загрязненных ПН.

4.5 Динамика радиального роста сосны обыкновенной в зеленых насаждениях г. Красноярска в условиях техногенного загрязнения

Из обзора литературы (Глава 1) следует, что для эффективного использования сосны обыкновенной в озеленении г. Красноярска необходимо иметь информацию о ее росте и состоянии (в т.ч., о радиальном росте и чувствительности вида к погодным факторам) дифференцированную по территории города с учетом степени и характера техногенного загрязнения.

Как было отмечено выше (Глава 2), воздушная среда г. Красноярска неоднородна по загрязнению атмосферными токсикантами. Их распределение варьирует в зависимости от рельефа местности, ветрового режима, характера застройки, от особенностей хозяйственного использования территории и др. (Скрипальщикова и др., 2009; Хлебопрос и др., 2012; Тулюш, Коротченко, 2018, Onuchin et al., 2020; Государственный доклад..., 2022 и др.). Тем не менее, уровень загрязнения атмосферными токсикантами принято оценивать средними по территории значениями $ИЗА_5$. $ИЗА_5$ — комплексная безразмерная характеристика уровня загрязнения атмосферы, рассчитанная по пяти приоритетным загрязняющим веществам с учетом их опасности и концентрации в атмосфере в долях ПДК (Руководство... РД 52.04.186-89, 1991; Хлебопрос и др., 2012; Государственный доклад..., 2022). В России загрязнение считается низким, если $ИЗА_5 < 5$, повышенным при $ИЗА_5$ от 5 до 6, высоким при $ИЗА_5$ от 7 до 13 и

очень высоким при ИЗА₅, равном или большем 14. Абсолютные значения ИЗА₅ для г. Красноярска за период 2004-2019 г. приведены в таблице 4.8 (Государственный доклад... 2020, 2021, 2022; Хлебопрос и др., 2012 и др.).

Несмотря на то, что районы Красноярска имеют свой уровень атмосферного загрязнения мы предполагаем, что изменение этого показателя (по трендам и по погодичной изменчивости) соответствует изменению ИЗА₅, общей для города (табл. 4.8).

Для выявления связи между ходом изменения ИЗА₅ и ходом радиального роста сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения (ПН «Ул. Е. Стасовой», «Парк «Гвардейский», «Ул. 9 Мая»), мы использовали индивидуальные серии ширины годичных колец модельных деревьев сосны на каждом ПН. В качестве фоновой взяты ПН «Дендрарий» (Глава 2).

Индивидуальные серии ширины годичных колец деревьев, взятых на каждом ПН, тесно коррелируют между собой: межсерийные коэффициенты корреляции варьируют в пределах 0.88–0.91 при $p \leq 0.05$. Это дает основание для построения обобщенной древесно-кольцевой хронологии (или средней кривой хода роста), отражающей особенности роста всех деревьев на каждом ПН.

Ход радиального роста деревьев сосны обыкновенной на условно чистом ПН («Дендрарий») представлен на рисунке 4.13 а. Кривые хода роста на условно чистом и загрязненных ПН схожи по форме (рис. 4.13 а, б). Первый максимум, характерный как для условно-чистого, так и для загрязненных ПН, связан с периодом формирования ювенильной древесины. Сдвиг этих максимумов по временной шкале друг относительно друга обусловлен разным средним возрастом деревьев в посадках на ПН. На загрязненных ПН ход радиального роста с течением времени приобретает характерные особенности, отличные от ПН «Дендрарий». С 2012 г. прирост резко увеличивается и затем стабилизируется (рис. 4.13, б).

Таблица 4.8. Значения ИЗА₅ за период 1991-2019 г. (Государственный доклад... 2020, 2021, 2022 и др.)

Год	Абсолютное значение ИЗА ₅	Уровень загрязнения
1991	64.60	очень высокий
1992	58.00	очень высокий
1993	53.30	очень высокий
1994	40.70	очень высокий
1995	41.30	очень высокий
1996	26.20	очень высокий
1997	20.50	очень высокий
1998	14.60	очень высокий
1999	12.92	высокий
2000	9.38	высокий
2001	18.63	очень высокий
2002	10.83	высокий
2003	14.00	очень высокий
2004	13.32	высокий
2005	15.14	очень высокий
2006	11.27	высокий
2007	14.66	очень высокий
2008	15.31	очень высокий
2009	18.56	очень высокий
2010	21.86	очень высокий
2011	23.75	очень высокий
2012	22.93	очень высокий
2013	17.05	очень высокий
2014	14.00	очень высокий
2015	7.00	высокий
2016	14.00	очень высокий
2017	14.00	очень высокий
2018	14.00	очень высокий
2019	13.00	высокий

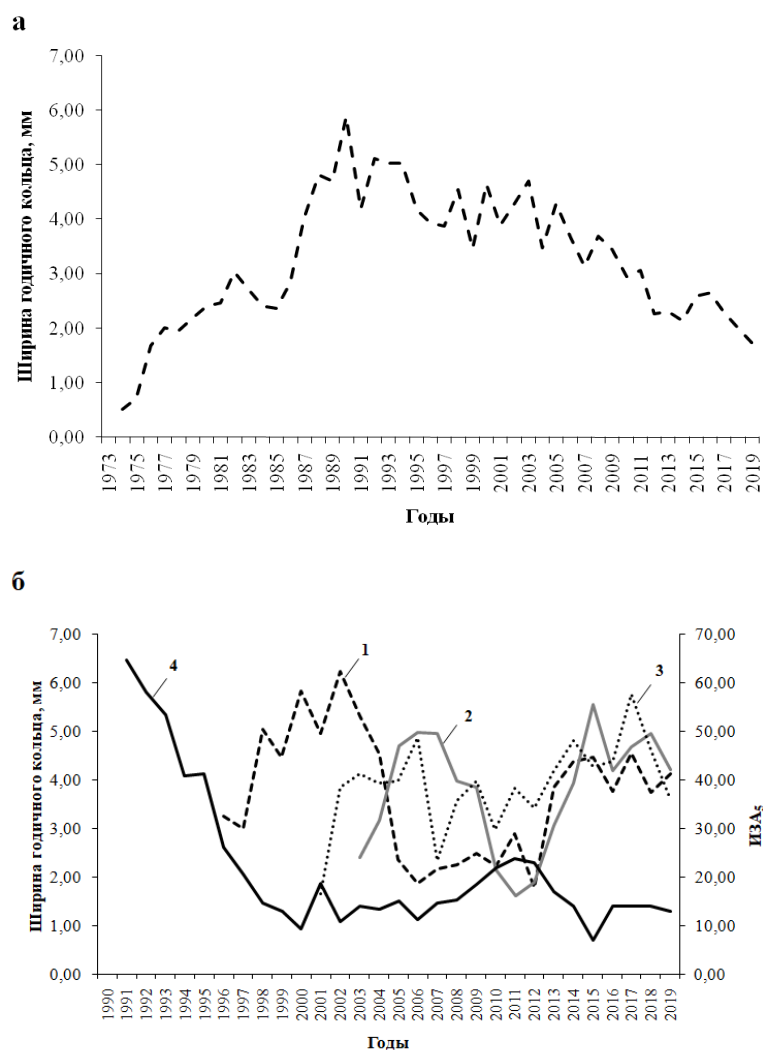


Рисунок 4.13. Средние кривые хода радиального роста сосны обыкновенной, произрастающей в условиях фона (ПН «Дендрарий») — (а) и при разной антропогенной нагрузке — (б). 1- ПН «Парк «Гвардейский»»; 2 - ПН «Ул. Е. Стасовой»; 3 - ПН «Ул. 9 Мая»; 4 - уровень $ИЗА_5$.

Вторые максимумы на всех кривых хода роста фактически совпадают и соответствуют периоду 2012-2019 гг., когда значения $ИЗА_5$ были минимальны.

Рассчитанные коэффициенты корреляции с $ИЗА_5$ достоверны для всех трех ПН, корреляция отрицательная, то есть при повышении уровня загрязнения увеличивается радиальный прирост.

На ПН «Ул. Е. Стасовой» коэффициент корреляции $R = -0.81$ (уровень достоверности $R = \pm 0.34$ при $P \geq 0.95$).

На ПН «Парк «Гвардейский» $R = -0.51$ (уровень достоверности $R = \pm 0.29$ при $P \geq 0.95$).

На ПН «Ул. 9 Мая» $R = -0.41$ (уровне достоверности $R = \pm 0.33$, $P \geq 0.95$).

Для исследования погодичной вариабельности ШГК и связи ее с вариабельностью атмосферного загрязнения проведено индексирование ШГК и ИЗА₅ с использованием полиномиальной функции (полинома третьего порядка). В результате индексирования из серии ИЗА₅ и индивидуальных серий ШГК были удалены тренды, выраженные на рис. 4.13, обусловленные влиянием долговременно изменяющихся факторов.

Некоторые характеристики индексированных древесно-кольцевых хронологий приведены в таблице 4.9

Таблица 4.9. Статистические характеристики индексированных хронологий радиального прироста деревьев сосны обыкновенной на пунктах наблюдения

	ПН «Дендрарий»	ПН «Парк «Гвардейский»»	ПН «Ул. Е. Стасовой»	ПН «Ул. 9 Мая»
Камбиальный возраст деревьев, лет	39±6	15±2	23±1	16±1
Средняя ШГК, мм	4.08±0.39	4.17±0.42	3.80±0.48	3.92±0.35
Дисперсия	2.09	2.45	3.25	1.68
Rbar	0.89	0.68	0.62	0.69

Примечание. Камбиальный возраст – возраст древесины деревьев на уровне взятия керна со ствола деревьев на ПН.

Коэффициент $Rbar$ характеризует межсерийную корреляцию индивидуальных индексированных хронологий в пределах ПН. Судя по его значениям (табл. 4.9), серии индексированных ШГК деревьев в пределах каждого пункта наблюдения довольно тесно коррелируют между собой, то есть погодичную изменчивость их радиального прироста хорошо описывает усредненная по деревьям индексная кривая. Это — подтверждение того, что отобранные пять модельных деревьев репрезентативны для каждого пункта

наблюдения, полученные по отобраным деревьям средние индексированные древесно-кольцевые хронологии применимы для дальнейшего дендроклиматического анализа.

Тесноту связи между индексами ШГК сосны обыкновенной на загрязненных ПН и индексами ИЗА₅ демонстрирую графики на рисунке 4.14, построенные за период времени, общий для деревьев на всех трех ПН: 2004-2019 гг. Связь, близкая к функциональной, между индексированными показателями ШГК и ИЗА₅ выявлена только у сосны на ПН «Ул. 9 Мая», произрастающей в условиях сильного комплексного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии. Связь описывается линейной функцией $y = -0.67x + 1.68$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.71$ (рис. 4.14, в). На ПН «Ул. Е. Стасовой» и «Парк «Гвардейский» связь между индексами ШГК и ИЗА₅ не выражена: $R^2 = 0.026$ и $R^2 = 0.081$ (рис. 4.14, а и б).

Таким образом, на погодичную изменчивость ШГК сосны обыкновенной в посадках, испытывающих значительное негативное влияние комплексного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии (ПН «Ул. 9 Мая») оказывает заметное влияние погодичная изменчивость уровня атмосферного загрязнения, выражающаяся в индексированных величинах ИЗА₅. На двух других ПН («Ул. Е. Стасовой» и «Парк «Гвардейский»), это влияние не проявилось настолько четко (Кладько, Скрипальщикова, 2021).

Для выявления влияния климатических факторов на радиальный прирост использовали скользящие корреляционные функции отклика на температуру воздуха и количество осадков (рис. 4.15). Коэффициенты корреляции $R \geq |0.55|$ между индексированными ШГК и климатическими факторами значимы при $p \leq 0.05$. Для построения были использованы данные среднесуточной температуры воздуха и суточных осадков по метеостанции «Красноярск. Опытное поле» с 1 апреля по 20 сентября за 2004–2019 гг.

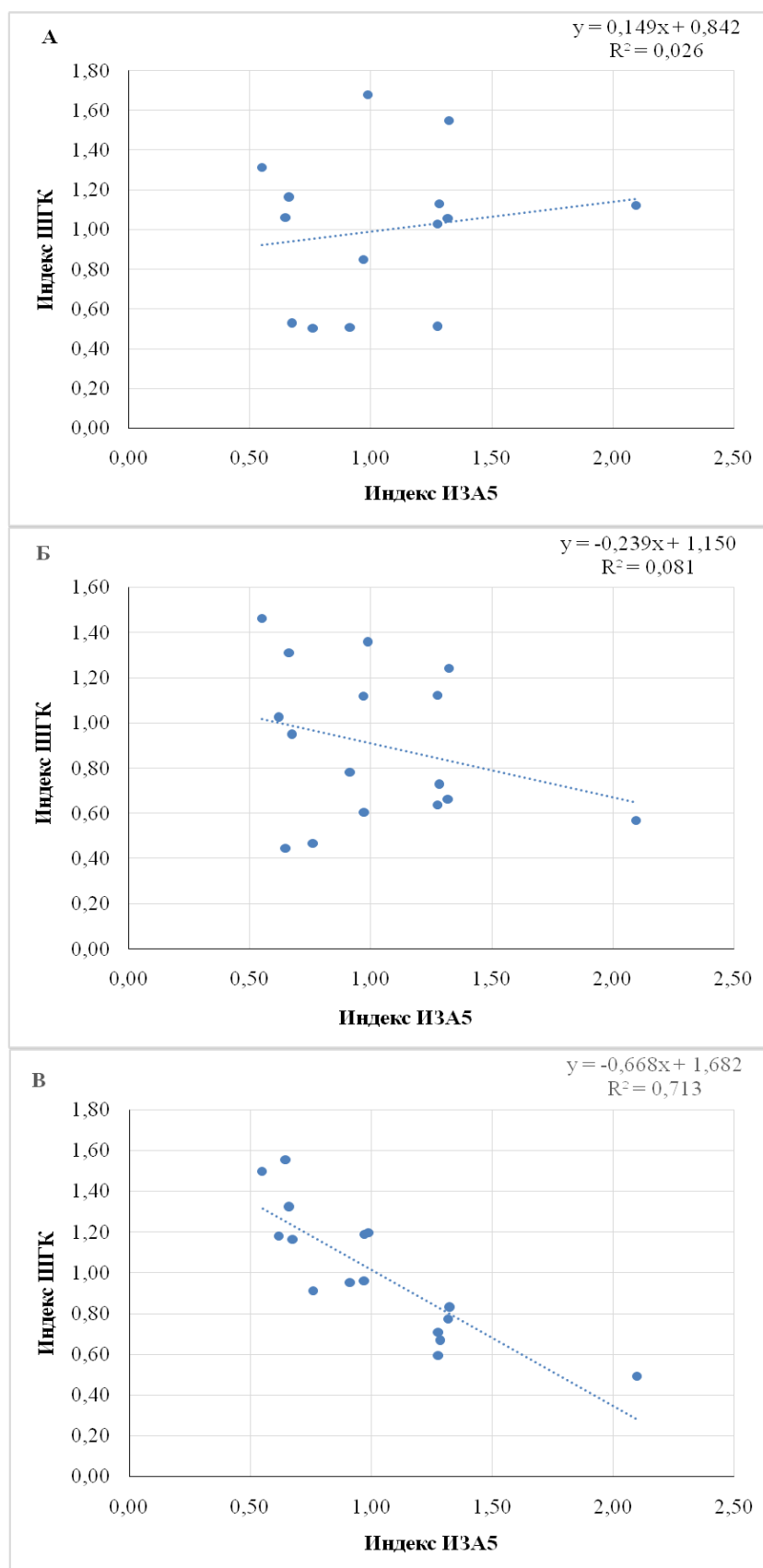


Рисунок 4.14. Значения индексов ШГК сосны обыкновенной на загрязненных ПН в зависимости от соответствующих индексов ИЗА₅. А - ПН «Ул. Е. Стасовой»; Б - ПН «Парк «Гвардейский»»; В - ПН «Ул. 9 Мая».

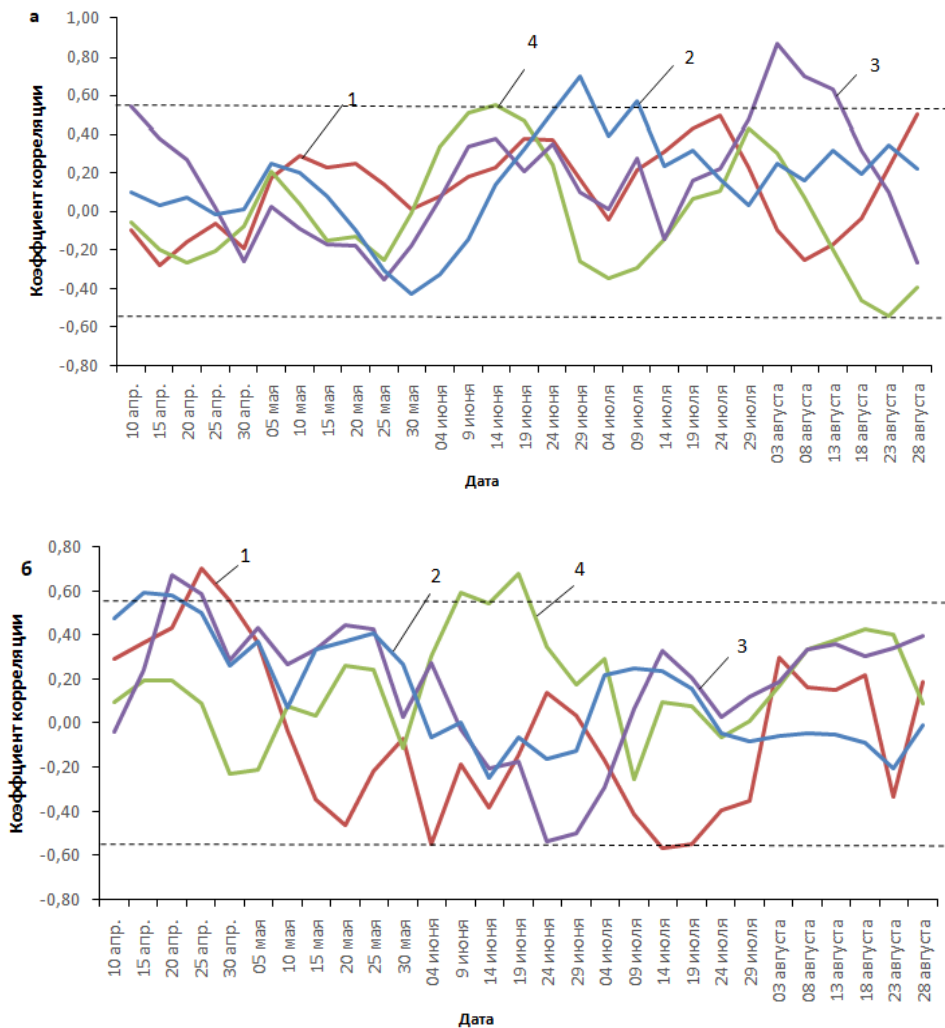


Рисунок 4.15. Скользящие корреляционные 20-дневные функции отклика индексов радиального прироста деревьев сосны обыкновенной на температуру воздуха (а) и количество осадков (б). 1 – ПН «Дендрарий», 2 – ПН «Ул. Е. Стасовой», 3 – «Парк «Гвардейский»»; 4 – ПН «Ул. 9 Мая»). 2004-2019 г.

Скользящие корреляционные функции отклика показали значимую положительную корреляцию радиального прироста сосны обыкновенной с температурой воздуха (рис. 4.15, а); на ПН «Ул. Е. Стасовой» — с конца июня до конца первой декады июля (кривая 2), на ПН «Парк «Гвардейский»» — с конца июля до середины августа (кривая 3), на ПН «Ул. 9 Мая» — в середине июня (кривая 4; корреляция слабая, на пределе значимости).

Положительная корреляция с количеством осадков (рис. 4.15, б) выявлена на ПН «Ул. Е. Стасовой» — в течение второй декады апреля (кривая 2), на ПН

«Парк «Гвардейский» — в течение третьей декады апреля (кривая 3), на ПН «Ул. 9 Мая» — в течение второй декады июня (кривая 4).

В то же время, как следует из рисунка 4.15, на условно-чистом ПН «Дендрарий» (кривая 1) значимой корреляционной связи прироста с температурой не выявлено, положительная корреляция с количеством осадков выявлена в течение третьей декады апреля.

Чтобы установить, модифицируют ли условия произрастания в загрязненных зонах города отклик радиального прироста на климатические факторы, применили тот же подход, что и для других видов. Сравнивали климатический отклик индексов радиального прироста деревьев на загрязненных ПН с таковым на условно-чистом ПН «Дендрарий».

Радиальный прирост сосны на загрязненных ПН «Ул. Е. Стасовой» и «Парк «Гвардейский» более чувствителен к температуре воздуха, чем на условно чистом ПН «Дендрарий» (рис. 4.15 а).

На ПН «Ул. 9 Мая» чувствительность радиального прироста к температуре воздуха выше, а чувствительность к осадкам — ниже в ранневесенний период (конец апреля) и выше в первой-второй декадах июня, чем на условно чистом ПН «Дендрарий».

Таким образом, по результатам, приведенным на рисунке 4.15, можно утверждать, что климатический отклик индексов радиального прироста на всех загрязненных ПН модифицирован относительно условно чистого ПН влиянием соответствующих условий произрастания.

В заключение раздела 4.3, посвященного особенностям радиального роста сосны обыкновенной, отметим следующее.

Тренды на кривых хода радиального роста и кривой изменения атмосферного загрязнения, выраженного в величинах $ИЗА_5$, совпадающие по периодам времени, противоположны: снижение интенсивности радиального роста на загрязненных ПН связано с повышением уровня $ИЗА_5$, что подтверждается достоверными отрицательными значениями корреляции.

Погодичная изменчивость радиального прироста сосны обыкновенной в значительной степени определяется изменчивостью атмосферного загрязнения только на ПН «Ул. 9 Мая», в условиях сильного комплексного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии.

На всех загрязненных ПН климатический отклик радиального прироста сосны обыкновенной модифицирован относительно климатического отклика деревьев, произрастающих на условно чистом ПН (Кладько и др., 2023).

Положительная корреляционная связь индексов прироста с количеством осадков может означать, что растения испытывают повышенную потребность в почвенной влаге в месте произрастания в выделенные по скользящим климатическим функциям отклика периоды сезона роста. Полученную информацию можно использовать в практическом применении – вводить в систему агротехнического ухода за насаждениями дополнительный полив в выявленные периоды сезона роста.

4.6. Обсуждение полученных результатов

Результаты исследования динамики радиального роста восьми древесных видов, произрастающих в зеленых насаждениях г. Красноярска, находятся в согласии с ранее полученными результатами ряда исследований по отдельным видам (Глава 1), и подтверждают основную гипотезу: скорость радиального роста и чувствительность к погодным условиям определяется видовой спецификой и особенностями техногенно загрязненной окружающей среды.

Согласно литературным источникам, исследователи часто наблюдали снижение скорости радиального роста деревьев на техногенно загрязненных участках по сравнению с фоновыми. В Главе 4 нами установлено, что тенденция к снижению скорости радиального роста древесных растений в зоне влияния техногенного загрязнения относительно «чистых» зон выполняется не для всех восьми исследованных в работе видов, а только для березы повислой и тополя бальзамического (независимо от характера загрязнения). Высокой

толерантностью к влиянию техногенно загрязненных условий произрастания характеризуется рост ствола по диаметру у ели колючей на ПН «КрасТЭЦ», рябины обыкновенной и черемухи Маака на ПН «Центр», «КрАЗ» и «КрасТЭЦ» и яблони ягодной на ПН «КрАЗ».

Негативное влияние атмосферного загрязнения, выраженного в величинах ИЗА₅, на радиальный рост сосны обыкновенной четко проявляется только в условиях сильного комплексного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии.

По литературным источникам, деревья, произрастающие вокруг крупных источников техногенного загрязнения, в большинстве случаев демонстрировали большую чувствительность радиального прироста на изменение погодных условий, чем на контроле.

В Главе 4, по результатам детального анализа корреляционной связи радиального прироста с климатическими факторами (температурой воздуха и количеством осадков) получено, что не для всех исследованных древесных видов, произрастающих в условиях техногенного загрязнения различного характера в г. Красноярске, характерна тенденция к повышению чувствительности радиального прироста к погодным условиям сезона роста. Это зависит не только от специфической чувствительности вида к изменению погодных факторов, но и от характера загрязнения. Так, например:

- на ПН «Центр» пониженная (по сравнению с условно чистыми условиями места произрастания) чувствительность радиального прироста к осадкам — у ели колючей, вяза приземистого, рябины обыкновенной, яблони ягодной;

- на ПН «КрАЗ» к обоим климатическим факторам пониженная (по сравнению с фоном) чувствительность радиального прироста — у ели колючей, пониженная к осадкам — у березы повислой, тополя бальзамического, яблони ягодной;

- на ПН «КрасТЭЦ» пониженная (по сравнению условно чистыми условиями места произрастания) чувствительность радиального прироста к

осадкам — у ели колючей, березы повислой, рябины обыкновенной, у яблони ягодной.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые дана характеристика интенсивности хода роста по диаметру восьми древесных видов, произрастающих в зеленых насаждениях г. Красноярска в условиях техногенного загрязнения различного характера: сосны обыкновенной, ели колючей, березы повислой, вяза приземистого, тополя бальзамического, рябины обыкновенной, черемухи Маака и яблони ягодной.

2. Высокой толерантностью характеризуется скорость радиального роста рябины обыкновенной и черемухи Маака независимо от характера загрязнения места произрастания. Радиальный прирост ели колючей толерантен к условиям произрастания в зоне выбросов предприятий теплоэнергетического комплекса и химической промышленности, яблони ягодной - в зоне выбросов предприятий цветной металлургии. Перспективно использовать эти виды для создания зеленых насаждений в условиях указанного характера техногенного загрязнения.

3. Установлено, что у березы повислой и тополя бальзамического скорость роста по диаметру в техногенно загрязненных местах произрастания меньше, чем в условно-чистых, независимо от характера техногенного загрязнения. Рост ели колючей вблизи КрАЗа, вяза приземистого в центре города и вблизи КрасТЭЦ, и яблони ягодной вблизи КрасТЭЦ ингибируется техногенно загрязненными условиями места произрастания (при низкой чувствительности деревьев к климатическим факторам). Негативное влияние атмосферного загрязнения, выраженного в величинах ИЗА₅, на радиальный рост сосны обыкновенной четко проявляется только в условиях сильного комплексного загрязнения от автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии.

4. Периоды в пределах сезона роста с существенным влиянием климатических факторов (температуры воздуха и количества осадков) на радиальный прирост определяются видовой спецификой и характером техногенного загрязнения места произрастания. У видов, произрастающих на одном ПН, так же, как и у вида, произрастающего на разных ПН (в условиях различного техногенного загрязнения), периоды времени в пределах сезона роста

со значимым влиянием на прирост климатических факторов существенно различаются.

5. Произрастание в условиях техногенного загрязнения модифицирует климатический сигнал в древесно-кольцевых хронологиях исследованных видов. Сравнительный анализ климатического сигнала в древесно-кольцевых хронологиях деревьев, произрастающих на загрязненных ПН относительно произрастающих на условно чистых ПН, показал, что его модификация зависит от видовой специфики и техногенно загрязненных условий места произрастания. При этом чувствительность радиального прироста к погодным условиям сезона роста может как понижаться, так и повышаться.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании полученных результатов разработаны предложения по оптимизации сроков агротехнического ухода за насаждениями (полив) в зависимости от их видовой принадлежности и характера техногенного загрязнения места произрастания (табл. П.1):

Таблица П.1. Сроки введения дополнительного полива насаждений

Вид	Сроки введения дополнительного полива				
	ПН «Ветлужанка»	ПН «Академгородок»	ПН «Центр»	ПН «КрАЗ»	ПН «КрасТЭЦ»
Ель колючая	20 мая- 10 июня	20 мая-10 июня	*	-	-
Береза повислая	1-15 мая, 20 августа- 10 сентября	15 мая-10 июня, 20 августа- 10 сентября	10-20 июля	20-31 августа	10-20 июня
Вяз приземистый	1-20 июня	-	-	-	20 мая- 10 июня
Тополь бальзамический	-	20 июля- 10 августа	20-30 июня	-	-
Рябина обыкновенная	20-30 июня	-	-	-	-
Черемуха Маака	-	-	-	-	-
Яблоня ягодная	15-31 мая	20-31 августа	15 июля - 10 августа	20-31 июля	1-10 мая, 10-20 августа
	ПН «Дендрарий»	ПН «Ул. Е. Стасовой»	ПН «Парк «Гвардейский»»	ПН «Ул. 9 Мая»	
Сосна обыкновенная	20-30 апреля	10-20 апреля	20-30 апреля	10-20 июня	

* Примечание: сроки дополнительного полива не выделены

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева, А.В. Влияние городской среды на состояние природных лесов / А.В. Авдеева, В.В. Кузьмичев // Экология. — 1997. — № 4. — С. 248–252.
2. Авдеева, Е.В. Зеленые насаждения в мониторинге окружающей среды крупного промышленного города: на примере г. Красноярска: дис. ... докт. сельхоз. наук: 03.00.16 / Авдеева Елена Владимировна. — Красноярск, 2008. — 390 с.
3. Авдеева, Е.В. Архитектоника лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в урбанизированной среде / Е.В. Авдеева, О.Г. Кривоносенко // Хвойные бореальной зоны. — 2013. — Т. XXXI. — № 3–4. — С. 7–17.
4. Авдеева, Е.В. Экологический мониторинг посадок сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на объектах озеленения города Красноярска / Е.В. Авдеева, А.И. Панов // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2017. — № 49. — С. 52–55.
5. Алексеев, В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев / А.В. Алексеев // Лесоведение. — 1989. — №4. — С. 51–57.
6. Алексеев, В.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / В.А. Алексеев, О.Г. Чертов, С.А. Сергейчик; под ред. В.А. Алексеева. — Ленинград: Наука (Ленинградское отд.), 1990. — 197 с.
7. Андреева, Е.Н. Методы изучения лесных сообществ / Е.Н. Андреева, И.Ю. Баккал, В.В. Горшков. — СПб.: НИИХимии СПб. гос. ун-та, 2002. — 240 с.
8. Антипов, В.Г. Влияние дыма и газов, выбрасываемых промышленными предприятиями на сезонное развитие деревьев и кустарников / В.Г. Антипов // Ботанический журнал СССР. — 1957. — Т. 42. — № 1. — С. 92–95.
9. Антоненко, О.В. Особенности ландшафтов города Красноярска как геолого–геоморфологическая основа для градостроительства / О.В. Антоненко, В.А. Безруких, Е.В. Авдеева, Э.И. Назарова, А.М. Кисленко // Хвойные бореальной зоны. — 2017. — Т. 35. — № 1–2 — С. 15–20.

10. Арсеньева, Т.В. Эколого–анатомические аспекты изменчивости древесины сосновых из промышленных районов Европейского Севера / Т.В. Арсеньева, Е.С. Чавчавадзе. — СПб.: Наука, 2001. — 109 с.
11. Артемьев, О.С. Методы таксации городских насаждений / О.С. Артемьев. — Красноярск: Сиб. гос.технол. ун–т, 2003. — 100 с.
12. Артемьев, О.С. Оценка влияния выбросов автотранспорта на приросты по диаметру стволов тополя бальзамического в городе Красноярске / О.С. Артемьев, А.А. Арсентьева // Вестник КрасГАУ. — 2014. — № 4. — С. 198–202.
13. Артемьев, О.С. Оценка воздействия выбросов автотранспорта на рост лиственницы сибирской в г. Красноярске / О.С. Артемьев, О.В. Терентьева // Аллея науки. — 2018. — Т. 3. — №9 (25). — С. 280-283.
14. Бабич, Н.А. Интродуценты в зеленом строительстве северных городов / Н.А. Бабич, О.С. Залывская, Г.И. Травникова. — Архангельск: Арханг. гос.техн. ун–т, 2008. — 144 с.
15. Балычев, О.В. Применение методов биоиндикации для оценки качества окружающей среды / О.В. Балычев, А.И. Курбанов // Материалы XIII международной научно-практической конференции «Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики». Тольятти, 21–24 апреля 2016 года. — Тольятти: Волжский университет имени В.Н. Татищева, 2016. — С. 250–253.
16. Безруких, В.А. Геолого-геоморфологические и почвенные условия окрестностей г. Красноярска / В.А. Безруких. — Красноярск: Краснояр. гос. пед. ун–т им. В. П. Астафьева. Красноярск, 2015. — 136 с.
17. Беланова, А.П. Состояние древесных растений в разных экологических зонах сибирского города / А.П. Беланова, М.А. Банаев, Л.Н. Томошевич, Л.Н. Чиндяева // Известия Самарского научного центра РАН. — 2016. — Т. 18. — № 2(2). — С. 292–296.
18. Белов, А.А. Динамика радиального прироста сосны обыкновенной в насаждениях Брянской области, загрязненных радионуклидами: автореф.

- дис.... канд. биол. наук: 06.03.02 / Белов Артем Анатольевич. — М., 2017. — 22 с.
19. Бенькова, В.Е. Значение микроэкологических условий для роста листовенницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр / В.Е. Бенькова, А.В. Шашкин, М.М. Наурзбаев, А.С. Прокушкин, В.В. Симанько // Лесоведение. — 2012. — № 4. — С. 73–84.
 20. Братилова, Н.П. Использование сосны кедровой сибирской в озеленении Красноярска / Н.П. Братилова, А. Доржу, Д.А. Коновалова // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства. Сборник статей всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2021. — Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева" (Красноярск), 2021. — С. 127–129.
 21. Бугаков, П.С. Почвы Красноярского края / П.С. Бугаков, С.М. Горбачева, В.В. Чупрова. — Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1981. — 128 с.
 22. Булыгин, Н.Е. Дендрология / Н.Е. Булыгин, В.Т. Ярмишко. — М.: МГУЛ, 2001. — 528 с.
 23. Ваганов, Е.А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов, В.С. Мазепа. — Новосибирск: Наука, 1996. — 246 с.
 24. Вараксин, Г.С. Использование древесных растений-интродуцентов в озеленении города Красноярска / Г.С. Вараксин, Ю.В. Кладько // Проблемы современной дендрологии: материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР П. И. Лапина (30 июня- 2 июля 2009 г.). — Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2009. — С. 429–431.
 25. Вараксин, Г.С. Выбор ассортимента древесных растений для озеленения территорий, прилегающих к городским магистралям (на примере г.

- Красноярска) / Г.С. Варакин, Ю.В. Кладько, А.Б. Романова // Актуальные проблемы современной науки и образования. Биологические науки. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Уфа: РИЦ БашГУ, 2010а. — С. 505–508.
26. Варакин, Г.С. Опыт использования древесных видов на примере г. Красноярска / Г.С. Варакин, Ю.В. Кладько, А.Б. Романова, В.Е. Мулява, В.В. Мулява // Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития. V международная научно-практическая конференция 25-26 марта 2010 г. — Ишим: Ишимский государственный педагогический институт им. П.П. Ершова, 2010б. — С.58–59.
27. Варакин, Г.С. Особенности фенологического развития липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в различных экологических условиях города Красноярска / Г.С. Варакин, Ю.В. Кладько // Вестник КрасГАУ. — 2010. — № 8. — С. 73–77.
28. Васенев, С.Л. Зависимость «качество и уровень жизни – антропогенная нагрузка на социоприродную среду» как индикатор эффективности экономического развития / С.Л. Васенев // Наука и бизнес: проблемы и перспективы развития предпринимательской деятельности: сборник статей Международной научно-практической конференции (25 октября 2016 г., г. Шахты). — Уфа: АЭТЕРНА, 2016. — С. 35–37.
29. Ведерников, К.Е. Особенности морфогенеза годичного прироста древесных растений в условиях городской среды / К.Е. Ведерников, И.Л. Бухарина // Лесоведение. — 2010. — № 6 — С. 33–38.
30. Воронин, В.М. Изучение биоиндикационной способности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) / В.М. Воронин, С.В. Соболева // Строение, свойства и качество древесины – 2018: Материалы VI Международного симпозиума имени Б. Н. Уголева, посвященного 50-летию регионального координационного совета по современным проблемам древесиноведения. Красноярск, 10-16 сентября 2018 г. — Красноярск: Издательство сибирского отделения РАН, 2018. — С. 57–60.

31. Вострикова, Т.Н. Цитогенетические реакции древесных растений в условиях техногенной нагрузки / Т.Н. Вострикова // Лесное хозяйство. — 2010. — №2. — С. 26–28.
32. Встовская, Т.Н. Определитель местных и экзотических древесных растений Сибири / Т.Н. Встовская, И.Ю. Коропачинский. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. — 702 с.
33. Горышина, Т.К. Растения в городе / Т.К. Горышина. — Л.: Издательство Ленинградского университета, 1991. — 152 с.
34. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2019 году». — Красноярск: КГБУ «ЦРМПиООС», 2020. — 314 с.
35. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году». — Красноярск: КГБУ «ЦРМПиООС», 2021. — 327 с.
36. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 году». — Красноярск: КГБУ «ЦРМПиООС», 2022. — 317 с.
37. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2022 году». — Красноярск: КГБУ «ЦРМПиООС», 2023. — 367 с.
38. Грачев, Е.Н. Показатели устойчивости лиственницы (*Larix sibirica*) в условиях техногенного загрязнения Красноярская и его окрестностей / Е.Н.Грачев, И.Н. Третьякова // Гомеостаз лесных экосистем: материалы X международного симпозиума «Концепция гомеостаза: теоретические, экспериментальные и прикладные аспекты». Красноярск, 13-19 декабря, 2000: сборник научных трудов. Краснояр. науч. центр Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. Ин-т леса им. В.Н. Докучаева; Краснояр. гос. аграр. ун-т; отв. ред. В. П. Нефедов; [отв. за вып. Е.В. Инжеваткин]. — Новосибирск: Наука, 2001. — С. 33–35.

39. Дажо, Р. Основы экологии / Р. Дажо. — М.: Изд-во «Прогресс», 1975. — 415 с.
40. Данченко, М.А. Влияние техногенных и климатических факторов на состояние лесонасаждений санитарно-защитной зоны ООО «Томскнефтехим» / М.А. Данченко, Т.В. Кабанова, С.А. Кабанова, Ж.Н. Зенкова // Новые технологии. — 2018. — №3. — С. 187–195.
41. Демьянов, В.А. Влияние промышленного загрязнения на радиальный прирост *Larix Gmelinii* (Pinaceae) / В.А. Демьянов, Л.И. Китсинг, В.Т. Ярмишко // Известия РАН. Серия биологическая. — 1996. — №4. — С. 490–494.
42. Еремченко, О.З. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья: монография/ О.З. Еремченко, И.Е. Шестаков, Н.В. Москвина; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. — Пермь, 2016. — 252 с.
43. Загрязнение воздуха и жизнь растений = Air Pollution and Plant Life : перевод с английского / под ред.: М. Трешоу, Т.В. Замараевой, С.М. Семенова. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. — 535 с.
44. Зайцев, Д.А. Воздействие температуры и осадков на радиальный прирост тополя берлинского и липы мелколистной в Санкт-Петербурге / Д.А. Зайцев, Б.Д. Дык, А.В. Селиховкин // Лесоведение. — 2023. — № 1. — С. 13–21.
45. Земляницкий, Л.Т. Особенности городских почв и грунтов / Л.Т. Земляницкий // Почвоведение. — 1963. — № 5. — С. 75–84.
46. Ильин, В.Б. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области / В.Б. Ильин, А.И. Сысо. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. — 229 с.
47. Информационная справка по выполнению мероприятия «Проведение сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха на основе банков данных источников выбросов загрязняющих веществ г. Красноярска и прилегающих территорий Березовского и Емельяновского районов» (в

- рамках государственного контракта № 59 от 26.06.2018, заключенного министерством экологии и рационального природопользования Красноярского края с АО «НИИ Атмосфера», г. Санкт-Петербург). — СПб.: «НИИ Атмосфера», 2018. — 14 с.
48. Кириллов, М.В. Окрестности Красноярска / М.В. Кириллов. — Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1977. — 91 с.
 49. Кириллюк, Л.И. Тяжелые металлы в растениях природных и урбанизированных ландшафтов / Л.И. Кириллюк, А.А. Буганов, Е.А. Буганов, Е.А. Бахтина // Лесное хозяйство. — 2004. — №6. — С. 19–20.
 50. Кладько, Ю.В. Использование редких видов интродуцентов в Центральном районе г. Красноярска / Ю.В. Кладько, А.Б. Романова // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сборник статей студентов и молодых ученых. Том 1. — Красноярск: СибГТУ, 2007. — С. 69–71.
 51. Кладько, Ю. В. Роль живых изгородей в формировании комфортного пространства в условиях города Красноярска [Электронный ресурс] / Ю.В. Кладько // Молодёжь и наука: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. — Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section02.html>.
 52. Кладько, Ю.В., Силкин, П.П. Дендрэкологический анализ формирования вторичной ксилемы яблони ягодной (*Malus baccata* (L) Borkh.) в условиях города Красноярска / Ю.В. Кладько, П.П. Силкин // Материалы VII Молодежной школы-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН «Наука, промышленность, экология», 24 июля–7 августа 2017г. – Красноярск: ФИЦ КНЦ СО РАН, 2017. – С. 19.
 53. Кладько, Ю.В. Особенности роста по диаметру стволов древесных растений в условиях Красноярска / Ю.В. Кладько, В.Е. Бенькова, Л.Н. Скрипальщикова // Строение, свойства и качество древесины — 2018: Материалы VI Международного симпозиума имени Б. Н. Уголева,

- посвященного 50-летию Регионального координационного совета по современным проблемам древесиноведения (Красноярск, 10-16 сентября 2018 г.). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. — С. 93–96.
54. Кладько, Ю.В. Особенности роста по диаметру стволов древесных растений семейства *Rosacea* в условиях города Красноярска / Ю.В. Кладько // Исследование компонентов лесных экосистем Сибири: Выпуск 15: материалы конкурса-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН молодых ученых, аспирантов и студентов (4 апреля 2018 г., г. Красноярск). – Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, 2018. – С. 12-13.
55. Кладько, Ю.В. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки г. Красноярска / Ю.В. Кладько, В.Е. Бенькова // Сибирский лесной журнал. — 2018. — № 4. — С. 49–57.
56. Кладько, Ю.В. Скорость роста по диаметру стволов древесных растений в зеленых насаждениях г. Красноярска / Ю.В. Кладько, В.Е. Бенькова, Л.Н. Скрипальщикова, А.Н. Ташев // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Красноярск, 26-31 августа 2019 г., Красноярск, 2019. — С. 171–174.
57. Кладько, Ю.В. Радиальный рост сосны обыкновенной в зеленых насаждениях г. Красноярска / Ю.В. Кладько, Л.Н. Скрипальщикова // Сибирский лесной журнал. — 2021. — № 3. — С. 38–43.
58. Кладько, Ю.В. Влияние климатических факторов на радиальный рост сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения г. Красноярска / Ю.В. Кладько, А.В. Бенькова, Л.Н. Скрипальщикова // Сибирский лесной журнал. — 2023. — № 5. — С. 91–99.
59. Кладько, Ю.В. Модификация климатического отклика древесных растений под влиянием аэротехногенного загрязнения / Ю.В. Кладько // Междисциплинарная конференция молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVI): тезисы докладов (Красноярск, 16 мая 2023 г.) – Красноярск: ИФ СО РАН, 2023. – С. 68.

60. Климат Красноярска / Под ред. Ц.А. Швер, А.С. Герасимова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 231 с.
61. Ковалева, Г.В. Почвы и техногенные поверхностные образования в городских ландшафтах: монография / Г.В. Ковалева, В.Т. Старожилов, А.М. Дербенцева, А.В. Назаркина и др. — Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2012. — 159 с.
62. Коропачинский, И.Ю. Древесные растения для озеленения Красноярска / И.Ю. Коропачинский, Р.И. Лоскутов; под ред. И.Ю. Коропачинского. — Новосибирск : Гео, 2014. — 320 с.
63. Корректировка сводного тома предельно допустимых выбросов для г. Красноярска (Том ПДВ). Том I. Книга 1. Пояснительная записка [Электронный ресурс]. — Красноярск. 2012. — 630 с. — Режим доступа: <http://www.krasecology.ru/About/PDV>.
64. Красинский, Н.Н. Газоустойчивость растений в связи с их систематическим положением и морфо-анатомическими и биологическими особенностями / Н.Н. Красинский // Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые ассортименты. Сборник работ. Горьк. гос. ун-т и Акад. коммун. хозяйства им. К. Д. Памфилова. — Горький; Москва : [б. и.], 1950. — С. 43.
65. Крашенинникова, С.В. Влияние урбанизированных территорий на формирование поверхностного стока / С.В. Крашенинникова // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. — 2008. — №10 (14). — С. 119–121.
66. Кузьмичев, В.В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели / В.В. Кузьмичев. — Новосибирск: Наука, 2013. — 207 с.
67. Кулагин, Ю.З. Влияние магнезитовой пыли на древесные растения / Ю.З. Кулагин // Записки Свердловского отделения Всесоюзного бот. общества. — 1964. — №3. — С. 155.
68. Кулагин, Ю.З. Древесные растения и промышленная среда / Ю.З.Кулагин. — М.: Наука, 1974. — 125 с.

69. Кусова, Н.Х. Зеленые насаждения - основной компонент экологической системы Владикавказа / Н.Х. Кусова // Известия Чеченского государственного педагогического университета. Серия 2. Естественные и технические науки. — 2016. — Т.10. — №2(14). — С. 22–27.
70. Кучеров, С.Е. Радиальный прирост сосны обыкновенной в районе Карабашского медеплавильного комбината / С.Е. Кучеров, А.А. Мулдашев // Лесоведение. — 2003. — №2. — С. 43–49.
71. Лапин, П.И. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений / П.И. Лапин, С.В. Сиднева // Опыт интродукции древесных растений. — М.: Наука, 1973. — С. 7–67.
72. Лебедева, М.Ю. Почвы как компонент среды урбанизированных территорий / М.Ю. Лебедева // XXI Царскосельские чтения. Материалы международной научной конференции. — 2017. — Том III. — С. 316–320.
73. Лесные растительные ресурсы Средней Сибири / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева; Отв. ред. Л. К. Поздняков. — Красноярск: ИЛИД, 1986. — 105 с.
74. Лисотова, Е.В. Оценка жизненного состояния хвойных и лиственных древесных растений в урбанизированной среде города Красноярска / Е.В. Лисотова, Л.Н. Сунцова, Е.М. Иншаков // Хвойные бореальной зоны. — 2018. — Т. 36. — № 6. — С. 498–501.
75. Лобжанидзе, Э.О. Камбий и формирование годичных колец древесины / Э.О. Лобжанидзе. — Тбилиси: Изд-во АН СССР, 1961. — 159 с.
76. Лоскутов, Р.И. Интродукция декоративных древесных растений в южной части Средней Сибири / Р.И. Лоскутов. — Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1991. — 189 с.
77. Лоскутов, Р.И. Декоративные древесные растения для озеленения городов и поселков / Р.И. Лоскутов. — Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1993. — 184 с.
78. Лунц, Л.Б. Городское зеленое строительство / Л.Б. Лунц. — М.: Стройиздат, 1971. — 280 с.

79. Мазепа, В.С. Метод расчета индексов годичного прироста обобщенного дендроклиматического ряда / В.С. Мазепа // Экология. — 1982. — №3. — С. 21–28.
80. Мальков, Ю.Г. Санитарно-гигиеническая роль городских зеленых насаждений (на примере г. Красноярска): автореф. дис. ... канд. биол. наук :03.00.16 / Юрий Гаврилович Мальков. — Красноярск, 1985. — 21 с.
81. Мамаев, С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере сем. *Pinaceae* на Урале) / С.А. Мамаев. — Москва: Наука, 1972. — 284 с.
82. Маракаев, О.А. Техногенный стресс и его влияние на лиственные древесные растения / О.А. Маракаев, Н.С. Смирнова, Н.В. Загоскина // Экология. — 2006. — № 6. — С. 410–415.
83. Мартыненко, В.Б. Лесные экосистемы и урбанизация / В.Б. Мартыненко, Б.М. Миркин, П.С. Широких // Лесоведение. — 2009. — №3. — С. 77–78.
84. Матвеев, С.М. Динамика состояния сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) вдоль пригородных автотрасс г. Воронежа 1991-2007 гг. / С.М. Матвеев, В.В. Акулов // Вестник Томского государственного университета. — 2012. — №364. — С. 212–218.
85. Машинский, Л.О. Город и природа / Л.О. Машинский. — М.: Стройиздат, 1973. — 228 с.
86. Машуков, Д.А. Различия в динамике роста лиственницы Гмелина на склонах северной и южной экспозиции северной тайги Центральной Эвенкии / Д.А. Машуков, А.В. Бенькова // Вестник КрасГАУ. — 2014. — Вып. 3. — С. 127–133.
87. Михайлова, Т.А. Накопление серы в ассимиляционных органах древесных растений и почве города Иркутска / Т.А. Михайлова, О.В. Шергина, Н.С. Бережная // Растительные ресурсы. — 2007. — Т. 43. — Вып. 3. — С. 65–76.
88. Михайлова, Т.А. Мониторинг техногенного загрязнения и состояния сосновых лесов на примере Иркутской области / Т.А. Михайлова, О.В. Калугина, О.В. Шергина // Лесоведение. — 2020. — № 3. — С. 265–273.

89. Монтиле, А.И. Влияние краевого эффекта на взаимосвязи отдельных морфологических признаков сосны обыкновенной в естественных насаждениях и лесопарке / А.И. Монтиле, А.А. Шавнин, А.А. Монтиле, Д.Ю. Голиков // Сибирский лесной журнал. — 2024. — № 1. — С. 67–77.
90. Мусаев, Е.К. Сезонный рост и строение годичных колец сосны обыкновенной в зоне Чернобыльской катастрофы / Е.К. Мусаев // Лесоведение. — 1996. — № 1. — С. 16–28.
91. Мюльгаузен, Д.С. Влияние аэротехногенного загрязнения на радиальный прирост сосны обыкновенной на Кольском севере / Д.С. Мюльгаузен, Л.А. Панкратова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле. — 2016. — № 4. — С. 124–133.
92. Надеин, А.Ф. Сравнительная оценка накопления биофильных элементов и экотоксикантов лесными растениями вблизи Архангельска / А.Ф. Надеин, С.Н. Тарханов, О.А. Лобанова // Лесное хозяйство. — 2005. — № 1. — С. 32–33.
93. Наурзбаев, М.М. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий / М.М. Наурзбаев, Е.А. Ваганов, О.В. Сидорова // Криосфера Земли. — 2003. — Т. VII. — № 2. — С. 84–91.
94. Неверова, О.А. Морфометрическая и дендрохронологическая диагностика состояния древесных насаждений как способ индикации загрязнения урбанизированной среды / О.А. Неверова // Успехи современного естествознания. Биологические науки. — 2002. — № 1. — С. 57–64.
95. Неверова, О.А. Оценка устойчивости древесных насаждений по степени нарушения ассимиляционного аппарата и крон деревьев / О.А. Неверова, В.С. Николаевский // Лесное хозяйство. — 2003. — № 6. — С. 31–32.
96. Неверова, О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды / О.А. Неверова // Биосфера. — 2009. — Т. 1. — №1. — С. 82–92.

97. Николаевский, В.С. Анатомо-морфологическое строение листьев древесных растений в связи с их газоустойчивостью / В.С. Николаевский // Вопросы физиологии и геоботаники. — 1966. — Вып. 4. — С. 115.
98. Николаевский, В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. / В.С. Николаевский. — Новосибирск: Наука, 1979. — 280 с.
99. Николаевский, В.С. Методы оценки состояния древесных растений и степени влияния на них неблагоприятных факторов / В.С. Николаевский, В.Г. Николаевская, Е.А. Козлова // Лесной вестник. — 1999. — № 2. — С. 76–79.
100. Николаевский, В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации / В.С. Николаевский. — Пушкино: ВНИИЛМ, 2002. — 220 с.
101. Оскорбина, М.В. Влияние выбросов алюминиевого производства на фотосинтетический аппарат лиственницы сибирской / М.В. Оскорбина, О.В. Калугина, Л.В. Афанасьева // Сибирский лесной журнал. — 2024. — № 1. — С. 31–39.
102. Официальный сайт ВНИИГМИ–МЦД [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://meteo.ru>.
103. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: техническое резюме / [О. А. Анисимов и др.]; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). — М.: Росгидромет, 2008. — 29 с.
104. Павлов, И.Н. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения / И.Н. Павлов. — Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2006. — 370 с.
105. Пирогова, К.И. К вопросу оценки декоративности древесно-кустарниковых растений / К.И. Пирогова // Вестник ландшафтной архитектуры — 2017. — № 12. — С. 37–40.
106. Попова, Э.П. Почвенный покров парков г. Красноярска и обеспеченность элементами минерального питания древесных растений / Э.П. Попова, О.Н.

- Зубарева, В.Н. Перевозникова // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. — 2007. — № 1. — С. 32–38.
107. Природные условия Красноярского края / Акад. наук СССР, Совет по изучению производит. сил. Красноярского комплексная экспедиция; [ред. коллегия: ... канд. геол.-минералогич. наук Л. В. Громов (отв. ред.)]. — М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. — 250 с.
108. Протопопова, Е.Н. Рекомендации по озеленению городов и рабочих поселков Средней Сибири / Е.Н. Протопопова. — Красноярск: Изд-во Красноярский рабочий, 1972. — 148 с.
109. Рахимбаев, И. Р. Фенологическая и структурная адаптация растений к загрязнению атмосферы промышленными газами / И.Р. Рахимбаев, А.П. Дашкевич // Роль растений в оздоровлении воздушного бассейна городов Казахстана. — Алма-Ата: Наука, 1982. — С. 5–19.
110. Россинина, А.А. Динамика радиального прироста тополя бальзамического в урбанизированной среде / А.А. Россинина, О.С. Артемьев, С.Л. Шевелев // Вестник КрасГАУ. — 2008. — № 3. — С. 174–177.
111. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89 (утв. Госкомгидрометом СССР 01.06.1989, Гл. гос. санитарным врачом СССР 16.05.1989). — М.: Финансы и статистика, 1991. — 615 с.
112. Рунова, Е.М. Комплексная оценка состояния загрязнения атмосферы по результатам биоиндикации сосны обыкновенной / Е.М. Рунова, Ф.Н. Шиверских // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2018. — № 51. — С. 155–157.
113. Рыбаков, Д.С. Биогеохимическая оценка экологического риска на примере *Pinus sylvestris* L. // Принципы экологии. — 2016. — № 2. — С. 70–83.
114. Рыбакова, Н.А. Динамика радиальных приростов лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) В условиях антропогенной нагрузки / Н.А. Рыбакова, Ю.Б. Глазунов // Лесной вестник. — 2023. — Т. 27.— № 4. — С. 5–13.
115. Рысин, А.П. Урболесоведение / А.П. Рысин, С.Л. Рысин. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. — 240 с.

116. Рябовол, С.В. Поясно-зональные элементы урбанофлоры г. Красноярска (Средняя Сибирь, Красноярская лесостепь) / С.В. Рябовол, Е.М. Антипова // Вестник КрасГАУ. — 2012.— №3. — С. 75–77.
117. Рязанов, В.А. Атмосфера наших городов / В.А. Рязанов. — Москва: Знание, 1965. — 32 с.
118. Серебрякова, Л.К. Допустимые концентрации токсических веществ в атмосферном воздухе для древесной растительности / Л.К. Серебрякова // Газоустойчивость растений: Сборник статей / Под ред. В.С.Николаевского. — Новосибирск: Наука, 1980. — С. 184–185.
119. Ситникова, А.С. Влияние промышленных загрязнений на устойчивость растений / А.С. Ситникова. — Алма-Ата: Наука. — 1990. — 86 с.
120. Скрипальщикова, Л.Н. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска / Л.Н. Скрипальщикова, А.И. Татаринцев, О.Н. Зубарева, В.Д. Перевозникова, В.В. Стасова, Н.В. Грешилова. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. — 179 с.
121. Смирнов, В.В. Сезонный рост главных древесных пород / В.В. Смирнов. — М.: Наука, 1964. — 165 с.
122. Стасова, В.В. Строение и развитие тканей ствола *Betula pendula* (*Betulaceae*) в условиях антропогенного загрязнения / В.В. Стасова, Л.Н. Скрипальщикова, О.Н. Зубарева, А.Н. Татаринцев // Растительные ресурсы. — 2011. — Том 47. — № 2. — С.66–75.
123. Степанов, Н.В. Сосудистые растения Приенисейских Саян / Н.В. Степанов. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. — 252 с.
124. Стравинскене, В.П. Изменение радиального прироста деревьев в зоне действия промышленного загрязнения / В.П. Стравинскене // Лесное хозяйство. —1987. — № 5. — С. 34–36.
125. Тарабрин, В.П. Водный режим и устойчивость древесных растений к промышленным газам / В.П. Тарабрин // Газоустойчивость растений: сб. статей; отв. ред. В. С. Николаевский. — Новосибирск. — 1980. — С. 18–29.

126. Таранков, В.И. Радиальный прирост древостоев сосны обыкновенной в зоне действия промышленного загрязнения / В.И. Таранков, С.М. Матвеев // Лесной журнал. — 1994. — № 4. — С. 48–51.
127. Томас, М.Д. Влияние загрязнения атмосферного воздуха на растения/ М.Д. Томас // В кн.: Загрязнение атмосферного воздуха. — М.: Наука, 1962. — С. 326–348.
128. Тулюш, Т.С. Экологическое состояние почв различных районов г. Красноярска / Т.С. Тулюш, И.С. Коротченко // Вестник КрасГАУ. — 2018. — № 6 (141). — С. 283-288.
129. Тутыгин, Г.С. Воздействие автотранспортного загрязнения на придорожные сосновые насаждения / Г.С. Тутыгин, В.В. Петрик, Ю.И. Поташева. — Архангельск: Арханг. гос.техн. ун-т, 2009. — 172 с.
130. Уразгильдин, Р.В. Прирост стволовой древесины сосны обыкновенной, ели сибирской и лиственницы Сукачева в условиях промышленного загрязнения / Р.В. Уразгильдин, Г.Р. Полякова, К.З. Амнева, Р.Д. Галиахметов, А.Ю. Кулагин // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отделение Биологическое. — 2018. — №123 (2). — С. 45–61.
131. Уразгильдин, Р.В. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 3. Влияние на радиальный прирост и корневые системы / Р.В. Уразгильдин, А.Ю. Кулагин // Биосфера. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С.101–119.
132. Федорков, А.Л. Радиальный прирост сосны в опыте по искусственному загрязнению почв тяжелыми металлами / А.Л. Федорков // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. — 2006. — № 6 (104). — С. 17–19.
133. Хлебопрос, Р.Г. Красноярск. Экологические очерки / Р.Г. Хлебопрос, О.В. Тасейко, Ю.Д. Иванова, С.В. Михайлюта. — Красноярск: Сиб. фед. ун-т. 2012. — 130 с.
134. Ходжаева, Г.К. Агроклиматические условия развития древесных растений на территории города Нижневартовска / Г.К. Ходжаева // Известия

- Самарского научного центра Российской академии наук. — 2017. — Т. 19. — № 2 (3). — С.578–581.
135. Чавчавадзе, Е.С. Атлас древесины и волокон для бумаги / Е.С. Чавчавадзе, З.Е. Брянцева, Е.В. Гончарова и др. — М.: Ключ, 1992. — 329 с.
136. Черенькова, Т.В. Динамика еловых насаждений Кольского севера в условиях воздействия природно-антропогенных факторов среды / Т.В. Черенькова, Ю.Н. Бочкарев // Журнал общей биологии. — 2013. — Т. 74. — №4. — С. 283–303.
137. Чжан, С.А. Изменение радиального прироста сосны обыкновенной в зоне длительного воздействия промышленного загрязнения / С.А Чжан, Е.М. Рунова, О.А. Пузанова, Л.А. Чжан // Хвойные бореальной зоны. — 2011. — № 29 (3-4). — С. 304–308.
138. Шабалина, О.М. Влияние загрязнения атмосферы на параметры ассимиляционного аппарата лиственницы сибирской и ее зараженность лиственничной почковой галлицей в условиях г. Красноярска / О.М. Шабалина // Проблемы современной дендрологии. Материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР П. И. Лапина (30 июня-2 июля 2009 г. Москва). — М.: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, 2009. — С. 532–535.
139. Шевелина, И.В. Динамика лесоводственно-таксационных показателей насаждений лесопарков города Екатеринбурга / И.В. Шевелина, Д.В. Метелев, З.Я. Нагимов // Успехи современного естествознания. — 2016. — № 6. — С. 125–131.
140. Шергина, О.В. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска / О.В. Шергина, Т.А. Михайлова. — Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2007. — 200 с.
141. Шихова, И.С. Некоторые закономерности в накоплении свинца растениями в условиях урбанизации (на примере г. Владивостока) / И.С. Шихова // Сибирский экологический журнал. — 2012. — № 2 — С. 285–294.

142. Шишов, Л.Л. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов и др.— Смоленск: Ойкумена, 2004. — 342 с.
143. Шиятов, С.Г. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров. — Красноярск: КрасГУ, 2000. — 80 с.
144. Шобанова, И.А. Влияние городской среды на морфометрические параметры ассимиляционного аппарата пихты одноцветной (*Abies concolor* Lindl. et Gord.) / И.А. Шобанова, С.В. Судейная // Проблемы современной дендрологии. Материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР П. И. Лапина (30 июня-2 июля 2009 г., Москва). — М.: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, 2009. — С.536–538.
145. Щетинкин, С.В. Особенности динамики радиального прироста дуба черешчатого в условиях радиоактивного загрязнения лесов центральной лесостепи / С.В. Щетинкин, Н.А. Щетинкина // Лесотехнический журнал. — 2014. — №3. — С. 130–139.
146. Ярмишко, В.Т. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние корней *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в Ленинградской области и юго-восточной Финляндии / В.Т. Ярмишко, И. Лумме, М.А. Ярмишко // Растительные ресурсы. — 2007. — Т. 43. — № 4. — С. 42–55.
147. Яценко-Хмелевский, А.А. Основы и методы анатомического исследования древесины / А.А. Яценко-Хмелевский. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. — 338 с
148. Ai, Z.T. From street canyon microclimate to indoor environmental quality in naturally ventilated urban buildings: issues and possibilities for improvement / Z.T. Ai, C.M. Mak // Building and Environment. — 2015. — Vol. 94. — Pp. 489–503.

149. Alekseeva, I.S. Greening as an element of sustainable urban development: valuation of economic feasibility, policy assessment and practical examples / I.S. Alekseeva, D.A. Menshikh, O.V. Kudryavtseva // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 51–62.
150. Antonova, A.A. Seasonal Distribution of Processes Responsible for Radial Diameter and Wall Thickness of Scots Pine Tracheids / A.A. Antonova, V.V. Stasova // Siberian Journal of Forest Science. — 2015. — Vol. 2. — Pp. 33–40.
151. Ayala-Azcárraga, C. Characteristics of urban parks and their relation to user well-being / C. Ayala-Azcárraga, D. Diaz, L. Zambrano // Landscape Urban Plann. — 2019. — Vol. 189. — Pp. 27- 35.
152. Baas, P. Ecological patterns in xylem anatomy. On the economy of plant form and function / P. Baas // New York: Cambridge University Press. — 1986. — P. 327–352.
153. Barniak, J. The tree-ring method of estimation of the effect of industrial pollution on pine (*Pinus sylvestris* L.) tree stands in the northern part of the Sandomierz Basin (SE Poland) / J. Barniak, M. Krąpiec // Water Air Soil Pollut. — 2016. — Vol. 227(5). — №166.
154. Benkova, V.E. Anatomy of Russian Woods. An atlas for the identification of trees, shrubs, dwarf shrubs and woody lianas from Russia / V.E. Benkova, F.H. Schweingruber. — Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag, 2004. — 456 p.
155. Chandorkar, K.R. Effect of low level continuous gamma irradiation on vascular cambium activity in scotch pine *Pinus sylvestris* L. / K.R. Chandorkar, N.G. Demgler // Environm. Experiment. Botany. — 1987. — Vol. 27. — № 2. — Pp. 165–175.
156. Chaudhuri, S. Urban greenery for air pollution control: a meta-analysis of current practice, progress, and challenges / S. Chaudhuri, A. Kumar // Environmental monitoring and assessment. — 2022. — Vol. 194. — Iss. 3. — № 235.
157. Cook, E.R. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences / Eds. E.R. Cook, L.A. Kairiuktis. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. — 394 p.

158. Danielson, S.C. Stress-Resistant Trees are More Common in Urban than Rural Forests: A Case Study of Cleveland, Ohio's Natural Parks / S.C. Danielson, R. Mascia, M. Metzger, K.L. Stuble, J.S. Medeiros // Urban forestry & Urban greening. — 2023. — Vol. 42. — №127864.
159. Du, H. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data / H. Du, W. Cai, Y. Xu, Z. Wang, Y. Wang, Y. Cai // Urban Forestry & Urban Greening. — 2017. — Vol. 27. — Pp. 24–31.
160. Duszyński, F. The record of air pollution in tree rings / F. Duszyński // Przegląd Geograficzny. — 2014. — №86 (3). — Pp. 317–338.
161. Elling, W. Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany / W. Elling, C. Dittmar, K. Pfaffmoser, T. Rötzer // Forest EcolManag. — 2009 — Vol. 257. — Pp. 1175–1187.
162. Fritts, H.C. Tree Rings and Climate / H.C. Fritts. — London: Academic Press, 1976. — 567 p.
163. Gao, H. Modeling variation in crown profile with tree status and cardinal directions for planted *Larix olgensis* Henry trees in Northeast China / H. Gao, L. Dong, F. Li // Forests. — 2017. — № 8 (5). — Pp. 139–144.
164. Garcia-Sanchez, I.E. Effect of heavy metals and environmental variables on the assimilation of CO₂ and stomatal conductance of *Ligustrum lucidum*, an urban tree from Mexico City / I.E. Garcia-Sanchez, V.L. Barradas, C.A. Ponce de Leyn Hill, M. Esperon-Rodriguez, I.R. Perez, M. Ballinas// Urban Forestry & Urban Greening. — 2019. — Vol. 42. — P. 72–81.
165. Gillner, S. Climatic response and impacts of drought on Oaks at urban and forest sites / S. Gillner, A. Roloff, J. Vogt // Urban forestry & Urban greening. — 2013. — Vol. 4. — Pp. 597–605.
166. Godek, M. Tree rings as an indicator of atmospheric pollutant deposition to subalpine spruce forests in the Sudetes (Southern Poland) / M. Godek, M. Sobik, M. Blas, Z. Polkowska, P. Owczarek, A. Bokwa // Atmospheric Research. — 2015. — Vol. 151. — Pp. 259–268.

167. Holmes, R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement / R.L. Holmes // *Tree-Ring Bulletin*. — 1983. — Vol. 44. — Pp. 69–75.
168. Holt, J.R. Using Zillow data to value green space amenities at the neighborhood scale / J.R. Holt, M.E. Borsuk // *Urban Forestry & Urban Greening*. — 2020. — Vol. 56. — №126794.
169. Huang, Y. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons / Y. Huang, C.Lei, C.-H. Liu, P. Perez, H. Forehead, S. Kong, J.L. Zhou // *Environmental Pollution*. — 2021. — № 280:116971.
170. Innes, J.L. Tree-ring analysis as an aid to evaluating the effects of pollution on tree growth / J.L. Innes, E.R. Cook // *Canadian Journal of Forest Research*. — 1989. — Vol. 19 (9). — Pp. 1174–1189.
171. Kaennel, M., Schweingruber, F.H. *Multilingual Glossary of Dendrochronology* / M. Kaennel, F.H. Schweingruber. — Berne, Switzerland: Paul Haupt — 467 p.
172. Kalugina, O.V. *Pinus sylvestris* as a bio-indicator of territory pollution from aluminum smelter emissions / O.V. Kalugina, T.A. Mikhailova, O.V. Shergina // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2017. — Vol. 24. — №11. — Pp. 10279–10291.
173. Kharuk, V.I. Subarctic vegetation under the Mixed Warming and Air Pollution Influence / V.I. Kharuk, I.A. Petrov, S.T. Im, A.S. Golyukov, M.L. Dvinskaya, A.S. Shushpanov, A.P. Savchenko, V.L. Temerova // *Forests*. — 2023 — Vol. 14. — № 3. — P. 615.
174. Kirdyanov, A.V. Die-off dynamics of Siberian larch under the impact of pollutants emitted by Norilsk enterprises / A.V. Kirdyanov, V.S. Myglan, A.V. Pimenov, A.A. Knorre, A.K. Ekart, E.A. Vaganov // *Contemp. Probl. Ecol.* — 2014. — Vol. 7. — Iss. 6. — Pp. 679–684.
175. Kirdyanov, A.V. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution / A.V. Kirdyanov, P.J. Krusic, V.V. Shishov, E.A. Vaganov, A.I. Fertikov, V.S. Myglan, V.V. Barinov, J. Browse, J. Esper, V.A. Ilyin, A.A. Knorre, M.A. Korets, V.V. Kukarskikh, D.A. Mashukov, A.A. Onuchin, A. Piermattei, A.V.

- Pimenov, A.S. Prokushkin, V.A. Ryzhkova, A.S. Shishikin, K.T. Smith, A.V. Taynik, M. Wild, E. Zorita, U. Büntgen // . Ecol. Lett. — 2020. — Vol. 23(12). — Pp. 1827–1837.
176. Kladko, Y.V. Trunk diameter growth dynamics of woody plants in Siberian industrial city greening / Y.V. Kladko, V.E. Benkova, L.N. Skripal'shchikova, A.N. Tashev // Forestry Ideas. — 2020. — Vol. 26. — №1(59). — Pp. 97–108.
177. Larson, P.R. The vascular cambium: development and structure / P.R. Larson. — Berlin: Springer Verlag, 1994. — 725 p.
178. Luszczynska, K. Reductions in tree-ring widths of silver fir (*Abies alba* Mill.) as an indicator of air pollution in southern Poland / K. Luszczynska, M. Wistuba, I. Malik // Environmental & Socioeconomic Studies. — 2018. — Vol. 6(3). — Pp. 44–51.
179. McGovern, M., Pasher, J. Canadian urban tree canopy cover and carbon sequestration status and change 1990-2012 / M. McGovern, J. Pasher // Urban forestry and Urban greening. — 2016. — Vol. 20. — Pp. 227–232.
180. Novakova, T. Contrasting tree ring Hg records in two conifer species: Multi-site evidence of species-specific radial translocation effects in Scots pine versus European larch / T. Novakova, T. Navratil, J.D. Demers, M. Roll, J. Rohovec // Science of The Total Environment. — 2021. — Vol. 762. — №144022.
181. Onuchin, A. Using an Urban Snow Cover Composition-Based Cluster Analysis to Zone Krasnoyarsk Town (Russia) by Pollution Level / A. Onuchin, G. Kofman, O. Zubareva, I. Danilova // Polish journal of environmental studies. — 2020. — Vol. 29. — Iss. 6. — Pp. 4257–4267.
182. Parn, H. Dendrochronological analysis of the growth and growth–climate relationships of conifers in the region of alkaline dust deposition / H. Parn, M. Mandre // Forest Ecol. Manag. — 2011. — Vol. 262. — Iss. 2. — Pp. 88–94.
183. Schekalev, R.V. Variability properties of *Pinus sylvestris* L. wood in growing stock under technogenic impact / R.V. Schekalev, A.A. Martynyuk, V.I. Melekhov // Russian Forestry Journal. — 2020. — Vol. 4(376). — Pp. 113–122.

184. Schweingruber, F.N. Tree Rings and Environment. Dendroecology / F.N. Schweingruber. — Brimensdorf; WSL/FNP: Bern, Stuttgart: Viena Haupt Publ., 1996. — 609 p.
185. Sensula, B. Long- and short-term incremental response of *Pinus sylvestris* L. from industrial area nearby steelworks in Silesian Upland, Poland / B. Sensula, M. Opala, S. Wilczynski, S. Pawelczyk // Dendrochronologia. — 2015. — Vol. 36. — Pp.1–12.
186. Sensula, B. Variations of tree ring width and chemical composition of wood of pine growing in the area nearby chemical factories / B. Sensula, S. Wilczynski, L. Monin, M. Allan, A. Pazdu, N. Fagel // Geochronometria. — 2017. — Vol. 44. — Pp. 226–239.
187. Sellier, D. Radial growth anisotropy and temporality in fast-growing temperate conifers / D. Sellier, R. Segura // Annals of Forest Science — 2020. — Vol. 77. — Pp. 1–12.
188. Shashkin, A. The peculiarities of Larch growth at the northern timberline / A. Shashkin, V. Benkova, V. Simanko; K. Mielikanen, H. Makinen, M. Timonen (eds.) // WordDendro 2010. Abstracts of The 8-th Intern. Conf. on Dendrochronol., June 13-18.2010. — Rovaniemi. Finland. 2010. — P. 149.
189. Shoda, T. Growth characteristics and growth equations of the diameter at breast height using tree ring measurements of street trees in Kyoto City, Japan / T. Shoda, J. Imanishi, S. Shibata // Urban Forestry & Urban Greening. — 2020. — Vol. 49. — 126627.
190. Stravinskiene, V. Dendrochronological research of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth in vicinity of industrial pollution / V. Stravinskiene, E. Bartkevicius, E. Plausinyte // Dendrochronologia. — 2013. — Vol. 31. — Pp. 179–186.
191. Stravinskiene, V. Assessment of *Pinus sylvestris* L. tree health in urban forests at highway sides in Lithuania / V. Stravinskiene, E. Bartkevičius, J. Abraitiene, A. Dautarte // Glob. Ecol. Conserv. — 2018. — V. 16. — № e00517

192. Wertz, B. Dendrochronological evaluation of the impact of industrial imissions on main coniferous species in the Kielce Upland / B. Wertz // Sylwan. — 2012. —Vol. 156(5). — Pp. 379–390.