

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук»

На правах рукописи



Легощина Ольга Михайловна

АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ
И ФИТОИНДИКАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

03.02.08 – Экология (биология)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель
доктор биологических наук, профессор
Неверова Ольга Александровна

Кемерово – 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	10
1.1 Адаптивный потенциал древесных растений в условиях техногенеза....	10
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ	19
2.1 Физико-географическая характеристика и природно-климатические условия Кемеровской области.....	19
2.2 Метеорологические условия.....	21
2.3 Характеристика загрязнения атмосферного воздуха г. Кемерово	23
2.4 Характеристика экологических условий на площадках наблюдения	29
ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	33
3.1 Эколого-биологическая характеристика изучаемых видов древесных растений.....	33
3.2 Методы проведения исследований.....	35
ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ, МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И АНАТОМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В ГРАДИЕНТЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТ ПРОМЗОНЫ Г. КЕМЕРОВО	39
4.1 Оценка окислительных процессов растений по активности пероксидазы и уровню малонового диальдегида	39
4.2 Содержание зеленых пигментов и фотосинтетическая способность древесных растений	51
4.3 Характеристика роста побегов и их элементов у исследуемых древесных растений.....	59
4.4 Анатомические особенности строения листьев и хвои древесных растений.....	65
4.5 Изучение аккумулирующей способности древесных растений в отношении серо- и азотсодержащих примесей атмосферы.....	75
4.6 Оценка способности древесных растений метаболизировать бенз(а)пирен	78

4.7 Оценка адаптивного потенциала древесных пород на исследуемых	
ПН	85
4.8 Оценка фитоиндикационной способности древесных растений в	
условиях преобладающего влияния выбросов промзоны.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	97
ПРИЛОЖЕНИЕ А Метеорологические условия (2009–2013 гг.)	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Активность пероксидазы в листьях исследуемых	
древесных растений	119
ПРИЛОЖЕНИЕ В Содержание МДА в листьях исследуемых древесных	
растений.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Содержание хлорофилла <i>a</i> в листьях исследуемых	
древесных растений	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Содержание хлорофилла <i>b</i> в листьях исследуемых	
древесных растений	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Содержание хлорофилла <i>a/b</i> в листьях исследуемых	
древесных растений	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Фотосинтетическая способность листьев	
исследуемых древесных растений	134
ПРИЛОЖЕНИЕ И Годичный прирост бокового побега исследуемых	
древесных растений	137
ПРИЛОЖЕНИЕ К Площадь и масса листьев исследуемых древесных	
растений.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Л Содержание общей серы в листьях исследуемых	
древесных растений	143
ПРИЛОЖЕНИЕ М Содержание общего азота в листьях исследуемых	
древесных растений	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования: В условиях высоких темпов урбанизации важнейшей задачей является улучшение экологической обстановки в городах. Одним из способов оптимизации экологических условий крупных промышленных центров (в том числе г. Кемерово) является создание рациональной системы озеленения, основанное на научных подходах к подбору ассортимента городских насаждений, обладающих высоким уровнем экологической адаптации и пластичности, и как следствие – высокими показателями декоративности и средоулучшающих свойств.

Особенности жизнедеятельности и экологическая роль древесных растений в городах изучались многими авторами (Илькун, 1971, 1978; Кулагин, 1974; Тарабрин, 1974; Николаевский, 1979, 2002; Чиркова, 2002; Mittler, 2002; Неверова, Колмогорова, 2003; Бухарина, 2008; Двоеглазова, 2009; Журавлева, 2012; Пашкова, 2015 и др.). Подбор видового состава древесных насаждений должен проводиться с учетом функционального назначения озеленяемых территорий.

Город Кемерово представляет собой крупный промышленный центр Сибири. На территории города, вблизи жилых кварталов располагается промзона включающая Кемеровскую ГРЭС, КАО «Химпром», ОАО «Кокс». Данные промышленные объекты выбрасывают в атмосферу вредные реагенты: оксиды азота, диоксид серы, оксид углерода, полиароматические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен и взвешенные вещества. Попадая в окружающую среду, поллютанты оказывают неблагоприятное влияние на процессы роста и развития растений. Однако некоторые древесные растения способны адаптироваться к условиям техногенного загрязнения формируя общую устойчивость древесных растений за счет разных форм адаптаций. В связи с вышесказанным актуальным является изучение адаптивных перестроек древесных растений в градиенте техногенного загрязнения от промзоны г. Кемерово. Полученная научная информация позволит выявить пределы устойчивости древесных растений в

зависимости от концентрации выбросов и расстояния от промзоны, что является ключевым моментом в вопросах создания эффективной системы озеленения вокруг промышленных зон, а также применения результатов фитоиндикационных исследований как дополнительной информации в оценке качества среды.

Степень разработанности темы исследования: Изучение механизмов устойчивости древесных насаждений г. Кемерова проводилось многими учеными с 1998 г. Детально изучено состояние древесных растений различных исторически сложившихся районов города, различающихся экологическими условиями. Выявлены особенности химического состава и установлена видовая специфичность растений в способности накапливать химические элементы техногенных выбросов; установлена направленность физиолого-биохимических и морфологических изменений у растений, исследованы фенологические особенности развития растений; на основе данных фитомониторинга выполнено экологическое зонирование территории города (Неверова, Колмогорова, 2003; Неверова, 2001, 2004). Изучена устойчивость древесных растений в примыкающих посадках города к выбросам автотранспорта (Неверова, Колмогорова, 2006; Неверова, Быков, 2009; Неверова, Колмогорова, Быков, 2009; Неверова, Цандекова, 2010; Неверова, 2011). Однако слабо изучен вопрос об адаптивных перестройках древесных растений в градиенте техногенного загрязнения от промзоны г. Кемерова.

Цель работы: изучение адаптивных реакций и фитоиндикационной способности древесных растений, произрастающих в градиенте техногенного загрязнения от промзоны г. Кемерово.

Задачи работы:

1. Выявить особенности физиолого-биохимических процессов у исследуемых древесных растений – окислительных процессов, содержания зеленых пигментов и фотосинтетической способности.

2. Охарактеризовать рост побегов и их элементов у исследуемых древесных растений.

3. Изучить анатомическую структуру листьев и хвои исследуемых древесных пород.

4. Изучить аккумулялирующую способность древесных растений в отношении серо- и азотсодержащих примесей атмосферы и способность метаболизировать бенз(а)пирен.

5. Дать сравнительную оценку адаптивного потенциала исследуемых древесных пород и их фитоиндикационной способности.

Научная новизна исследования: Впервые в условиях г. Кемерово на основе комплексного изучения физиолого-биохимических, морфологических и анатомических характеристик проведено изучение адаптивного потенциала древесных растений (*Betula pendula* Roth, *Sorbus sibirica* Hedl., *Picea obovata* Ledeb.), произрастающих в градиенте промышленного загрязнения от промзоны. Методом корреляционного анализа выявлены «+» и «–» корреляции изучаемых характеристик растений с комплексным показателем загрязнения атмосферы (КПЗА), которые формируют адаптивные и негативные перестройки на различных уровнях организации и определяют тот или иной уровень устойчивости; установлены соотношения адаптивных перестроек к негативным, доля адаптивных перестроек в этих соотношениях, средняя сила корреляций по модулю. Обнаружено, что в градиенте промышленного загрязнения от промзоны наиболее высоким адаптивным потенциалом обладает береза повислая, наименьшим – рябина сибирская. Показана фитоиндикационная роль растений-аккумуляторов химических элементов загрязнений (серы и азота) в мониторинге характера распространения промышленных выбросов от промзоны и выявления дополнительных источников загрязнения. На примере рябины сибирской (*Sorbus sibirica* Hedl.) показана способность древесных растений метаболизировать бенз(а)пирен.

Теоретическая и практическая значимость работы: Полученные результаты исследования дополняют имеющиеся теоретические представления о влиянии промышленных выбросов на анатомо-морфологические, физиологические и ростовые параметры, а также расширяют представления о метаболических путях

трансформации бенз(а)пирена в растениях.

Результаты исследований являются научной основой для создания эффективной системы озеленения вокруг промышленных зон. Аккумулирующая способность листьев *Betula pendula* Roth в отношении серосодержащих примесей и хвои *Ресца obovata* Ledeb. в отношении азотсодержащих примесей может использоваться для детализации информации о характере загрязнения атмосферного воздуха и объективности экологических прогнозов. Отдельные показатели *Ресца obovata* Ledeb. (содержание хлорофиллов «а» и «б», фотосинтетическая способность, размер клеток и объем тканей, степень асимметрии ЦПП) могут применяться как индикаторные характеристики в системе мониторинга состояния окружающей среды. Материалы диссертационной работы внедрены в образовательный процесс Кемеровского государственного университета и используются при проведении практических и лекционных занятий по дисциплинам «Экологический мониторинг», «Биоиндикация окружающей среды», «Экология городских экосистем» для студентов, обучающихся по направлению «Экология и природопользование».

Методология и методы исследований: Основой диссертационной работы послужили материалы, собранные автором в период с 2009–2013 гг., на территории г. Кемерово. Закладка площадок наблюдения проведена с учетом градиента техногенного загрязнения от промузла по преобладающему направлению распространения выбросов. В ходе выполнения исследований использованы апробированные методы: газожидкостная хроматография с масс-спектрометрическим детектором, спектрофотометрия, световая микроскопия, анатомирование микропрепаратов, морфометрия, методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности физиолого-биохимических, морфологических и анатомических перестроек у древесных растений, а также способность к аккумуляции азот- и серосодержащих примесей атмосферы в условиях градиента

техногенного загрязнения (на примере промзоны г. Кемерова) формируют ряд устойчивости растений: береза>ель>рябина.

2. Формирование выраженных ответных реакций растений на различных уровнях их организации наблюдается на расстоянии от промзоны до 1 км по преобладающему юго-западному направлению ветров (при комплексном показателе загрязнения атмосферы – 17,9 ...10,4).

3. Древесные растения способны усваивать из воздуха и метаболизировать бенз(а)пирен до гидроксипроизводных.

Степень достоверности результатов исследования: Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждена четкой постановкой цели и задач, тщательным планированием эксперимента, использованием адекватных цели и задачам методов, репрезентативностью выборки, корректным применением статистических методов обработки экспериментального материала.

Апробация работы: Основные результаты исследований доложены на семинарах, научных сессиях и конференциях молодых ученых в Институте экологии человека СО РАН (2009–2016 гг.), международных конференциях: «Экология Южной Сибири и сопредельных территорий» (Абакан, 2010), «Экология. Риск. Безопасность» (Курган, 2010), «Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития» (Ишим, 2010), «Найновите постижения на европейската наука» (Болгария, 2011), «Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов» (Кемерово, 2012); молодежной конференции «I Усовские чтения в Кузбассе» (Кемерово, 2010); всероссийских научно-практических конференциях: «Проблемы озеленения городов Сибири и сопредельных территорий» (Иркутск, 2011), инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации» (Кемерово, 2011); всероссийских научно-практических конференциях с международным участием: «Научное творчество молодежи» (Анжеро-Судженск, 2011), «Ботанические чтения» (Ишим, 2012).

Публикации: По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 6 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (из них 1 статья в журнале, переводная версия которого индексируется Web of Science; 2 статьи в журналах, индексируемых Web of Science или Scopus), 1 статья в российском электронном научном журнале, 1 статья в сборнике научных трудов, 11 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций (из них 1 зарубежная конференция).

Личный вклад автора: Автор работы, начиная с 2009 г. принимал непосредственное участие в сборе фактического материала, в выполнении основного объема исследований, в математической обработке полученных результатов. Все лабораторные и полевые исследования в течение 5 лет проводились лично Легощиной О. М. Научные результаты, представленные в диссертации, были получены автором лично или в ходе совместной работы автора с научным руководителем.

Структура и объем диссертации: Диссертация изложена на 144 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 171 источников, из них 29 на иностранном языке, и приложений, изложенных на 29 страницах. Работа содержит 32 рисунка и 41 таблицу из них 31 в приложении.

Благодарности: Выражаю искреннюю благодарность научному руководителю профессору, доктору биологических наук О. А. Неверовой за общее руководство работой. Автор признателен коллективу сотрудников ФИЦ УУХ СО РАН за содействие и поддержку в проведении настоящих исследований.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Адаптивный потенциал древесных растений в условиях техногенеза

Техногенная трансформация природных ландшафтов нередко приводит к формированию экстремальных лесорастительных условий (ЛРУ), несмотря на то, что это происходит в пределах географического и экологического ареалов отдельных видов древесных растений. Способность древесных растений развиваться в экстремальных ЛРУ, например, в условиях жесткой конкуренции на периферии ареала или в условиях техногенеза, определяет их потенциальные возможности к выживанию.

Адаптивный потенциал древесных растений является важнейшей характеристикой вида. Под адаптивным потенциалом понимается комплекс адаптивных реакций, обеспечивающих приспособляемость растений к экстремальным условиям среды. Адаптивные реакции, возникающие в ответ на действие факторов окружающей среды, характеризуют изменчивость метаболизма и устойчивость растений в экстремальных условиях.

Изменчивость, устойчивость и экологическая пластичность служат одними из основных составляющих адаптивного потенциала. Под устойчивостью понимается способность организмов сохранять жизненно важные функции и процессы на определенном уровне и при этом по возможности исключить их резкие колебания. Экологическая пластичность, напротив, определяется путем выявления максимально возможных колебаний того или иного показателя растений без ущерба для организма (в пределах нормы реакции), а также времени их проявления. Таким образом, именно благодаря определению степени изменчивости жизненно важных процессов на различных уровнях организации в экстремальных ЛРУ и определении взаимозависимостей между этими показателями мы приходим к определению лишь реализуемой части адаптивного потенциала древесных растений (Кулагин, 2006).

Результатом множества разработок стало появление ряда теорий о функционировании адаптивного комплекса растений, авторы которых объясняли с разных позиций способности растений приспосабливаться к экстремальным факторам среды и, в частности, к условиям техногенеза.

Авторы всех концепций едины во мнении о том, что техногенез является новейшим фактором в жизни растений, масштабы которого нередко превосходят действие важнейших природных экологических факторов. Так, предложенный метод определения газоустойчивости древесных растений Н. П. Красинским (1950) не стал универсальным, таким образом, теория преадаптации (экологическая) выдвинутая Ю.З. Кулагиным (1974, 1980), расширяет понимание степени и особенностей воздействия токсикантов на растения; во многом позволяет понять особенности развития организмов в условиях техногенеза. Автором отмечается, что биотипическая, возрастная и модификационная неоднородность популяций выступает в качестве адаптивного полиморфизма на разных уровнях организации. При этом Ю.З. Кулагин выделяет 9 форм газоустойчивости – анатомическую, физиологическую, биохимическую, габитуальную, феноритмическую, анабиотическую, регенерационную, популяционную и ценотическую.

Итоговая устойчивость определяется, как результат сочетания и интегрирования совокупности приспособительных реакций и не может быть сведена к одной из них. В качестве преадаптации могут выступать те структурно-функциональные компоненты растения, которые не обеспечивали в эволюционном прошлом жизненно важных функций, но способны в условиях техногенеза повышать и обеспечивать устойчивость организма.

Возможен также и вариант постадаптации, в своей основе базируется на тех положениях, что в далеком эволюционном прошлом некоторые признаки играли важнейшие функции, но в последствии эти признаки хранились и передавались как рецессивные и не использовались активно организмом, однако на сегодняшний день адаптивные возможности организмов зависят от использования этих рецессивных признаков (Тарабрин, 1981; Сергейчик, 1984).

Широко известный подход, определяемый как взаимодействие «ФАКТОР-ЭФФЕКТ» – один из наиболее популярных и распространенных на современном этапе методов исследования, несомненно, имеет свои преимущества. В данном случае основа разработок состоит в понимании и расшифровке ответных механизмов растения при действии отдельных факторов (Николаевский, 1979). Указывается, что «... рычагом осуществления адаптивных перестроек служит система координации метаболизма, контролируемая в конечном итоге центром генной регуляции – ядерной ДНК, реализуемая через деятельность ферментативных систем и лимитируемая энергетическим потенциалом клетки и всего организма в целом. В то же время возможности растений не беспредельны. Если экстремальный фактор превышает по своей силе границы «зоны адаптации», то его координационные системы не в состоянии устранить вызываемые внешними воздействиями расстройства метаболизма. Происходит все углубляющаяся дискоординация последнего, что приводит к неизбежной гибели организма» (Удовенко, 1976: цит. по Сергейчик, 1994).

Особого внимания заслуживают подходы С.А. Мамаева в понимании вопросов изменчивости как основы устойчивости древесных растений. В работах автора указывается, что в основе изменчивости лежат биологические особенности роста и развития вида, а также особенности взаимодействия растения с внешней средой. При этом основой анализа разнокачественности структурных признаков растений стали материалы, полученные в результате собственных многолетних исследований, что позволило составить представление об амплитуде изменчивости признака и позволяет более точно подойти к пониманию роли тех или иных экологических факторов и генетических процессов, протекающих в популяциях и формирующих различные свойства вида. Выделяя 5 форм изменчивости (географическую, экологическую, хронографическую, половую и индивидуальную), автор устанавливает факт значительной индивидуальности признаков по свойственной им амплитуде изменчивости в пределах популяции (Мамаев, 1969).

Определяющим фактором в жизни растений нельзя назвать какое-либо природное или антропогенное явление или процесс. Как правило, совокупность факторов оказывает суммарное влияние на растительный организм, причем часто наблюдаются синергизм или антагонизм при действии различных факторов. Несмотря на эти обстоятельства, мы можем выделить определенные экологические факторы в качестве основных, при этом в целом ЛРУ будут характеризоваться именно с точки зрения определяющего фактора, не исключая при этом менее выраженных.

В литературных источниках приводится множество работ, посвященных изучению адаптивного потенциала растений в техногенной среде.

В условиях загрязнения природной среды ряд видов растений проявляет повышенную устойчивость. Адаптационные процессы протекают на всех уровнях организации живого – от цитогенетического до экосистемного. Важнейшими механизмами являются изменения популяционной структуры вида, в результате которых большее представительство в популяции приобретают особи, обладающие наибольшей резистентностью к действию конкретного токсического фактора. Сильное повреждение листьев не всегда приводит к гибели дерева. Благодаря регенерационной способности растения восстанавливают новые листья и побеги взамен поврежденных.

Приспособление растений к экстремальным условиям на разных уровнях биологической организации осуществляется с определенными закономерностями (чем выше уровень «клетка → организм → популяция», тем большее число механизмов одновременно участвует в адаптации растений к стрессовым воздействиям). На уровне организма механизмы адаптации, свойственные клетке, дополняются новыми, отражающими взаимодействие органов в целом растении. Прежде всего, это конкуренция отдельных органов за физиологически активные вещества и трофические факторы. В процессе жизнедеятельности биометрические параметры испытывают колебания, определяемые как внутренними, так и внешними факторами. Регуляторные гомеостатические механизмы обеспечивают низкий уровень этих колебаний. При воздействиях, превышающих границы

толерантной зоны, в биосистеме развивается комплекс физиологических и биохимических изменений. Комплекс изменений, происходящих в живой системе, отражает ее переход из состояния, поддерживаемого гомеостатическими механизмами, в новое квазистационарное стрессовое состояние (Веселова и др., 1993).

Повышенная устойчивость растений к экстремальным условиям определяется способностью к перестройке физиологических процессов, проявлением приспособлений, развившихся ранее для защиты от других экстремальных факторов природной среды. Оценка влияния различных составляющих биотопа на химизм и уровень метаболических процессов листьев особо важна с позиций познания механизмов, обеспечивающих реализацию адаптивных стратегий растений (Кулагин, 1985; Пахомова, 1995; Mansfield et al., 1988).

Экологическая пластичность листового аппарата, проявляется в изменении его компонентного состава и функциональной активности в зависимости от комплекса биотопических условий (особенности светового, гидротермического, эдафического и прочих режимов) (Исаков, Висковатова, 1984; Васильев, 1988; Кузьмин, 1989; Полевой, Саламатова, 1991; Kolb, Hart, 1997; Bussotti et al., 2000). В зависимости от экзогенных условий обнаруживаются адаптивные изменения на уровне метаболических процессов либо тканевого строения. Например, усиление активности ферментов, способствующих снижению содержания в хвое значительных количеств перекисных соединений, подтверждается увеличением содержания малонового диальдегида, одного из конечных продуктов их расщепления (Жиров и др., 2007; Неверова и др., 2010). В клетках ассимиляционных органов накапливаются фенольные соединения, которые выполняют защитную функцию при повреждениях растений, связывают ионы тяжелых металлов в устойчивые комплексы, лишая тем самым их каталитического действия, служат акцепторами образующихся свободных радикалов (Братчук, 2001; Бухарина, Поварницина, Ведерников, 2007), играют значимую роль в адаптации растений к различным стрессовым факторам в том

числе и к техногенному загрязнению (Чупахина, Масленников, 2004; Трошкова, Винокурова, 2005; Фуксман и др., 2005; Noch et al., 2001). Внутри вида наиболее газоустойчивые деревья отличаются большим содержанием воды в листьях (Тарабрин, 1980), в лубе и заболони, меньшим объемом вентилируемых полостей в губчатой паренхиме листьев (Князева, 1950; Уразгильдин, 2001; Половникова, 2007), высоким осмотическим давлением клеточного сока, нахождением изоэлектрической точки в более кислой области pH, а также большим содержанием общего и белкового азота в молодой хвое.

Неспецифический характер ответной реакции клеток тканей хвои сосны на накопление в них токсичных веществ мобилизует резервные защитные возможности организма для общего и быстрого ответа на их воздействие. Например, для уменьшения количества перекисных соединений и поддержания жизнеспособности в тканях хвои сосны обыкновенной интенсифицируется процесс разложения перекисных соединений в клетке, о чем свидетельствует повышение активности каталазы (Шебалова, Бабушкина, 2000).

Рядом авторов выявлены изменения анатомической структуры хвои адаптивного характера различных видов сосен в условиях повышенной техногенной нагрузки: отмечается увеличение количества устьиц, числа смоляных каналов и их средней и суммарной площади поперечных сечений у *Pinus sylvestris* L. (Онучин, Козлова, 1993; Кулагин, Зайцев, 2006); увеличение диаметра смоляных каналов в хвое *Pinus brutia* (Nuhoglu, 2005); увеличение толщины кутикулы, площади мезофилла и центрального цилиндра, площади поверхности хвои и длины хвои у *Picea obovata* Ledeb. и *Pinus sylvestris* L. (Зотикова с соавт., 2007); увеличение площади поперечного сечения хвои *Pinus sylvestris* L. (Ладанова, Плюснина, 1998; Соболева, 2009). У лиственных пород деревьев листовая пластинка утолщается в результате утолщения мезофилла с сохранением числа слоев клеток (Кулагин, 2006; Убаева, 2010; Мазунина, 2009; Майдебур, 2006; Половникова, 2007). Возрастает число устьиц (Лыкшитова, 2014; Асадулаев, Рамазанова, 2012; Сунцовой, Иншаковым, 2007), увеличивается площадь жилок на единицу площади листа, уменьшаются размеры хлоропластов,

т.е. с нарастанием городских влияний отмечается общая для всех видов тенденция к редукции ассимилирующих структур и снижению фотосинтетической мощности листа (Кулагин, Шагиева, 2005). Наиболее тесно связан характер повреждения деревьев с толщиной покровных тканей (Федорков, 2002). Устойчивые виды характеризуются мощным развитием покровных тканей ассимиляционных органов, низкой «вентилируемостью» губчатой паренхимы, большим количеством мелких устьиц на 1 мм^2 листа и меньшей степенью их открытия в дневное время (Чернышенко, 1999). В работе С.А. Сергейчик (1994) показано, что у растений газоустойчивых видов при действии газообразных соединений азота происходит увеличение толщины листа, толщины мезофилла, столбчатой и губчатой ткани. У растений малоустойчивых к действию атмосферных загрязнителей толщина листовых пластинок уменьшается за счет уменьшения толщины столбчатой и губчатой паренхимы и толщины верхнего и нижнего эпидермиса.

Минимизация размеров побега у древесных растений носит преадаптивный характер и наблюдается у видов устойчивых к факторам внешней среды (Кулагин, 1985). В условиях техногенеза у древесных растений отмечается явление ксерофитизации при котором происходит уменьшение ассимилирующего органа, при одновременном увеличении ширины и длины листовой пластинки (Сергейчик, 1984; Orenet. al., 1988; Беляева, Николаевский, 1989; Гетко, 1989; Аугустайтис, 1992; Токарева, 1992; Зубарева, 1993; Ярмишко, 1997; Неверова, Колмагорова, 2002; Завьялов, 2013). По мнению В.С. Николаевского (1979) это явление вызвано подавлением фазы растяжения клеток из-за недостатка ассимилятов и возможно нарушения гормональной регуляции роста под действием отдельных стрессовых факторов. А.К. Фролов (1998) рассматривает ксерофитизацию листового аппарата как адаптивную реакцию, направленную на более экономное расходование влаги растениями в городе.

В.С. Николаевский (1979) утверждает, что явление ксероморфности способствует повышению устойчивости вида в условиях техногенеза. Но, в научной литературе появляются сведения о том, что в условиях загрязнения

среды у некоторых видов, являющихся довольно устойчивыми, может происходить и удлинение побега (Турмухаметова, 2005; Бухарина, Поварницина, Ведерников, 2007).

Среди структурных особенностей, помимо традиционно рассматриваемых, привлекает к себе внимание показатель массы единицы площади листа (Кавеленова и др., 2007; Bussotti et al., 2000; Burghardt, Riederer, 2003). Масса единицы поверхности листьев (степень склерофилизованности) имеет различные показатели у растений разных экологических групп, имеет меньшие значения у теневыносливых видов (Ninemets et al., 1998) и обнаруживает связь с условиями обитания: уровнем увлажнения почвы, засолением (Bussotti et al., 2000), изменяется в зависимости от условий сезонов и видовых особенностей растений (Кавеленова и др., 2007).

Во многом устойчивость определяется строением древостоев. Так, хвойные одноярусные насаждения вдоль автомобильной дороги более устойчивы к загрязнению автомобильным транспортом, чем многоярусные (Гурьев и др., 1999).

В плане газоустойчивости многие лиственные древесные растения (различные виды тополей, ивы и др.) более устойчивы к техногенному загрязнению за счет быстрого роста, листопадности и засухоустойчивости (Кагарманов, 1995; Кулагин, 1998; Кулагин и др., 2000). Хвойные древесные породы отличаются тем, что хвоя не опадает и держится на побеге несколько лет (за исключением лиственницы). Следовательно, в условиях техногенеза хвоя способна накапливать большие дозы токсиканта, и если листопадные древесные растения ежегодно освобождаются от определенного количества токсиканта, сбрасывая листву, то хвойные лишены этого преимущества. В то же время за счет многолетней хвои (зимой путем механического осаждения твердых частиц) хвойные растения способны выполнять свои санитарно-защитные насаждения. Есть научные данные, что сосна обыкновенная в летний период способна выделять избыток техногенной серы из хвои, чем повышает свою толерантность

при произрастании в условиях загазованности диоксидом серы (Гирс, Зубарева, 1990).

Характеристики изменений и взаимозависимости отдельных параметров на различных уровнях организации древесных растений являются ключевым звеном в раскрытии особенностей реализации адаптивного потенциала отдельных видов.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Физико-географическая характеристика и природно-климатические условия Кемеровской области

Город Кемерово расположен в северной части Кузнецкой котловины по обоим берегам реки Томь. В орографическом отношении район Кемерова представляет собой плато с широкими и плоскими водоразделами и чередующимися неглубокими долинами небольших рек, оврагами, логами, западинами.

Климат г. Кемерово – резкоконтинентальный с разграниченными сезонами. Продолжительность солнечного сияния в Кемерово составляет в среднем 1923 часов в год. Наиболее неблагоприятные погодные условия в городе создаются с ноября по январь. В это время солнечное сияние за месяц в сумме составляет 50 часов и не превышает в среднем 21 % возможной суммы. Резкое сокращение продолжительности солнечного сияния в конце осени и в первые зимние месяцы связано с особенностями режима облачности. В среднем около 80 дней в году небосвод в зоне города полностью закрыт плотными облаками, из них почти 60% приходится на ноябрь – январь.

Большую часть астрономического года (149 дней) составляет холодный зимний период (с 3 ноября по 31 марта). Теплый летний сезон продолжается около 100 дней (с 7 июня по 14 сентября). Межсезонные периоды, весна и осень, составляют 67 (1 апреля–6 июня) и 49 (15 сентября–2 ноября) дней, соответственно. Зима суровая, начинается в первой декаде ноября и продолжается до конца марта. Средняя годовая температура колеблется от 1,0 до -0,9 °С. Самым холодным месяцем в году является январь (средняя многолетняя температура - 17...-20 °С, абсолютный минимум температуры воздуха опускался до -40 °С и ниже).

Лето наступает в первой декаде июня и продолжается до второй декады сентября. Средняя месячная температура воздуха в июне составляет +16,2 °С, в

июле +18,7 °С, в августе +15,3 °С. Июль – единственный месяц, когда не наблюдаются заморозки в воздухе. Безморозный период составляет 110–122 дней, заморозки в среднем заканчиваются в III декаде мая и начинаются со II декады сентября.

Снежный покров устанавливается в основном в начале ноября или в конце октября и удерживается длительное время, в среднем 145–155 дней. Термический режим почв зимой, прежде всего, определяется процессом их промерзания. Промерзание почв в окрестностях Кемерово в обычные зимы распространяется на глубину 1–1,5 м, а в малоснежные – до 2 м и более. Температурный режим верхнего десятисантиметрового слоя глинистых суглинистых почв в период вегетации благоприятен для произрастания многих культурных растений.

Осадков выпадает в среднем 400–500 мм в год, однако, распределение их по территории очень неравномерное. Максимальное количество сухих дней приходится на май (9 дней), а зимой они практически отсутствуют. Осадки выпадают преимущественно в течение трех летних месяцев. На них приходится 45 % годовой нормы, на три календарных зимних месяца – 12 %, на весну и осень – 17 % и 25 %, соответственно.

Над Кузнецкой котловиной воздушный поток под влиянием окружающих гор и благодаря общей ее пространственной ориентации подвергается значительной деформации. В результате в Кемерово преобладают южные и юго-западные ветра (25 %), реже северные и восточные (менее 10 %). Наибольшее число южных ветров приходится на холодное полугодие (зимой – 33 %, осенью – 25 %). Максимум юго-западных ветров приходится на конец осени (октябрь – 34%) и начало зимы (ноябрь, декабрь – 30 %). Средняя годовая скорость ветра в Кемерово на высоте флюгера (12 м) составляет 4,4 м/с. Ее изменчивость из года в год небольшая и составляет в среднем 0,4 м/с. В годовом ходе средней скорости ветра проявляются два максимума: первый – осенью, в ноябре (5,5 м/с), второй – весной, в марте (5,2 м/с). Повышенная вероятность штилевой погоды характерна для июля и августа при небольшой средней скорости ветра 3,0–2,5 м/с. Зимой, при низких температурах и слабых ветрах, особенно в ночные и утренние часы, в

долинах рек и других пониженных местах города на 10–15 °С холоднее, чем на возвышенностях (Агроклиматические ресурсы Кемеровской области, 1973; Климат Кемерова, 1987).

2.2. Метеорологические условия

Основные параметры метеорологических условий 2009–2013 гг. по данным ГУ «Кемеровский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» представлены в приложении (ПРИЛОЖЕНИЕ А. Метеорологические условия (2009–2013 гг.)).

2009 год был значительно теплее по сравнению со среднегодовыми данными, осадков выпало больше годовой среднестатистической нормы (рисунок 1). Весенние месяцы были несколько теплее среднегодовых значений, самым теплым весенним месяцем был апрель – на 3 °С выше среднегодовой нормы. Осадков в апреле и мае выпало значительно больше нормы (в среднем на 8–23 %), а март характеризовался низким режимом увлажнения (выпало осадков на 53 % меньше нормы) в сравнении со среднегодовыми данными (рисунок 2).

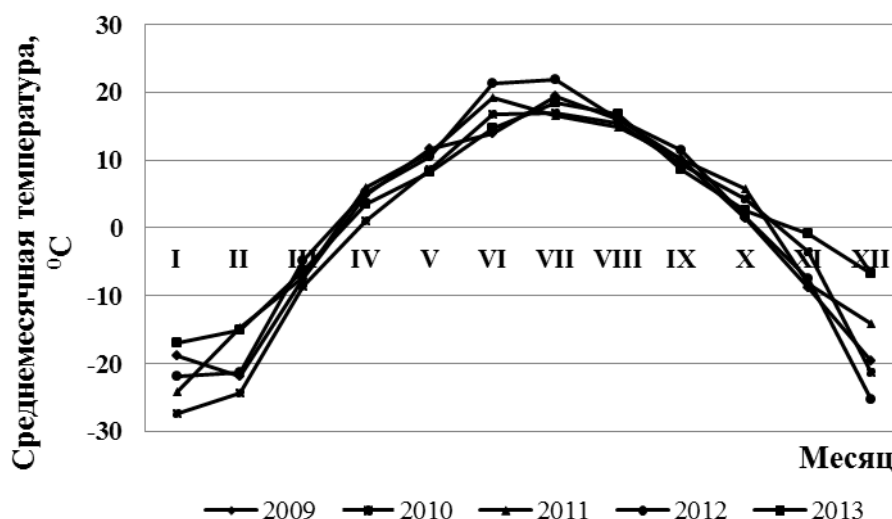


Рисунок 1 – Среднемесячная температура в г. Кемерово за 2009–2013 гг.

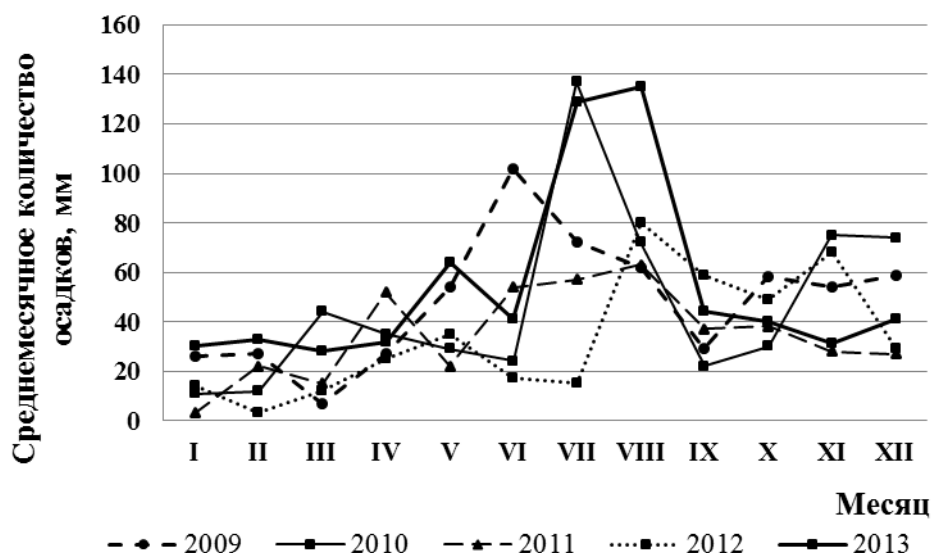


Рисунок 2 – Среднемесячное количество осадков в г. Кемерово за 2009–2013 гг.

Из летних месяцев – июнь отличался более низкими температурами с отклонением ниже нормы на 2,3 °С. Июль, и август были в среднем теплее среднемноголетних значений. Осадков в течение летних месяцев выпало больше нормы в среднем на 13–52 %. Осенние месяцы характеризовались теплой погодой. Количество осадков за осенние месяцы выпало больше нормы в среднем на 35–38 %.

2010 г. был значительно теплее среднемноголетних данных, и осадков выпало больше нормы. Температура воздуха в весенние месяцы была ниже нормы. Осадков в этот период выпало больше среднемноголетней нормы в среднем на 40–193 %. Из летних месяцев более теплым были июнь, а июль был прохладным в сравнении со среднемноголетними данными (на 1,9 °С ниже нормы). Осадков в течение летних месяцев выпало больше нормы в среднем на 14–114 %. Осенние месяцы характеризовались теплой погодой, с низким количеством осадков в сентябре и октябре (на 45 % и 30 % меньше нормы).

2011 г. был теплее среднемноголетних данных, и осадков выпало меньше среднемноголетних данных. Весенние месяцы характеризовались теплой погодой с превышением количества выпавших осадков в апреле (на 100 % больше нормы). Лето было холоднее нормы в июле и августе (на 1,3–2,4 °С ниже нормы). Лето

было засушливым, осадков в июне и июле выпало меньше нормы на 21 %. Осенние месяцы были теплыми и довольно сухими (выпало осадков на 10–36 % меньше нормы).

2012 г. был значительно теплее среднестатистических данных, и осадков выпало меньше нормы. Весенние месяцы характеризовались теплой погодой и низким количеством осадков, при этом минимальное количество осадков наблюдалось в марте (выпало 63 % от нормы). Лето было теплее нормы на 2,9–4,9 °С. Из летних месяцев самым влажным был август (осадков выпало на 29 % больше нормы). Осенние месяцы были прохладными, но довольно влажными (в среднем осадков выпало на 9–55 % больше нормы).

2013 г. был теплее среднемноголетних данных, но более влажным. Весенние месяцы характеризовались теплой погодой и высокой степенью влажности (в среднем осадков выпало на 23–60 % больше нормы). Лето было прохладным. Из летних месяцев самыми влажными были июль (осадков выпало на 79 % больше нормы) и август (осадков выпало на 118 % больше нормы). Осенние месяцы были теплыми, самым теплым осенним месяцем был ноябрь (на 6,5 °С выше нормы).

Таким образом, 2011 год характеризовался как самый теплый и засушливый (с низким количеством осадков). 2013 год был самый холодный и самый влажный. В 2009, 2010 и 2012 гг. температура и количество осадков были средними в сравнении с 2011 и 2013 гг.

2.3. Характеристика загрязнения атмосферного воздуха г. Кемерово

Город Кемерово – крупный промышленный, административный и культурный центр Кемеровской области, узел шоссейных и железнодорожных путей с предприятиями теплоэнергетики, с площадью 295 км² и населением 521,2 тыс. человек.

На территории города Кемерово находится многоотраслевой промышленный комплекс, включающий в себя около 70 крупных и средних

предприятий энергетики, химии, машиностроения, а также угледобывающей, пищевой и ряда других отраслей, на долю которых приходится более 90 % общего объема производства. За последние годы отраслевая структура промышленности города претерпела изменения. Ведущее положение занимают предприятия по производству и распределению электроэнергии, за ними следуют представители металлургии и химии.

Выбросы промышленных предприятий города подвергаются воздействию комплекса метеорологических факторов, которые определяют тот или иной уровень загрязнения. При этом высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха города различными примесями наблюдается в периоды неблагоприятных метеоусловий (НМУ). Возникновению НМУ способствуют штили, приземные и приподнятые инверсии и туманы. Процент штилевых ситуаций в городе составляет 14 %.

По направлению ветровые потоки в приземном слое ориентируются по долине р. Томь, осуществляя почти поперечные (южные, юго-западные) глубокие затоки за городскую черту, накрывая вредными примесями прибрежную зону отдыха на правом берегу Томи. В холодные периоды года так же формируются неблагоприятные для рассеивания примесей метеорологические условия.

Пониженная прозрачность атмосферы (пылевое загрязнение и туманообразование) вызывает общий дефицит ультрафиолетового излучения, приходящего от солнца. Часть ультрафиолетового излучения расходуется на фотохимические процессы в атмосфере, приводя к вторичному ее загрязнению.

Сформировавшиеся в центральной части города искусственные очаги тепла вызывают термический подсос и сток приземного воздуха с окраин в пониженную центральную часть, увеличивая загрязнение воздуха, которое становится значительным при ослабленном динамическом проветривании и температурной инверсии.

Особенности рельефа также влияют на уровень загрязнения атмосферного воздуха города: перемещение приземного воздуха осуществляется от окраин в

пониженную центральную часть, увеличивая степень загрязнения атмосферного воздуха.

Одним из важнейших факторов, определяющих экологическую ситуацию в г. Кемерово, является состояние атмосферного воздуха и степень его загрязнения.

По критериям Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, на основании данных Кемеровского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Кемерово в 2009–2011 и 2013 гг. оценивался как высокий, а в 2012 г. как очень высокий, что было связано с большим содержанием бенз(а)пирена и диоксида серы.

Высокая степень загрязнения атмосферного воздуха в городе обусловлена большим количеством промышленных предприятий на относительно небольшой территории, а также повторяющимися неблагоприятными метеоусловиями. Суммарный выброс загрязняющих веществ в атмосферу города Кемерово составил в 2009 г. – 121,06 тыс. т. вредных веществ, в 2010 г. – 105,134 тыс. т., в 2011 г. – 116,53 тыс. т. (рисунок 3). При этом от стационарных источников было получено в 2009 г. – 53,035 тыс. т вредных веществ, в 2010 г. – 55,434 тыс. т., в 2011 г. – 47,465 тыс. т. (Доклад о состоянии..., 2011).

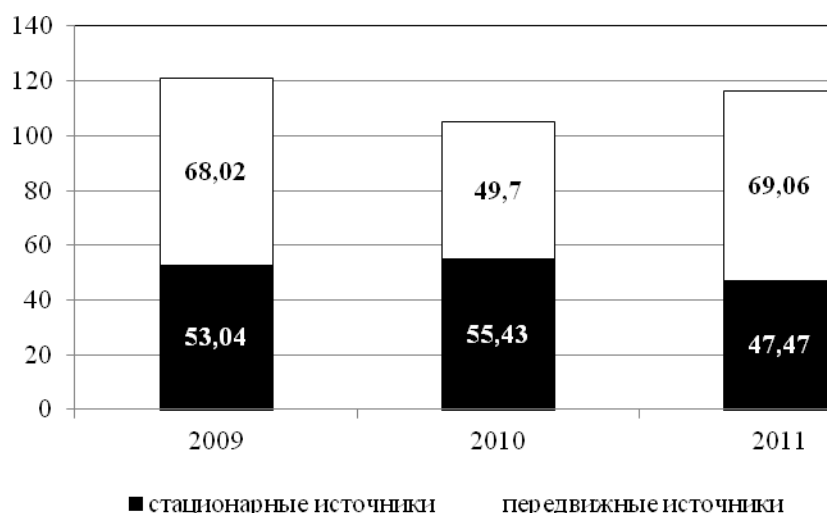


Рисунок 3 – Структура суммарного выброса загрязняющих веществ в атмосферу г. Кемерово за 2009–2011 гг., тыс.т.

Таким образом, суммарные выбросы снижались в 2010 г. на 13 %, а в 2011 г. на 4 %. в сравнении с 2009 г. При этом количество выбросов от стационарных источников в 2010 г. немного возросло (на 4 %), а в 2011 г, снизилось на 11 % в сравнении с 2009 г.

Основной вклад в суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников вносят предприятия по производству и распределению электроэнергии, газа и воды – 72,6 %; химического производства – 10,1 %, производству кокса, нефтепродуктов и ядерных материалов – 7,9 %.

Предприятия производящие электрическую и тепловую энергию (Кемеровская ГРЭС, Ново-Кемеровская ТЭЦ, Кемеровская ТЭЦ) загрязняют атмосферу города за счет использования такого типа топлива (каменный уголь, природный и коксовый газ, мазут) который имеет высокую зольность и сернистость, что в свою очередь приводит к повышению концентраций диоксида серы и сажи в атмосфере города. Так в 2010 г. от ведущего топливно-энергетического предприятия города – Кемеровской ГРЭС было выброшено в воздух 19,12 тыс. т/год загрязняющих веществ из них: диоксида серы – 7,42 тыс. т/год, диоксида азота – 7,40 тыс. т/год, твердых загрязняющих веществ – 3,1 тыс. т/год.

Значительный вклад в загрязнение воздушного бассейна города Кемерово, передвижными источниками, вносит автотранспорт. Так в 2009 г. количество выбросов от передвижных источников составило: 68,03 тыс. т, а в 2010 г. – 49,70 тыс. т. Таким образом, в 2010 году количество выбросов от автотранспорта уменьшились по сравнению с 2009 годом на 18,325 тыс. т вследствие изменения методологии расчета выбросов от автотранспорта (учтен экологический класс автомобилей).

Для контроля содержания примесей от различных промышленных производств и автотранспорта, поступающих в воздух введены определенные стандартизированные экологические нормативы – предельно допустимые концентрации (ПДК). Основными веществами превышающими ПДК в

2009–2013 гг. по среднегодовым концентрациям были: бенз(а)пирен, диоксид азота, формальдегид, оксид азота и сажа (таблица 1).

Таблица 1 – Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в г. Кемерово за 2009–2013 гг., (доли ПДК)

Наименование загрязняющего вещества	Год				
	2009	2010	2011	2012	2013
бенз(а)пирен	2,900	3,400	3,300	3,100	2,400
диоксид азота	1,800	1,500	1,500	1,600	1,300
формальдегид	1,100	1,100	2,700	3,300	3,200
оксид азота	0,800	0,800	0,700	0,800	0,600
сажа	1,100	1,100	1,200	1,000	0,700
аммиак	0,700	0,900	0,900	0,800	0,600
оксид углерода	0,600	0,600	0,700	0,700	0,400
водород хлористый	0,400	0,400	0,400	0,400	0,300
фенол	0,300	0,300	0,300	0,300	0,200
взвешенные вещества	0,300	0,300	0,500	0,400	0,200
диоксид серы	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
анилин	<0,100	<0,100	<0,100	0,100	<0,100

При этом, за пять лет, максимальное превышение ПДК по бенз(а)пирену приходилось на 2010 г. – 3,4 ПДК, по диоксиду азота на 2009 г. – 1,8 ПДК, по формальдегиду на 2012 г. – 3,3 ПДК, по саже на 2011 г. – 1,2 ПДК (рисунок 4). По этим веществам отмечено превышение как среднемесячных, так и среднегодовых концентрации в Заводском районе города. Так, по среднемесячной концентрации здесь зафиксировано превышение ПДК по бенз(а)пирену – в 7,4 ПДК и по среднегодовой концентрации превышение ПДК по диоксиду азота – в 2,0 ПДК.

За период 2009–2013 гг. отмечается снижение среднегодовых концентраций диоксида азота и сажи на 28 % и 36 % соответственно. Среднегодовые концентрации формальдегида и бенз(а)пирена изменялись неравномерно. По

сравнению с 2009 годом концентрация формальдегида увеличилась практически в 3 раза; бенз(а)пирена – уменьшилась в 1,2 раза.

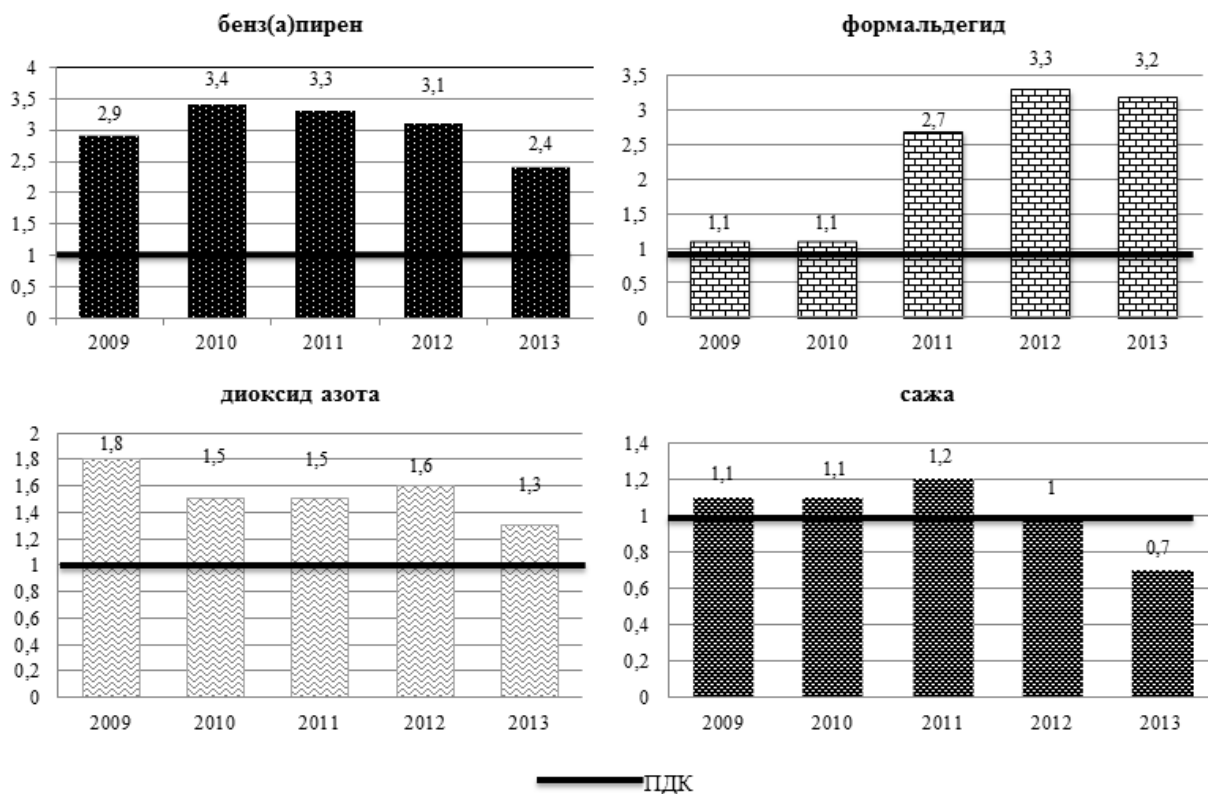


Рисунок 4 – Тенденция изменения среднегодовых концентраций основных примесей в г. Кемерово в долях ПДК

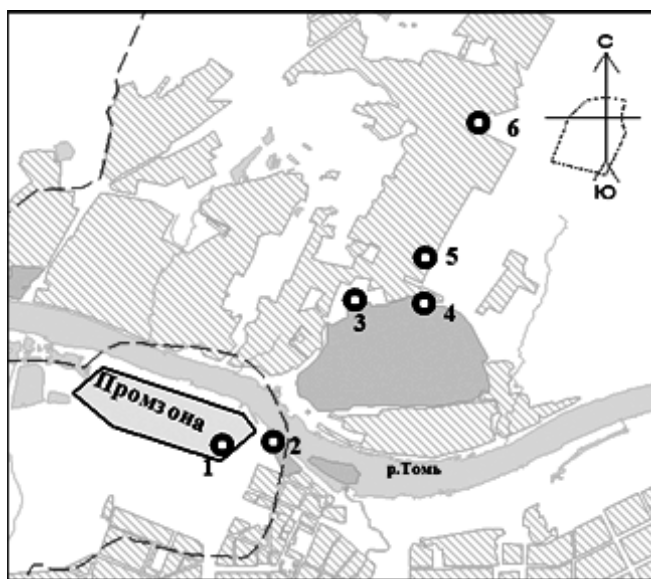
По остальным веществам превышения санитарно-гигиенических нормативов не наблюдалось: среднегодовые концентрации оксида углерода, водорода хлористого сохраняются на одном уровне в течение 3 лет; среднегодовые концентрации фенола, диоксида серы – 5 лет. Загрязнение атмосферы города металлами незначительное: средние значения из среднемесячных не превышают значений природного фона.

Атмосферные осадки за период 2009–2013 гг. имели в 32 % случаев слабощелочную, в 62 % случаев – нейтральную, в 5 % случаев – равновесную, в 1% случаев – слабокислую реакции. Снежный покров был насыщен сульфатами (10,74 мг/л) и гидрокарбонатами (7,08 мг/л). В катионной группе преобладающими были ионы кальция – 2,67 мг/л. Величина pH составила 5,6 ед. (Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2013г.).

2.4. Характеристика экологических условий на площадках наблюдения

Мощным источником загрязнения атмосферного воздуха г. Кемерово является промзона, включающая Кемеровскую ГРЭС, КОАО «Химпром», ОАО «Кокс». Промзона расположена на границе Центрального и Заводского районов города в непосредственной близости к жилым кварталам. Приоритетными выбросами данных промышленных объектов являются оксиды азота, диоксид серы, оксид углерода, полиароматические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен и взвешенные вещества.

Для исследований выбраны 6 площадок наблюдений (ПН), расположенных в градиенте концентраций техногенных выбросов от промзоны по преобладающему юго-западному направлению ветров (рисунок 5).



Обозначения. ПН: 1 – сквер у проходной ГРЭС (ул. Станционная, 17)

2 – парк им. Горького (вблизи спорткомплекса)

3 – территория станции Юннатов (пр. Шахтеров, 10)

4 – территория санатория «Журавлик» (ул. Терешковой, 7)

5 – сквер им. Шахтеров (между пр. Шахтеров и ул. Институтской)

6 – двор сельской больницы (ул. Авроры, 12)

Расстояние от 1ПН по прямой линии составляет: до 2ПН – 1 км, до 3ПН – 3 км, до 4ПН – 4 км, до 5ПН – 4,5 км, до 6ПН – 6,5 км.

Рисунок 5 – Схема расположения площадок наблюдения в плане города Кемерово

Для оценки адаптивного потенциала, обеспечивающего устойчивость древесных растений, детоксикационных возможностей в отношении бенз(а)пирена, а также оценки возможности использования древесных растений для индикации загрязнения атмосферного воздуха серо- и азотсодержащими выбросами проведено моделирование загрязнения атмосферного воздуха на исследуемых ПН А.А. Быковым(к.ф.-м.н., с.н.с. филиала института прикладных технологий СО РАН).

Для оценки среднего за длительный период загрязнения атмосфер г. Кемерова использован специальный модуль программного комплекса ЭРА, который согласован ГГО им. А.И. Воейкова (С-Петербург, Россия) на соответствие краткосрочной модели (ОНД-86..., 1987) и долгосрочной модели (Методика расчета..., 2005). Комплекс ЭРА может быть применен для нормативных расчетов загрязнения атмосферы и позволяет использовать стандартные нормативные базы данных, накопленные в форматах программного комплекса ЭРА, отработанный интерфейс и все текстовые и графические возможности по представлению результатов (включая построение на цифровых и растровых картах). Для линейных и площадных источников используется процедура интегрирования с шагом, зависящим от удаления точки от источника, а шаг выбирается из условия не превышения вычислительной погрешности уровня 3 %.

Основное соотношение для вычисления средней за длительный период концентрации C в точки с полярными координатами (r, φ) относительно источника имеет следующий общий вид:

$$C(r, \varphi) = \frac{p_1(\varphi)M}{r} \int_0^\infty du \int_0^\infty d\lambda p_2(u) p_3(\lambda) q(r, u, \varphi, \lambda, H_e), \quad (1)$$

где M (г/сек) средний за период осреднения выброс источника, а расшифровка обозначений и формулы для подынтегральной функции q и эффективной высоты источника H_e представлены в Методике расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (2005). В состав выражения (1) входят три функции,

представляющие плотности распределения: направление ветра $p_1(\varphi)$; скорость ветра $p_2(u)$; безразмерный параметр λ интенсивности турбулентного перемешивания $p_3(\lambda)$. Для нормативных расчетов эти распределения, определяющие режим долговременного загрязнения атмосферы в окрестности источника, запрашиваются вместе с остальными необходимыми параметрами в ГГО им. А.И. Воейкова. Функция $p_1(\varphi)$ получается из стандартной 8-и румбовой розы ветров путем интерполяции, вид которой определен в Методике расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (2005).

В процессе моделирования были рассчитаны:

- комплексный показатель загрязнения атмосферы (КПЗА),
- показатель загрязнения атмосферы серо- (ПЗА_с) и азотсодержащими (ПЗА_н) примесями,
- безразмерная концентрация (Cr) и условная величина (Q) бенз(а)пирена.

Расчеты выполнены на основании данных инвентаризации, взятых из материалов сводного тома ПДВ г. Кемерова (Ажиганич и др., 2005). При расчете КПЗА учтены приоритетные выбросы предприятий промзоны – оксиды азота, диоксид серы, оксид углерода, бенз(а)пирен и взвешенные вещества (зола, сажа и др.) (таблица 2).

При расчете ПЗА_с и ПЗА_н учтены примеси от предприятий промзоны и автодорог: серная кислота, диоксид серы, сера элементарная, сероводород, сероуглерод в одном случае и диоксид азота, азотная кислота, аммиак, оксид азота, нитрат аммония в другом случае (таблица 2).

$Cr = C / ПДКс$, где C рассчитаны в точках отбора проб по формуле (1). $ПДКс = 0,000001 \text{ мг/м}^3$ – принятая в России среднесуточная предельно допустимая концентрация для Б(а)П. $Q = 780 Cr$, где множитель 780 выбран с целью обеспечить в дальнейшем наглядность диаграммы сопоставления загрязнения с показателями метаболитов бенз(а)пирена в растениях (таблица 3).

Таблица 2 – Значения комплексного показателя загрязнения атмосферы (КПЗА), показателя загрязнения атмосферы серосодержащими (ПЗА_S) и азотсодержащими выбросами (ПЗА_N) на исследуемых площадках наблюдения

№ ПН	название ПН	КПЗА	ПЗА _S	ПЗА _N
1	Сквер у заводоуправления ГРЭС (ул. Станционная, 17)	17,968	0,404	1,642
2	Парк им. Горького (вблизи пр. Кезнецкого)	10,429	0,395	1,858
3	Территория станции Юннатов (пр. Шахтеров, 10)	8,132	0,526	1,293
4	Территория санатория «Журавлик» (ул. Терешковой, 7)	6,871	0,452	1,339
5	Сквер им. Шахтеров (между пр. Шахтеров и ул. Институтской)	6,281	0,503	1,482
6	Территория сельской больницы (ул. Авроры, 12)	6,208	0,457	1,178

Таблица 3 – Расчетные значения среднего за летний период загрязнения атмосферы Б(а)П на исследуемых ПН

Расчетные показатели	Исследуемые ПН					
	1	2	3	4	5	6
$Cr = C / ПДКс$	0,1485	0,1508	0,1740	0,1649	0,1760	0,1384
$Q = 780 Cr$	116,0	117,6	135,7	128,5	137,1	108,0

Расчетные показатели не являются нормативными гигиеническими критериями, поскольку далеко не все учтенные вещества обладают эффектом однонаправленного воздействия на человека. Они носят смысл «суммарной техногенной нагрузки», создаваемой промышленностью посредством атмосферного переноса загрязнения на ту или иную территорию города.

Глава 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены в 2009–2013 гг. В качестве объектов исследований выбраны 3 древесные породы, представленные в насаждениях исследуемых площадок наблюдения – ель сибирская, береза повислая и рябина сибирская средневозрастного генеративного состояния (Смирнова, Чистякова, Попадюк и др., 1990).

3.1. Эколого-биологическая характеристика изучаемых видов древесных растений

Береза повислая, поникающая или бородавчатая (*Betula pendula* Roth).

Дерево до 25 м высотой. Ствол до 80 см в диаметре, с белой, очень редко розоватой гладкой корой (берестой). На старых стволах иногда у отдельных деревьев кора растрескивается и становится темно-серой или почти черной и твердой. Ветви чаще всего повислые, с блестящей бурой или красновато-бурой корой. Молодые побеги большей частью голые, блестящие, густо покрытые смолистыми бородавками. Листья от треугольно-яйцевидных до ромбических и обратнояйцевидных, острые, иногда удлинненно-остроконечные, с основаниями от сердцевидных и усеченных до клиновидных, двояко-пильчато-зубчатые, молодые блестящие и клейкие. Плодовые сережки цилиндрические, повислые. Плодовые чешуйки 4–6 мм длиной, орешки 1,5–2,5 мм длиной, продолговато-эллиптические с крылышками. Сокодвижение наступает в первой декаде мая. Появление первых листьев и цветение у березы наступает почти одновременно и через месяц или немного позже после начала сокодвижения. Зеленеет и зацветает береза в первой декаде мая, а через 70–80 дней созревают семена и начинают рассеиваться. В среднем рассеивание семян березы наступает в начале третьей декады июля. Пожелтение листвы у березы наступает во II – III декадах августа, а заканчивается в конце сентября и I половине октября. Береза, по требовательности к воде, относится к мезофитам, а по требовательности к

наличию в почве элементов питания к мезотрофам, однако способна произрастать и на более бедных почвах. Успешно растет на песчаных почвах, на суглинистых, оподзоленных, на деградированных черноземах и каменистых почвах. Лучше развивается на свежих супесчаных и суглинистых почвах. Береза бородавчатая плохо переносит высокие стояния грунтовых вод. Корневая система сильно разветвлённая, неглубокая. Долговечность до ста лет. (Коропачинский и др., 2002; Шипулин и др., 1970; Шиманюк, 1964). По Николаевскому В.С. (1979; 2002) береза является неустойчивой к диоксиду серы и хлору, среднеустойчива к окислам азота и к аммиаку.

Рябина сибирская (*Sorbus sibirica* Hedl.).

Дерево или кустарник до 20 м высотой. Кора стволов и старых ветвей коричневато-серая, гладкая. Молодые побеги и почки от голых до белоопушенных. Почки обычно не клейкие. Листочки продолговато-ланцетовидные, эллиптические, острые и тупые, пильчато-зубчатые, сверху матовые, голые, снизу от голых до опушенных. Прилистники цельнокрайные или пильчатые, часто рано опадающие. Мезофит, засухоустойчив и зимостоек. Эутроф, но переносит и бедные почвы, резко снижая при этом скорость роста и не достигая больших размеров, теневынослив. Рост быстрый. Долговечность более 100 лет (Качалов, 1969; Коропачинский, 1983; 2002).

Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.).

Дерево первой величины до 30–35 м высоты, со стволом до 70 см в диаметре с узкоконусовидной кроной.

Кора стволов серая, трещиноватая. Молодые побеги продольно-рубчатые, усажены короткими и толстыми рыжеватыми волосками или голые. Хвоя четырехгранная, линейно-шиловидная, 5–22 мм длиной, колючая обычно темно-зеленая. Вечнозеленое однодомное анемофильное растение. Мезофит, мезотроф, очень теневынослива. Размножается семенами. Цвести начинает в различных районах Сибири с середины мая до начала июня. Семена созревают во второй половине сентября. Несолеустойчива. Рост медленный. Долговечность до 300 лет. (Галактионов и др., 1963; Коропачинский, 1983; Коропачинский, 2002).

3.2. Методы проведения исследований

Для исследований с каждой ПН использовали по 5 средневозрастных деревьев наиболее типичного жизненного состояния.

Физиолого-биохимические исследования проводили трехкратно за вегетацию – в середине июня, июля и августа. Отбор проб листьев проводили в утренние часы, с южной стороны, с нижней части кроны с годичных побегов. У ели собирали хвою второго года вегетации, которая считается наиболее физиологически активной (Диагностика состояния насаждений..., 1990).

Оценку фотосинтетической способности древесных растений проводили бескамерным методом (Быков, 1974), который позволяет рассчитать интенсивность фотосинтеза (ИФ) по количеству углеводов, образующихся в листьях (хвое) на каждый грамм их исходного содержания ($\text{мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) (расчет на сырую массу листа). Мерой содержания восстановленных веществ являлась оптическая плотность раствора в области спектра 590–610 нм. Опытные образцы экспонировали в течение 4-х часов при $t = 25 \pm 2$ и освещенности 25–30 тыс. люкс. Фиксацию и сжигание растительных образцов проводили раствором бихромата калия в серной кислоте.

Содержание пероксидазы определяли по методу А.Н. Бояркина (Ермаков и др., 1987). Метод основан на определении скорости реакции окисления бензидина под действием фермента, содержащегося в растениях, до образования окрашенного продукта (синего цвета) определенной концентрации, заранее устанавливаемой на спектрофотометре.

Изучение активности перекисного окисления липидов в растительных тканях, осуществляли по содержанию малонового диальдегида (МДА) (Мокроносова, 1994). Метод основан на образовании окрашенных продуктов с максимумом поглощения при 532 нм в результате реакции малонового диальдегида с тиобарбитуровой кислотой (ТБК).

Содержание фотосинтетических пигментов – хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли спектрофотометрированием 80%-й ацетоновой

вытяжки при соответствующих длинах волн $\lambda=663$, 645 и 440,5 нм на спектрофотометре Leki SS 1207 (Гавриленко, 1975).

За пять лет исследований (2009–2013 гг.) проанализировано 810 образцов для определения физиолого-биохимических показателей (интенсивности фотосинтеза, активности пероксидазы, содержание МДА и фотосинтетических пигментов).

Морфо-биометрические исследования проводили на 5 модельных деревьях каждой ПН, у которых метили по 10 ветвей нижней трети кроны дерева по периметру. Размеры побегов в длину измеряли каждые 10 дней до прекращения роста с помощью железной линейки с точностью до 0,1 см. После прекращения роста листьев на годичном побеге определяли их массу (сырую и сухую) взвешиванием на весах с точностью до 0,1 г. Листья и хвою сушили в сушильном шкафу при 105 °С до полного высыхания. Площадь листьев определяли путем их сканирования с последующей обработкой изображения с помощью компьютерной программы *Image Tools*.

Для атомических исследований растительный материал (листья и хвою) собирали в конце июля и фиксировали в 60 % растворе этилового спирта (Фурст, 1979). Из средней части листовой пластинки делали поперечные срезы микротомом и помещали их в глицерин. Измерения анатомо-морфологических признаков хвои проводили с помощью микроскопа Аксиоскоп-2+, модель ZEISS N HBO103 and N HBO75 (Германия) с окулярным микрометром, фотокамерой и программным обеспечением.

Растительный материал (листья и хвою) для анализа на содержание химических элементов собирали в конце августа, затем обмывали дистиллированной водой, подсушивали и фиксировали в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 15 мин с последующим досушиванием при температуре 65 °С в течение 2 ч. Содержание азота определяли методом Кьельдаля, модифицированным З. В. Чмелевой и С. Л. Тютеревым (Плешков, 1976). Содержание общей серы в растениях определяли спектрофотометрическим методом (Мочалова, 1975).

Оценка способности древесных растений метаболизировать бенз(а)пирен (Б(а)П) проведена на примере рябины сибирской. Для этих целей в экстрактах листьев идентифицировали метаболиты Б(а)П: Б(а)П-1,3-дион и моно- и дигидроксипроизводные – 1-гидрокси-Б(а)П и Б(а)П-7,8-дигидродиол и определяли их относительные содержания. Анализы выполнены в экспериментальной лаборатории ООО «Спектроника» (г. Москва) на жидкостном хроматографе Dionex Ultimate 3000 с масс-спектрометрическим детектором Applied Biosystems Qtrap3200.

Условия пробоподготовки и проведения анализа. Экстракты растительных проб готовили методом жидкостной экстракции. Навеску (1,7 г) помещали в круглодонную колбу с обратным холодильником, заливали 5 мл смеси гексан:ацетон (1:1) и помещали в ультразвуковую баню на 2 часа. Процесс экстракции проводили при температуре 45 °С. После этого экстракт фильтровали через фильтр 0,45 мкм, упаривали и перерастворяли в 1 мл ацетонитрила. 20 мкл экстракта вводили на колонку Phenomenex Synergi 50X2,0 мм 4 мкм. Температура колонки 25 °С. Элюент – ацетонитрил:ацетатный буфер 5мМ, 0,1 % муравьиной кислоты, градиент от 30 % до 100 % ацетонитрила, скорость потока – 0,8 мл/мин.

Для обнаружения в экстрактах метаболитов Б(а)П: Б(а)П-1,3-диона, 1-гидрокси-Б(а)Пна и Б(а)П-7,8-дигидродиола выбрали m/z соответствующие их протонированным молекулярным ионам. По этим выбранным ионам провели детектирование с предварительным хроматографическим разделением экстракта и получили хроматограмму по выделенным ионам. Детектирование: масс-спектрометрическое, источник ионизации – химическая ионизация, потенциал коронного разряда 3 кВ, температура источника 500 °С, потенциал декластаризации 55 В, давление газа реагента 45 PSI. Оптимизацию условий ионизации проводили подавая раствор метаболитов БП из шприца прямым вводом в источник химической ионизации. Условия ионизации: ионизация – положительная, потенциал коронного разряда 3 кВ, температура источника 500 °С, потенциал декластаризации 55 В, скорость инфузии 3 мкл/мин.

Относительное содержание метаболитов БП определяли полуколичественным методом. Для этого полученные масс-хроматограммы по трем MRM-переходам обсчитывали следующим образом: по каждому метаболиту выбирали хроматограмму экстракта с максимальной площадью пика этого метаболита, принимали эту площадь за 100 % и рассчитывали содержание этого метаболита в остальных экстрактах, в процентах от площади этого пика.

Для оценки загрязнения снега серо- и азотсодержащими выбросами исследуемых ПН исследован состав анионов (сульфатов и нитратов) в снеговых пробах (Институт неорганической химии СО РАН, Коковкин В.В.).

Математическую обработку результатов проводили с использованием пакета прикладных программы Statistika 8.0. Для определения достоверных различий между результатами опытного и контрольного вариантов использовали t-критерии Стьюдента, где t-критерий Стьюдента сравнивали с теоретическими рассчитанным t-критерием, который определили по специальным таблицам (Лакин, 1990; Зайцев, 1984). Различия считали достоверными на первом уровне значимости ($P < 0,05$).

ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ, МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И АНАТОМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В ГРАДИЕНТЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТ ПРОМЗОНЫ Г. КЕМЕРОВО

4.1. Оценка окислительных процессов растений по активности пероксидазы и уровню малонового диальдегида

Пероксидазы (К.Ф. 1.11.1.7.) – широко распространенные ферменты, обнаружены фактически во всех зеленых растениях, подавляющем большинстве грибов и аэробных бактериях. Ввиду широкого функционального разнообразия эти ферменты принимают участие как в ряде физиологических, так и детоксикационных процессах. Предполагается, что в растениях основная часть органических токсикантов окисляется пероксидазами (Квеситадзе и др., 2005). Эта гипотеза базируется на следующих экспериментально обоснованных соображениях: широкое распространение пероксидазы в растениях; высокое сродство с органическими ксенобиотиками различных химических структур, обеспечивающее практически универсальную субстратную специфичность.

Кроме того, повышенное содержание в атмосферном воздухе окислов азота и диоксида серы вызывает в клетках растений усиление цепных свободнорадикальных процессов и образование органических перекисей, с помощью которых пероксидаза окисляет субстраты.

Вышесказанное послужило причиной исследовать активность пероксидазы у древесных растений в зоне влияния выбросов промышленных предприятий.

Пятилетние исследования показали, что рябина характеризуется наиболее высокими показателями активности пероксидазы (1,96...12,56 ед. акт.), далее следует береза (1,06...8,49 ед. акт.) и минимальные показатели активности пероксидазы характерны для ели (0,80...6,02 ед. акт.). В годы исследований (2009 – 2013 гг.) выявлено, что в непосредственной близости к промзоне (1ПН и 2ПН) активность пероксидазы возрастает в сравнении с 6ПН у всех исследованных

видов (ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Активность пероксидазы в листьях древесных растений на ПН), но при этом не наблюдается линейной зависимости показателей ферментативной активности от расстояния до промзоны на промежуточных ПН.

Результаты исследования окислительных процессов показали, что в течение вегетации наиболее низкой вариабельностью показателей активности пероксидазы в градиенте концентраций промышленных выбросов от промзоны характеризуются береза (1,06...8,49 ед. акт.) и ель (0,80...6,02 ед. акт.), максимальная вариабельность значений активности пероксидазы характерна для рябины (1,96...12,56 ед. акт.).

Выявлено, что в непосредственной близости к промзоне (1ПН и 2ПН, расстояние от промзоны - 1 км, КПЗА 17,968...10,429) активность пероксидазы возрастает у всех исследованных видов древесных пород в сравнении с 6ПН. В среднем за 5 лет максимальная активация фермента в непосредственной близости к промзоне (1ПН) в сравнении с наиболее удаленной – 6ПН характерна для хвой ели сибирской – активность пероксидазы возрастает в 2,34...3,1 раза с максимумом в конце вегетации (таблица Б.1 ПРИЛОЖЕНИЯ); у березы и рябины значения активности фермента лежат в близких пределах: у рябины возрастание активности пероксидазы происходит в 1,9...2,3 раза, у березы – в 2,3...2,4 раза с максимумом в начале вегетации (июне). Однако, не всегда наблюдается линейная зависимость показателей ферментативной активности в хвое и листьях растений от расстояния до промзоны на 3ПН, 4ПН, и 5ПН. Имеются также отличия в степени активации фермента у различных видов растений по годам.

Так в вегетационный период 2009 г. у березы повислой отмечалась максимальная активация пероксидазы при приближении к источнику выбросов: активность фермента возрастала на 1ПН на 208, 325 и 309 % в июне, июле и августе соответственно по сравнению с 6ПН (рисунок 6); у ели сибирской по мере приближения к источнику выбросов отмечалось минимальное повышение активности данного фермента (на 5–105 %) (таблица Б.1 ПРИЛОЖЕНИЯ).

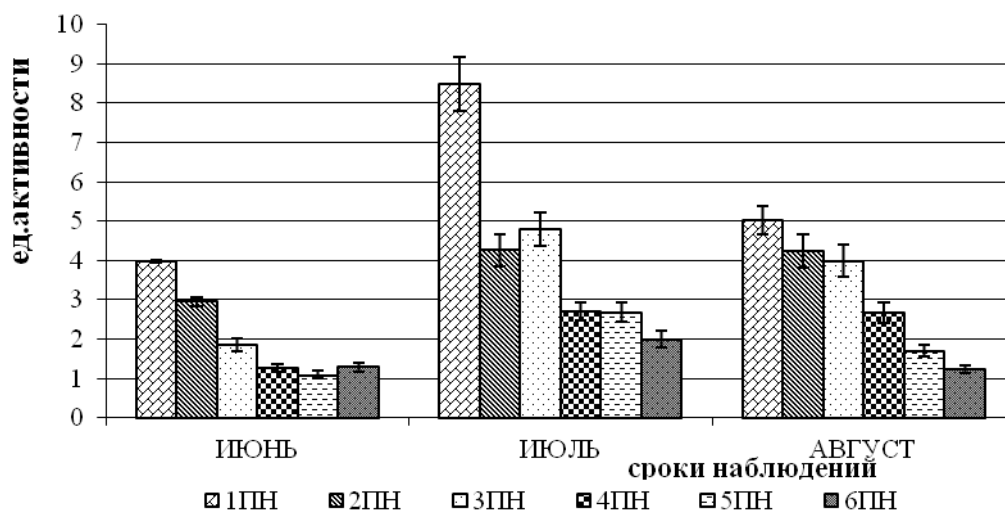


Рисунок 6 – Активность пероксидазы в листьях березы повислой на исследуемых ПН (данные 2009 г.)

В 2010 г. максимальной активностью пероксидазы вблизи промзоны (1ПН) характеризовалась ель: в июле и августе наблюдалось повышение активности фермента в 3,4 и 4,4 раза соответственно (рисунок 7). У рябины максимальная активация пероксидазы наблюдалась на 2ПН и 1ПН в июне (в 1,8 и 1,7 раза), у березы – в августе (в 1,9 и 1,5 раза соответственно в сравнении с 6ПН).

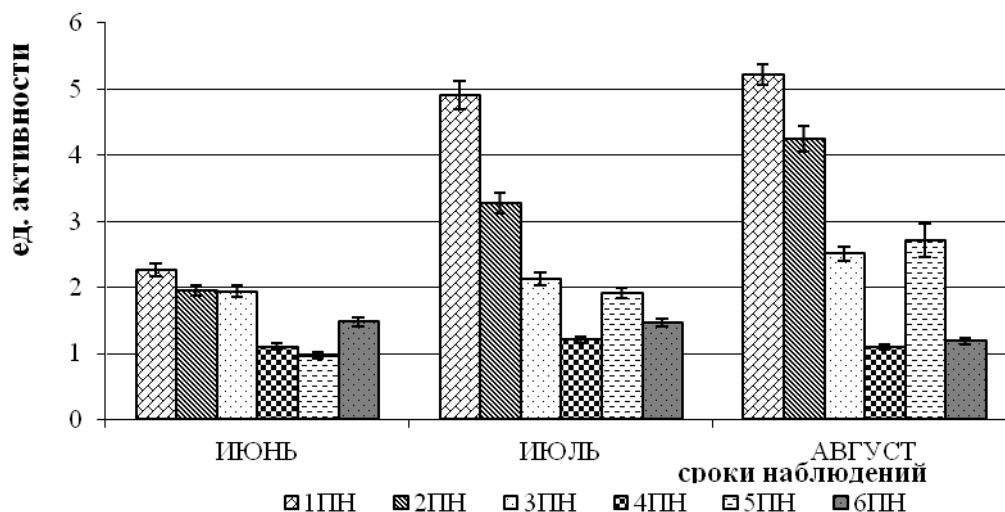


Рисунок 7 – Активность пероксидазы в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (данные 2010 г.)

В 2011 г. у рябины наибольшая активация пероксидазы выявлена на 1ПН и 2ПН, причем в большей степени на 2ПН – выше в 4,4 и 2,6 раза в июне, в 4,5 и 2,4

раза в июле, в 4,7 и 2,7 раза в августе соответственно в сравнении с 6ПН (рисунок 8). У березы активность пероксидазы также была выше на 2ПН и превосходила значения данного показателя на 6ПН в 2,9, 1,9 и 2,4 раза соответственно в июне, июле и августе. У ели максимально активность фермента повышалась на 1ПН и в большей степени в начале и конце вегетации (в июне в 2 раза, в августе в 2,5 раза) (таблица Б.3 ПРИЛОЖЕНИЯ).

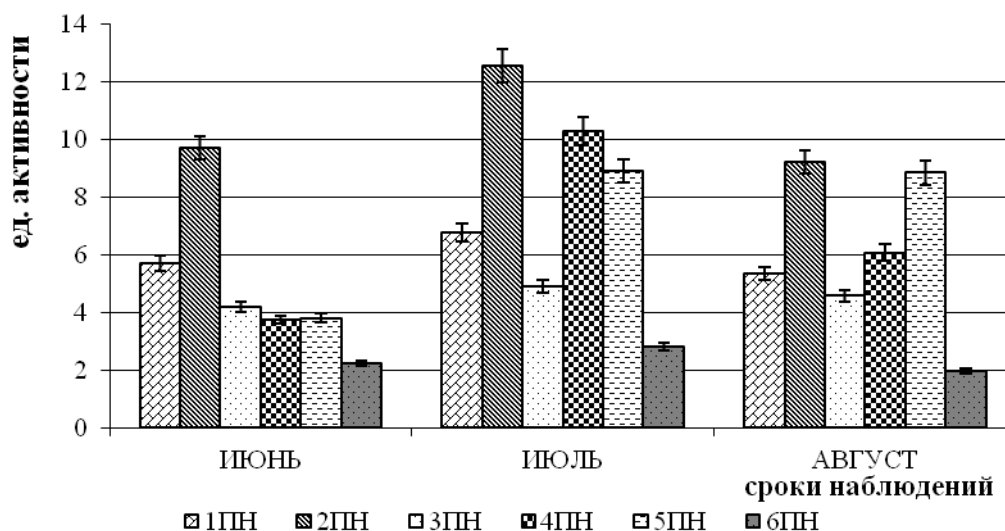


Рисунок 8 – Активность пероксидазы в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН (2011 г.)

В 2012 г. у ели наблюдалась максимальная активация пероксидазы по мере приближения к источнику выбросов, так активность фермента возрастала на 1ПН на 143, 320 и 262 % в июне, июле и августе соответственно в сравнении с 6ПН (рисунок 9).

У рябины наибольшая активность пероксидазы выявлена на 1 и 2ПН, причем на 2ПН в большей степени в июне – выше на 80 % , а на 1ПН в июле – выше на 98 % соответственно в сравнении с 6ПН. У березы максимальная активация пероксидазы отмечалась на 1ПН и превышала значения данного показателя на 6ПН на 144, 96 и 150 % соответственно в июне, июле и августе.

В 2013 г. максимальной активацией пероксидазы вблизи промзоны (1ПН) характеризовалась ель: в июне, июле и августе наблюдалось повышение активности фермента в 3,7, 2,3 и 3 раза соответственно в сравнении с 6ПН

(рисунок 10). У рябины максимальная активация пероксидазы на 1ПН наблюдалась в июле – выше в 2,1 раз, а на 2ПН в августе – выше в 2,2 раза в сравнении с 6ПН соответственно. У березы максимальная активность пероксидазы наблюдалась на 1 и 2ПН в июне – выше в 2,9 и 2,4 раза в сравнении с 6ПН соответственно.

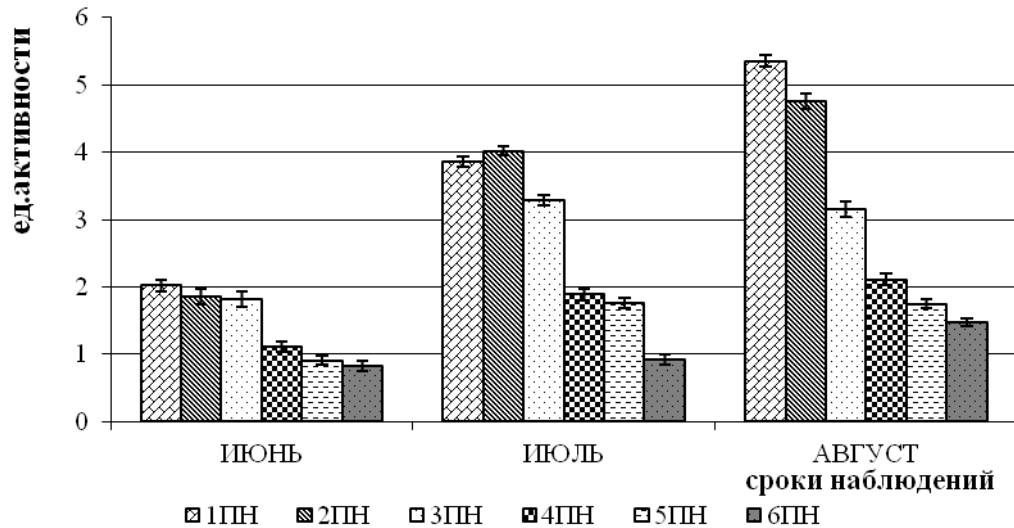


Рисунок 9 – Активность пероксидазы в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (данные 2012 г.)

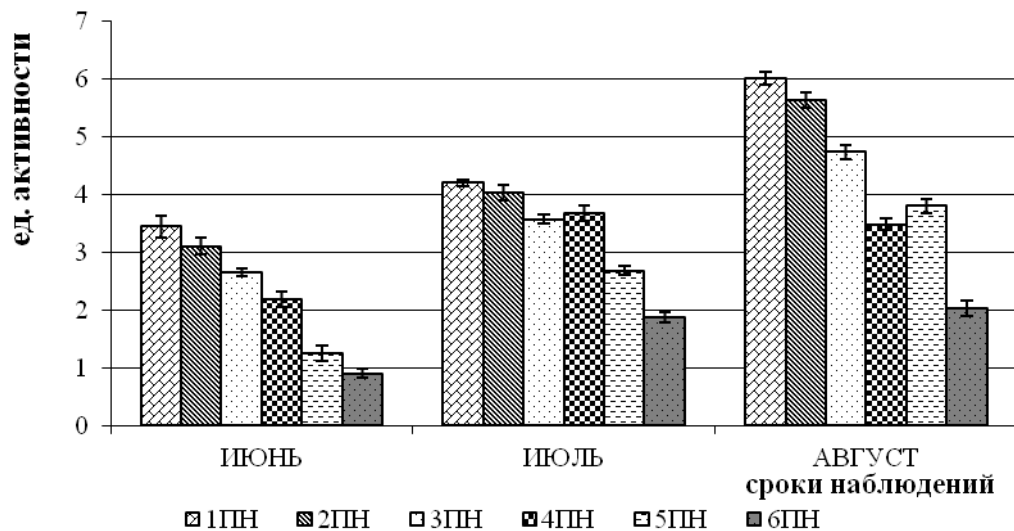


Рисунок 10 – Активность пероксидазы в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (данные 2013 г.)

Стимуляция активности пероксидазы у исследуемых растений по мере приближения к промзоне может быть вызвана увеличением содержания в

атмосферном воздухе комплекса загрязнителей – органических токсикантов (в частности ПАУ), окислов азота и диоксида серы.

Первые служат для пероксидазы субстратами для окисления, вторые – вызывают в клетках растений усиление цепных свободнорадикальных процессов и образование органических перекисей, с помощью которых пероксидаза окисляет субстраты. Однако следует отметить, что не наблюдается линейной зависимости активности фермента от удаленности ПН относительно промзоны. В частности во все периоды наблюдений отмечается более низкая активность пероксидазы у растений на 4ПН (ближе расположенной к источнику выбросов) в сравнении с 5ПН и 6ПН (более удаленных от промзоны).

В литературных источниках имеются некоторые данные об изменении активности пероксидазы в листьях древесных растений при воздействии различных загрязняющих факторов. Так Т.А. Михайлова (1996) установила, что в условиях г. Иркутска в хвое лиственницы европейской, сосны обыкновенной и ели сибирской при сильном поражении фтористыми соединениями происходит значительное повышение пероксидазной активности.

Сидорович с соавторами (2004) определили, что в условиях г. Минска активность пероксидазы в хвое ели колючей повышается как по мере увеличения абсолютного возраста хвои, так и с нарастанием техногенной нагрузки. Так, на территории ЦБС выявлено 2 пика активности пероксидазы в 2-х летней хвое ели колючей – весенний и летний, когда активность фермента составляет 364,2 и 250,1 % от уровня контроля соответственно.

В.Г. Еремеева и Е.С. Денисова (2011) отмечали, что при экспозиции растений парами углеводородов происходило увеличение активности пероксидазы у березы повислой, ивы белой, клена ясенелистного, сосны обыкновенной, тополя черного и яблони ягодной.

В.С. Воскресенский с соавторами (2011) определили, что в условиях г. Йошкар-Олы хвоя (листья) *P. sylvestris*, *B. pendula* и *T. cardata* характеризовались высокими значениями пероксидазы в промышленной зоне. Аналогичная тенденция выявлена и другими исследователями в условиях

загрязнения окружающей среды кислыми газами (Рачковская и др., 1980, Николаевский, 1979).

При этом некоторыми учеными обнаружено снижение активности пероксидазы в хвое ели при повышенных концентрациях сернистого газа и озона в воздухе (Castillio et.al., 1987).

Нами выявлена положительная корреляционная связь активности пероксидазы у исследуемых растений на исследуемых ПН с КПЗА: у березы $r = 0,68; 0,72; 0,63$ ($n = 90, p < 0,05$), у рябины $r = 0,62; 0,38; 0,45$ ($n = 90, p < 0,05$), у ели $r = 0,54; 0,58; 0,69$ ($n = 90, p < 0,05$). Это подтверждает существенную роль загрязнения атмосферы в активации пероксидазы у древесных растений.

В литературе имеются сведения, о том, что в ходе реакций окисления, катализируемых пероксидазой и другими ферментами – оксидоредуктазами возникают активные формы кислорода. Генерация активированных форм кислорода может вызывать повреждения в клетке, и в первую очередь повреждение мембранных структур. Это приводит к перекисному окислению ненасыщенных жирных кислот липидов мембран. Одним из продуктов перекисного окисления липидов является малоновый диальдегид.

В связи с вышесказанным для нас представлял интерес изучить процесс перекисного окисления липидов в древесных растениях по содержанию малонового диальдегида (МДА).

Результаты изучения перекисного окисления липидов по содержанию малонового диальдегида (МДА), свидетельствуют, что у всех видов древесных растений наблюдается тенденция к увеличению количества МДА при приближении к промзоне. Так в годы исследований на 1ПН наиболее активно процесс перекисного окисления липидов происходил в хвое ели – содержание МДА в среднем возрастает в 1,57...2,5 раза в сравнении с 6ПН. Из лиственных пород наиболее интенсивно данный процесс происходил у рябины: на 1ПН в среднем за 5 лет количество МДА в листьях возрастало в 1,65...1,9 раза в сравнении с 6ПН с максимумом в начале вегетации. У березы интенсивность перекисного окисления липидов была чуть ниже, чем у рябины. Четкой

зависимости содержания МДА в хвое и листьях растений от расстояния до промзоны на 3ПН, 4ПН, и 5ПН выявлено не было. (ПРИЛОЖЕНИЕ В. Содержание МДА в листьях исследуемых древесных растений).

Сравнительная характеристика по годам показала, что в 2009 г. отмечаются самые высокие показатели содержания МДА, а самые низкие – в 2010 г. Так в вегетационный период 2009 г. максимальное количество МДА отмечается у березы повислой – в течение вегетации его содержание на ПН колеблется от 12 до 68 нмоль/г (рисунок 11). Минимальное содержание МДА отмечается у рябины сибирской (от 8 до 34 нмоль/г в сроки наблюдений с июня по август) (таблица В.2 ПРИЛОЖЕНИЯ).

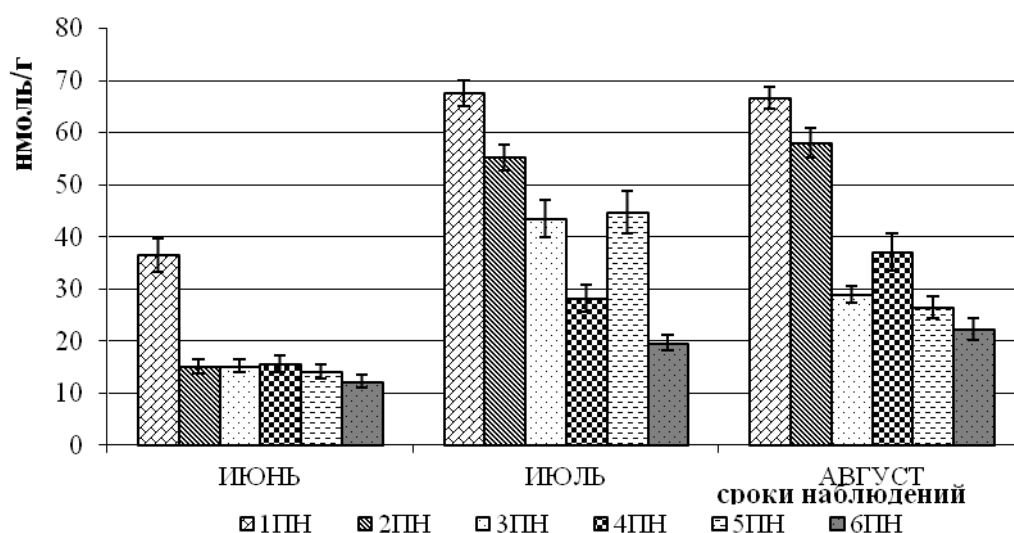


Рисунок 11 – Содержание малонового диальдегида в листьях березы повислой на исследуемых ПН (данные 2009 г.)

Максимальная стимуляция процесса перекисного окисления липидов в 2009 г. отмечается у березы на 2 и 1ПН, причем в июле содержание МДА увеличивается в 2,8 и 3,5 раз соответственно. У ели более выражены процессы перекисного окисления липидов мембран в начале и конце вегетации: в июне содержание МДА увеличивается на 1ПН в 6,4 раза, в августе – в 3,9 раза в сравнении с 6ПН. У рябины содержание МДА существенно возрастает на 1ПН в июне – в 4 раза, а на 2ПН в августе – в 3 раза (таблица В.2 ПРИЛОЖЕНИЯ).

В 2010 г. содержание МДА в листьях и хвое растений существенно ниже (на порядок) в сравнении с 2009 г. Тем не менее, в 2010 г. также сохраняется тенденция увеличения содержания МДА в листьях и хвое исследуемых растений по мере приближения к промзоне. Так у ели процесс перекисного окисления липидов более выражен в августе и на 1ПН, 2ПН, 3ПН содержание МДА в 1,5; 2,3 и 1,7 раза превышает данный показатель в сравнении с 6ПН (рисунок 12). У березы и рябины на 1 и 2ПН во все сроки наблюдений отмечается стабильное повышение окислительных процессов в сравнении с 6ПН (наиболее удаленной), в среднем за вегетацию содержание МДА выше в 1,2–1,6 раза.

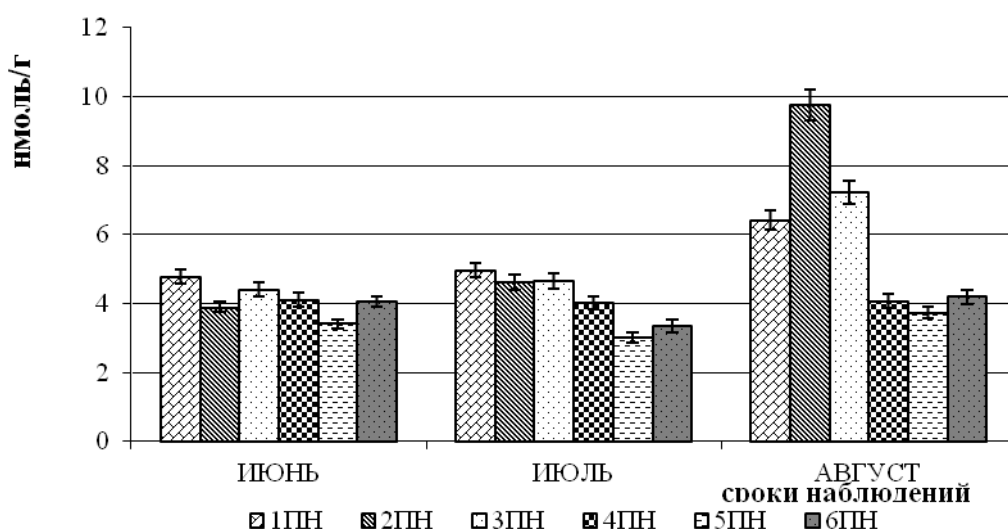


Рисунок 12 – Содержание малонового диальдегида в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (данные 2010 г.)

Меньшая интенсивность перекисного окисления липидов у растений исследуемых ПН в 2010 г. возможно связана с большим количеством осадков, которые способствовали смыву загрязнителей с поверхности листьев и хвои, что предотвращало их проникновение внутрь.

Результаты содержания МДА у растений в 2011 г. превосходили значения 2009 г., но были существенно ниже, чем в 2009 г. В 2011 г. аналогично предыдущим годам (2009 г. и 2010 г.) сохраняется тенденция к увеличению содержания МДА в листьях и хвое исследуемых растений по мере нарастания уровня промышленного загрязнения (с 5ПН по 1ПН) (ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Содержание МДА в листьях исследуемых древесных растений). У исследуемых растений на 1ПН в сравнении с 6ПН отмечается возрастание содержания МДА в среднем за вегетацию: у ели в 1,4...1,6 раз (рисунок 13), у рябины в 1,1...1,4 раза, у березы в 1,1...1,2 раза.

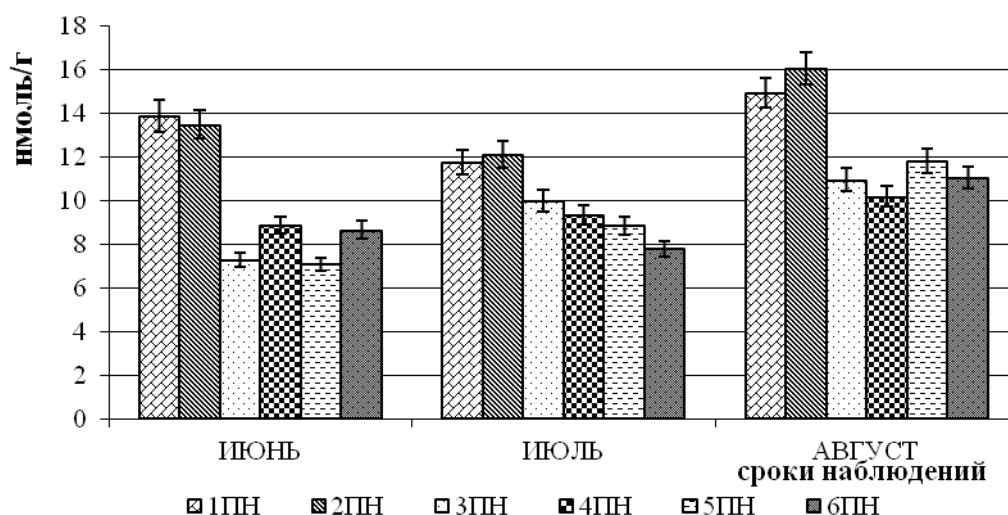


Рисунок 13 – Содержание малонового диальдегида в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (данные 2011 г.)

В 2012 и 2013 гг. содержание МДА превышало значения 2010 и 2011 гг., но было существенно ниже 2009 г. В 2012 и 2013 гг. сохраняется тенденция к увеличению содержания МДА по мере приближения к промзоне. В 2012 г. из исследованных растений максимальное увеличение содержания МДА наблюдалось у ели: на 1ПН в июне и августе в 1,7 раз, на 2ПН в августе в 1,8 раз превышает данный показатель значения на 6ПН (рисунок 14). У остальных исследуемых растений максимальная активация МДА отмечалась на 1ПН: у рябины в среднем за вегетацию значения возрастали в 1,3...1,6 раза, у березы в 1,4...1,5 раз.

В 2013 г. максимальная стимуляция перекисного окисления липидов наблюдалась у ели, причем в июне на 1ПН была выше в 1,4 раза, а в августе на 2ПН – выше в 1,8 раза, соответственно в сравнении с 6ПН (рисунок 15). У остальных исследуемых растений максимальные значения МДА наблюдались на

1ПН: у рябины значения были выше в среднем за вегетацию в 1,3...1,5 раза, у березы в 1,4...1,5 раза.

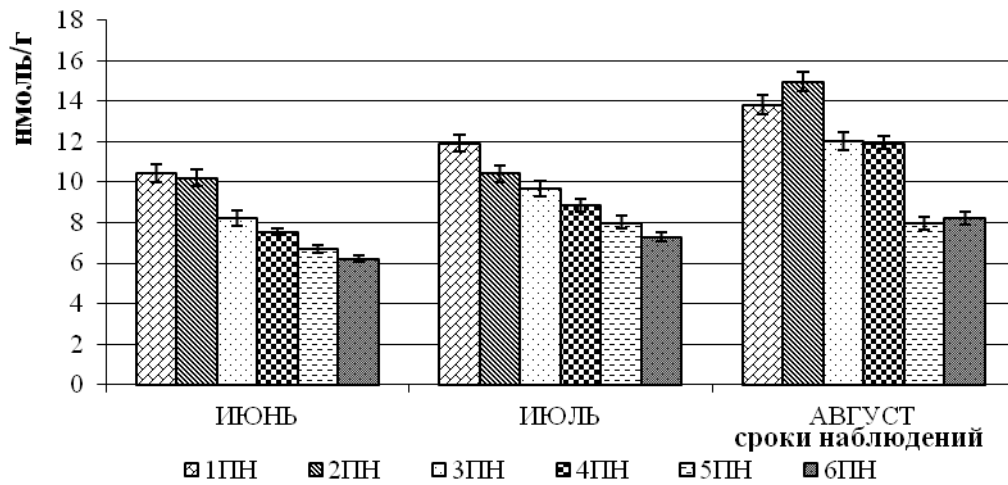


Рисунок 14 – Содержание малонового диальдегида в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (данные 2012 г.)

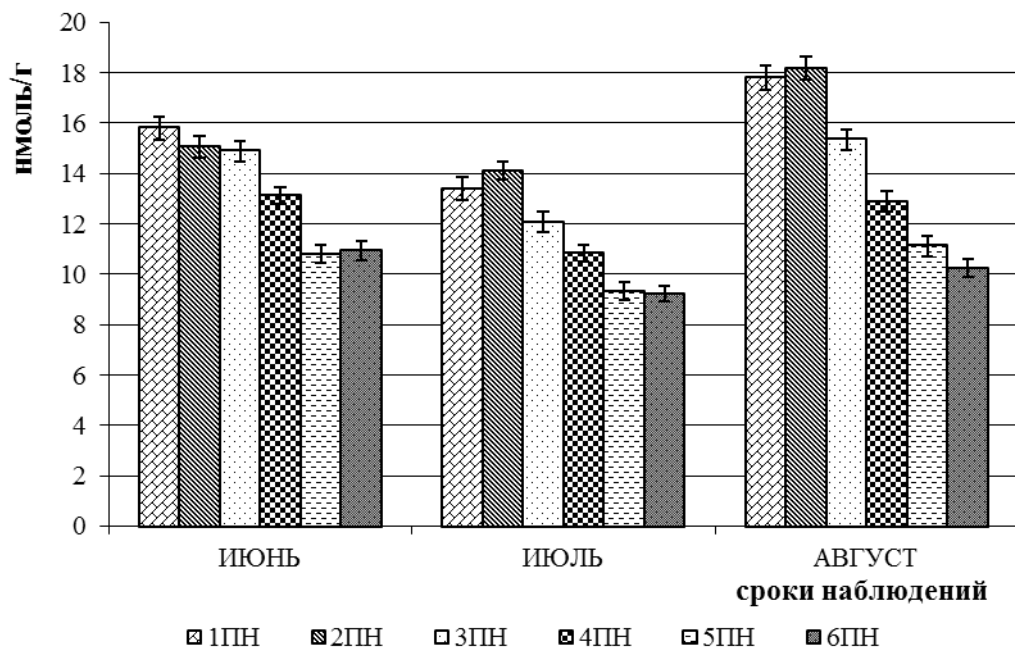


Рисунок 15 – Содержание малонового диальдегида в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (данные 2013 г.)

Однако не всегда наблюдается линейная зависимость между содержанием МДА и степенью удаленности ПН. За пятилетний период наблюдений процесс

перекисного окисления липидов шел наиболее интенсивно в конце периода вегетации.

Зарубежными и отечественными исследователями показано, что содержание МДА, являющегося продуктом перекисного окисления фосфолипидов мембран, в листьях растений определяется их видовой принадлежностью. Так А.Р. Гарифзянов (2012) в условиях г. Тулы установил увеличение содержания малонового диальдегида в условиях промышленного загрязнения среды у трех лиственных пород: *Betula pendula* Roth, *Populus nigra* L., *Tilia cordata* Miller. и определил виды, у которых окислительные процессы снижались в тех же самых условиях, это: *Sorbus aucuparia* L., *Acer platanoides* L., *Larix sibirica* Ledeb.

Е.А. Ерофеева (2013) в условиях г. Нижний-Новгород определила увеличение липопероксидации в листьях березы повислой в зоне сильного промышленного загрязнения.

В литературе имеются противоречивые сведения о влиянии тяжелых металлов на перекисное окисление липидов мембран у растений. Рядом зарубежных авторов было установлено, что накопление металлов в (Cu, Cd, Pb, Co, Hg и Mn) в окружающей среде приводит к увеличению содержания МДА в растениях (Tewari et al., 2002; Yurekli and Porgali, 2006; Goncalves et al., 2007). Другие исследователи зафиксировали уменьшение количества МДА при воздействии тяжелых металлов. Так Goncalves et al., (2007) установил, что у растений *Cucumis sativus* при воздействии тяжелых металлов происходит снижение МДА. Sinha et al. (1996) определили, что концентрация МДА снижалась в растениях *Vasopa monnieri* обработанных Hg в различных концентрациях. Zhang et al., (2007) установили, что при экспозиции Pb и Cd растения *K. candel* происходило уменьшение содержания МДА, а в растениях *B. gymnorrhiza* содержание МДА увеличивалось. Как объясняют авторы, растения *K. Candel*, по-видимому, лучше защищены от окислительного стресса повышенным содержанием окислительных ферментов.

Нами установлена достоверная положительная корреляционная связь содержания МДА с КПЗА у исследуемых растений: у березы в июне $r = 0,49$ ($n = 90$, $p < 0,05$), у рябины в июне и июле $r = 0,48$; $0,36$ ($n = 90$, $p < 0,05$), у ели в июне и августе $r = 0,45$; $0,52$ ($n = 90$, $p < 0,05$).

Таким образом, выбросы предприятий промзоны г. Кемерово вызывают стимуляцию окислительных процессов в клетках растений, что выражается в увеличении активности пероксидазы и перекисного окисления липидов мембран. Максимальная стимуляция окислительных процессов в листьях и хвое растений отмечается при комплексном показателе загрязнения атмосферы (КПЗА) 17,968...10,429 – на расстоянии 1 км от промзоны.

4.2. Содержание зеленых пигментов и фотосинтетическая способность древесных растений

Очевидно, что в наибольшей степени окислительным повреждениям подвержены структуры, функция которых непосредственно связана с метаболизмом кислорода. Функционирование ассимиляционных тканей растений протекает при интенсивном облучении светом с выделением в ходе синтетической реакции кислорода. Такие условия создают потенциальную угрозу развития в клетке фотодеструктивных повреждений. Хлоропласты, в которых осуществляется процесс фотосинтеза и фотоокисления воды с образованием молекулярного кислорода, являются теми структурами клетки, в которых образование кислородных радикалов происходит с наибольшей интенсивностью. Получен большой фактический материал, свидетельствующий о важной роли фотодеструктивных процессов в структурных и функциональных нарушениях ассимиляционных тканей при действии на растения многих токсических веществ (Мерзляк, 1989). Установлено, что фотодеструкция представляет собой процесс окислительной деградации, который затрагивает, в первую очередь, пигменты и липиды фотосинтетических мембран.

В связи с вышесказанным, и в связи с вышерассмотренными окислительными процессами, происходящими в клетках растений по мере приближения к источнику выбросов, представляется интересным оценить количество пигментов – хлорофиллов *a*, *b* и отношения хлорофиллов *a/b* в листьях исследуемых растений.

Исследованиями установлено, что максимальные значения содержания зеленых пигментов наблюдались у березы, а минимальные у ели, у рябины значения данного показателя были средними. Кроме того, в большинстве случаев наибольшая концентрация хл. *a* и хл. *b* приходилась на июль – период наибольшей физиологической активности древесных растений.

Результатами пятилетних исследований установлена тенденция к снижению содержания хлорофилла *a* и *b* у всех трех древесных пород растений по мере приближения к промзоне. Максимальное снижение концентрации хлорофилла *a* с 5ПН по 1ПН (в сравнении с 6ПН) отмечалось в 2009 г. – в среднем за вегетацию значения были ниже у ели в 1,1–1,9 раза, у рябины в 1,1–1,9 раза, у березы в 1,1–2,2 раза (рисунок 16).

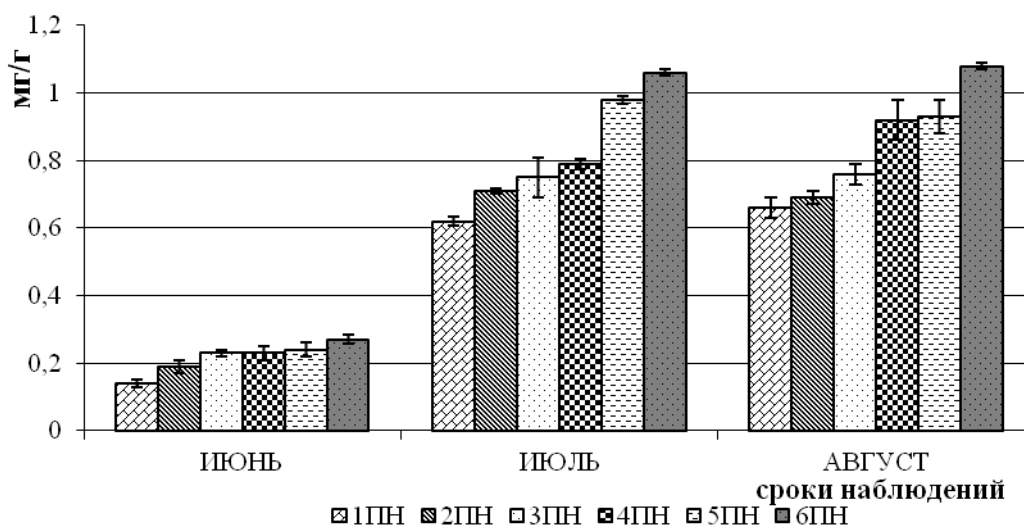


Рисунок 16 – Содержание хлорофилла *a* в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (2009 г.)

Минимальное снижение концентрации зеленых пигментов приходилось на 2013 г. – в среднем за вегетацию содержание хлорофилла *a* было ниже у ели в

1,1–1,4 раза, у рябины и березы в 1,1–1,2 раза соответственно (ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Содержание хлорофилла *a* в листьях исследуемых древесных растений).

Концентрация хлорофилла *b* в сравнении с хлорофиллом *a* у исследуемых растений в 2009–2013 гг. была гораздо меньше и на ПН снижалась в большей степени. При этом максимальное снижение содержания хл. *b* с 5ПН по 1ПН в сравнении с 6ПН приходилось на 2009 г. – в среднем за вегетацию значения были ниже у ели в 1,1–3,8 раз, у березы в 1,1–3 раза, у рябины в 1,1–4,7 раз (рисунок 17), а минимальные значения отмечались в 2010 г. – в среднем за вегетацию значения были ниже у ели в 1,1–1,8 раза, у березы в 1,1–1,5 раза, у рябины в 1,1–1,7 раз (ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Содержание хлорофилла *b* в листьях исследуемых древесных растений).

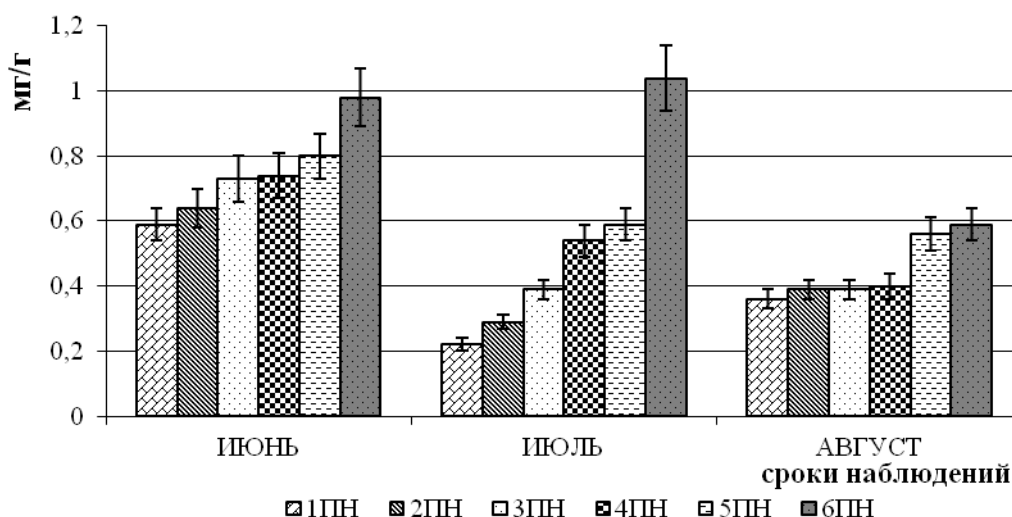


Рисунок 17 – Содержание хлорофилла *b* в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН (2009 г.)

Влияние газообразных токсикантов на пигменты пластид широко представлено в научной литературе. Рядом исследователей обнаружены перестройки фотосинтетического аппарата носящие негативный характер и как следствие приводящие к снижению содержания зеленых пигментов. Так О.Н. Дегтярева (2003) в условиях г. Горно-Алтайска установила снижение, как зеленых, так и желтых пигментов у видов семейства *Pinaceae* (ели сибирской,

сосны сибирской, сосны обыкновенной, пихты сибирской и лиственницы сибирской) при сильной антропогенной нагрузке. Г.А. Зайцев и А.Ю. Кулагин (2006) изучая сосну обыкновенную произрастающую в условиях нефтехимического типа загрязнения установили незначительное снижение содержания хлорофилла в хвое. А.П. Зотикова с соавторами (2007) в условиях г. Горно-Алтайска отмечали снижение содержания зеленых пигментов у ели сибирской, сосны обыкновенной и кедра сибирского в условиях сильного атмосферного загрязнения. Л.М. Павлова с соавторами (2010) в условиях г. Благовещенска выявили снижение количественного содержания основных групп фотосинтетических пигментов в листьях тополя Симони, ильма мелколистного и березы плосколистной, при возрастании концентраций тяжелых металлов в почве и воздухе. А.Н. Кизеев (2011) в районах городов Мончегорск – Полярные Зори – Кандалакша установил, что у сосны обыкновенной произрастающей вблизи металлургических предприятий и в условиях повышенного накопления хвоей радионуклидов содержание пигментов в хвое снижалось. В.Г. Еремеева и Е.С. Денисова (2011) отметили, что в условиях г. Омска аэротехногенное загрязнение вызывает значительное снижение хлорофиллов у березы повислой, в то время как у тополя черного и яблони ягодной происходит увеличение зеленых пигментов.

Отмечено, что при слабом техногенном воздействии происходит стимуляция пигментообразования, а высокие концентрации способствуют снижению накопления хлорофилла, что может являться следствием нарушения хлорофиллов, превращения их в феофитины и нарушения синтеза хлорофилла (Барахтенова, Николаевский, 1988; Сергейчик и др., 1999)

В наших исследованиях выявлены отрицательные корреляционные связи КПЗА с содержанием хлорофиллов *a* и *b* у исследуемых древесных пород: у ели с содержанием хл. *a* в июле и августе $r = - 0,56; - 0,68$ ($n = 90, p < 0,05$), с хл. *b* в июне – августе $r = - 0,61; - 0,64; - 0,62$ ($n = 90, p < 0,05$); у березы с хл. *a* июле и августе $r = - 0,68; - 0,63$ ($n = 90, p < 0,05$), с хл. *b* в июне – августе $r = - 0,49; -$

0,62; - 0,44 ($n = 90$, $p < 0,05$); у рябины с хл. *b* в июне – августе $r = - 0,55$; - 0,54; - 0,45 ($n = 90$, $p < 0,05$).

Важной характеристикой фотосинтетического аппарата является соотношение хлорофиллов *a/b*. Отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* у растений может характеризовать потенциальную фотохимическую активность листьев. Высокое содержание хлорофилла *a* и величина отношения хлорофилла *a/b*, могут, вероятно, служить признаком высокой потенциальной интенсивности фотосинтеза (Николаевский, 1979).

Согласно представлениям Х. Лихтенталлера (1982), изменения этого соотношения свидетельствуют о перестройках ультраструктуры, направленных на увеличение доли тилакоидов стромы или гран. Высокие показатели соотношения хлорофилла *a/b* характерны для «световых» хлоропластов, у которых преобладает доля тилакоидов стромы и они обладают большей эффективностью светоусвоения и более высокой степенью защиты мембран хлоропластов от фотоповреждений по сравнению с «теневыми» хлоропластами, где преобладают тилакоиды гран.

Полученные нами экспериментальные данные показывают, что у растений произрастающих в непосредственной близости к промзоне наблюдается тенденция к повышению отношения хл. *a/b*. Достоверное повышение данного показателя выявлено у растений на 1ПН и 2ПН (в июле), так в среднем за пять лет значения отношения хл. *a/b* возрастали в листьях рябины – в 1,7 и 1,6 раз, в хвое ели – в 1,7 и 1,8 раз, в листьях березы – в 1,5 и 1,3 раза соответственно в сравнении с 6ПН.

Сравнительная характеристика по годам показала, что максимальные показатели отношения хл. *a/b* у растений на 1ПН в сравнении с 6ПН выявлены в 2009 г. (июль): у ели выше на 122 %, у рябины на 2ПН – на 162 %, у березы на 1ПН – на 98 % (рисунок 18, ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Содержание хлорофилла *a/b* в листьях исследуемых древесных растений).

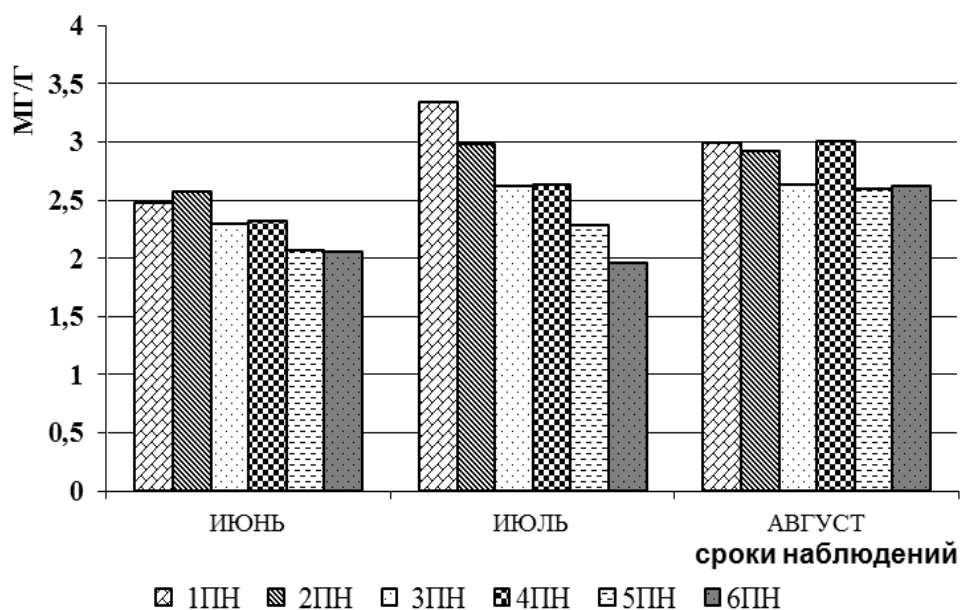


Рисунок 18 – Относительное содержание хлорофилла *a/b* в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН (средние значения за 5 лет.)

За годы исследований самое незначительное повышение отношения хл. *a/b* отмечено в 2011 г.; на 1ПН и 2ПН превышение значений в сравнении с 6ПН составляет (в июле): у ели 6...32 %, у рябины – 27...25 %, у березы – 23...9 % соответственно.

Как показывают экспериментальные данные, в 2009–2011гг. более существенное превышение значений отношения хл. *a/b* на 1ПН и 2ПН (июль) отмечалось у рябины, а в 2012 и 2013гг. – у ели.

Полученные нами данные по возрастанию соотношения хлорофилла *a/b* вблизи промзоны согласуются с литературными источниками. Так О.М. Соболева с соавторами (2009) в условиях г. Новокузнецка у сосны обыкновенной отмечали увеличение соотношения хлорофилла *a/b*.

М.С. Титова (2013) в условиях г. Уссурийска исследуя пигменты в хвое сосны обыкновенной обнаружила, что в условиях сильного и среднего уровня загрязнения происходит снижение общего содержания хлорофиллов и увеличение соотношения хлорофилла *a/b*, что подтверждается и в других научных исследованиях (Тужилкина, 2009; Чупахина и др., 2012).

В наших исследованиях выявлены положительные корреляционные связи между КПЗА и отношением хл. a/b у древесных пород в июле: у ели $r = 0,50$, у березы $r = 0,45$, у рябины $r = 0,51$ (при $n = 90$, $p < 0,05$).

Повышение соотношения хл. a/b при приближении к промзоне свидетельствует о том, что по мере нарастания уровня техногенной нагрузки у исследуемых растений происходит перестройка ультраструктуры хлоропластов в сторону «светового» типа. Это способствует повышению эффективности светоусвоения и степени защиты мембран хлоропластов от фотоповреждений и может рассматриваться как защитный механизм растений в условиях техногенной нагрузки.

Полученные выше результаты согласуются с данными по фотосинтетической способности растений на исследуемых ПН. В большинстве случаев вблизи источников выбросов (1ПН) у растений возрастает фотосинтетическая способность. В среднем за 5 лет фотосинтетическая способность на 1ПН возрастала у ели – в 1,6...2,3 раза (с максимумом в начале вегетации), у рябины – в 1,8...2,1 раза и у березы – в 2,0...2,5 раза с максимумом в июле. Следует отметить, что не всегда наблюдается линейная зависимость данного эффекта от расстояния до промзоны. Имеются также различия в способности растений к фотосинтезу по годам. Так, в 2009 г. у ели в июле на 2ПН отмечалось незначительное снижение синтеза ассимилятов в сравнении с 6ПН; у рябины и березы более существенное снижение синтеза ассимилятов отмечалось на 1ПН и 2ПН в августе – на 40 и 28 % и 63 и 51 % соответственно. У березы в 2009 г. на 1ПН повышение синтеза ассимилятов вблизи промзоны выявлено только в июне (в 1,8 раза), у рябины – в июне и июле (в 1,6 и 2,2 раза). Более выраженная тенденция в повышении синтеза углеводов у древесных растений вблизи промзоны отмечена в 2010–2013 гг. При этом в 2010 г. максимальное повышение фотосинтетической способности вблизи промзоны (1 и 2ПН) отмечается у березы в июле – выше показателей на 6ПН в 3,1 и 2,4 раза. В 2011 г. более существенные различия в синтезе углеводов отмечаются у растений в июле и августе. Повышение значений данного показателя в среднем за вегетацию

наблюдались в следующих пределах: у ели в 1,1–1,7 раза, у рябины в 1,1–2,4 раза, у березы в 1,1–3,3 раза. В 2012 г. максимальное повышение фотосинтетической способности вблизи промзоны (1ПН) наблюдалось у березы в июле – выше в 2,9 раза. У остальных древесных пород повышение данного показателя в среднем за вегетацию колебалось в следующих пределах: у ели в 1,1–2,2 раза, у рябины в 1,2–2,4 раза в сравнении с 6ПН. В 2013 г. более существенное повышение значений фотосинтетической способности у всех исследуемых растений приходилось на июнь: у ели в 1,2–2,2 раза, у рябины в 1,1–2,4 раза, у березы в 1,1–2,8 раза в сравнении с 6ПН.

Как показывают результаты, наибольшие отличия фотосинтетической способности на исследуемых ПН в сравнении с 6ПН отмечались у березы (рисунок 19, ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Фотосинтетическая способность листьев исследуемых древесных растений).

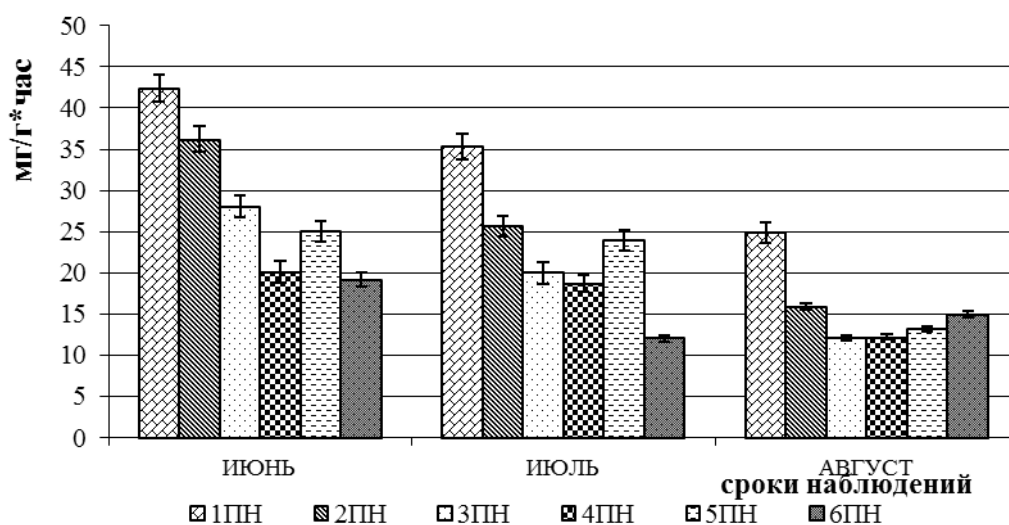


Рисунок 19 – Фотосинтетическая способность листьев березы повислой на исследуемых ПН (2012 г.)

Рядом ученых установлено, что при воздействии допустимого уровня загрязнения происходит возрастание фотосинтетической активности в листьях древесных растений. Так И.Л. Бухарина с соавторами (2010) в условиях г. Ижевска выявили возрастание интенсивности фотосинтеза в листьях березы повислой и клена ясенелистного в зоне влияния промышленных предприятий.

Аналогичную тенденцию наблюдали и другие исследователи (Илькун, 1978; Веретенников, 1980; Тарабрин, Кондратюк, Башкатов, 1986; Голубева, 1999; Поварницина, 2007; Бухарина, Поварницина, Ведерников, 2007). Имеются данные о том что, низкие концентрации SO_2 или SO_3^{2-} увеличивают скорость фотосинтеза (Барахтенова, 1980; Мальхотра, Хан, 1988).

Нами выявлены положительные корреляционные связи КПЗА с фотосинтетической способностью в июне и июле: у ели ($r = 0,55$; $0,43$ при $n = 90$, $p < 0,05$), у рябины ($r = 0,39$; $0,64$ при $n = 90$, $p < 0,05$).

4.3. Характеристика роста побегов и их элементов у исследуемых древесных растений

Работа фотосинтетического аппарата обеспечивает процессы роста и развития растений. Экспериментально установлено, что в среднем за 5 лет у исследуемых древесных растений отмечается тенденция к удлинению годичных побегов, причем в большинстве случаев этот процесс более выражен в начале вегетации у деревьев на 1 и 2 ПН в сравнении с 6 ПН. Так у ели в среднем за 5 лет на 1 ПН удлинение годичных побегов в конце мая было выше в 1,5 раз, у березы – на 2 ПН в 1,4 раза в сравнении с 6 ПН (рисунок 20); у рябины удлинение побегов по мере приближения к промзоне менее выражено и на 1 ПН годичный прирост был выше на 13 % в сравнении с 6 ПН. Однако имеются различия в интенсивности роста годичных побегов по годам, и нелинейный характер этого процесса в зависимости от расстояния до промзоны.

У березы за пятилетний период исследований удлинение годичного побега на 1 ПН в сравнении с 6 ПН наблюдалось только в начале вегетации с максимальными значениями в 2013 г. (на 116 % выше) и минимальными в 2011 г. (на 3% выше). В остальные даты наблюдений (с 11.06. по 13.07.) интенсивность роста боковых побегов на разных ПН сильно варьировало по годам.

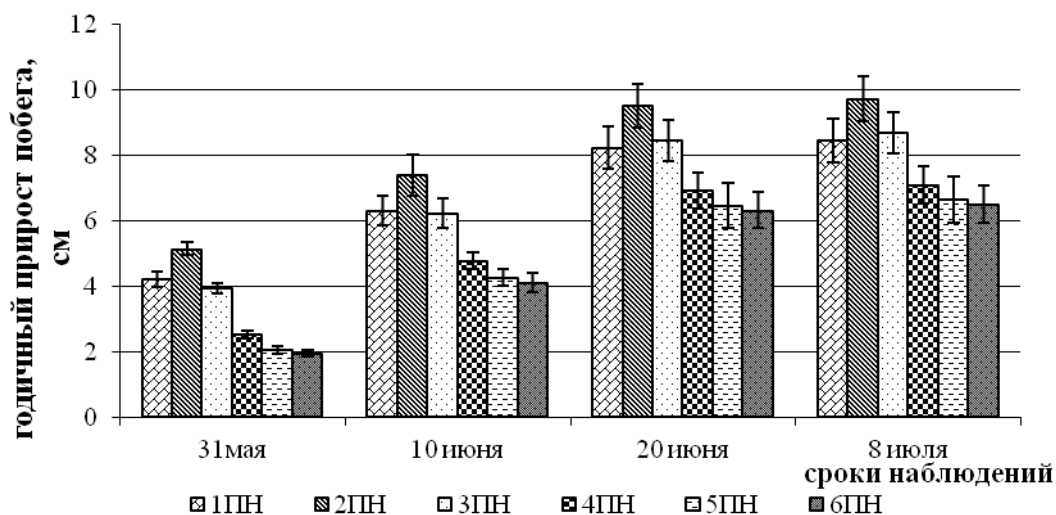


Рисунок 20 – Годичный прирост бокового побега березы повислой на исследуемых ПН (2013 г.)

Так в 2009 г. боковые побеги в течение всего периода роста удлинялись на 3–5ПН (на 3–18 % больше в сравнении с 6ПН), а в конце вегетации на 2ПН (на 15 % выше в сравнении с 6ПН).

В 2010 г. удлинение боковых побегов во все сроки наблюдений происходило на 2ПН – значения на 24...49 % выше в сравнении с 6ПН, а в начале и в конце вегетации прирост возрастал еще и на 4ПН (на 19 % и 5 % соответственно в сравнении с 6ПН).

В 2011 г. удлинение годичных побегов березы во все сроки наблюдений приходилось на 2–5ПН, что на 1...24 % было больше в сравнении с 6ПН.

В 2012 г. увеличение прироста бокового побега березы происходило во все даты наблюдений лишь на 1, 2 и 4ПН, где значения на 5...47 % были выше, чем на 6ПН.

В 2013 г. удлинение годичных побегов происходило на 1–5ПН (на 2... 164 % выше в сравнении с 6ПН) в течение всего периода роста.

У рябины на 1ПН в сравнении с 6ПН наблюдается удлинение годичных побегов с минимальными значениями в 2010 г. (на 1...14 %) и максимальными в 2012 г. (в начале вегетации выше на 54 % в сравнении с 6ПН) (рисунок 21).

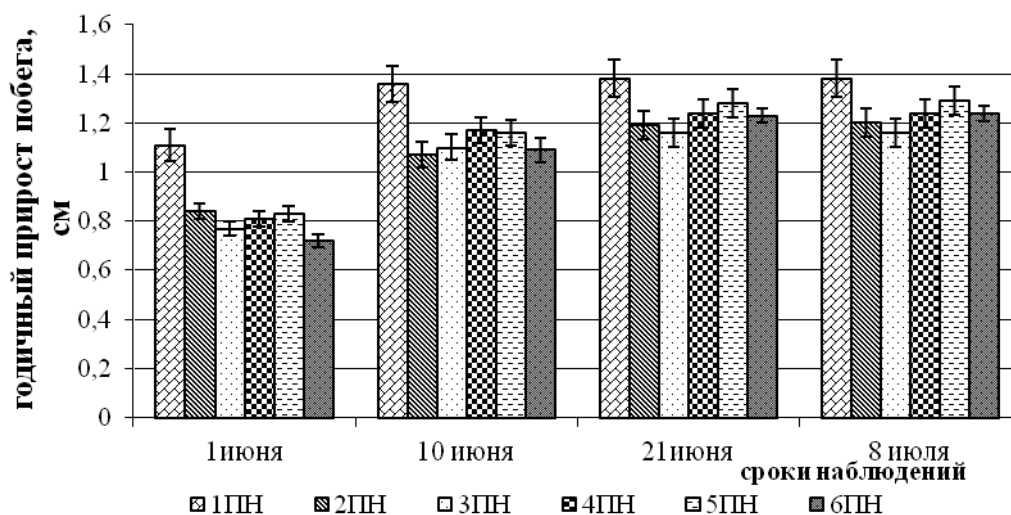


Рисунок 21 – Изменение годичного прироста боковых побегов у рябины сибирской на исследуемых ПН (2012 г.)

В 2009, 2011 и 2013 гг. удлинение побегов рябины в сравнении с 6ПН было выше на 4...48 %, 12...14 % и 2...25 %.

У ели в годы исследований отмечены различные ответные реакции роста годичных побегов. Так в 2009 г. выявлена тенденция к удлинению годичного побега в непосредственной близости к промзоне (1ПН) – на 20...90 % в сравнении с 6ПН с максимальными значениями в начале вегетации; на 2–5ПН побеги укорачивались без определенной зависимости от расстояния до промзоны.

В 2010 г. отмечено удлинение побегов по мере приближения к промзоне, но данная зависимость носила нелинейный характер от расстояния. В 2011 г. в начале вегетации годичный прирост боковых побегов ели существенно выше на 1ПН (на 28–46 % в сравнении с 6ПН), однако к середине вегетации данная тенденция меняется на противоположную – побеги ели на 1ПН растут менее интенсивно и их прирост ниже, чем на 6ПН в среднем на 12 % (ПРИЛОЖЕНИЕ И. Годичный прирост бокового побега исследуемых древесных растений).

В 2012 г. сохраняется тенденция к удлинению годичного побега в непосредственной близости к промзоне (1 и 2ПН) – на 17...75 % в сравнении с 6ПН с максимальными значениями в конце вегетации; на 3–5ПН побеги укорачиваются без определенной зависимости от расстояния до промзоны.

В 2013 г. отмечено удлинение годичного побега по мере приближения к промзоне, причем максимальные значения отмечались на 1ПН и 2ПН – выше на 55...77 % в сравнении с 6ПН с максимальными значениями в начале вегетации.

В литературных источниках широко представлены исследования интенсивности роста годичного побега и его элементов в условиях влияния промышленного загрязнения. Так Н.С. Бережная (2005) в условиях загрязнения фторсодержащими эмиссиями, в сосновых лесах Верхнего Приангарья, отмечала высокий уровень дефолиации крон, некрозы хвои, нарушение осевого ветвления, изменение формы кроны, суховершинность, снижение длины и массы хвои и побегов, сокращение продолжительности жизни хвои до 1–3 лет. Л.В. Афанасьева (2005) в районе промышленных узлов бассейна реки Селенги при загрязнении окружающей среды серой, фтором, кремнием, свинцом и железом наблюдала увеличение уровня дефолиации крон сосны обыкновенной, снижение продолжительности жизни хвои, длины побегов, массы и количества хвоинок на побеге. Л. Е. Мазунина (2009) своими исследованиями показала, что нефтяное загрязнение, на территории Самотлорского месторождения в Ханты-Мансийском автономном округе, значительно изменяет морфологию растения. Наблюдается уменьшение роста стебля в высоту, уменьшается его радиальный рост, значительно снижается площадь ассимиляционной поверхности растений и биопродуктивность. Р.О. Собчак (2009) в условиях г. Горно-Алтайска определила снижение ростовых процессов побегов хвойных пород (сосны обыкновенной, сосны сибирской, пихты сибирской, ели сибирской) подвергающихся действию атмосферного загрязнения. Аналогичные результаты были получены и ранее другими исследователями (Сергейчик, 1984; Алексеев, 1990; Николаевский, 1998). В научной литературе имеются данные о более высоком линейном приросте побегов у деревьев, произрастающих в условиях загрязнения (Тарчевский, 1964).

Нами установлена положительная корреляционная связь между КПЗА и годичным приростом бокового побега для ели в начале и середине роста ($r = 0,46$;

0,49; 0,42 при $n = 90$ и $p < 0,05$) и рябины в начале роста ($r = 0,44$ при $n = 90$ и $p < 0,05$).

Пятилетними исследованиями выявлена тенденция снижения площади и массы листьев и хвои годовичных побегов у древесных растений по мере приближения к промзоне, в большинстве случаев с более выраженными отличиями на 1ПН в сравнении с 6ПН и непрямой зависимостью от расстояния на промежуточных ПН.

В 2009 г. отмечались самые значительные отличия изучаемых показателей древесных растений на 1ПН в сравнении с 6ПН: у березы и рябины площадь листьев снижалась на 25 и 64 %, масса сухих и сырых листьев – на 24 и 51; 54 и 75 % соответственно; у ели площадь хвоинки снижалась на 59 %, масса 50 сухих и сырых хвоинок – на 164–158 % (рисунок 22, ПРИЛОЖЕНИЕ К. Площадь и масса листьев исследуемых древесных растений).

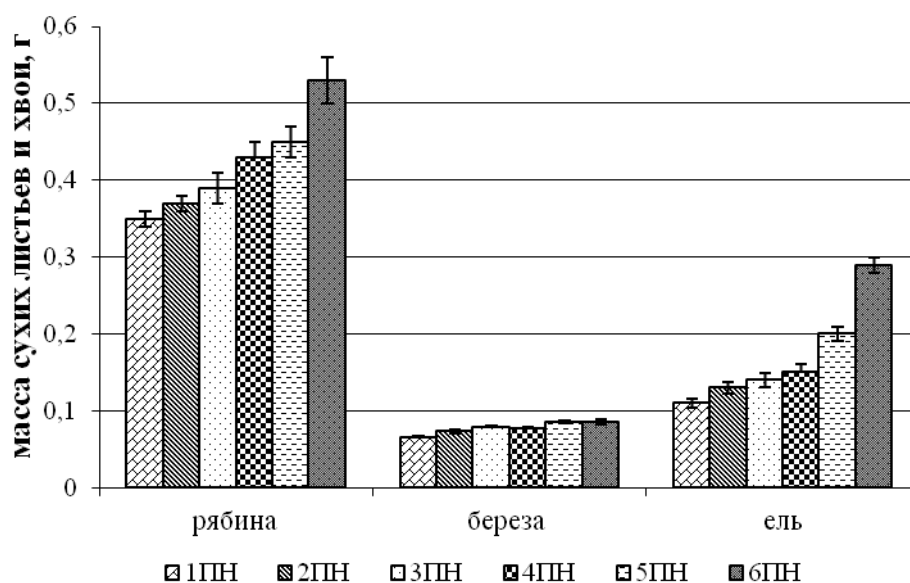


Рисунок 22 – Масса сухих листьев и хвои у исследуемых древесных пород на ПН (2009 г.)

В 2010–2011 гг. у березы площадь листьев годовичного побега на 1ПН в сравнении с 6ПН ниже на 22–23 %, масса сухих и сырых листьев в 2010 г. существенно не меняется, а в 2011 г. снижается на 33 %. У рябины площадь листьев годовичного побега снижается на 20–16 % в 2010–2011 гг., при этом масса

сухих и сырых листьев существенно не меняется. У ели в данный период отмечена однозначная тенденция к снижению массы и площади хвои на 1ПН – на 95...187 и 83 % соответственно. В 2012 и 2013 гг. у березы площадь листьев на годичном побеге на 1ПН в сравнении с 6ПН была ниже на 15–21 %, масса сухих и сырых листьев снижалась на 2–20 % и 8–26 % соответственно. У рябины площадь листьев годичного побега на 1ПН в сравнении с ПН 6 снижалась на 3–7 % , масса сухих и сырых листьев на 28–18 и 6–7 % в 2012–2013 гг. У ели в 2012–2013 гг. как и в предыдущие года наблюдалось снижение сухой, сырой массы и площади хвои на 1ПН, но с меньшей интенсивностью: ниже на 58 %, 53–43 % и 51–32 % соответственно.

В научной литературе описано негативное влияние техногенного загрязнения на морфологические признаки строения древесных растений. Так О.Н. Зубарева (1993) изучая влияние выбросов промышленных предприятий в Средней Сибири на сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris*) установила, что на начальных этапах загрязнения, происходит увеличение листовой массы с последующим ее снижением вплоть до полной редукции при накоплении загрязнителей.

Этот эффект соответствует неспецифическому адаптационному синдрому растений (Пахомова, 1995). Л.Е. Мазунина (2009) в условиях Саяно-Алтайского месторождения Ханты-Мансийского автономного округа установила уменьшение роста стебля в высоту, уменьшается его радиальный рост, снижается площадь ассимиляционной поверхности растений. Р.Ш. Убаева (2009) определила, что в условиях г. Грозного у клена остролистного уменьшаются некоторые морфологические признаки: листовая пластинка и длина черешка при увеличении загазованности среды.

Другими учеными установлены адаптивные перестройки, связанные с увеличением листовой поверхности в условиях повышенной техногенной нагрузки. Так Л.С. Лыкшитова с соавторами (2014) установили, что в условиях атмосферного загрязнения г. Улан-Удэ у ильма, сирени и яблони (*Ulmus pumila*, *Malus baccata*, *Syringa vulgaris*) увеличилась масса листа. А.П. Зотикова с

соавторами (2007) в условиях г. Горно-Алтайска выявили у *Picea obovata* Ledeb. в условиях повышенного атмосферного загрязнения увеличение площади поверхности хвои и длины хвои.

В наших исследованиях выявлена достоверная отрицательная корреляционная связь КПЗА с сухой массой хвои ($r = - 0,39$ при $n = 90$, $p < 0,05$) и с площадью хвои ели ($r = - 0,42$ при $n = 90$, $p < 0,05$), что подтверждает факт существенного влияния загрязнения атмосферы на снижение данного показателя.

4.4. Анатомические особенности строения листьев и хвои древесных растений

Для ранней диагностики состояния древесных растений и загрязнения атмосферного воздуха подходят характеристики ассимилирующих органов, которые в связи с их функцией газообмена являются первичным барьером при проникновении атмосферных токсикантов внутрь листа. В литературных источниках отмечается, что хроническое воздействие атмосферных токсикантов вызывает серьезные изменения анатомического строения листьев и хвои растений (Зотикова и др., 2007; Куровская, 2002; Кулагин, 1974; Николаевский, 1979).

Микроскопирование препаратов поперечных срезов хвои ели сибирской показало, что по мере приближения к промзоне (от 5ПН к 1ПН) отмечается снижение длины и площади поверхности хвои на 21–39 % и 26–57 % соответственно, по сравнению с 6ПН, максимально удаленной от источников выбросов (таблица 4). По мере нарастания техногенной нагрузки отмечается уменьшение диаметра центрального проводящего пучка (ЦПП): от 4ПН к 1ПН данный показатель снижался на 4–8 %.

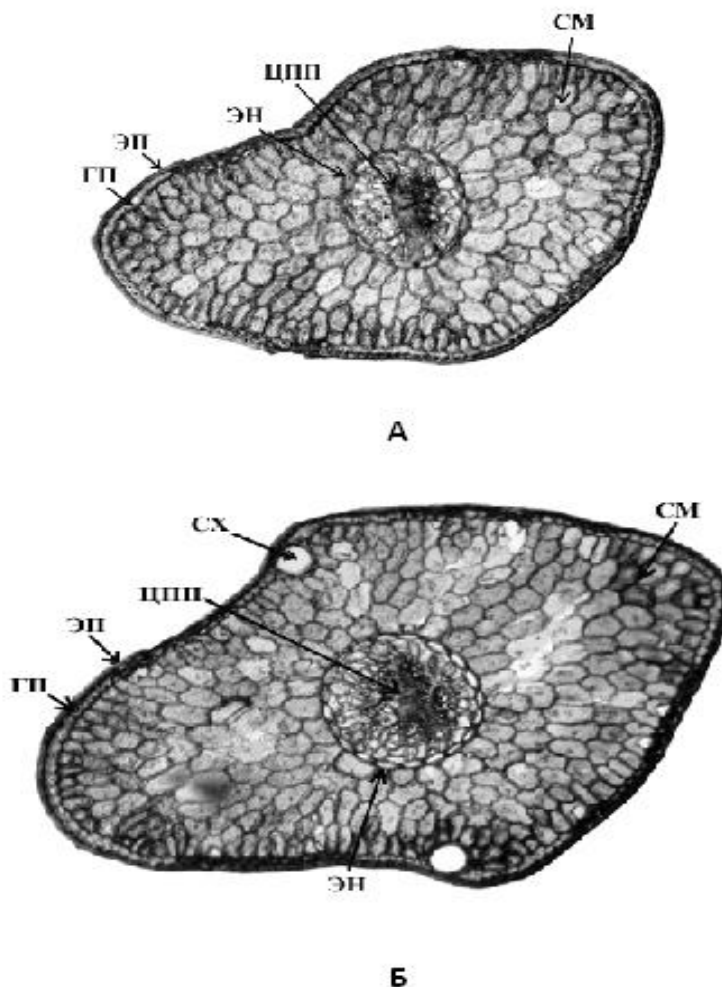
Таблица 4 – Анатомические и морфологические признаки строения хвои ели сибирской в условиях действия выбросов промзоны города Кемерово

Показатель	№ ПН					
	1	2	3	4	5	6
длина хвоинки, мм	17,34*±	13,96*±	17,90*±	15,55*±	14,54*±	22,73±
	0,63	0,52	1,01	0,66	0,52	0,33
площадь хвоинки, мм ²	41,93*±	32,33*±	48,9*±	37,94*±	39,46*±	66,47±
	1,25	2,31	3,10	3,30	1,40	2,20
периметр поперечного сечения хвои, мкм	237,17*±	235,26*±	269,49±	245,32*±	271,39±	290,14±
	4,62	11,34	6,32	7,94	7,93	7,19
величина асимметрии ЦПП, мкм	7,06*±	7,74*±	6,52±	3,80±	2,73*±	2,72±
	0,81	1,03	0,59	0,89	0,34	0,32
диаметр ЦПП, мкм	23,43±	24,2±	24,42±	23,43±	27,72±	25,52±
	0,99	0,65	1,91	1,00	1,08	0,72
толщина кутикулы, мкм	0,67±	0,53*±	0,65*±	0,61*±	0,64*±	0,76±
	0,05	0,04	0,06	0,06	0,03	0,03
толщина эпидермы, мкм	0,55±	0,58±	0,61±	0,53±	0,64±	0,54±
	0,05	0,06	0,05	0,04	0,07	0,03
толщина гиподермы, мкм	1,34*±	1,49±	1,46±	1,54±	1,60±	1,73±
	0,07	0,12	0,09	0,07	0,001	0,09
толщина эндодермы, мкм	2,11±	1,51±	1,65±	1,63±	1,40±	1,64±
	0,24	0,09	0,14	0,06	0,10	0,07

*- достоверные отличия от 6ПН

Установлено, что ЦПП в хвое ели располагается не строго по середине, а немного смещается относительно центральной оси, при этом наиболее сильно асимметрия была выражена у деревьев по мере приближения к источнику выбросов: на 4–1ПН асимметрия составляла 40–185 %. При этом максимальные значения асимметрии ЦПП наблюдались на 2ПН, а минимальные на 5ПН и

составляли 7,74 и 2,75 единиц соответственно. Отмечалась редукция количества смоляных каналов до одного или полное их отсутствие (рисунок 23).



Обозначения: А – 1ПН (сквер у проходной ГРЭС); Б – 6ПН (двор сельской больницы);

ЭП – эпидерма; ГП – гиподерма; СМ – складчатый мезофилл; СХ – смоляные ходы; ЭН – эндодерма; ЦПП – центральный проводящий пучок

Рисунок 23 – Поперечные срезы хвои ели сибирской произрастающей в условиях действия выбросов промзоны

Покровные ткани являются основным барьером между окружающей средой и внутренними тканями хвои, поэтому их состояние является очень важным диагностическим признаком. Кутикула образованна воскоподобным веществом и покрывает наружные стенки эпидермы. Кутикула защищает растения от излишнего испарения и проникновения болезнетворных микроорганизмов (Кравкина, 1991). Эндодерма выполняет функцию пограничной ткани между

внутренней и периферической частями хвои и отвечает за избирательный транспорт веществ к проводящим тканям (Эсау, 1969).

Полученные нами данные свидетельствуют, что по мере приближения к источнику выбросов отмечается неоднозначная реакция в развитии различных тканей хвои, толщина и площадь некоторых видов тканей увеличивается, других – редуцируется. Так толщина кутикулы и гиподермы (ткань, образованная одним или несколькими слоями субэпидермальных клеток) от 5ПН к 1ПН уменьшалась на 12–37 % и 8–23 % соответственно. По мере приближения к источнику выбросов (от 5ПН к 1ПН) в большинстве случаев происходило снижение площади поперечного среза хвои (на 21–54 %), площади мезофилла (на 22–54 %), площади центрального цилиндра (ЦЦ) (на 14–55 %).

В ряде работ сообщается об изменении анатомических признаков негативного характера у хвойных пород под воздействием техногенного загрязнения. В частности Р.О. Собчак с соавторами (2004) в условиях г. Горно-Алтайска установили уменьшение толщины кутикулы, эпидермы, эндодермы хвои ели сибирской, снижение длины и ширины устьиц, площади поверхности хвои, длины хвои, площади смоляных каналов, площади мезофилла и центрального цилиндра у сосны сибирской. О.М. Соболева с соавторами (2009) в условиях г. Новокузнецка выявили снижение ширины и высоты хвоинки, числа смоляных каналов, площадей центрального цилиндра и поперечного среза хвои сосны обыкновенной.

А.К. Фролов (1998) обнаружил, что в условиях г. Санкт-Петербурга наблюдалась редукция хвои сосны обыкновенной, в результате чего число клеток мезофилла на 1 см² листа в уличных посадках г. Санкт-Петербурга в два раза меньше, чем в г. Прага. С.А. Сергейчик с соавторами (1994) отметила угнетение роста и снижение длины годовых побегов и хвоинок сосны обыкновенной, в зоне слабого задымления.

Вместе с тем нами выявлены анатомические изменения хвои адаптивного характера. Так по мере приближения к источнику выбросов (от 3ПН к 1ПН) наблюдалось незначительное увеличение толщины эпидермы – на 2–13 %; в

непосредственной близости к промзоне (1ПН) происходило утолщение слоя эндодермы хвои на 29 %. Утолщение эпидермы и эндодермы можно рассматривать как усиление барьерных функций, направленных на ограничение поступления из воздуха токсических веществ внутрь хвои в первом случае, и ограничение поступления токсических веществ к проводящим пучкам во втором случае. Нами установлено, что с уменьшением количества смоляных каналов отмечалось возрастание их площади (на 17–50 %) (рисунок 24).

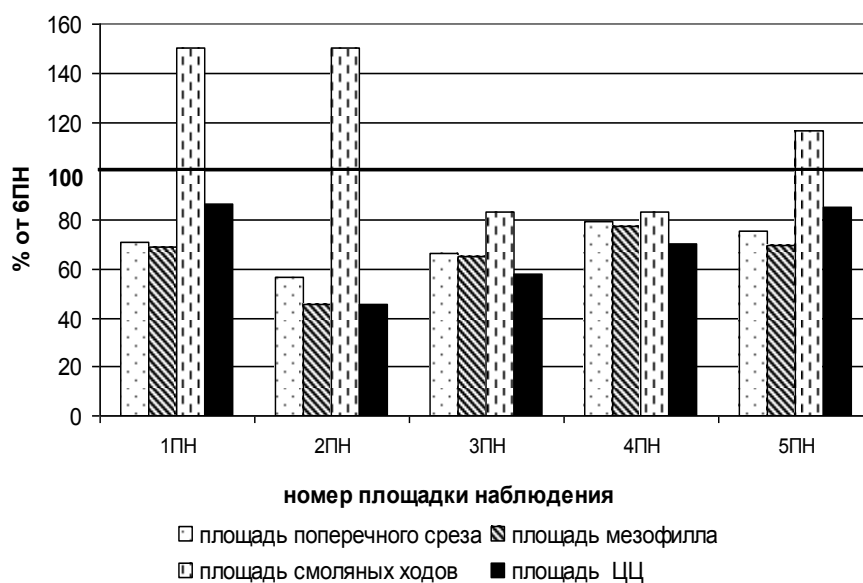


Рисунок 24 – Площади тканей хвои на поперечном срезе ели сибирской на исследуемых ПН

Смоляные каналы вблизи промзоны становились более короткими и одновременно более широкими. Подобные результаты получены А.А. Онучиным и Л.Н. Козловой (1993), которые установили, что в зоне выбросов КАТЭКа у сосны обыкновенной, происходит увеличение количества устьиц, числа смоляных каналов и их средней и суммарной площади поперечных сечений. Y. Nuhoglu (2005) обнаружил увеличение диаметра смоляных каналов в хвое *Pinus brutia* в зоне влияния ТЭЦ вблизи турецкого города Еникея. А.П. Зотикова с соавторами (2007) выявила защитные механизмы у ели сибирской и сосны обыкновенной в условиях атмосферного загрязнения. У ели сибирской увеличиваются толщина кутикулы, площадь мезофилла и центрального цилиндра, площадь поверхности

хвои и длина хвои. У сосны обыкновенной в техногенных условиях возрастает площадь мезофилла. К.В. Ладанова и С.Н. Плюснина (1998) в зоне действия выбросов целлюлозно-бумажного комбината г. Сыктывкара отметили увеличение площади поперечного сечения хвои сосны обыкновенной, в сосняке черничном.

Отношение площади ЦЦ к площади поперечного сечения хвои характеризует пропорциональность развития внутренних тканей и ее адаптивные возможности к внешним условиям.

В наших исследованиях данный показатель на 1ПН и 5ПН был значительно выше, чем на остальных площадках и составлял 22 и 14 % (в сравнении с 6ПН). Довольно часто это связано с активацией процессов выведения и детоксикации различных повреждающих агентов. Однако ценой такой адаптации бывает угнетение фотосинтетической функции листового аппарата, что структурно выражается в уменьшении площади мезофилла – основной ткани листа содержащей хлоропласты.

Данные корреляционного анализа показали достоверную связь комплексного показателя загрязнения атмосферы (КПЗА) с некоторыми анатомо-морфологическими характеристиками хвои ели сибирской: отрицательную связь с периметром поперечного сечения хвои ($r = - 0,5$, при $n=36$, $p<0,05$), толщиной гиподермы ($r = - 0,34$, при $n=36$ $p<0,05$), и положительную связь с толщиной эндодермы ($r = 0,51$, при $n = 54$, $p<0,05$), величиной асимметрии центрального проводящего пучка ($r = 0,41$, при $n = 34$, $p<0,05$) и площадью смоляного хода ($r = 0,42$, при $n=34$, $p<0,05$). Это свидетельствует о существенном влиянии промышленных выбросов на анатомо-морфологические перестройки хвои ели сибирской.

У рябины по мере увеличения техногенной нагрузки изменение анатомических показателей строения листовой пластинки выражено в меньшей степени, чем у ели. Толщина столбчатого, губчатого мезофилла и кутикулы варьирует в листьях рябины исследуемых ПН без особой тенденции. Тем не менее, отмечена тенденция к снижению высоты верхней и нижней эпидермы от

6ПН к 1ПН. Так на 2 и 1ПН высота верхней и нижней эпидермы листьев рябины снижается на 24; 30 % и 2; 16 % соответственно по сравнению с 6ПН (таблица 5).

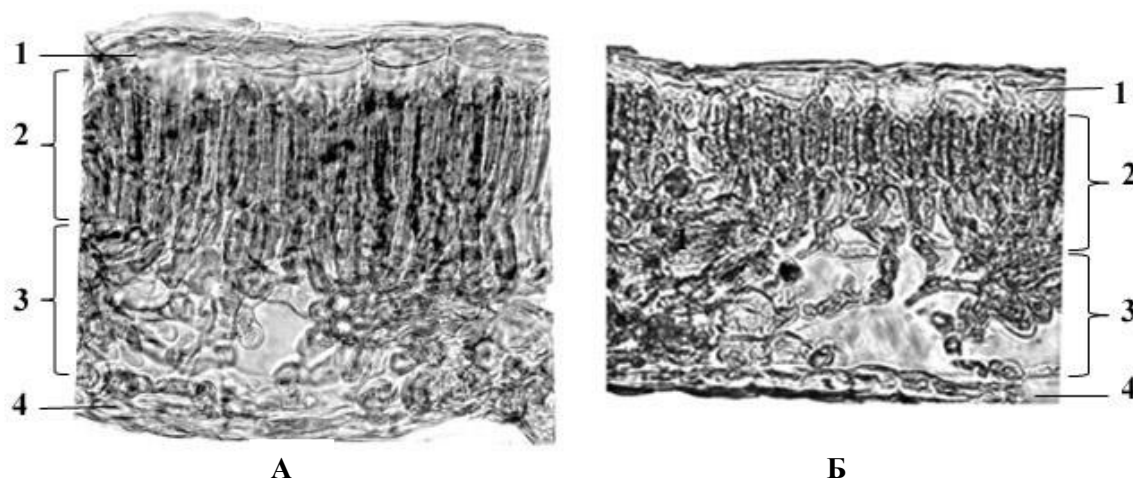
Таблица 5 – Анатомические признаки строения листовой пластинки рябины сибирской на исследуемых площадках наблюдения города Кемерово

Признаки	№ПН					
	1	2	3	4	5	6
толщина листовой пластинки, мкм	12,52*± 0,47	14,37± 0,6	13,18± 0,26	12,23*± 0,32	12,69*± 0,48	14,47± 0,57
высота клеток верхней эпидермы, мкм	1,56*± 0,07	1,64*± 0,10	2,08± 0,10	1,80*± 0,04	1,82± 0,10	2,04± 0,06
ширина клеток верхней эпидермы, мкм	2,22± 0,09	2,22± 0,17	2,26± 0,09	2,31± 0,09	2,1± 0,10	2,27± 0,08
высота клеток нижней эпидермы, мкм	1,49± 0,08	1,63± 0,06	1,61± 0,12	1,82± 0,08	1,67± 0,11	1,73± 0,09
ширина клеток нижней эпидермы, мкм	1,70*± 0,06	2,27± 0,13	2,10± 0,11	2,00± 0,08	1,89*± 0,05	2,10± 0,08
толщина столбчатого мезофилла, мкм	5,39± 0,29	6,11± 0,25	5,59± 0,15	5,02± 0,22	5,26± 0,22	5,52± 0,27
толщина губчатого мезофилла, мкм	4,80± 0,14	5,21± ,17	4,56± 0,19	4,24*± 0,16	4,57± 0,23	5,02± 0,28
толщина кутикулы, мкм	0,58± 0,04	0,59± 0,04	0,47*± 0,04	0,51± 0,04	0,51± 0,04	0,63± 0,05

*- достоверные отличия от 6ПН

Установлена достоверная отрицательная корреляционная связь КПЗА с анатомическими характеристиками листьев рябины: с толщиной клеток верхней и нижней эпидермы ($r = - 0,37$; $- 0,21$ при $n = 82$, $p < 0,05$), шириной клеток нижней эпидермы ($r = - 0,24$ при $n = 82$, $p < 0,05$).

У березы повислой отмечается нелинейный характер анатомо-морфологических изменений листовой пластинки в зависимости от расстояния до промзоны (рисунок 25).



*Примечание: А – 1ПН (сквер у проходной ГРЭС), Б – 6ПН (двор сельской больницы);
1 – верхняя эпидерма листа, 2 – столбчатый мезофилл, 3 – губчатый мезофилл,
4 – нижняя эпидерма листа;*

Рисунок 25 – Поперечный срез листа березы повислой произрастающей в условиях действия выбросов промзоны

Более значительные и достоверные отличия изучаемых показателей отмечаются на 1ПН и 2ПН в сравнении с 6ПН, наиболее удаленной от промзоны. Причем, у березы выявлено значительно меньше изменений негативного характера. Так в непосредственной близости к промзоне (1ПН) наблюдается тенденция к снижению толщины кутикулы и ширины клеток нижней эпидермы в сравнении с 6ПН – на 22 и 17 % соответственно (таблица 6).

Таблица 6 – Анатомические признаки строения листовой пластинки березы повислой на исследуемых площадках наблюдения города Кемерово

Признаки	№ПН					
	1	2	3	4	5	6
толщина листовой пластинки, мкм	17,60*± 0,80	14,04± 0,56	13,79± 0,65	16,53*± 0,34	14,81± 0,13	14,42± 0,44

Продолжение таблицы 6

Признаки	№ПН					
	1	2	3	4	5	6
толщина клеток верхней эпидермы, мкм	2,35*± 0,10	2,16± 0,05	1,96± 0,10	2,94*± 0,14	1,94± 0,09	1,97± 0,07
толщина столбчатого мезофилла, мкм	7,20*± 0,28	4,97± 0,33	4,83*± 0,21	5,80± 0,11	5,85± 0,19	5,67± 0,16
толщина губчатого мезофилла, мкм	7,46*± 0,31	6,27± 0,35	6,00± 0,22	6,66*± 0,21	6,44*± 0,14	5,82± 0,17
толщина кутикулы, мкм	0,49± 0,04	0,40± 0,06	0,47± 0,042	0,60± 0,052	0,54± 0,07	0,63± 0,08

* - достоверные отличия от 6ПН

Значительно больше у березы выявлено анатомо-морфологических изменений адаптивного характера в непосредственной близости к промзоне. В частности у березы с 1ПН в сравнении с 6ПН обнаружено достоверное увеличение толщины столбчатого и губчатого мезофилла (на 27 и 28 %), толщины листовой пластинки (на 22 %), толщины тканей верхней эпидермы (на 19 %).

На промежуточных площадках наблюдения изучаемые показатели меняются без определенной тенденции и их значения не достоверны в сравнении с 6ПН.

В мировой литературе имеется множество работ о влиянии факторов внешней среды на анатомо-морфологические характеристики листьев древесных растений. Анализ литературы показывает, что существуют противоречивые данные о анатомо-морфологических перестройках у растений в условиях техногенного загрязнения среды, что, по-видимому, определяется видовыми особенностями деревьев и степенью техногенного воздействия. В частности Bruno Francisco Sant'Anna-Santos et. al. (2006) исследовано действие кислотного дождя на структуру листа *Genipa americana* L.: обнаружены некротические пятна

на листовой пластинке, разрыв кутикулы в области некрозов, разрушение клеток эпидермы и столбчатого мезофилла, гипертрофия губчатого мезофилла. М.М. Liezel, G. M. Deemson, P. L. Fideliz (2013) установлены изменения длины листа *Tithonia diversifolia* (Hemsl), длины междоузлий, толщины и плотности эпидермы в условиях влияния выбросов автомобильного транспорта в Багио-Сити. Maya Kurteva, M., Katerina Stambolieva, K. (2007) выявлено снижение линейного прироста годовых побегов и листьев у *Acer pseudoplatanus* L., *Acer platanoides* L. и *Betula pendula* Roth в условиях промышленного загрязнения городской среды в Софии. Elina O Ksanen et. al. (2005) установили негативное воздействие озона и CO₂ на анатомические показатели листьев европейской березы (*Betula pendula* Roth). Повышение концентрации CO₂ и озона вызывало уменьшение толщины листьев. Воздействие озона вызывало также снижение толщины столбчатого мезофилла. Johanna Riikonen Kevin E. Percy et. al. (2010) установлено, что под действием озона и CO₂ у березы уменьшается размер и плотность клеток эпидермы.

Вместе с тем существует множество работ, авторы которых указывают на адаптивные изменения морфологических, анатомических и физико-химических показателей у растений в условиях неблагоприятных факторов внешней среды, позволяющие им выживать (Wyszkowski, Wyszkowska, 2003; Kovacic, Nikolic, 2005; Gomes et. al., 2011; Ristic and Jenks, 2002; Kapitonova, 2002; Uribe-Salas et. al., 2008; Snejana, 2005).

В непосредственной близости к промзоне выявлены достоверные корреляционные связи анатомических показателей листьев березы с КПЗА: с толщиной листовой пластинки ($r = 0,37$, при $n = 82$, $p < 0,05$), толщиной нижней эпидермы ($r = 0,22$, при $n = 106$, $p < 0,05$), толщиной столбчатого и губчатого мезофилла ($r = 0,43$, при $n = 100$, $p < 0,05$ и $r = 0,39$, при $n = 100$, $p < 0,05$). Это доказывает существенное влияние промышленных выбросов на анатомо-морфологические перестройки листовой пластинки березы повислой.

Таким образом, по анатомическим показателям тканей хвои и листьев наименьшую устойчивость в условиях нарастающей техногенной нагрузки

проявила ель и рябина сибирская, характеризующиеся самым большим числом негативных анатомических изменений, проявляющихся в уменьшении размеров клеток и объема тканей, а также в выраженной асимметрии ЦПП (у ели). Береза повислая характеризуется наибольшим количеством изменений анатомических признаков листьев адаптивного характера, связанных с увеличением размеров и клеток и тканей, что, по-видимому, обеспечивает ее более высокую устойчивость.

4.5. Изучение аккумулярующей способности древесных растений в отношении серо- и азотсодержащих примесей атмосферы

С целью повышения надежности оценки загрязнения атмосферы серо- и азотсодержащими выбросами в зоне распространения выбросов от промзоны (расстояние до 6,5 км), нами определено содержание общей серы и общего азота в сухих растительных образцах (хвое ели, листьях березы и рябины), собранных в летний период 2009 г. на исследуемых ПН (ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Содержание общей серы в листьях древесных растений на ПН).

Для оценки загрязнения воздуха и снега серо- и азотсодержащими выбросами исследуемых ПН, проведен расчет показателя загрязнения атмосферы данными примесями (ПЗА) и исследован состав анионов (сульфатов и нитратов) в снеговых пробах. При расчете (ПЗА) учтены примеси от предприятий промзоны и автодорог: диоксид азота, азотная кислота, аммиак, оксид азота, нитрат аммония в одном случае и серная кислота, диоксид серы, сера элементарная, сероводород, сероуглерод в другом случае.

Экспериментальные данные показывают, что на исследуемых ПН ель накапливает минимальное количество серы в сравнении с другими породами. Содержание общей серы в сухих образцах хвои колеблется в пределах 0,59–1,07 мг/г. Максимальная вариабельность в содержании общей серы обнаружена в сухих листьях рябины на исследуемых ПН и лежит в пределах 0,14–1,34 мг/г (у березы содержание общей серы колеблется в пределах 0,99–1,37 мг/г).

Выявлено, что содержание общей серы в хвое ели, листьях березы и рябины по мере удаления от промзоны носит нелинейный характер. В целом следует отметить, что значения содержания общей серы в хвое ели и листьях березы и рябины, произрастающей на наиболее удаленной площадке наблюдения (6ПН, расстояние от источника выброса 6,5 км) меньше в сравнении с 1ПН, расположенной в непосредственной близости от промзоны. Но у деревьев, произрастающих на промежуточных площадках наблюдения данная зависимость отсутствует и значения данного показателя в большинстве случаев превосходят содержание общей серы растений с 1ПН (рисунок 26).

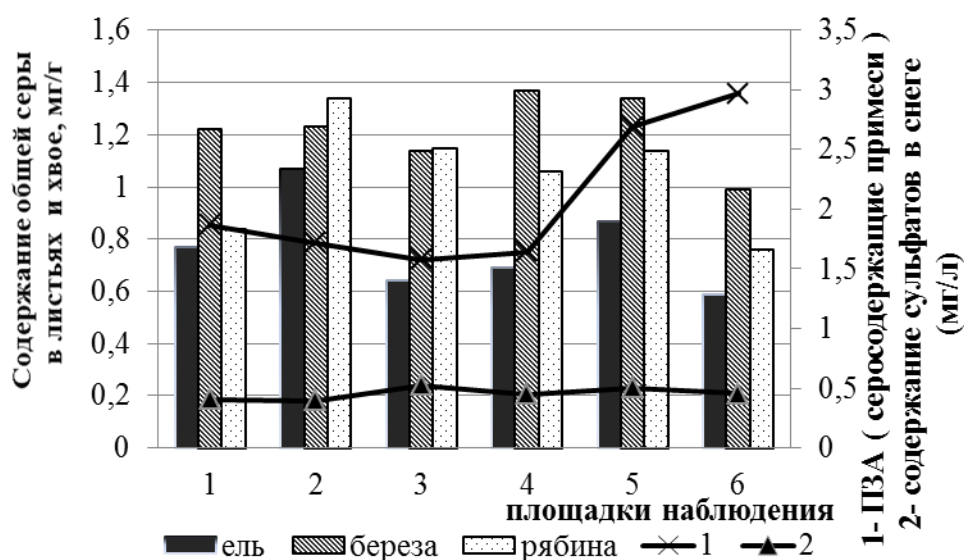


Рисунок 26 – Показатели содержания общей серы в растительных образцах, сульфатов в снеге и ПЗА серосодержащими примесями

Что касается общего азота, то в большинстве случаев его значения в листьях и хвое исследуемых растений на 1ПН ниже, а по мере удаления от источника выбросов содержание общего азота в сухих растительных образцах возрастает (рисунок 27, ПРИЛОЖЕНИЕ М. Содержание общего азота в листьях древесных растений на ПН).

Кривые значений содержания нитратов в снеге и ПЗА азотсодержащими примесями на исследуемых ПН имеют достаточно выраженную сходимость. Анализ данных фитомониторинга позволил установить высокую согласованность результатов по содержанию общего азота в хвое ели, в листьях рябины и березы с

ПЗА азотсодержащими примесями ($r = 0,81; 0,51; 0,38$; при $n = 90$, $p < 0,05$) и у ели с содержанием нитратов в снеге ($r = 0,60$ при $n = 90$, $p < 0,05$) (рисунок 27).

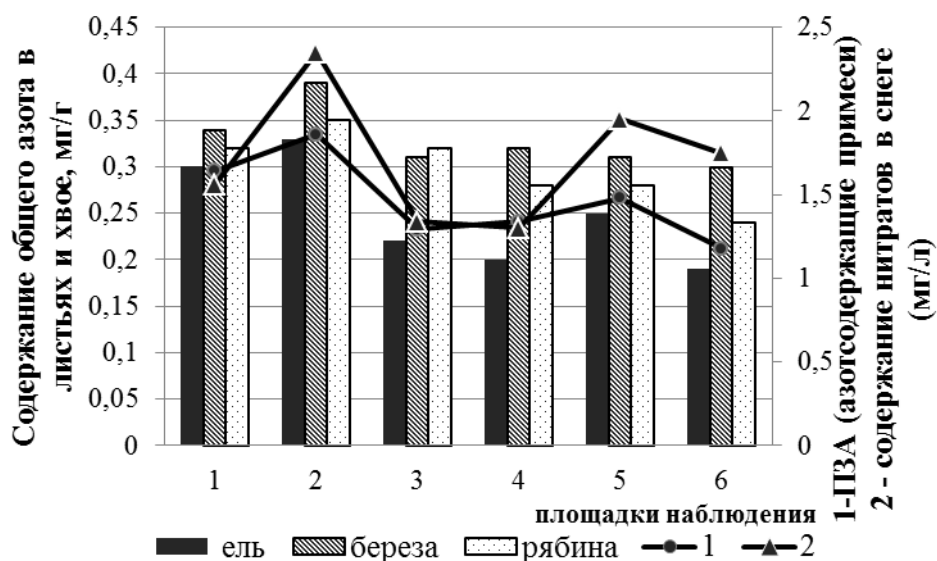


Рисунок 27 – Показатели содержания общего азота в растительных образцах, нитратов в снеге и ПЗА азотсодержащими примесями

Полученные данные свидетельствуют о возрастании загрязнения окружающей среды азотсодержащими выбросами по мере удаления от промзоны, хотя эта зависимость носит нелинейный характер. Установленный факт, очевидно, связан с вкладом дополнительных источников в загрязнение атмосферы данной примесью, в частности автотранспорта.

Сопоставление полученных нами данных по содержанию общей серы в растительных образцах с расчетным показателем загрязнения атмосферы (ПЗА) серосодержащими примесями показало, что не наблюдается четкой связи между ними. Расчетные значения ПЗА серосодержащими примесями существенно не отличаются на исследуемых ПН и варьируют без определенной тенденции в пределах 0,39–0,52, тогда как содержание общей серы в растительных образцах в большинстве случаев выше на 2, 4 и 5 ПН. Результаты содержания общей серы в листьях и хвое исследуемых растений показали их высокую сходимость у березы с загрязнением снега сульфатами на 1–5 ПН ($r = 0,47$, при $n = 90$, $p < 0,05$).

Исключение составляет БПН, где минимальным значениям содержания общей серы в растительных образцах соответствуют максимальные значения содержания сульфатов в снеге (рисунок 26). Высокая концентрация сульфатов в снеге на БПН может быть связана с работой в зимний период стационарных котельных и печей частного сектора на прилегающей территории, загрязняющих атмосферу серосодержащими примесями.

Проведенные исследования показали, что расчетные методы загрязнения атмосферы азот- и серосодержащими примесями не всегда отражают истинный характер распространения этих примесей в атмосфере по факелу. В частности существенное влияние на характер распространения серосодержащих примесей в зимний период влияют дополнительные источники загрязнения – отопительные печи частного сектора и мини-котельные. Экспериментальные методы исследования объектов окружающей среды – снега, листьев и хвои древесных растений позволяют детализировать информацию о характере загрязнения атмосферного воздуха и делают более объективными экологические прогнозы.

4.6. Оценка способности древесных растений метаболизировать бенз(а)пирен

Оценка способности древесных растений метаболизировать бенз(а)пирен (Б(а)П) проведена на примере рябины сибирской. Для этих целей в экстрактах листьев идентифицировали метаболиты Б(а)П: Б(а)П-1,3-дион и моно- и дигидроксипроизводные – 1-гидрокси-Б(а)П и Б(а)П-7,8-дигидродиол и определяли их относительные содержания. Анализы выполнены в экспериментальной лаборатории ООО «Спектроника» (г. Москва) на жидкостном хроматографе Dionex Ultimate 3000 с масс-спектрометрическим детектором Applied Biosystems Qtrap3200.

На рис.28 представлена масс-хроматограмма, зарегистрированная в режиме по выделенным ионам, в качестве которых выбраны протонированные метаболиты бензапирена. Метаболиты БП менее гидрофобны чем сам БП,

элюируются при меньшей концентрации ацетонитрила и раньше выходят из колонки, что видно на хроматограмме.

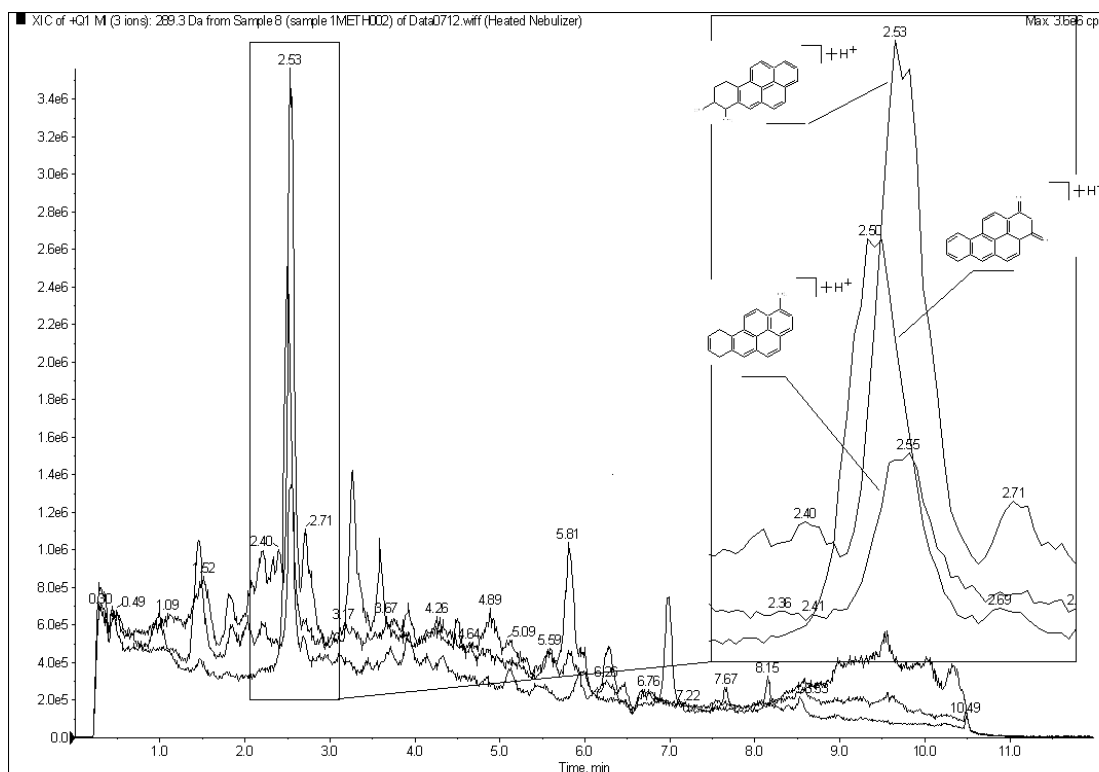


Рисунок 28 – Масс-хроматограмма протонированных метаболитов БП

Для проведения количественных исследований для каждого метаболита выбирали MRM переходы (массы дочерних ионов которые хорошо воспроизводимы и позволяют селективно определять каждый компонент).

Для этого провели масс-спектрометрическое детектирование после хроматографического разделения в режиме MS^2 . Данные MS^2 использовались для подтверждения структуры метаболитов и корректной их интерпритации (рис. 29–31).

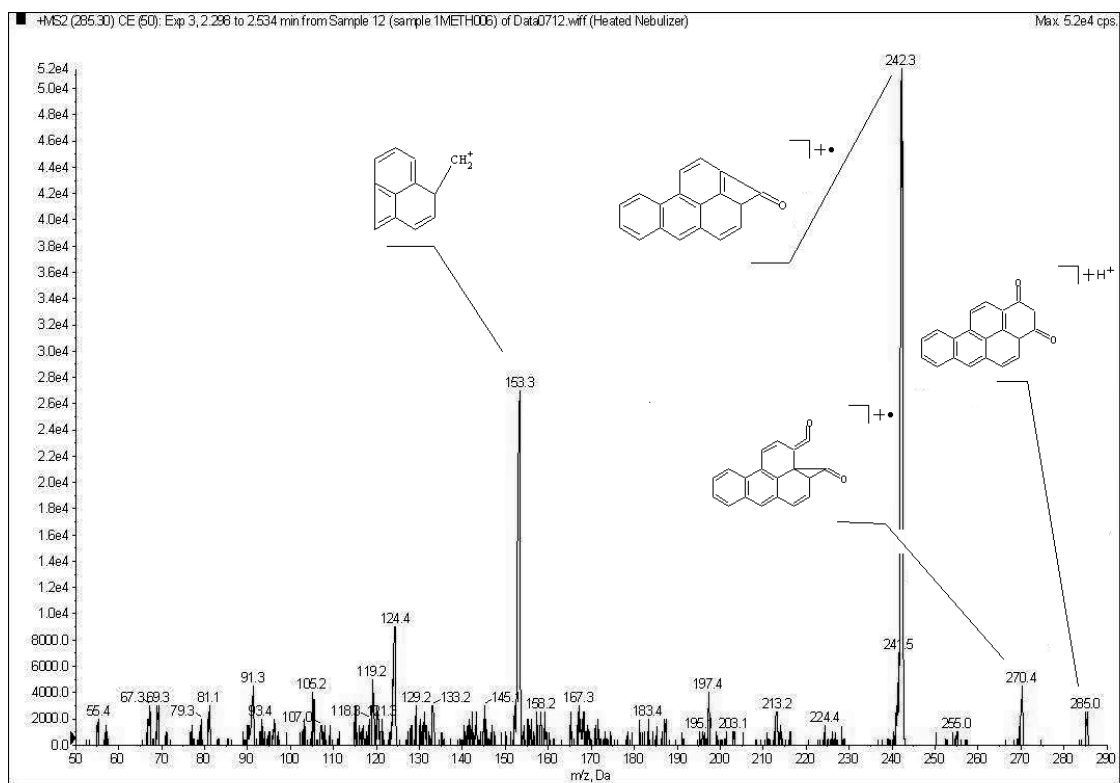


Рисунок 29 – Масс-спектр Б(а)П-1,3-диона

На масс-спектре хорошо виден протонированный молекулярный ион 285 и ион 242, который взяли в качестве дочернего для в MRM 285/242.

На масс-спектре кроме протонированного молекулярного иона хорошо виден ион 271, показывающий потерю воды при фрагментации материнского иона.

С использованием этих MRM-переходов для каждого из производных были получены масс-хроматограммы обеспечивающие лучшую селективность (отношение сигнал-шум), чем для режима МС (моно-квадруполя).

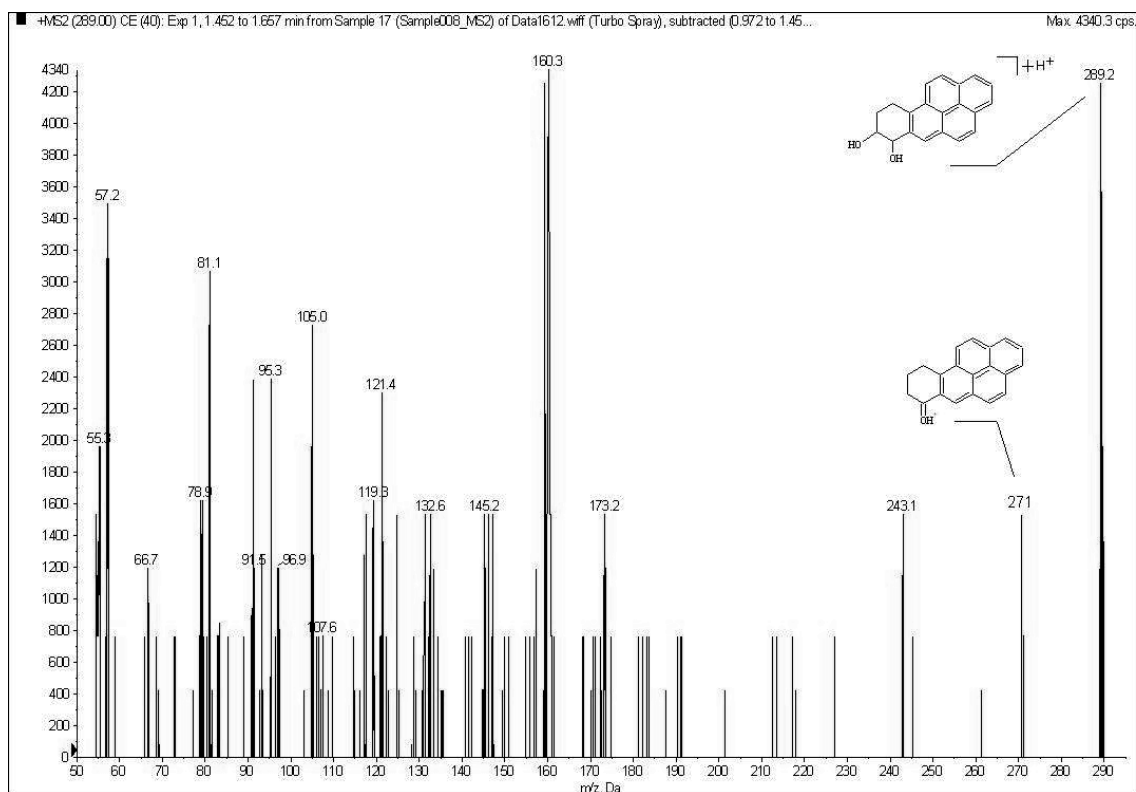


Рисунок 30 – Масс-спектр бензапирен-7,8-дигидродиола

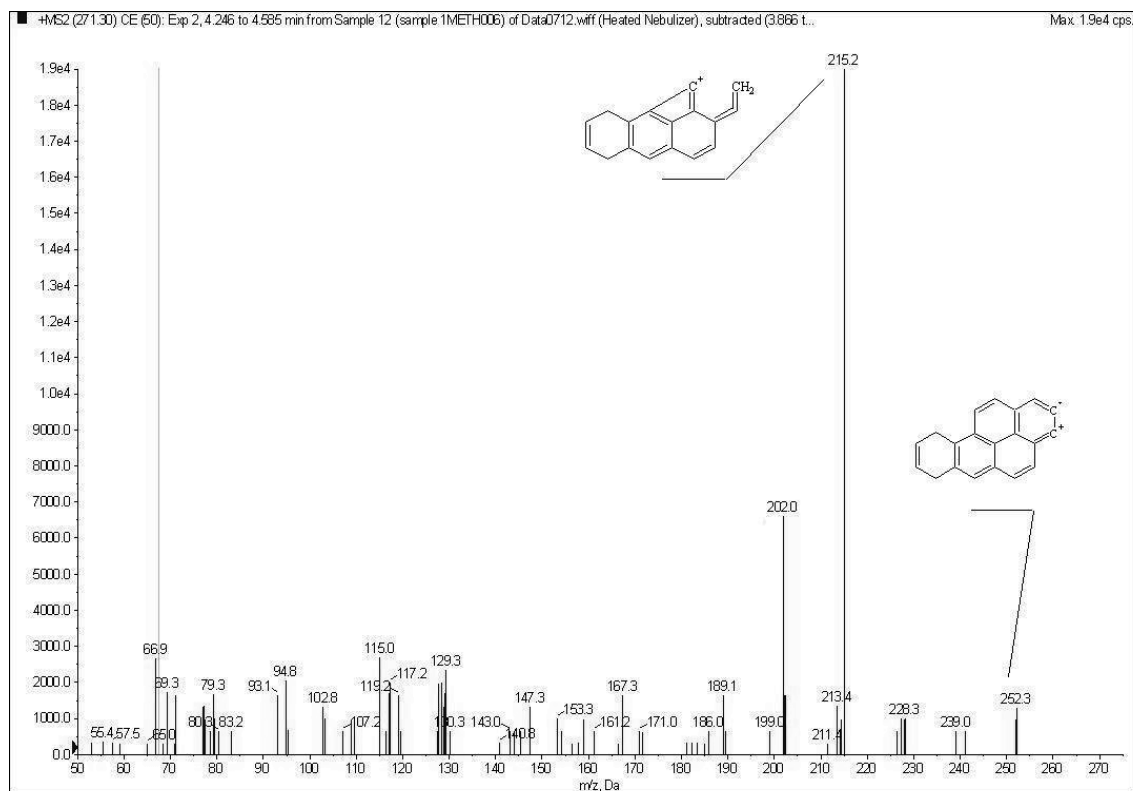


Рисунок 31 – Масс-спектр 1-гидрокси-бенз(а)пирена

Результаты исследований показывают, что в экстрактах рябины сибирской в зоне действия выбросов предприятий промзоны г. Кемерово обнаружены следующие метаболиты бенз(а)пирена: Б(а)П-1,3-дион и моно- и дигидроксипроизводные бенз(а)пирена – 1-гидрокси-Б(а)П и Б(а)П-7,8-дигидродиол.

В литературных источниках сообщается, что в растениях продуктами глубокого окисления бензапирена являются хиноны и моно- и дигидроксипроизводные (Дурмишидзе, Девдариани, Кавтарадзе, Кварцхава, 1979; Девдариани, Кавтарадзе и др., 1979; Дурмишидзе, Кавтарадзе и др., 1979; Дурмишидзе, Девдариани и др., 1979; Девдариани, 1988, Sanderman, 1994). В частности С.В. Дурмишидзе, Л.К. Кавтарадзе, Т.В. Девдариани (1979) в растениях идентифицировали 6-гидрокси-Б(а)П, Б(а)П-1,6-дион, Б(а)П-3,6-дион и Б(а)П-6,12-дион. П.А. Киселев с соавторами (2008) сообщают о таких метаболитах бензапирена, обнаруженных в растениях, как 3-гидрокси-Б(а)П и 9 гидрокси-Б(а)П, Б(а)П-7,8-дигидродиол, Б(а)П- 9,10-дигидродиол, Б(а)П- 4,5 –дигидродиол.

Сведений в литературных источниках об обнаруженных нами метаболитах – Б(а)П-1,3-дионе и 1-гидрокси-Б(а)П мы не нашли. Результаты наших исследований дополняют информацию о возможных путях метаболизации бенз(а)пирена растениями.

Экспериментально установлено, что в зависимости от расстояния до промзоны имеются качественные и количественные различия в содержании метаболитов Б(а)П в экстрактах рябины. Так на 1ПН (в непосредственной близости к промзоне) у рябины из трех исследуемых метаболитов Б(а)П обнаружен только Б(а)П-1,3дион. Его относительное содержание составляет 55 %. В листьях рябины, произрастающей на более удаленном расстоянии от промзоны (2–6ПН), выявлены моно- и дигидроксипроизводные бенз(а)пирена – Б(а)П-7,8-дигидродиол и 1-гидрокси-Б(а)П. Причем, у рябины, произрастающей на 2 и 4ПН преобладает содержание 1-гидрокси-Б(а)П (100 и 84 % соответственно), а на 3ПН и 5ПН – Б(а)П-7,8-дигидродиол (88 и 100 % соответственно). Минимальное содержание гидроксипроизводных Б(а)П у рябины выявлено на 6ПН (наиболее

удаленной от промзоны). Содержание Б(а)П-7,8-дигидродиола составляет 28 %, 1-гидрокси-Б(а)П – 37 %. Полученные данные, свидетельствуют о различной интенсивности метаболических процессов у рябины в зависимости от расстояния и уровня загрязнения ПН бенз(а)пиреном.

Результаты моделирования загрязнения атмосферы Б(а)П на исследуемых ПН представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчетные значения среднего за летний период загрязнения атмосферы Б(а)П на исследуемых ПН

Расчетные показатели	Исследуемые ПН					
	1	2	3	4	5	6
$Cr=C/ПДКс$	0,1485	0,1508	0,1740	0,1649	0,1760	0,1384
$Q=780 Cr$	116,0	117,6	135,7	128,5	137,1	108,0

Результаты свидетельствуют, что загрязнение атмосферного воздуха Б(а)П по мере удаления от промзоны носит нелинейный характер. В частности, на 5ПН содержание в воздухе Б(а)П выше, чем вблизи промзоны (1ПН). Данный факт объясняется влиянием дополнительных источников выброса Б(а)П, например отопительных печей частной застройки, расположенной в районе 3ПН, 4ПН и 5ПН, использующих в качестве топлива уголь. Однако минимальные значения Б(а)П в воздухе отмечены на самой удаленной 6ПН.

Для оценки возможности индикации загрязнения атмосферного воздуха г. Кемерово Б(а)П нами сопоставлены показатели суммы относительного содержания гидроксипроизводных Б(а)П (Σ ОН-Б(а)П) с условной величиной Q (рисунок 32).

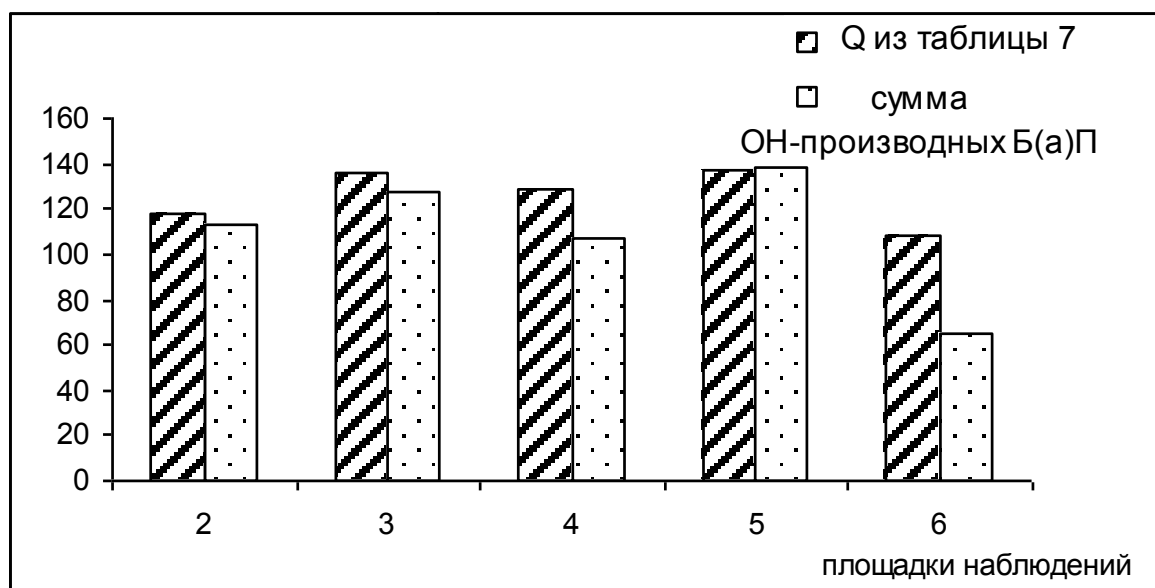


Рисунок 32 – Сопоставление расчетных средних концентраций Б(а)П (Q) с суммой относительного содержания моно- и дигидроксипроизводных Б(а)П (Σ ОН-Б(а)П) в листьях рябины сибирской

Результаты показывают высокую сходимость сравниваемых показателей на исследуемых ПН, подтвержденную корреляционным анализом ($r = 0,5$ при $n = 75$, $p < 0,05$). Это дает основание заключить о возможности использования гидроксипроизводных Б(а)П растений для индикации загрязнения атмосферного воздуха Б(а)П.

Выявлена положительная корреляционная связь активности пероксидазы с суммой относительного содержания гидроксипроизводных Б(а)П (Σ ОН-Б(а)П) ($r = 0,65$ при $n = 82$, $p < 0,05$) в листьях рябины. Это подтверждает факт участия пероксидазы в трансформации Б(а)П.

Таким образом, количество фермента пероксидазы, выраженная в единицах активности или концентрации фермента в вытяжке ($C = E/\text{мл}$) может использоваться как маркер способности растений метаболизировать бенз(а)пирен.

4.7. Оценка адаптивного потенциала древесных пород на исследуемых ПН

Устойчивость растений к загрязнению окружающей среды характеризует их способность полноценно осуществлять свои основные жизненные функции, а мера устойчивости отражает количественную сторону этой способности.

Уровень устойчивости определяется адаптивными возможностями растения. Но поскольку адаптация представляет собой сложную совокупность многих перестроек в организме, а каждый конкретный методический прием оценки устойчивости основан на изучении какого-либо одного звена или процесса жизнедеятельности, то более точную оценку устойчивости растений можно получить при использовании комплекса различных методов диагностики.

Изучение комплекса физиолого-биохимических, морфологических и анатомических характеристик древесных растений в условиях преобладающего влияния выбросов предприятий промзоны показало, что у растений формируются перестройки как негативного характера, снижающие их устойчивость, так и адаптивного характера, повышающие их устойчивость.

Пятилетними исследованиями выявлена нелинейная зависимость в реакциях растений на комплексное загрязнение атмосферного воздуха от промзоны, тем не менее, в непосредственной близости к промзоне (как правило 1ПН и 2ПН, расстояние до 1 км от промзоны, КПЗА 17,968...10,429) наблюдается более выраженная ответная реакция растений в сравнении с ПН, наиболее удаленной (6ПН), на промежуточных ПН исследуемые показатели растений колеблются без определенной тенденции.

Выбросы предприятий промзоны вызывают стимуляцию окислительных процессов в клетках растений, что выражается в увеличении активности пероксидазы и перекисного окисления липидов мембран. По мере приближения к источнику выбросов (от 1 км и ближе) данная тенденция усиливается.

Вблизи промзоны (1ПН и 2ПН) стимуляция окислительных процессов в среднем за 5 лет наиболее выражена у ели – активность пероксидазы возрастает в

2,34...3,1 раза с максимумом в конце вегетации, содержание МДА – в 1,57... 2,5 раза в сравнении с 6ПН; у лиственных древесных пород в сравнении с елью стимуляция окислительных процессов вблизи источников выбросов выражена в меньшей степени, однако у рябины в сравнении с березой более активно шел процесс перекисного окисления липидов – на 1ПН в среднем за 5 лет количество МДА в листьях возрастало в 1,65...1,9 раза в сравнении с 6ПН с максимумом в начале вегетации.

Результатами пятилетних исследований установлена тенденция к снижению содержания хлорофилла *a* и *b* у всех трех древесных пород растений по мере приближения к промзоне. Концентрация хлорофилла *b* в сравнении с хлорофиллом *a* у исследуемых растений в 2009–2013 гг. была гораздо меньше и на ПН снижалась в большей степени. По степени снижения концентрации хлорофиллов вблизи промзоны (1ПН и 2ПН, расстояние до 1 км от промзоны, КПЗА 17,968...10,429) исследуемые древесные породы можно расположить в следующем порядке:

рябина > ель > береза.

Полученные нами экспериментальные данные показывают, что, несмотря на выявленное снижение количества хл. *a* и хл. *b* у растений произрастающих на ПН ближе к источникам загрязнения, наблюдается тенденция к повышению соотношения хл. *a/b*. Достоверное повышение данного показателя выявлено у растений на 1ПН и 2ПН (в июле), так в среднем за пять лет значения отношения хл. *a/b* возрастали в листьях рябины – в 1,7 и 1,56 раз, в хвое ели – в 1,67 и 1,75 раз, в листьях березы – в 1,5 и 1,3 раза соответственно в сравнении с 6ПН.

Повышение соотношения хл. *a/b* при приближении к промзоне может свидетельствовать о том, что по мере нарастания уровня техногенной нагрузки у исследуемых растений происходит перестройка ультраструктуры хлоропластов в сторону «светового» типа. Это способствует повышению эффективности светоусвоения и степени защиты мембран хлоропластов от фотоповреждений и может рассматриваться как защитный механизм растений в условиях техногенной нагрузки.

Полученные выше результаты согласуются с данными по фотосинтетической способности растений на исследуемых ПН. Вблизи источников выбросов (1ПН) у растений возрастает фотосинтетическая способность, хотя не всегда наблюдается линейная зависимость данного эффекта от расстояния до промзоны. По степени повышения фотосинтетической способности растений вблизи промзоны (1ПН и 2ПН, расстояние до 1 км от промзоны, КПЗА 17,968...10,429) исследуемые породы располагаются в следующий ряд:

береза > ель > рябина.

Работа фотосинтетического аппарата обеспечивает процессы роста и развития растений. Сравнительная характеристика роста исследуемых пород в 2009–2013 гг. выявила отличия в направленности и интенсивности роста побегов и их элементов. Экспериментально установлено, что в среднем за 5 лет у исследуемых древесных растений отмечается тенденция к удлинению годичных побегов, причем в большинстве случаев этот процесс более выражен в начале вегетации у деревьев на 1ПН и 2ПН в сравнении с 6ПН. Так у ели в среднем за 5 лет на 1ПН удлинение годичных побегов в конце мая было выше в 1,5 у березы на 1ПН и 2ПН – в 1,2 и 1,4 раза соответственно в сравнении с 6ПН, у рябины удлинение побегов по мере приближения к промзоне менее выражено и на 1ПН годичный прирост был выше на 13 % в сравнении с 6ПН. Однако имеются различия в интенсивности роста годичных побегов по годам, и нелинейный характер этого процесса в зависимости от расстояния до промзоны. У ели, несмотря на тенденцию удлинения побегов в целом, в 2009 и 2010 гг. на некоторых ПН отмечалось укорочение побегов без определенной зависимости от расстояния до промзоны в сравнении с 6ПН.

Пятилетними исследованиями выявлена тенденция снижения площади и массы листьев и хвои годичных побегов у древесных растений по мере приближения к промзоне, в большинстве случаев с более выраженными отличиями на 1ПН в сравнении с 6ПН и непрямой зависимостью от расстояния на

промежуточных ПН. По степени снижения площади и массы сухих листьев и хвои исследуемые древесные породы можно расположить в следующий ряд:

ель >рябина>береза.

В условиях выбросов промзоны обнаружены анатомо-морфологические изменения листьев и хвои исследуемых растений. У ели по мере приближения к промзоне (от 5ПН к 1ПН) отмечается снижение длины и площади поверхности хвои, отмечается уменьшение диаметра центрального проводящего пучка (ЦПП), возрастание его асимметрии, редукция количества смоляных ходов до одного или полное их отсутствие, уменьшается толщина кутикулы и гиподермы, снижается площадь поперечного среза хвои, площадь мезофилла, площадь центрального цилиндра. Вместе с тем нами выявлены анатомические изменения хвои адаптивного характера: по мере приближения к источнику выбросов увеличивалась толщина слоя эпидермы и эндодермы, возрастала площадь смоляных каналов, они становились более короткими и одновременно более широкими.

У рябины по мере увеличения техногенной нагрузки изменение анатомических показателей строения листовой пластинки выражено в меньшей степени, чем у ели: толщина столбчатого, губчатого мезофилла и кутикулы варьирует в листьях рябины исследуемых ПН без особой тенденции, тем не менее, отмечена тенденция к снижению высоты верхней и нижней эпидермы.

У березы выявлено значительно меньше изменений негативного характера. Так в непосредственной близости к промзоне (1ПН) наблюдается тенденция к снижению толщины кутикулы и ширины клеток нижней эпидермы. Значительно больше у березы выявлено анатомо-морфологических изменений адаптивного характера в непосредственной близости к промзоне: увеличивается толщина листовой пластинки, верхней эпидермы, столбчатого и губчатого мезофилла. На промежуточных площадках наблюдения изучаемые показатели меняются без определенной тенденции и их значения не достоверны в сравнении с 6ПН.

Таким образом, по анатомическим показателям тканей хвои и листьев наименьшую устойчивость в условиях нарастающей техногенной нагрузки

проявила ель и рябина сибирская, характеризующиеся самым большим числом негативных анатомических изменений, проявляющихся в уменьшении размеров клеток и объема тканей, а также в выраженной асимметрии ЦПП (у ели). Береза повислая характеризуется наибольшим количеством изменений анатомических признаков листьев адаптивного характера, связанных с увеличением размеров и клеток и тканей, что, по-видимому, обеспечивает ее более высокую устойчивость.

Для интерпретации полученных данных в таблицах 6–8 представлены результаты корреляционного анализа комплекса изучаемых показателей растений с КПЗА. Анализ табличных данных показывает, что в условиях влияния выбросов промзоны у древесных растений возникают + и – корреляции изучаемых характеристик с КПЗА, которые формируют адаптивные и негативные перестройки на различных уровнях организации, которые определяют тот или иной уровень устойчивости.

У исследованных древесных пород соотношение адаптивных перестроек к негативным составляет: у березы – 5/3, у рябины – 2/5, у ели – 4/7; при этом доля адаптивных перестроек в этих соотношениях составляет 1,7;0,4;0,57 соответственно. Средняя сила корреляций по модулю составляет 0,39/0,58; 0,58/0,40 и 0,49/0,50 у березы, рябины и ели соответственно. Как показывают данные, самая большая доля адаптивных перестроек выявлена у березы (таблица 8): по мере приближения к промзоне в листьях происходит стимуляция окислительных процессов, снижается содержание зеленых пигментов (хлорофиллов *a* и *b*), в то же время возрастает относительное содержание хл. *a/b*, фотосинтетическая способность, увеличивается толщина листовой пластинки, клеток нижней эпидермы, столбчатого и губчатого мезофилла. Однако следует отметить, что средняя сила корреляций адаптивных перестроек по модулю ниже, чем негативных.

Таблица 8 – Оценка адаптивного потенциала березы повислой в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово

Исследуемые характеристики	Корреляции с КПЗА	
	Адаптивные перестройки	Негативные перестройки
Содержание малонового диальдегида	–	0,51
Содержание хлорофилла <i>a</i>	–	-0,58...-0,68
Содержание хлорофилла <i>b</i>	–	-0,48...-0,63
Относительное содержание, <i>a/b</i>	0,51	–
Анатомические признаки: Толщина клетки нижней эпидермы	0,22	–
Толщина палисадного мезофилла	0,43	–
Толщина губчатого мезофилла	0,39	–
Толщина листовой пластинки	0,37	–
Средняя сила корреляций (по модулю)	0,42	0,58
<i>Общее количество адаптивных и негативных перестроек:</i>	5	3

У ели выявлен самый широкий спектр негативных перестроек при приближении к промзоне (таблица 9): отмечается стимуляция окислительных процессов, снижается содержание зеленых пигментов, снижается сухая масса хвои, уменьшается периметр поперечного сечения хвои, снижается толщина гиподермы, увеличивается величина асимметрии центрального проводящего пучка. Однако при этом увеличивается относительное содержание хл. *a/b*, фотосинтетическая способность, толщина эндодермы, диаметр смоляных каналов, что можно рассматривать как адаптивные перестройки.

Таблица 9 – Оценка адаптивного потенциала ели сибирской в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово

Исследуемые характеристики	Корреляции с КПЗА	
	Адаптивные перестройки	Негативные перестройки
Содержание малонового диальдегида	–	0,50...0,51
Фотосинтетическая активность	0,53	–
Содержание хлорофилла <i>a</i>	–	-0,48...-0,61
Содержание хлорофилла <i>б</i>	–	-0,53...- 0,64
Относительное содержание хл. <i>a/б</i>	0,50	–
Масса сухой хвои	–	-0,51
Анатомо-морфологические признаки: Периметр поперечного сечения хвои	–	-0,50
Величина асимметрии центрального проводящего пучка		0,41
Толщина гиподермы	–	-0,34
Толщина эндодермы	0,51	–
Диаметр смоляных каналов	0,42	–
Средняя сила корреляций (по модулю)	0,49	0,50
<i>Общее количество адаптивных и негативных перестроек:</i>	4	7

У рябины выявлено самое низкое количество адаптивных перестроек при нарастании техногенной нагрузки от помзоны (таблица 10). Они касаются только физиолого-биохимического уровня – повышается относительное содержание хл. *a/б* и возрастает фотосинтетическая способность. Но при этом повышается уровень окислительных процессов, снижается содержание зеленых пигментов, толщина клеток верхней и нижней эпидермы и ширина клеток последней. Однако

следует заметить, что у рябины средняя сила корреляций адаптивных перестроек превосходит по модулю силу корреляций негативных перестроек (0,58/0,40).

Таблица 10 – Оценка адаптивного потенциала рябины сибирской в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово

Исследуемые характеристики	Корреляции с КПЗА	
	Адаптивные перестройки	Негативные перестройки
Содержание малонового диальдегида	–	0,52
Фотосинтетическая активность	0,55	–
Содержание хлорофилла <i>б</i>	–	-0,52...-0,56
Относительное содержание, <i>а/б</i>	0,61	–
Анатомические признаки: Толщина клетки верхней эпидермы	–	-0,37
Толщина клетки нижней эпидермы	–	-0,21
Ширина клетки нижней эпидермы	–	-0,24
Средняя сила корреляций (по модулю)	0,58	0,43
<i>Общее количество адаптивных и негативных перестроек:</i>	2	5

Таким образом, в условиях влияния выбросов предприятий промзоны наиболее высоким адаптивным потенциалом обладает береза повислая, далее следует ель сибирская, и наименьший адаптивный потенциал имеет рябина сибирская.

4.8. Оценка фитоиндикационной способности древесных растений в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны

Древесные растения могут усваивать и вовлекать в метаболизм веществ газообразные загрязнители – оксиды серы, азота, аммиак, бенз(а)пирен и др. Даже низкие концентрации газообразных веществ в атмосфере при долговременном воздействии могут вести к их аккумуляции в листьях и хвое древесных растений (Гришина, 1990; Барахтенова, 1992; 1993) и использоваться как индикаторные характеристики загрязнения среды.

Сопоставление содержания общей серы в растительных образцах с ПЗА серосодержащими примесями показало, что не наблюдается четкой связи между ними, в то время как обнаружена высокая сходимость содержания серы в листьях березы с загрязнением снега сульфатами на 1–5ПН ($r = 0,47$, при $n = 54$, $p < 0,05$). Исключение составляет 6ПН, где минимальным значениям содержания общей серы в растительных образцах соответствуют максимальные значения содержания сульфатов в снеге, что, очевидно, связано с работой в зимний период стационарных котельных и печей частного сектора на прилегающей территории.

Кривые значений содержания нитратов в снеге и ПЗА азотсодержащими примесями на исследуемых ПН имеют достаточно выраженную сходимость и коррелируют с содержанием общего азота в хвое ели сибирской ($r = 0,60$ и $r = 0,47$ соответственно при $n = 54$, $p < 0,05$).

Проведенные исследования показали, что моделирование загрязнения атмосферы серосодержащими примесями по данным сводного тома ПДВ не всегда отражают истинный характер их распространения в атмосфере по преобладающему направлению ветров. В частности существенное влияние на характер распространения серосодержащих примесей в зимний период влияют дополнительные источники загрязнения – отопительные печи частного сектора и мини-котельные.

Таким образом, экспериментальные методы исследования объектов окружающей среды – снега, листьев и хвои древесных растений позволяют

детализировать информацию о характере загрязнения атмосферного воздуха и делают более объективными экологические прогнозы.

Данные корреляционного анализа подтверждают возможность применения березы повислой для индикации загрязнения атмосферы серосодержащими выбросами, а ели сибирской – азотсодержащими примесями.

Выявленная положительная корреляционная связь содержания гидроксиметаболитов бенз(а)пирена в листьях рябины с содержанием Б(а)П в воздухе, подтверждает способность растений метаболизировать бенз(а)пирен. Наличие положительной корреляционной связи активности пероксидазы с суммой относительного содержания гидроксипроизводных Б(а)П (Σ ОН-Б(а)П) подтверждает факт участия пероксидазы в трансформации Б(а)П у рябины.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В градиенте концентраций выбросов предприятий промзоны г. Кемерово максимальная стимуляция окислительных процессов в листьях и хвое древесных растений (*Betula pendula* Roth, *Sorbus sibirica* Hedl., *Pecea obovata* Ledeb.), выражающаяся в увеличении активности пероксидазы и содержании малонового диальдегида; а также в снижении содержания хл. *a* и хл. *б*, увеличении соотношения хл. *a/б*, возрастании фотосинтетической способности, отмечалась на расстоянии до 1 км по преобладающему направлению распространения выбросов от промзоны (КПЗА 17,968...10,429).

2. На расстоянии до 1 км по преобладающему направлению распространения выбросов от промзоны (КПЗА 17,968...10,429) обнаружены изменения интенсивности роста годичных побегов и их элементов, выражающиеся в большинстве случаев в удлинении побегов, снижении площади и массы листьев и хвои годичных побегов.

3. В непосредственной близости к промзоне (до 1 км по преобладающему направлению распространения выбросов от промзоны, КПЗА 17,968...10,429) толщина и площадь некоторых видов тканей и структур листьев и хвои древесных растений увеличивается, других – редуцируется. Количество и характер анатомо-морфологических изменений определяет степень устойчивости растений к техногенной нагрузке.

4. У исследуемых древесных растений в непосредственной близости к промзоне (до 1 км по преобладающему направлению распространения выбросов от промзоны, КПЗА 17,968...10,429) выявлены адаптивные перестройки: у березы отмечается возрастание относительного содержания хл. *a/б* и возрастание фотосинтетической способности, увеличение толщины листовой пластинки, клеток нижней эпидермы, столбчатого и губчатого мезофилла; у ели увеличивается относительное содержание хл. *a/б*, фотосинтетическая

способность, толщина эндодермы, диаметр смоляных каналов; у рябины повышается относительное содержание хл. *a/b* и возрастает фотосинтетическая способность.

5. Методом корреляционного анализа было установлено, что наиболее высоким адаптивным потенциалом и, следовательно, наибольшей устойчивостью обладает береза повислая, далее следует ель сибирская и наименьший адаптивный потенциал имеет рябина сибирская. Соотношение адаптивных перестроек к негативным составляет: у березы – $5/3$, у ели – $4/7$, у рябины – $2/5$.

6. Наличие достоверной положительной корреляции между содержанием серы в листьях березы повислой и количеством сульфатов в снеге подтверждает возможность использования данной древесной породы для индикации атмосферного загрязнения серосодержащими выбросами, а наличие достоверной положительной корреляции между содержанием азота в хвое ели сибирской и ПЗА азотсодержащими примесями – для индикации загрязнения атмосферы азотсодержащими выбросами.

7. В листьях рябины сибирской обнаружены гидроксипроизводные бенз(а)пирена, которые положительно коррелируют с содержанием бенз(а)пирена в воздухе, это подтверждает способность растений метаболизировать бенз(а)пирен.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены изучению механизмов трансформации бенз(а)пирена у разных видов древесных растений в градиенте техногенного загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажиганич Т. Е. Проведение сводных расчетов загрязнения атмосферы г. Кемерова для нормирования выбросов и диагностических оценок / Т. Е. Ажиганич, Т. Г. Алексейченко, А. А. Быков и др. // В кн. «Экология города. Проблемы. Решения» – труды V городской научно-практической конференции. – Кемерово, 2003. – С. 41–45.
2. Алексеев В. А. Влияние загрязнения на изменение морфоструктуры деревьев / В. А. Алексеев, И. В. Лянгузова // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л.: Наука, 1990. – С. 87–94.
3. Агроклиматические ресурсы Кемеровской области / Отв. ред. М. И. Черникова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973 – 143 с.
4. Асадулаев З. М. Фитоиндикационная оценка основных показателей морфолого-анатомических признаков побегов *Platanus orientalis* L. в условиях города Махачкалы / З. М. Асадулаев, З. Р. Рамазанова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – № 1(9). – С. 2170–2173.
5. Аугустайтис А. А. Закономерности роста сосновых древостоев при различном уровне загрязнения природной среды: автореф. дис. ...к. б. н.: 03.00.16 / Аугустайтис Альгирдас Альгирдович. – М., 1992. – 22с.
6. Афанасьева Л. В. Влияние атмосферного промышленного загрязнения на сосновые леса бассейна реки Селенги: автореф. дис. ...к. б. н.: 03.00.16 / Афанасьева Лариса Владимировна. – Улан-Удэ, 2005. – 19 с.
7. Барахтенова Л. А. Влияние поллютантов на обмен веществ и состояние сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения: автореф. дис. ...д. б. н.: 03.00.05, 03.00.16 / Барахтенова Людмила Алексеевна. – Новосибирск, 1993. – 34 с.
8. Барахтенова Л. А. Диагностика устойчивости сосновых лесов при техногенном загрязнении. Ч. III. Пороговые концентрации серы / Л. А. Барахтенова // Изв. СО РАН АН СССР. – Сер. Биол. науки. – 1992. – Вып. 2. – С. 38–44.

9. Барахтенова Л. А. Динамика поглощения SO_2 и влияние его на интенсивность фотосинтеза у C_3 - и C_4 - растений / Л. А. Барахтенова // Газоустойчивость растений. – Новосибирск: Наука, 1980. – С.86–96.

10. Барахтенова Л. А. Влияние сернистого газа на фотосинтез растений / Л. А. Барахтенова, В. С. Николаевский. – Новосибирск, 1998. – 85с.

11. Беляева Л. В. Биоиндикация загрязнения атмосферного воздуха и состояния древесных растений / Л. В. Беляева, В. С. Николаевский // Науч. тр. МЛТИ. – 1989. – Вып. 222. – С. 36–47.

12. Бережная Н. С. Трансформация сосновых лесов Верхнего Приангарья, загрязняемых фторсодержащими эмиссиями: автореф. дис. ...к. б. н.: 03.00.16 / Бережная Надежда Станиславовна. – Иркутск, 2005. – 19 с.

13. Братчук Н. И. Изменения некоторых биологических параметров лекарственных растений Удмуртии в условиях загрязнения среды: автореф. дис. ...к.б.н.: 03.00.16 / Братчук Надежда Ивановна. – Ижевск, 2001. – 18 с.

14. Бухарина И. Л. Состояние насаждений и их роль в экологической оптимизации среды крупного промышленного центра (на примере г. Ижевска) / И.Л. Бухарина // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 5. – С. 106–114.

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

16. Быков О. Д. Бескамерный способ изучения фотосинтеза / О. Д. Быков //Методические указания. – Л., 1974. – 17 с.

17. Васильев Б. Р. Строение листа древесных растений различных климатических зон / Б.Р. Васильев. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. – 208 с.

18. Васильева К. А. Эколого-биологические особенности клена остролистного (*Acer platanoides* L.) в условиях техногенного загрязнения: автореф. дис. ...к. б. н.: 03.02.08/ Васильева Ксения Анатольевна. – Уфа, 2011. – 22с.

19. Веретенников А. В. Фотосинтез древесных растений / А. В. Веретенников. – Воронеж, ВГУ, 1980. – 77 с.
20. Веселова Т. В. Стресс у растений / Т. В. Веселова, В. А. Веселовский, Д. С. Чернавский. – М.: МГУ, 1993. – 144 с.
21. Воскресенский В. С. Изменение активности окислительно-восстановительных ферментов у древесных растений в условиях городской среды / В.С. Воскресенский, О. Л. Воскресенская // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 1. – С.75–82.
22. Гавриленко В. Ф. Большой практикум по физиологии растений. Фотосинтез. Дыхание : учеб. пособие. / В.Ф. Гавриленко, М. Е. Ладыгина, Л. М. Хандобина. – М.: Высшая школа, 1975. – 391 с.
23. Гарифзянов А. Р. Образование перекиси водорода и проявления окислительного стресса в листьях древесных растений в условиях промышленного загрязнения / А. Р. Гарифзянов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 1. – С. 151–155.
24. Гетко Н. В. Растения в техногенной среде / Н. В. Гетко// Структура и функция ассимиляционного аппарата. – Минск: Наука и техника, 1989. – 205с.
25. Гирс Г. И. Толерантность сосны обыкновенной в зоне действия выбросов тепловой электростанции, работающей на угле / Г. И. Гирс, О. Н. Зубарева. – Изв. СО АН СССР. – Сер. биол., 1990. – № 1. – С.105–112.
26. Голубева Е. И. Диагностика состояния экосистем в сфере антропогенного воздействия: автореф. дис. ...д. б. н.: 11.00.11/ Голубева Елена Ильинична. – М.: Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова, 1999. – 48 с.
27. Гришина Л. А. Биологическая активность почв и скорость деструкционных процессов / Л. А. Гришина, Г. Н. Копчик, И. В. Сапегина // Влияние атмосферного загрязнения на свойства почв. – М.:МГУ, 1990. – С. 81–94.
28. Галактионов И. И. Декоративные деревья и кустарники для озеленения городов Азиатской части РСФСР / И. И. Галактионов, А. В. Ву // Сектор

озеленения городов, Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова. – М. : Изд-во Мин-ва коммунального хоз-ва РСФСР, 1963. – 290 с.

29. Гурьев Т. А. Техногенное загрязнение полосы отвода автомобильных дорог и его воздействие на прилегающие лесонасаждения / Т. А. Гурьев, Г. С. Тутыгин, Е. Ю. Филимонкова // Автомоб. дороги. Инф. центр по автомоб. дорогам. – 1999. – № 1. – С. 24–40.

30. Двоеглазова А. А. Эколого-биологические особенности древесных и травянистых растений в насаждениях урбанозкосистемы крупного промышленного центра (на примере г. Ижевска): автореф. дис. ...к. б. н.: 03: 00: 16 / Двоеглазова Анна Алексеевна. – Уфа, 2009. – 20 с.

31. Девдариани Т. В. Биотрансформация канцерогенных полициклических ароматических углеводов в растениях / Т. В. Девдариани // Биотрансформация ксенобиотиков в растениях. – Тбилиси: Мецниереба, 1988. – С. 79–162.

32. Девдариани Т. В. Изучение усвоения и превращения бенз(а)антрацена растительной клеткой в стерильных условиях / Т. В. Девдариани, Л. К. Кавтарадзе // Метаболизм химических загрязнителей биосферы в растениях. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – С. 92–98.

33. Девдариани Т. В. Об усвоении Бп-9¹⁴ С травянистыми растениями / Т. В. Девдариани, Л. К. Кавтарадзе, Л. Ш. Кварцхава // Растения и химические канцерогены. – М.: Наука, 1979. – С. 90–92.

34. Дегтярева О. Н. Состояние видов *Pinaceae Lindl.* на урбанизированных территориях Республики Алтай. автореф. дис. ...к. б. н.: 03.00.05 / Дегтярева Ольга Николаевна. – Томск, 2003. – 23 с.

35. Дурмишидзе С. В. Усвоение БП (7,10 С¹⁴) корнями однолетних растений / С. В. Дурмишидзе, Т. В. Девдариани, Л. К. Кавтарадзе, Л. Ш. Кварцхава // Растения и химические канцерогены. – М.: Наука, 1979. – С. 87–88.

36. Дурмишидзе С. В. Расщепление «Б» и «С» ароматических колец БП растениями в стерильных условиях / С. В. Дурмишидзе, Т. В. Девдариани, Л. К. Кавтарадзе, Т. В. Миминошвили // Метаболизм химических загрязнителей биосферы в растениях. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – С. 121–127.

37. Дурмишидзе С. В. О выделении и идентификации некоторых продуктов ферментативного окисления 7,10-С¹⁴-бенз(а)пирена в растениях / С. В. Дурмишидзе, Л. К. Кавтарадзе, Т. В. Девдариани, // Метаболизм химических загрязнителей биосферы в растениях. –Тбилиси: Мецниереба. – 1979.– С. 99–108.
38. Доклад о состоянии и охране окружающей среды в Кемеровской области в 2010г / Кемерово: Администрация Кемеровской области, 2011. – 74 с.
39. Доклад о состоянии и охране окружающей среды в Кемеровской области в 2013г. / Кемерово: Администрация Кемеровской области, 2014. – 278 с.
40. Ермаков А. И. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков, В. В. Арасимович, Н. П. Ярош, Ю. В. Перуанский, Г.А. Луковникова, М. И. Иконникова.– Л.: Агропромиздат. – 1987. – С. 41–45.
41. Еремеева В. Г. Газоустойчивость древесных растений Западной Сибири / В. Г. Еремеева, Е. С. Денисова // Сибирский экологический журнал.– 2011.– № 2 – С. 263–271.
42. Ерофеева Е. А. Оценка качества окружающей сред урбанизированной территории по интенсивности липопероксидации и величине флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* Roth / Е. А. Ерофеева // Записки горного института.– 2013.–Т. 203.– С.166–170.
43. Жиров В. К. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем Севере / В. К. Жиров, Е. И. Голубева, А. Ф. Говорова, А. Х. Хаитбаев. – М: Наука, 2007. – 166 с.
44. Журавлева А. Н. Эколого-биологическое состояние и особенности семенного размножения растений в условиях урбанизированной среды: автореф. дис. ...к. б. н.: 03.02.08 / Журавлева Анастасия Николаевна. – Тольятти, 2012. – 18 с.
45. Завьялов К. Е. Морфология и химический состав листьев опытных культур березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях магнетитового загрязнения / К. Е. Завьялов // Известия ОГАУ.– 2013.– № 3 (41).– С.230–232.

46. Зайцев Г. А. Сосна обыкновенная и нефтехимическое загрязнение: дендрэкологическая характеристика, адаптивный потенциал и использование / Г. А. Зайцев, А. Ю. Кулагин. – М.: Наука, 2006. – 124 с.

47. Зотикова А. П. Сравнительная оценка структурно-функциональной организации листового аппарата хвойных растений на территории г. Горно-Алтайск / А. П. Зотикова, О. Г. Бендер, Р. О. Собчак, Т. П. Астафурова // Вестник Томского государственного университета. – 2007. – № 299(1). – С. 197–200.

48. Зубарева О. Н. Влияние выбросов промышленных предприятий в Средней Сибири на сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris* L.): автореф. дис. ... к. б. н.: 03.00.16 / Зубарева Ольга Николаевна. – Красноярск, 1993. – 21 с.

49. Зайцев Г. Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике / Г. Н. Зайцев. – М.: Наука, 1984. – 424 с.

50. Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. – Киев, 1978. – 246 с.

51. Илькун Г. М. Газоустойчивость растений. Вопросы экологии и физиологии / Г. М. Илькун. – Киев: Наука думка, 1971. – 146 с.

52. Исаков В. И. Изменчивость жилкования листьев некоторых древесных пород по экологическому профилю г. Риги / В. И. Исаков, Л. И. Висковатова // Ботан. журн. 1984. – Т. 69, № 3. – С. 394–399.

53. Кавеленова Л. М. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений / Л. М. Кавеленова, Е. В. Малыхина, С. А. Розно, Ю. В. Смирнов // Поволжский экологический журнал. – 2008. – № 3. – С. 200–210.

54. Кавеленова Л. М. К структурно-функциональным особенностям листьев древесных растений в насаждениях лесостепи / Л. М. Кавеленова, С. А. Розно, Ю. В. Киреева, Ю. В. Смирнов // Бюл. «Самарская Лука». – 2007. – Т. 16, № 3 (21). – С. 568–574.

55. Кагарманов И. Р. Биологические особенности тополей в связи с лесовосстановлением в техногенных условиях Предуралья: автореф. дис. ... к. б. н.: 03.00.05 / Кагарманов Ильдар Раисович. – Уфа: БГУ, 1995. – 18 с.

56. Квеситадзе Г. И. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях / Г. И. Квеситадзе, Г. А. Хатисашвили, Т. А. Садунишвили, З. Г. Евстигнеева. – М.: Наука, 2005. – 199 с.

57. Кизеев А. Н. Изменения морфологических и физиолого-биохимических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения / А.Н. Кизеев // Молодой ученый. – 2011. – Т.1, № 3 (26), – С. 120–126.

58. Киселев П. А. Полиморфизм монооксигеназной системы и его роль в метаболической активации бенз(а)пирена / П. А. Киселев, Н. А. Бовдей, Д. Шварц // Ксенобиотики и живые системы. Материалы III международной научной конференции. 22–24 октября 2008 г. – Минск: изд.центр БГУ. – 2008. – С. 58–60.

59. Князева В. И. Газоустойчивость растений в связи с их систематическим положением и морфо-анатомическими особенностями / В. И. Князева // Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые ассортименты. – М. Горький: акад. ком. хоз. РСФСР, Горьковский ун-т., 1950. – С. 297–303.

60. Кравкина И. М. Влияние атмосферных загрязнителей на структуру листа / И. М. Кравкина // Ботанический журнал. – 1991. – Т. 76. – № 1. – С. 3–9.

61. Красинский Н. П. Озеленение промплощадок дымоустойчивым ассортиментом / Н. П. Красинский. – М.: Наука, 1950. – 219 с.

62. Кузьмин А. В. Интегральная характеристика экологического воздействия на морфогенез листа древесных растений / А.В. Кузьмин // Бюл. Главного ботан. сада. – 1989. – Вып. 151. – С. 76–80.

63. Кулагин А. А. Реализация адаптивного потенциала древесных растений в экстремальных лесорастительных условиях: автореф. дис. ... д. б. н.: 03.00.16 / Кулагин Андрей Алексеевич. – Тольятти, 2006. – 36 с.

64. Кулагин А. А., Шагиева Ю. А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей / А. А. Кулагин, Ю. А. Шагиева. – М.: Наука, 2005. – 190 с.

65. Кулагин А. Ю. Тополя в Предуралье: дендрэкологическая характеристика и использование / А. Ю. Кулагин, И. Р. Кагарманов, Л. Н. Блонская. – Уфа: Гилем, 2000. – 124 с.

66. Кулагин Ю. З. Индустриальная дендрэкология и прогнозирование / Ю. З. Кулагин. – М.: Наука, 1985. – 117 с.
67. Кулагин Ю. З. Древесные растения и промышленная среда / Ю. З. Кулагин. – М.: Наука, 1974. – 125 с.
68. Кулагин Ю. З. Лесообразующие виды, техногенез и прогнозирование / Ю. З. Кулагин. – М.: Наука, 1980. – 115 с.
69. Кулагин А. Ю. Ивы: техногенез и проблемы оптимизации нарушенных ландшафтов / А. Ю. Кулагин. – Уфа: Гилем, 1998. – 193 с.
70. Куровская Л. В. Морфофункциональные особенности хвойных растений в условиях городской среды: автореф. дис. ...к. б. н.: 03.00.05., 03.00.12 / Куровская Лариса Валерьевна. – Томск, 2002. – 22 с.
71. Качалов А. А. Деревья и кустарники / А. А. Качалов. – М.: "Лесная промышленность", 1969. – 408 с.
72. Коропачинский И. Ю. Древесные растения Азиатской России / И. Ю. Коропачинский, Т. Н. Встовская. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002. – 707 с.
73. Коропачинский И. Ю. Древесные растения Сибири / И. Ю. Коропачинский. – Новосибирск: Наука, 1983. – 384 с.
74. Климат Кемерово / под ред. С. Д. Кошинского. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 168 с.
75. Ладанова К. В. Анатомо-морфологические изменения разновозрастной хвои сосны обыкновенной в зоне действия Сыктывкарского лесопромышленного комплекса / К. В. Ладанова, С. Н. Плюснина // Лесной журнал. – 1998. – № 1. – С. 7–11.
76. Лыкшитова Л. С. Эколого-биологические особенности адаптации *Malus baccata* (L.) Borkh., *Ulmus pumila* L., *Syringa vulgaris* L. к воздействию факторов городской среды (на примере г. Улан-Удэ): дис. ...к. б. н.: 03.02.01, 03.02.08 / Лыкшитова Людмила Станиславовна. – Улан-Удэ, 2014. – 125 с.
77. Лакин Г. Ф. Биометрия / Г. Ф. Лакин. – М.: Высшая школа, 1990. – 352 с.

78. Мазунина Л. Е. Особенности анатомии и морфологии высших растений в условиях нефтяного загрязнения / Л. Е. Мазунина // Вестник НВГУ. – 2009. – № 1. – С. 16–18.

79. Майдебуря И. С. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомо-морфологические и биохимические показатели древесных растений : автореф. дис. ... к. б. н. : 03.00.16 / Майдебуря Ирина Сергеевна. – Калининград, 2006. – 22 с.

80. Малый практикум по физиологии растений/под ред. А. Т. Мокроносова. – М.: МГУ, 1994. –183 с.

81. Мальхотра С. С. Биохимическое и физиологическое действие приоритетных загрязняющих веществ / С. С. Мальхотра, А. А. Хан // Загрязнение воздуха и жизнь растений. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – С. 144–189.

82. Мамаев С. А. О проблемах и методах внутривидовой систематики древесных растений. II Амплитуда изменчивости / С. А. Мамаев // Труды ИЭРИЖ «Закономерности формообразования и дифференциации вида у древесных растений». – Свердловск, 1969. – С. 3–38.

83. Мерзляк М. Н. Активированный кислород и окислительные процессы в мембранах растительной клетки / М. Н. Мерзляк. – М.: ВИНТИ, 1989. – 404 с.

84. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (Дополнение к ОНД-86). –С-Пб.: ГГО им. А. И. Воейкова. – 2005. –15 с.

85. Михайлова Т. А. Эколого-физиологическое состояние лесов, загрязненных промышленными эмиссиями: автореф. дис. ...д.б.н.: 03.00.16 / Михайлова Татьяна Алексеевна. – Иркутск, 1996. – 20 с.

86. Мочалова А. Д. Спектрофотометрический метод определения серы в растениях / А. Д. Мочалова // Сельское хозяйство за рубежом. – 1975. – № 4. – 17 с.

87. Неверова О. А. Активность пероксидазы как показатель детоксикационного потенциала древесных растений в зоне выбросов

автотранспорта / О. А. Неверова, Е. Ю. Колмогорова, А. А. Быков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – № 1–3. – С. 384–388.

88. Неверова О. А. Морфо-биометрическая диагностика состояния древесных растений и загрязнения атмосферного воздуха города Кемерово / О. А. Неверова // Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга. – Сыктывкар, 2001 – 137 с.

89. Неверова О. А. Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города (На примере г. Кемерово): дис. ... д. б. н.: 03.00.16/ Неверова Ольга Александровна. – Кемерово, 2004. – 358 с

90. Неверова О. А. Морфофизиологическая оценка состояния древесных растений в условиях урбанизированной среды / О. А. Неверова, Е. Ю. Колмогорова // Межвузовский сборник «Естествознание и гуманизм», Томск, 2006. – Т. 3, № 1. – С. 104–105.

91. Неверова О. А. Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты / О. А. Неверова, Е. Ю. Колмогорова. – Новосибирск: Наука, 2003 – 222 с.

92. Неверова О. А. Ксерофитизация листьев древесных растений как показатель загрязнения атмосферного воздуха (на примере г. Кемерово) / О. А. Неверова, Е. Ю. Колмогорова // Лесн. журн. (известия высших учебных заведений). – 2002. – № 3. – С. 29–33.

93. Неверова О. А. Оценка интенсивности окислительных процессов у древесных растений в зоне действия промышленных выбросов / О. А. Неверова, О. М. Легощина, А. А. Быков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12(33), №1. – С. 776–779.

94. Неверова О. А. Экологическая оценка загрязнения перекрестков города Кемерово выбросами автотранспорта с использованием модельных расчетов и фитоиндикации / О. А. Неверова, А. А. Быков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – №7. – С. 140–146.

95. Неверова О. А. Морфометрическая характеристика древесных пород в условиях действия выбросов промзоны г. Кемерово / О. А. Неверова, О. М. Легощина // Ботанические чтения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Ишим, 11 мая 2011 г.). – Ишим, 2011. – 73 с.

96. Николаевский В. С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации / В. С. Николаевский. – М.: МГУЛ, 1998. – 191 с.

97. Николаевский В. С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации / В. С. Николаевский. – Пушкино, ВНИИЛМ, 2002. – 220 с.

98. Николаевский В. С. Биологические основы газоустойчивости растений / В. С. Николаевский. – Новосибирск: Наука, 1979. – 275 с.

99. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 92 с.

100. Онучин А. А. Структурно-функциональные изменения хвои сосны под влиянием поллютантов в лесостепной зоне средней Сибири / А. А. Онучин, Л. Н. Козлова // Лесоведение. – 1993. – № 2. – С. 39–45.

101. Павлова Л. М. Состояние фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных растений в городской среде / Л. М. Павлова, И. М. Котельникова, Н. Г. Куимова, Н. Ю. Леусова, Л. П. Шумилова // Экология урбанизированных территорий. – 2010. – № 2. – С. 98–105.

102. Пахомова В. М. Основные положения современной теории стресса и неспецифический адаптационный синдром у растений / В. М. Пахомова // Цитология. – 1995. – № 1 (2). – С. 66–91.

103. Пашкова А. С. Биоэкологические особенности *Picea abies* L. и *Picea pungens* Engelm. в условиях городской среды: автореф. ... дис. к. б. н.: 03.02.01., 03.02.08 / Пашкова Анна Сергеевна. – Оренбург, 2015. – 24 с.

104. Плешков Б. П. Практикум по биохимии растений / Б. П. Плешков. – М.: Колос, 1976. – С. 10–13.

105. Поварницина Т. М. Эколого-физиологические особенности адаптации древесных растений к условиям крупных промышленных центров (на примере г. Ижевска): автореф. дис. ... к. б. н.: 03.00.16 / Поварницина Татьяна Михайловна. – Тольятти, 2007. – 20 с.

106. Полевой В. В. Физиология роста и развития растений / В. В. Полевой, Т. С. Саламатова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 240 с.

107. Половникова М. Г. Эколого-физиологические особенности горных растений на разных этапах онтогенеза в условиях городской среды : автореф. дисс. ... к. б. н.: 03.00.12, 03.00.16 / Половникова Марина Григорьевна. – Нижний Новгород, 2007. – 24 с.

108. Рачковская, М. М. Изменение активности некоторых оксидаз как показатель адаптации растений к условиям промышленного загрязнения / М. М. Рачковская, Л. О. Ким // Газоустойчивость растений. – Новосибирск: Наука, 1980. – С. 117–126.

109. Сезонные изменения активности пероксидазы в ассимиляционном аппарате ели колючей в условиях городской среды / Е. А. Сидорович, И. А. Шобанова, С. В. Судейная, О. Н. Мурашко // Проблемы озеленения городов: альм. – М.: Прима – М., 2004. – Вып. 10. – С. 175–180.

110. Сергейчик С. А. Древесные растения и оптимизация промышленной среды / С. А. Сергейчик. – Минск, 1984. – 166 с.

111. Сергейчик С. А. Устойчивость древесных растений в техногенной среде / С. А. Сергейчик. – Минск: Наука и техника, 1994. – 280 с.

112. Смирнова О. В. Популяционная организация растительного покрова лесных территорий (на примере широколиственных лесов Европейской части России) / О. В. Смирнова, А. А. Чистякова, Р. В. Попатюк и др. – Пущино, 1990. – 92 с.

113. Соболева О. М. Комплексная оценка состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в г. Новокузнецке / О. М. Соболева, Е. П. Кондратенко, Л. Г. Пинчук // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 7 (57). – С. 33–36.

114. Собчак Р. О. Диагностика состояния видов хвойных в зонах техногенного загрязнения Республики Алтай / Р. О. Собчак // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 325. – С. 185–190.

115. Собчак Р. О., Дегтярева О. Н., Астафурова Т. П. Комплексная оценка состояния пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb. в условиях городской среды / Р. О. Собчак, О. Н. Дегтярева, Т. П. Астафурова // Хвойные бореальные зоны. – 2004. – Вып. 2. – С. 100–109.

116. Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М. Древесные растения в условиях техногенной среды / Л. Н. Сунцова, Е. М. Иншаков // Хвойные бореальной зоны. – 2007. – Т. 24, № 1. – С. 95–99.

117. Тарабрин В. П. Адаптация растений в условиях индустриальной среды / В. П. Тарабрин // Всес. Совещ. по вопросам адаптации древесных растений к экстремальным условиям среды. – Петрозаводск: Изд-во КФ АН СССР, 1981. – С. 125–126.

118. Тарабрин В. П. Устойчивость древесных растений в условиях промышленного загрязнения среды: автореф. ... дис. д. б. н. / В. П. Тарабрин. Киев, 1974. – 54 с.

119. Тарабрин В. П., Кондратюк Е. Н., Башкатов В. Г. и др. Фитотоксичность органических и неорганических загрязнений / В. П. Тарабрин, Е. Н. Кондратюк, В. Г. Башкатов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 215 с.

120. Тарабрин В. П. Водный режим и устойчивость древесных растений к промышленным загрязнениям // Газоустойчивость растений. сб. науч. тр.; отв. ред. В. С. Николаевский. – М.: Изд-во «Наука», 1980. – С. 18–29.

121. Тарчевский В. В. Влияние дымогазовых выделений промышленных предприятий Урала на растительность / В. В. Тарчевский // Растения и промышленная среда. – Свердловск: УрГУ, 1964. – С. 5–69.

122. Титова Н. М. Реакция пигментной системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на загрязнение окружающей среды [Электронный ресурс] / Н. М. Титова // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 10. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/reaktsiya-pigmentnoy-sistemy-sosny-obyknovennoy->

pinus-sylvestris-l-na-zagryaznenie-okruzhayuschey-sredy (дата обращения: 23.03.2017)

123. Токарева Т. Г. Экологическая оценка техногенного воздействия на еловые леса Кольского полуострова: дисс. ... к. б. н.: 03.00.16/ Токарева Татьяна Георгиевна. – М., 1992. – 165 с.

124. Трошкова И. Ю., Винокурова Р. И. Особенности накопления бетулина и суберина в коре деревьев *Betula pendula*, произрастающих на территориях различного функционального использования / И. Ю. Трошкова, Р. И. Винокурова // Современные проблемы аграрной науки и пути их решения: мат. Всерос. Научно-практ. конф. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА. – 2005. – С. 278–282.

125. Турмухаметова Н. В. Особенности морфогенеза побегов и феноритмов *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. в условиях городской среды: автореф. дисс. ... к. б. н.: 03.00.16 / Турмухаметова Нина Валерьевна. – Новосибирск, 2005. – 19 с.

126. Тужилкина В. В. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение / В. В. Тужилкина // Экология. – 2009. – №4. – С. 243 – 248.

127. Убаева Р. Ш. Влияние загрязнения воздушной среды на структуру листа клена остролистного (*Acer platanoides* L.) в условиях г. Грозного. [Электронный ресурс] / Р. Ш. Убаева. – Режим доступа: http://vernadsky.tstu.ru/pdf/2009/03/rus_03_2009_3.pdf. (дата обращения: 12.11.2017)

128. Уразгильдин Р. В. Анатомия листьев *Populus balsamifera* при промышленном загрязнении / Р. В. Уразгильдин // Тезисы докладов. Всероссийская конференция «Научные аспекты экологических проблем России». – Москва, 13–16 июня, 2001 г. – СПб: Гидрометеиздат. – С. 84.

129. Федорков А. Л. Изменчивость признаков анатомического строения хвои сосны и ее устойчивость к техногенному и климатическому стрессу / А. Л. Федорков // Экология. – 2002. – № 1. – С. 70–72.

130. Фролов А. К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем / А. К. Фролов. – СПб.: Наука, 1998. – 328 с.

131. Фуксман И. Л. Фенольные соединения хвойных деревьев в условиях стресса / И. Л. Фуксман, Л. Л. Новицкая, В. А. Исидоров, В. И. Рощин // – Лесоведение, 2005, № 3. – С. 4–10.
132. Фурст Г. Г. Методы анатомо-гистохимического исследования растительных тканей / Г. Г. Фурст. – М.: Наука, 1979. – 155 с.
133. Цандекова О. Л. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений / О. Л. Цандекова, О. А. Неверова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – №1–3. – С. 853–856.
134. Чернышенко О. В. Деревья в городе /О. В. Чернышенко// Лесохоз. инф. –1999. – № 7 (8). – С. 15–21.
135. Чиркова Т. В. Физиологические основы устойчивости растений: Учеб. Пособие / Т. В. Чиркова. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2002. – 244 с.
136. Чупахина Г. Н. Адаптация растений к нефтяному стрессу / Г. Н. Чупахина, П. В. Масленников // Экология. – 2004. – № 5. – С. 330–335.
137. Чупахина Г. Н. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта / Г. Н. Чупахина, П. В. Масленников, Л. Н. Скрыпник, М. И. Бессережнова // Вестн. Том. гос. ун-та. – Биология. – 2012. – № 2(18). – С. 171–185.
138. Шебалова Н. М. К механизмам повреждения и устойчивости сосны обыкновенной, произрастающей в зонах техногенного загрязнения / Н. М. Шебалова, Л. Г. Бабушкина // Изв. вузов. Лесной. журнал. – 2000. – № 5–6. –С. 26–31.
139. Шипулин А. Я., Калинин А. М., Никифоров Г. В. Леса Кузбасса / А. Я. Шипулин, А. М. Калинин, Г. В. Никифоров. – Кемерово: Кемер. кн. изд-во, 1970. – 223 с.
140. Шиманюк А. П. Биология древесных и кустарниковых пород СССР / А. П. Шиманюк. – М: Просвещение, 1964. – 480 с.
141. Эсау. К. Анатомия растений /К. Эсау. – М.: Мир, 1969.– 564 с.

142. Ярмишко В. Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере / В. Т. Ярмишко. – СПб.: Изд-во НИИСХ СПбГУ, 1997. – 210 с.

143. Bruno Francisco Sant'Anna-Santos. Effects of simulated acid rain on leaf anatomy and micromorphology of *Genipa americana* L. (Rubiacea) / Bruno Francisco Sant'Anna-Santos; Luzimar Campos da Silva; Aristéa Alves Azevedo; Rosane Aguiar // Braz.arch. biol. technol. [online]. – 2006. – 49(2). – P. 313–321.

144. Burghardt M. Ecophysiological relevance of cuticular transpiration of deciduous and evergreen plants in relation to stomatal closure and leaf water potential / M. Burghardt, V. Riederer // J. of Experimental Botany. – 2003. – Vol. 54, № 389. – P. 1941–1949.

145. Bussotti F. Leaf morphology and macronutrients in broadleaved trees in central Italy / F. Bussotti, F. Borghini, C. Celesti, C. Leonzio, P. Bruschi // Trees. – 2000. – Vol. 14, № 7. – P. 361–368.

146. Castillo F J. Extracellular biochemical markers of photochemical oxidant air pollution damage to Norway spruce / F J Castillo, P R Miller, H. Greppin // Experientia. – 1987. – Bd. 43. – S. 111–115.

147. Elina O Ksanen. Structural characteristics and chemical composition of birch (*Betula pendula*) leaves are modified by increasing CO₂ and ozone / Elina O Ksanen, Johanna Riko Nenwz, Seija Kaakinenz, ToniI Holopain Enw and Elina Vapaavuoriz // Global Change Biology. – 2005. – № 11. – S. 732–748.

148. Gomes M. P. Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiaria decumbens* / M. P. Gomes, T. C. L. L. S. M. Marques, M. O. G. Nogueira , E. M. Castro, & A. M. Soares// Scientia Agricola. – 2011. – № 68. – S. 566–573.

149. Gonçalves J. F. Cadmium toxicity causes oxidative stress and induces response of the antioxidant system in cucumber seedlings / J. F. Gonçalves, A. G. Becker, D. Cargnelutti, L. A. Tabaldi, L. B. Pereira, V. Battisti, R. M. Spanevello, V. M. Morsch, F. T. Nicoloso, M. R. C. Schetinger // Braz. J. Plant Physiol. – 2007. – № 19. – S. 223–232.

150. Pereira L. B. Aluminum-induced oxidative stress in cucumber / L. B. Pereira , C. M. Mazzanti, J. F. Gonçalves, D. Cargnelutti, L. A. Tabaldi, A. G. Becker, N. S. Calgaroto, J. G. Farias , V. Battisti, D. Bohrer, F. T. Nicoloso, V. M. Morsch, M. R. Schetinger // *Plant Physiol , Biochem.* – 2010. – Vol. 48 (8).–P. 683–689.

151. Hoch W. A. Physiological significance of anthocyanin during autumnal leaf senescence / W. A. Hoch, E. L. Zeldin, B. H. McCown // *Tree Physiology.* – 2001. – Vol. 21, № 1. – P. 1–8.

152. Johanna Riikonen Kevin E. Percy. Leaf size and surface characteristics of *Betula papyrifera* exposed to elevated CO₂ and O₃ / Johanna Riikonen Kevin E. Percy, Minna Kivimäki, Mark E. Kubiske, Neil D. Nelson, Elina Vapaavuori, David F. Karnosky // *Environmental Pollution.* – 2010. – Vol. 158. – P. 1029–1035.

153. Kolb T. E. Boxelder water sources and physiology at perennial and ephemeral stream sites in Arizona / T. E. Kolb, S. C. Hart // *Tree Physiology.* – 1997. – Vol. 17. – P. 151–160.

154. Kovacic S. Relations between *Betula pendula* Roth (*Betulaceae*) leaf morphology and environmental factors in five regions of Croatia / S. Kovacic, T. Nikolic // *Acta Biologica Cracoviensia.* – 2005. – Vol. 47. – P. 7–13.

155. Kapitonova O. A. Specific anatomical features of vegetative organs in some macrophyte species under conditions of industrial pollution / O. A. Kapitonova // *Russian Journal of Ecology.* – 2002. – № 33(1). –S. 59–61.

156. Lichthenthaller H. K. Adaptation of chloroplast-ultrastructure and chlorophyll-protein levels to high-light and low-light growth conditions / H. K. Lichthenthaller, G. Kuhn, U. Prenzel // *Z. Naturforsch.* – 1982. – Vol. 37, № 4. – P. 464–475.

157. Liezel M. M. Morpho-anatomical characterization of *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) gray growing on sites exposed to vehicular emissions / M. M. Liezel, G. M. Deemson, P. L. Fideliz // *International journal of plant, animal and environmental sciences.* – 2013. – Vol. 3(3). – P. 168–172.

158. Mansfield T. A. Interactions between air pollutants and other limiting factors / T. A. Mansfield, P. W. Lucas, E. A. Wright // Air Pollut. and Ecosyst.: Proc. Intern. Symp. Grenoble. Dordrecht. – 1988. – P. 123–141.

159. Mittler R. Oxidative Stress, Antioxidants, and Stress Tolerance / R. Mittler // Trends Sci. – 2002. – Vol. 7. – P. 405–409.

160. Maya Kurteva M. *Acer pseudoplatanus* L., *Acer platanoides* L. and *Betula pendula* Roth. as bioindicators of urban pollution in Sofia / Maya Kurteva M., Katerina Stambolieva K //Silva Balcanica. – 2007. – Bd. 8(1). – S. 32–46.

161. Ninemets U. An analysis of light effects on foliar morphology, physiology and light interception in temperate deciduous woody species of contrasting shade tolerance / U. Ninemets, O. Kull, J.D. Tenhunen // Tree Physiology. – 1998. – Vol. 18. – P. 681–696.

162. Nuhoglu Y. The harmful effects of air pollutants around the Yenikoy thermal power plant on architecture of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) needles / Y. Nuhoglu // J Environ Biol. – 2005 Jun. – Vol. 26 (2). – P. 315–322.

163. Ristic Z. Leaf cuticle and water loss in maize lines differing in dehydration avoidance / Z. Ristic, and M. Jenks//Journal of Plant Physiology. – 2002. – Vol. 159. – P. 645–651.

164. Sandermann H. Jr.: Higher Plant Metabolism of Xenobiotics: The 'Green Liver' Concept / H. Jr. Sandermann // Pharmacogenetics. – 1994. – Vol. 4. – P. 225–241.

165. Sinha S. Bioaccumulation and biochemical effects of mercury in the plant *Bacopa monnieri* (L) / S. Sinha, M. Gupta, P. Chandra //Environ. Toxicol. Water Quality. – 1996. – Vol. 11. – P. 105–112.

166. Snejana B. D. Leaf blade structure and the tolerance of *Acer negundo* L. (Box elder) to the polluted environment / B. D. Snejana //Dendrobiology. – 2005. – Vol. 53. – P. 11–16.

167. Tewari R. K. Modulation of oxidative stress responsive enzymes by excess cobalt / R. K. Tewari, P. Kumar, P. N. Sharma, S. S. Bisht // Plant Science. – 2002. – Vol. 162. – P. 381–388.

168. Uribe-Salas D. Foliar morphological variation in the white oak *Quercus rugosa* Nee (Fagaceae) along a latitudinal gradient in Mexico: Potential implications for management and conservation / D. Uribe-Salas, C. Saenz-Romero, A. Gonzalez-Rodriguez, O. Tellez-Valdez, K. Oyama // Forest ecology and management. – 2008. – Vol. 256(12). – P. 2121–2126.

169. Wyszowski M. Effect of soil contamination by copper on the content of macro elements in spring barley / M. Wyszowski, J. Wyszowska // Polish Journal Natural Sciences. – 2003. – Vol. 14. – P. 309–320.

170. Yurekli F. The effects of excessive exposure to copper in bean plants / F. Yurekli, Z.B. Porgali, // Acta Biol. Cracov. – 2006. – Vol. 48. – P. 7–13.

171. Zhang F. Q. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*) / F. Q. Zhang, Y.S. Wang, Z. P. Lou, J. D. Dong // Chemosphere. – 2007. – Vol. 67.– P. 44–50.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Метеорологические условия (2009–2013 гг.)

Таблица А.1 – Метеорологические условия 2009–2013 гг.

Месяц	Температура воздуха, °С	Отклонение от средненоголетней, °С	Осадки, мм	Отклонение от средненого- летней, %
2009				
Январь	-18,9	-1,7	26	93
Февраль	-21,8	-6,2	27	159
Март	-7,5	+1,0	7	47
Апрель	4,8	+3,0	27	108
Май	11,7	+1,4	54	123
Июнь	13,9	-2,3	102	152
Июль	19,4	+0,2	72	113
Август	16,1	+0,3	62	98
Сентябрь	10,1	+0,7	29	73
Октябрь	1,5	-0,3	58	135
Ноябрь	-8,9	-0,9	54	138
Декабрь	-19,6	-5,4	59	174
2010				
Январь	-27,3	-10,1	11	39
Февраль	-24,4	-8,8	12	71
Март	-8,6	-0,1	44	293
Апрель	1,1	-0,7	35	140
Май	8,6	-1,7	29	66
Июнь	16,7	+0,4	24	36
Июль	16,9	-1,9	137	214
Август	15,4	-0,4	72	114

Сентябрь	9,4	0,0	22	55
Октябрь	4,3	+2,5	30	70
Ноябрь	-3,5	+4,5	75	192
Декабрь	-21,3	-7,1	74	218
2011				
Январь	-24,2	-7,2	3	11
Февраль	-14,6	-0,1	22	116
Март	-7,3	-0,0	15	79
Апрель	6,0	+4,1	52	200
Май	11,1	-0,1	22	55
Июнь	19,2	+2,7	54	79
Июль	16,6	-2,4	57	79
Август	14,9	-1,3	63	102
Сентябрь	10,1	+0,5	37	90
Октябрь	5,8	+3,4	38	84
Ноябрь	-8,3	-0,9	28	64
Декабрь	-14,2	+0,3	27	66
2012				
Январь	-21,8	-4,8	14	50
Февраль	-21,3	-6,6	3	16
Март	-4,9	+2,4	12	63
Апрель	+5,2	+3,3	25	96
Май	+10,6	-0,6	35	88
Июнь	+21,4	+4,9	17	25
Июль	+21,9	+2,9	15	21
Август	+16,1	-0,1	80	129
Сентябрь	+11,4	+1,8	59	144
Октябрь	+1,7	-0,7	49	109

Ноябрь	-7,5	-0,1	68	155
Декабрь	-25,3	-10,8	29	71
2013				
Январь	-17,0	0,0	30	107
Февраль	-15,1	-0,4	33	174
Март	-6,3	+1,0	28	147
Апрель	+3,5	+1,6	32	123
Май	+8,3	-2,9	64	160
Июнь	+14,6	-1,9	41	60
Июль	+18,4	-0,6	129	179
Август	+16,8	+0,6	135	218
Сентябрь	+8,7	-0,9	44	107
Октябрь	+2,6	+0,2	40	89
Ноябрь	-0,9	+6,5	31	70
Декабрь	-6,8	+7,7	41	100

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Активность пероксидазы в листьях исследуемых древесных растений

Таблица Б.1 – Активность пероксидазы в хвое ели сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Активность пероксидазы в ед. активности			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	1,56±0,03*	3,13±0,30	3,00±0,29*
2	1,07±0,09	2,50±0,17	2,65±0,18*
3	1,09±0,11	1,89±0,17	2,08±0,21*
4	0,94±0,01	1,61±0,13	1,82±0,16
5	0,89±0,08	2,29±0,03	2,12±0,11*
6	0,81±0,03	2,18±0,11	1,46±0,13
2010			
1	2,27±0,11*	4,91±0,22*	5,22±0,15*
2	1,95±0,08*	3,28±0,16*	4,25±0,21*
3	1,94±0,09*	2,13±0,09*	2,51±0,11*
4	1,10±0,05*	1,21±0,05	1,10±0,04
5	0,97±0,04*	1,92±0,08*	2,71±0,26*
6	1,48±0,07	1,46±0,06	1,19±0,05
2011			
1	3,05±0,14*	5,05±0,22*	4,31±0,21*
2	2,46±0,12*	3,54±0,15	2,41±0,11*
3	1,89±0,08	2,18±0,11*	1,96±0,07
4	2,63±0,12*	4,71±0,22*	2,97±0,12*
5	2,61±0,11*	3,96±0,16	2,51±0,11
6	1,49±0,06	3,45±0,15	1,70±0,07
2012			
1	2,02±0,09*	3,86±0,08*	5,36±0,08*
2	1,86±0,11*	4,02±0,07*	4,76±0,12*
3	1,82±0,12*	3,29±0,07*	3,16±0,11*
4	1,11±0,07	1,89±0,09*	2,11±0,09*
5	0,91±0,06	1,76±0,07*	1,75±0,07*
6	0,83±0,08	0,92±0,07	1,48±0,06
2013			
1	3,45±0,19*	4,21±0,06*	6,02±0,12*
2	3,11±0,15*	4,03±0,13*	5,64±0,13*
3	2,65±0,07	3,58±0,08*	4,74±0,12*
4	2,19±0,13	3,68±0,13	3,49±0,10
5	1,25±0,14	2,69±0,08	3,81±0,12
6	0,93±0,08	1,87±0,09	2,04±0,13

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

Таблица Б.2 – Активность пероксидазы в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Активность пероксидазы в ед. активности			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	7,90±0,64 [*]	6,56±0,63 [*]	10,28±0,95 [*]
2	6,82±0,65 [*]	6,27±0,61 [*]	10,00±0,96 [*]
3	5,00±0,49 [*]	5,63±0,52 [*]	9,30±0,87 [*]
4	3,57±0,34	2,27±0,21	6,51±0,64
5	3,84±0,37	2,67±0,26	6,58±0,62
6	2,33±0,23	3,46±0,32	6,24±0,61
2010			
1	7,16±0,32 [*]	7,00±0,30	7,16±0,22 [*]
2	7,51±0,31 [*]	7,23±0,32	6,28±0,30 [*]
3	5,77±0,27	6,28±0,30	6,20±0,29 [*]
4	4,75±0,22	4,77±0,22	5,12±0,26
5	5,69±0,25	5,83±0,26	5,79±0,26
6	4,15±0,22	6,20±0,30	4,25±0,20
2011			
1	5,71±0,26 [*]	6,78±0,31 [*]	5,36±0,21 [*]
2	9,72±0,42 [*]	12,56±0,58 [*]	9,23±0,42 [*]
3	4,19±0,18 [*]	4,92±0,21 [*]	4,59±0,21 [*]
4	3,77±0,14 [*]	10,30±0,51 [*]	6,08±0,29 [*]
5	3,81±0,15 [*]	8,93±0,41 [*]	8,86±0,42 [*]
6	2,23±0,11	2,82±0,12	1,96±0,08
2012			
1	5,64±0,03 [*]	6,25±0,02 [*]	7,23±0,02 [*]
2	6,23±0,02 [*]	5,26±0,04 [*]	7,12±0,06 [*]
3	5,02±0,02 [*]	5,36±0,02 [*]	6,84±0,03 [*]
4	4,26±0,03 [*]	4,80±0,03 [*]	5,12±0,03 [*]
5	5,13±0,02 [*]	4,25±0,02 [*]	5,64±0,02 [*]
6	3,46±0,03	3,16±0,03	4,27±0,04
2013			
1	6,33±0,18 [*]	7,89±0,06 [*]	8,27±0,02 [*]
2	6,29±0,08 [*]	7,27±0,04 [*]	9,03±0,06 [*]
3	5,24±0,02 [*]	6,13±0,02 [*]	6,23±0,02 [*]
4	4,31±0,04 [*]	5,20±0,02 [*]	5,44±0,02 [*]
5	4,47±0,05 [*]	4,08±0,08 [*]	5,74±0,03 [*]
6	3,19±0,04	3,81±0,02	4,06±0,03

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица Б.3 – Активность пероксидазы в листьях березы повислой на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Активность пероксидазы в ед. активности			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	3,98±0,04*	8,49±0,70*	5,03±0,35*
2	2,96±0,11*	4,27±0,41*	4,25±0,42*
3	1,85±0,17*	4,80±0,42*	4,00±0,40*
4	1,26±0,11	2,70±0,24*	2,67±0,25*
5	1,09±0,12	2,68±0,25*	1,70±0,15
6	1,29±0,11	2,00±0,22	1,23±0,11
2010			
1	4,54±0,22	5,12±0,24	6,27±0,31*
2	3,25±0,16	6,72±0,33*	7,72±0,36*
3	2,87±0,13	4,30±0,21	5,36±0,25*
4	1,06±0,05*	2,23±0,11*	3,38±0,16
5	3,54±0,15	5,00±0,25	3,74±0,17
6	3,74±0,18	4,70±0,23	4,15±0,21
2011			
1	3,96±0,15*	6,15±0,29*	2,93±0,13
2	4,42±0,19*	6,03±0,28*	5,60±0,25*
3	3,36±0,13*	3,63±0,16	2,17±0,09
4	1,34±0,06	2,14±0,09*	1,56±0,06*
5	3,83±0,17*	4,16±0,19*	3,67±0,16*
6	1,53±0,07	3,13±0,14	2,32±0,10
2012			
1	5,27±0,05*	6,24±0,02*	5,49±0,04*
2	5,01±0,05*	5,94±0,02*	5,01±0,02*
3	4,63±0,03*	4,17±0,05*	4,34±0,06*
4	3,27±0,04*	3,93±0,05*	3,22±0,04*
5	3,09±0,04*	4,02±0,03*	3,61±0,04*
6	2,16±0,04	3,18±0,04	2,20±0,15
2013			
1	6,23±0,02*	6,79±0,03*	5,97±0,01*
2	5,22±0,01*	7,18±0,05*	5,91±0,06*
3	3,94±0,03*	5,14±0,03*	4,20±0,03*
4	3,06±0,02*	4,35±0,06*	3,46±0,02*
5	3,48±0,03*	4,47±0,05*	3,84±0,02*
6	2,14±0,02	3,04±0,01	2,41±0,01

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Содержание МДА в листьях исследуемых древесных растений

Таблица В.1 – Содержание малонового диальдегида (МДА) в хвое ели сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

<i>МДА, нмоль/г</i>			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	40,40±4,2*	44,36±3,01*	29,90±2,10*
2	11,90±0,41*	36,10±3,30	17,70±1,10*
3	10,58±0,81*	30,86±2,30	14,47±0,70*
4	19,40±1,14*	31,12±2,70	14,86±1,30*
5	11,80±1,21	18,40±1,10	11,02±1,10
6	6,29±1,92	24,80±2,10	7,64±0,30
2010			
1	4,78±0,22	4,96±0,22*	6,41±0,28*
2	3,89±0,15	4,60±0,22*	9,76±0,46*
3	4,41±0,21	4,65±0,23*	7,22±0,35*
4	4,11±0,21	4,02±0,21	4,07±0,21
5	3,41±0,13	3,01±0,16	3,73±0,16
6	4,05±0,16	3,35±0,21	4,19±0,20
2011			
1	13,89±0,72*	11,76±0,56*	14,95±0,68*
2	13,49±0,65*	12,11±0,60*	16,05±0,75*
3	7,29±0,32	10,00±0,48*	10,95±0,53
4	8,88±0,40	9,36±0,44	10,19±0,48
5	7,09±0,32	8,87±0,42	11,82±0,56
6	8,65±0,41	7,80±0,36	11,05±0,51
2012			
1	10,46±0,54*	11,92±0,58*	13,81±0,55*
2	10,21±1,14*	10,43±0,57*	14,97 ±0,87*
3	8,23±0,59	9,68±0,53	12,03±0,59*
4	7,56±0,54	8,87±0,57	11,94±0,34*
5	6,71±0,92	8,01±0,65	7,99±0,55
6	6,22±0,59	7,30±0,69	8,21±0,43
2013			
1	15,81±0,48*	13,41±0,58*	17,82±0,54*
2	15,05±0,59*	14,12±0,57*	18,17±0,59*
3	14,89±0,61*	12,08±0,57*	15,35±0,52*
4	13,13±0,54*	10,84±0,51	12,89±0,64
5	10,81±0,80	9,34±0,64	11,13±0,56
6	10,95±0,55	9,22±0,54	10,25±0,55

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

Таблица В.2 – Содержание малонового диальдегида (МДА) в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

<i>МДА, нмоль/г</i>			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	33,18±3,21*	34,42±2,90*	33,03±2,11*
2	14,19±0,20*	28,30±2,10*	31,07±2,91*
3	11,30±1,10	15,80±1,30*	20,36±1,61*
4	16,01±1,50*	18,90±1,60*	32,20±1,61*
5	12,60±1,10*	16,52±0,50*	17,03±0,91*
6	8,20±0,80	10,72±0,91	10,24±0,91
2010			
1	9,29±0,52*	10,49±0,54*	10,99±0,60*
2	8,19±0,42	9,51±0,50*	10,39±0,53*
3	7,84±0,36	8,55±0,50*	9,76±0,51
4	7,04±0,29	8,43±0,39	8,75±0,49
5	7,63±0,27	8,05±0,32	8,23±0,45
6	7,64±0,25	7,95±0,29	8,50±0,42
2011			
1	12,87±0,62*	12,11±0,58*	18,18±0,87*
2	8,97±0,41	11,91±0,56*	14,29±0,67*
3	9,62±0,46	11,54±0,53	12,96±0,62
4	9,69±0,42	10,66±0,51	13,15±0,63
5	9,89±0,43	10,54±0,50	12,33±0,59
6	10,72±0,52	10,79±0,52	12,94±0,58
2012			
1	11,86±0,60*	10,16±0,59*	14,85±0,39*
2	10,45±0,52*	9,45±0,60	12,83±0,60*
3	9,03±0,61	9,11±0,55	11,07±0,55
4	9,50±0,62	8,73±0,72	10,29±0,47
5	8,17±0,25	7,19±0,59	8,52±0,73
6	7,65±0,60	7,56±0,59	9,04±0,57
2013			
1	17,86±0,41*	14,11±0,61	19,35±0,71*
2	17,22±0,66*	13,86±0,1*	17,82±0,52*
3	15,91±0,55*	12,19±0,50	15,69±0,46*
4	14,56±0,54	12,85±0,56	16,11±0,57*
5	13,23±0,51	11,64±0,52	14,81±0,53*
6	12,88±0,50	10,99±0,92	13,36±0,22

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

Таблица В.3 – Содержание малонового диальдегида (МДА) в листьях березы повислой на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

<i>МДА, нмоль/г</i>			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	36,54±3,20*	67,60±2,52*	66,70±2,20*
2	15,07±1,30	55,28±2,51*	57,98±2,81*
3	15,22±1,21	43,50±3,60*	29,03±1,61
4	15,66±1,62	28,23±2,60	37,10±3,51*
5	14,20±1,31	44,80±4,10	26,55±2,11
6	12,23±1,22	19,60±1,50	22,30±2,20
2010			
1	10,73±0,43*	11,30±0,5*	13,20±0,52*
2	9,07±0,32*	10,73±0,45*	12,80±0,48*
3	8,00±0,35	10,52±0,38*	11,25±0,35*
4	7,30±0,23	8,54±0,35	10,32±0,36*
5	7,86±0,24	8,69±0,31	9,38±0,32
6	7,35±0,23	7,48±0,36	8,50±0,29
2011			
1	13,23±0,63*	15,53±0,74*	17,28±0,81*
2	14,19±0,67*	13,83±0,64	15,54±0,72
3	11,88±0,54	11,28±0,52	13,61±0,67
4	11,52±0,53	12,87±0,61	13,58±0,63
5	12,32±0,59	13,68±0,64	14,93±0,73
6	11,86±0,57	13,29±0,63	14,56±0,70
2012			
1	14,89±0,50*	15,48±0,46*	18,21±0,52*
2	13,67±0,67*	14,03±0,55*	16,33±0,40*
3	12,24±0,54	13,96±0,53*	14,03±0,52
4	12,96±0,59*	14,92±0,58*	15,55±0,48*
5	11,28±0,25	12,87±0,64	14,21±0,46*
6	10,36±0,48	11,16±0,50	12,17±0,50
2013			
1	15,89±0,50*	16,23±0,51*	18,54±0,48*
2	14,77±0,48*	15,73±0,50*	17,88±0,50*
3	13,73±0,17*	15,66±0,22*	15,49±0,32*
4	13,04±0,57	14,92±0,28*	16,20±0,54*
5	12,83±0,51	13,06±0,56*	15,02±0,56
6	11,43±0,49	10,82±0,52	13,68±0,47

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Содержание хлорофилла *a* в листьях исследуемых древесных растенийТаблица Г.1 – Содержание хлорофилла *a* в хвое ели сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>a</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,14±0,01*	0,62±0,01*	0,66±0,03*
2	0,19±0,02*	0,71±0,01*	0,69±0,02*
3	0,23±0,01	0,75±0,06*	0,76±0,03*
4	0,23±0,02	0,79±0,01*	0,92±0,06
5	0,24±0,02	0,98±0,01*	0,93±0,05
6	0,27±0,01	1,06±0,01	1,08±0,01
2010			
1	0,64±0,02*	0,8±0,01*	0,87±0,03*
2	0,71±0,03*	0,83±0,01*	0,89±0,04*
3	0,74±0,03*	0,88±0,01*	1,03±0,05
4	1,06±0,05	1,1±0,05*	0,94±0,04
5	0,89±0,03	0,92±0,01*	0,98±0,04
6	1,12±0,05	1,43±0,02	1,18±0,07
2011			
1	0,75±0,03*	0,78±0,04*	0,76±0,04*
2	0,98±0,05	1,07±0,05	0,96±0,05
3	0,97±0,05	1,01±0,05*	0,99±0,04
4	0,96±0,05	1,07±0,05	1,06±0,05
5	1,20±0,06	1,37±0,06	1,13±0,05
6	1,00±0,04	1,28±0,06	1,18±0,05
2012			
1	0,69±0,02*	0,91±0,05*	0,85±0,03*
2	0,73±0,03*	0,96±0,05*	0,89±0,03*
3	0,79±0,09	0,97±0,09*	1,15±0,08
4	0,96±0,09	1,12±0,06*	1,26±0,08*
5	0,82±0,07	0,91±0,06*	1,31±0,06*
6	1,04±0,06	1,56±0,06	1,01±0,03
2013			
1	0,79±0,03*	0,92±0,03*	0,84±0,03*
2	0,86±0,04*	0,98±0,02*	0,95±0,03*
3	0,89±0,04*	1,16±0,05	0,99±0,03*
4	0,94±0,06	1,01±0,07	1,16±0,06
5	1,13±0,06	1,25±0,07	1,25±0,05
6	1,08±0,06	1,14±0,02	1,10±0,04

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица Г.2 – Содержание хлорофилла *a* в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>a</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,25±0,02*	1,04±0,01*	1,17±0,01*
2	0,33±0,03	1,29±0,01*	1,25±0,01*
3	0,38±0,02	1,39±0,01*	1,23±0,01*
4	0,37±0,01	1,70±0,01	1,33±0,01*
5	0,43±0,03	1,60±0,01	1,76±0,01*
6	0,47±0,04	1,80±0,01	1,90±0,01
2010			
1	1,32±0,04*	1,68±0,07	1,47±0,05
2	1,29±0,04*	1,80±0,07	1,40±0,05*
3	1,36±0,05*	1,73±0,09	1,33±0,04*
4	1,66±0,07	1,85±0,09	1,77±0,04
5	1,48±0,07	1,93±0,09	1,73±0,01
6	1,84±0,09	1,92±0,08	1,75±0,08
2011			
1	1,32±0,06*	1,60±0,09*	1,35±0,06
2	1,62±0,08	1,89±0,09	1,82±0,09
3	1,44±0,07*	1,83±0,09	1,53±0,07
4	1,57±0,08	1,68±0,08*	1,39±0,07
5	1,95±0,09	2,21±0,09	1,95±0,09*
6	1,78±0,08	2,12±0,09	1,57±0,07
2012			
1	1,45±0,07*	1,68±0,06*	1,39±0,05*
2	1,78±0,07*	1,72±0,05*	1,45±0,04*
3	1,56±0,03*	1,79±0,06*	1,52±0,05*
4	1,53±0,03*	1,60±0,06*	1,69±0,05*
5	1,84±0,05*	1,98±0,08	1,83±0,09
6	1,97±0,09	1,86±0,08	1,90±0,08
2013			
1	1,62±0,05*	1,72±0,06*	1,58±0,04*
2	1,74±0,05*	1,86±0,06*	1,65±0,04*
3	1,56±0,04*	1,84±0,06*	1,61±0,04*
4	1,69±0,06	1,93±0,09	1,70±0,06*
5	1,79±0,06	2,12±0,09	1,89±0,08
6	1,89±0,06	2,09±0,09	1,92±0,09

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

Таблица Г.3 – Содержание хлорофилла *a* в листьях березы повислой на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>a</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,19±0,01*	1,38±0,07*	1,34±0,08*
2	0,33±0,02*	1,40±0,11*	1,43±0,12*
3	0,39±0,02	1,52±0,15	1,47±0,12*
4	0,34±0,03	1,94±0,13	1,57±0,12
5	0,43±0,03	2,08±0,20	1,83±0,05
6	0,42±0,01	2,09±0,11	1,89±0,05
2010			
1	1,31±0,06*	1,64±0,07*	1,66±0,06*
2	1,51±0,06	1,75±0,06	1,75±0,06
3	1,55±0,06	1,88±0,04	1,87±0,02
4	1,54±0,06	1,87±0,07	1,88±0,07
5	1,85±0,05	2,09±0,01	2,05±0,10
6	1,75±0,07	2,10±0,10	2,01±0,07
2011			
1	1,55±0,08	1,65±0,08	1,59±0,08
2	1,79±0,09	1,93±0,09	1,87±0,09
3	1,67±0,08	1,83±0,09	1,73±0,08
4	1,72±0,08	1,91±0,09	1,83±0,09
5	1,79±0,08	2,01±0,09	1,97±0,09
6	1,84±0,09	1,99±0,09	1,96±0,09
2012			
1	1,42±0,06*	1,63±0,05*	1,59±0,06*
2	1,53±0,05*	1,81±0,06*	1,51±0,06*
3	1,58±0,06	1,74±0,07*	1,69±0,08
4	1,49±0,05*	1,86±0,08	1,74±0,09
5	1,83±0,06	2,09±0,08	1,86±0,08
6	1,96±0,09	1,96±0,09	1,99±0,09
2013			
1	1,62±0,06*	1,84±0,06*	1,66±0,06*
2	1,58±0,05*	1,94±0,09	1,73±0,06*
3	1,59±0,05*	1,99±0,08	1,69±0,06*
4	1,47±0,05*	1,91±0,09	1,75±0,06*
5	1,93±0,09	2,09±0,09	1,92±0,09
6	1,81±0,08	2,11±0,09	2,01±0,09

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Содержание хлорофилла *b* в листьях исследуемых древесных растений

Таблица Д.1 – Содержание хлорофилла *b* в хвое ели сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>b</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,31±0,03*	0,10±0,01*	0,17±0,02*
2	0,34±0,03*	0,11±0,01*	0,18±0,02*
3	0,44±0,04	0,20±0,02*	0,21±0,02*
4	0,43±0,04	0,27±0,02	0,21±0,02*
5	0,51±0,05	0,37±0,03	0,26±0,02
6	0,55±0,05	0,38±0,03	0,33±0,03
2010			
1	0,19±0,01*	0,27±0,01*	0,27±0,01*
2	0,26±0,01*	0,26±0,01*	0,23±0,01*
3	0,22±0,01*	0,35±0,01*	0,28±0,01*
4	0,31±0,01	0,42±0,02*	0,30±0,01
5	0,33±0,02	0,48±0,03	0,35±0,01
6	0,37±0,02	0,59±0,03	0,35±0,02
2011			
1	0,25±0,01*	0,24±0,01*	0,24±0,01*
2	0,31±0,01	0,26±0,01*	0,32±0,01*
3	0,33±0,01	0,33±0,01*	0,29±0,01*
4	0,32±0,01	0,34±0,02*	0,35±0,01*
5	0,42±0,02*	0,49±0,02	0,41±0,02
6	0,33±0,01	0,42±0,02	0,43±0,02
2012			
1	0,21±0,01*	0,19±0,01*	0,18±0,01*
2	0,26±0,01*	0,18±0,01*	0,19±0,01*
3	0,32±0,02*	0,21±0,01*	0,24±0,01*
4	0,44±0,02	0,27±0,02*	0,29±0,02
5	0,46±0,02	0,36±0,03	0,32±0,02
6	0,60±0,02	0,59±0,03	0,36±0,02
2013			
1	0,26±0,011*	0,22±0,01*	0,20±0,01*
2	0,24±0,02	0,23±0,01*	0,21±0,01*
3	0,31±0,02	0,34±0,02	0,35±0,02
4	0,30±0,02	0,32±0,02	0,30±0,02
5	0,42±0,02	0,45±0,02	0,41±0,02
6	0,33±0,02	0,51±0,02	0,32±0,01

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица Д.2 – Содержание хлорофилла *b* в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>b</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,59±0,05*	0,22±0,02*	0,36±0,03*
2	0,64±0,06	0,29±0,02*	0,39±0,03*
3	0,73±0,07	0,39±0,03*	0,39±0,03*
4	0,74±0,07	0,54±0,05*	0,40±0,04
5	0,80±0,07	0,59±0,05*	0,56±0,05
6	0,98±0,09	1,04±0,10	0,59±0,05
2010			
1	0,39±0,01*	0,36±0,01*	0,51±0,01*
2	0,38±0,01*	0,53±0,02*	0,42±0,01*
3	0,48±0,01*	0,64±0,03	0,50±0,02*
4	0,51±0,02*	0,67±0,03	0,58±0,02
5	0,59±0,02	0,67±0,03	0,60±0,02
6	0,75±0,04	0,76±0,03	0,64±0,03
2011			
1	0,45±0,02*	0,61±0,03*	0,45±0,02
2	0,56±0,03	0,73±0,03*	0,69±0,03
3	0,48±0,02*	0,69±0,03*	0,59±0,03
4	0,56±0,02	0,62±0,03*	0,47±0,03
5	0,85±0,03*	1,15±0,04	0,79±0,04
6	0,68±0,03	1,02±0,04	0,56±0,03
2012			
1	0,51±0,03*	0,68±0,02*	0,43±0,02*
2	0,54±0,05	0,75±0,03*	0,49±0,02*
3	0,52±0,05	0,82±0,03	0,58±0,02*
4	0,59±0,06	0,79±0,02*	0,51±0,02*
5	0,63±0,06	1,12±0,05	0,76±0,04
6	0,76±0,06	1,14±0,05	0,82±0,05
2013			
1	0,59±0,02*	0,65±0,02*	0,61±0,03*
2	0,63±0,03*	0,85±0,03*	0,67±0,03*
3	0,74±0,04	0,89±0,04	0,74±0,07
4	0,69±0,04	0,76±0,05	0,72±0,07
5	0,86±0,04	0,98±0,05	0,89±0,07
6	0,91±0,05	1,13±0,05	0,96±0,08

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица Д.3 – Содержание хлорофилла *б* в листьях березы повислой на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>б</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,65±0,06	0,26±0,02*	0,41±0,04
2	0,72±0,06	0,32±0,03*	0,43±0,04
3	0,73±0,06	0,34±0,03*	0,45±0,04
4	0,79±0,07	0,74±0,07	0,46±0,04
5	0,80±0,08	0,76±0,07	0,51±0,05
6	0,85±0,08	0,78±0,07	0,63±0,06
2010			
1	0,39±0,02*	0,57±0,03*	0,58±0,03*
2	0,49±0,02*	0,67±0,02*	0,65±0,02*
3	0,50±0,03*	0,66±0,03*	0,65±0,02*
4	0,48±0,02*	0,81±0,01*	0,85±0,02
5	0,63±0,03	0,90±0,04	0,82±0,04
6	0,65±0,02	0,96±0,04	0,85±0,03
2011			
1	0,53±0,02*	0,55±0,03*	0,55±0,02*
2	0,68±0,02	0,73±0,04	0,64±0,03
3	0,58±0,02*	0,69±0,03	0,57±0,03*
4	0,59±0,02	0,72±0,03	0,711±0,02
5	0,68±0,04	0,83±0,06	0,79±0,04
6	0,68±0,03	0,82±0,05	0,76±0,02
2012			
1	0,51±0,02*	0,56±0,02*	0,64±0,03*
2	0,54±0,02*	0,68±0,03*	0,69±0,03*
3	0,65±0,02*	0,71±0,03*	0,74±0,03*
4	0,60±0,03*	0,69±0,03*	0,77±0,03*
5	0,81±0,04	0,86±0,04	0,94±0,05
6	0,94±0,05	0,97±0,04	1,05±0,06
2013			
1	0,69±0,03*	0,67±0,02*	0,76±0,02*
2	0,74±0,03*	0,74±0,03*	0,83±0,03*
3	0,71±0,02*	0,79±0,03*	0,79±0,02*
4	0,84±0,03*	0,68±0,02*	0,86±0,03
5	0,94±0,03	0,82±0,03	0,95±0,03
6	0,95±0,04	0,98±0,04	1,04±0,03

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Содержание хлорофилла *a/b* в листьях исследуемых древесных растенийТаблица Е.1 – Относительное содержание хлорофилла *a/b* в хвое ели сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>a/b</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,45±0,04	6,21±0,60*	3,88±0,31
2	0,56±0,05	6,50±0,60*	3,83±0,32
3	0,52±0,05	3,80±0,30*	3,61±0,33
4	0,53±0,05	2,91±0,20	4,38±0,41
5	0,47±0,04	2,60±0,21	3,58±0,31
6	0,49±0,04	2,79±0,23	3,27±0,30
2010			
1	3,56±0,16	2,96±0,14*	3,22±0,14
2	2,73±0,13	3,19±0,15*	4,30±0,15*
3	3,36±0,15	2,51±0,12	3,68±0,16
4	3,41±0,15	2,62±0,10	3,13±0,14
5	2,69±0,12	1,92±0,09*	2,80±0,13
6	3,03±0,13	2,42±0,01	3,37±0,15
2011			
1	3,02±0,14	3,26±0,15	3,19±0,14
2	3,18±0,12	4,07±0,18*	3,02±0,14
3	2,96±0,13	3,08±0,14	3,30±0,15
4	2,97±0,12	3,14±0,13	3,04±0,14
5	2,88±0,13	2,81±0,12	2,77±0,12
6	3,02±0,14	3,08±0,14	2,76±0,12
2012			
1	3,29±0,16*	4,26±0,32*	4,72±0,25*
2	2,81±0,12*	5,33±0,34*	4,68±0,21*
3	2,47±0,11*	4,61±0,22*	4,79±0,23*
4	2,18±0,10	4,14±0,21*	4,34±0,19*
5	1,78±0,09	2,53±0,14	4,09±0,19*
6	1,73±0,09	2,64±0,16	2,81±0,13
2013			
1	3,04±0,14	4,18±0,22*	4,20±0,20*
2	3,58±0,17	4,26±0,24*	4,52±0,23*
3	2,87±0,13	3,41±0,18*	2,83±0,15
4	3,13±0,17	3,16±0,18*	3,87±0,16
5	2,69±0,15	2,78±0,14	3,05±0,14
6	3,27±0,17	2,24±0,12	3,44±0,14

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица Е.2 – Относительное содержание хлорофилла *a/b* в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>a/b</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,42±0,04	4,27±0,39*	3,25±0,30
2	0,52±0,05	4,45±0,38*	3,21±0,29
3	0,52±0,05	3,56±0,32*	3,15±0,25
4	0,50±0,05	3,15±0,29*	3,33±0,24
5	0,54±0,05	2,70±0,20*	3,14±0,30
6	0,48±0,04	1,70±0,17	3,22±0,20
2010			
1	3,38±0,16*	4,67±0,22*	2,88±0,10
2	3,39±0,15*	3,39±0,16*	3,33±0,16
3	2,83±0,13	2,70±0,13	2,66±0,12
4	3,25±0,15*	2,76±0,14	3,05±0,13
5	2,51±0,12	2,88±0,14	2,88±0,13
6	2,45±0,10	2,53±0,12	2,73±0,12
2011			
1	2,95±0,13	2,65±0,12*	2,99±0,13
2	2,88±0,13	2,60±0,11*	2,66±0,12
3	2,98±0,13	2,61±0,11*	2,56±0,11
4	2,80±0,11	2,68±0,12*	2,95±0,13
5	2,31±0,10	1,91±0,09	2,44±0,12
6	2,63±0,12	2,08±0,09	2,81±0,11
2012			
1	2,84±0,18	2,47±0,17*	3,23±0,018*
2	3,30±0,21	2,29±0,14*	2,96±0,13*
3	3,00±0,19	2,18±0,12	2,62±0,14
4	2,59±0,16	2,03±0,10	3,31±0,21
5	2,92±0,18	1,77±0,098	2,41±0,10
6	2,59±0,16	1,63±0,096	2,32±0,10
2013			
1	2,75±0,17*	2,64±0,12*	2,59±0,16*
2	2,76±0,17	2,19±0,17	2,46±0,15*
3	2,11±0,10	2,07±0,10	2,18±0,11
4	2,45±0,13	2,54±0,12	2,36±0,13
5	2,08±0,10	2,16±0,10	2,12±0,11
6	2,08±0,10	1,85±0,89	2,00±0,10

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

Таблица Е.3 – Относительное содержание хлорофилла *a/b* в листьях березы повислой на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Содержание хлорофилла <i>a/b</i> в мг/г			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	0,29±0,02*	5,30±0,50*	3,27±0,29
2	0,46±0,04	4,38±0,40*	3,32±0,31
3	0,53±0,05	4,47±0,40*	3,27±0,33
4	0,43±0,04	2,62±0,21	3,41±0,31
5	0,54±0,05	2,74±0,23	3,50±0,28
6	0,49±0,04	2,68±0,24	3,00±0,27
2010			
1	3,36±0,18	2,88±0,13*	2,86±0,11*
2	3,08±0,13	2,61±0,12	2,69±0,10
3	3,10±0,14	2,84±0,13*	2,88±0,10*
4	3,21±0,15	2,31±0,12	2,24±0,10
5	2,94±0,14	2,32±0,10	2,50±0,10
6	2,69±0,12	2,19±0,10	2,36±0,09
2011			
1	2,92±0,13	2,98±0,13*	2,92±0,13
2	2,66±0,12	2,65±0,12	2,92±0,13
3	2,88±0,13	2,66±0,12	3,05±0,14
4	2,90±0,14	2,65±0,13	2,57±0,11
5	2,62±0,12	2,41±0,11	2,50±0,12
6	2,71±0,12	2,43±0,11	2,56±0,11
2012			
1	2,78±0,15*	2,91±0,16*	2,48±0,12*
2	2,83±0,16*	2,66±0,13*	2,19±0,10
3	2,43±0,13	2,45±0,12	2,28±0,11
4	2,48±0,13	2,70±0,14	2,26±0,11
5	2,26±0,12	2,43±0,12	1,98±0,09
6	2,09±0,10	2,02±0,10	1,90±0,09
2013			
1	2,35±0,13	2,74±0,14*	2,18±0,11
2	2,14±0,10	2,31±0,12	2,08±0,10
3	2,24±0,11	2,52±0,13	2,14±0,10
4	1,75±0,085	2,81±0,14	2,03±0,98
5	2,05±0,10	2,55±0,12	2,02±0,98
6	1,91±0,09	2,15±0,10	1,93±0,87

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Фотосинтетическая способность листьев исследуемых древесных растений

Таблица Ж.1 – Фотосинтетическая способность ели сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Фотосинтетическая способность растений в мг /г*час			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	24,30±2,20*	42,60±1,20*	32,60±2,50*
2	15,50±1,10*	26,90±2,31	22,90±2,20*
3	24,80±2,30*	25,90±2,22	28,40±2,60*
4	7,70±0,70	39,21±3,40	31,30±2,90*
5	21,50±2,30*	21,22±2,30	29,30±1,80*
6	6,60±0,50	27,31±2,10	14,20±1,40
2010			
1	30,07±0,49*	22,50±0,70	30,45±1,50*
2	28,05±1,10*	12,77±0,50	10,39±0,50*
3	28,84±1,30*	16,80±1,30	12,00±0,60
4	15,24±0,72	12,00±0,60*	24,28±1,20*
5	20,80±1,30	21,72±1,00	22,40±1,70*
6	20,01±1,40	17,90±1,60	14,89±0,70
2011			
1	14,95±0,73*	16,05±0,80*	11,76±0,52*
2	13,49±0,62*	13,89±0,65*	12,11±0,59*
3	7,29±0,35	10,95±0,52	10,00±0,49*
4	8,88±0,41	10,19±0,49	9,36±0,45
5	7,09±0,32	11,82±0,54	8,87±0,43
6	8,65±0,42	11,05±0,51	7,80±0,38
2012			
1	37,14±1,46*	28,11±1,29*	25,31±0,84*
2	24,06±1,10*	22,81±1,21	16,94±1,24
3	27,90±1,10*	23,10±1,23	18,73±0,85
4	19,03±0,65	17,08±1,21	21,04±1,02*
5	21,64±1,20	20,70±0,65	14,02±0,71
6	17,03±0,74	18,01±1,32	14,00±0,73
2013			
1	42,13±1,22*	34,01±1,12*	30,9±1,15*
2	35,07±1,10*	25,04±0,85*	23,08±1,06*
3	29,01±0,76*	19,81±0,76	19,08±0,62
4	25,03±0,82	24,05±0,81*	14,06±0,72
5	27,31±0,86	20,03±0,74	18,54±0,98
6	19,03±0,52	15,62±0,82	16,01±0,86

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица Ж.2 – Фотосинтетическая способность рябины сибирской на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Фотосинтетическая способность растений в мг /г*час			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	13,30±1,12*	62,20±4,10*	44,90±3,20*
2	24,10±0,60*	21,60±2,30	53,30±4,10
3	28,50±0,90*	27,80±2,10	104,40±9,80
4	8,30±0,60	17,70±1,23	104,40±9,90
5	11,30±0,51*	33,20±3,10	119,00±9,90*
6	8,10±0,50	28,30±2,50	74,20±6,50
2010			
1	58,23±2,50*	52,65±2,50*	65,78±3,20*
2	40,90±0,62*	57,66±2,80*	30,20±0,90
3	52,03±2,40*	47,79±2,30*	27,58±1,30
4	58,00±3,70*	45,45±2,20*	40,44±2,00
5	46,90±3,00*	32,78±1,50*	18,52±0,90*
6	30,84±1,3	22,50±1,00	32,23±1,50
2011			
1	22,18±1,05*	24,65±1,12	22,82±0,98*
2	22,06±1,03*	21,59±0,96	21,41±0,95*
3	16,99±0,82*	13,63±0,62*	19,23±0,92*
4	8,09±0,38*	18,68±0,92	8,56±0,41
5	12,22±0,59	21,00±0,99	9,31±0,43
6	11,89±0,57	20,15±0,95	9,51±0,45
2012			
1	69,08±3,10*	46,21±2,40*	44,06±2,10*
2	51,03±2,40*	40,14±2,10*	36,08±1,40*
3	35,09±1,50	32,08±1,03*	27,21±1,21
4	44,60±2,40*	29,08±1,40	14,02±0,95
5	28,21±1,30	32,01±1,20	22,06±1,21
6	28,39±1,40	21,35±0,95	19,91±1,12
2013			
1	79,01±2,30*	59,91±2,50*	54,98±2,10*
2	54,04±2,80*	47,03±2,60*	39,08±1,20*
3	41,89±2,60	25,53±1,60	30,01±1,20
4	46,92±2,40	28,90±1,50	32,15±1,40
5	35,01±1,60	15,41±0,89	29,18±1,40
6	32,13±1,30	26,23±1,30	28,73±1,50

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица Ж.3 – Фотосинтетическая способность березы повислой на исследуемых ПН в 2009–2013 гг.

Фотосинтетическая способность растений в мг /г*час			
№ПН	июнь	июль	август
2009			
1	41,80±3,20*	18,00±1,20	49,50±2,50*
2	25,10±2,10	16,90±1,30	66,90±5,80*
3	7,10±0,60*	37,50±3,10*	104,90±9,90
4	34,50±3,20	32,10±3,20*	99,00±8,60
5	20,90±2,40	33,70±3,10*	124,60±11,20
6	22,50±2,30	18,40±1,12	132,00±11,30
2010			
1	32,45±1,60*	54,68±2,52*	26,54±1,31*
2	39,77±1,82*	42,19±2,11*	9,05±0,42
3	37,02±1,81*	5,41±0,23*	4,70±0,20*
4	25,69±1,21*	11,77±0,52*	23,50±1,10*
5	38,81±1,92*	35,54±1,71*	9,28±1,81
6	17,92±0,83	17,45±0,80	10,37±0,52
2011			
1	26,19±1,20*	39,31±1,59*	19,45±0,93*
2	20,09±0,95*	42,39±1,96*	14,46±0,71*
3	7,71±0,34*	23,27±1,03*	11,03±0,53*
4	10,61±0,51*	13,98±0,62	11,13±0,52*
5	9,88±0,46*	12,21±0,71	7,12±0,34
6	14,31±0,70	15,27±0,74	5,86±0,26
2012			
1	42,43±1,63*	35,29±1,54*	24,85±1,29*
2	36,19±1,56*	25,64±1,31*	15,93±0,45
3	28,09±1,32	20,01±1,30	12,11±0,31
4	20,11±1,30	18,73±0,95	12,19±0,33
5	25,03±1,32	23,97±1,26*	13,19±0,32
6	19,16±0,84	12,06±0,39	14,99±0,35
2013			
1	53,07±1,95*	39,84±1,24*	36,06±1,24*
2	46,97±1,86*	26,78±1,05*	30,08±1,22*
3	32,08±1,53*	24,87±1,10*	24,51±1,11
4	26,01±1,02	28,19±1,21	25,86±1,15
5	26,94±1,03	17,16±0,84	19,02±0,95
6	18,91±0,84	14,32±0,74	16,89±0,93

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Годичный прирост бокового побега исследуемых древесных растений

Таблица И.1 – Годичный прирост бокового побега ели сибирской в 2009–2013 гг.

№ПН	Сроки наблюдений			
	1.06.09	11.06.09	26.06.09	13.07.09
1	7,73±0,30*	9,36±0,52*	9,57±0,53*	9,65±0,52
2	5,70±0,31*	5,83±0,52	5,91±0,49	5,92±0,51
3	4,20±0,20	6,16±0,43	6,38±0,46	6,81±0,43
4	3,10±0,31	5,74±0,41	7,21±0,46	7,63±0,37
5	4,90±0,42	5,49±0,52	5,63±0,56	5,73±0,55
6	4,20±0,42	6,63±0,41	7,48±0,38	8,2±0,68
	01.06.10	10.06.10	21.06.10	08.07.10
1	2,38±0,10	5,56±0,28*	8,91±0,44	8,94±0,45
2	1,84±0,09*	3,23±0,16*	4,01±0,20*	4,23±0,22*
3	1,11±0,06*	3,08±0,12*	6,94±0,34	7,23±0,33
4	0,38±0,02*	2,21±0,11*	6,81±0,32	8,37±0,41
5	1,80±0,09*	4,96±0,24*	7,09±0,31	7,40±0,35
6	2,76±0,12	7,48±0,38	8,76±0,41	9,16±0,48
	24.05.2011	02.06.2011	10.06.2011	23.06.2011
1	4,18± 0,17	6,31±0,31	6,74±0,36	6,87±0,37
2	2,84±0,14	3,54±0,16	3,68±0,16*	3,72±0,18*
3	2,37±0,10	4,39±0,21	6,10±0,33*	6,21±0,38*
4	0,19±0,01	2,21±0,10	5,09±0,28*	6,34±0,38*
5	3,42±0,13	4,59±0,23	5,21±0,27*	5,22±0,26*
6	3,26±0,14	4,32±0,21	7,56±0,24	7,65±0,21
	01.06.12	10.06.12	21.06.12	08.07.12
1	3,38±0,12*	5,49±0,16*	5,89±0,20*	5,90±0,26*
2	2,56±0,12	4,29±0,13*	4,78±0,21*	4,79±0,21*
3	1,37±0,08	3,09±0,11	3,34±0,16	3,35±0,25
4	0,47±0,03	2,35±0,11	2,46±0,14	2,46±0,32
5	1,24±0,11	2,41±0,11	2,73±0,16	4,73±0,19
6	2,19±0,09	3,22±0,13	3,37±0,28	3,37±0,16
	31.05.13	10.06.13	20.06.13	08.07.13
1	5,85±0,16*	8,53±0,32*	8,62±0,32*	8,64±0,42*
2	5,12±0,15*	7,96±0,23*	7,99±0,31*	8,02±0,32*
3	3,89±0,13	5,61±0,25	5,70±0,26	5,70±0,28
4	2,84±0,12	4,32±0,23	4,35±0,24	4,38±0,25
5	3,74±0,18	5,87±0,29	5,91±0,30	5,93±0,32
6	3,30±0,16	5,07±0,24	5,17±0,25	5,20±0,26

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица И.2 – Годичный прирост бокового побега рябины сибирской в 2009–2013гг.

№ПН	Сроки наблюдений			
	1.06.09	11.06.09	26.06.09	13.07.09
1	0,99±0,08	1,36±0,08	2,36±0,27*	2,36±0,20*
2	0,82±0,08	1,20±0,01	1,36±0,06	1,36±0,06
3	0,57±0,05	0,95±0,07*	1,19±0,10	1,19±0,10
4	0,69±0,04	1,17±0,05	2,10±0,19	2,10±0,20
5	0,82±0,07	1,17±0,07	1,34±0,09	1,34±0,09
6	0,79±0,05	1,37±0,10	1,59±0,12	1,59±0,12
	01.06.10	10.06.10	21.06.10	08.07.10
1	0,90±0,04	1,26±0,06	1,38±0,07	1,42±0,07
2	0,75±0,03	0,98±0,05	1,21±0,06	1,26±0,06
3	0,69±0,02*	0,75±0,03*	0,89±0,04*	0,92±0,05*
4	0,78±0,03	0,89±0,04	0,98±0,05	1,02±0,05
5	0,85±0,04	1,05±0,05	1,28±0,06	1,30±0,06
6	0,89±0,04	1,15±0,05	1,23±0,06	1,25±0,06
	24.05.2011	02.06.2011	10.06.2011	23.06.2011
1	1,31±0,06	1,54±0,09	1,59±0,08	1,59±0,08
2	0,95±0,04	1,39±0,07	1,53±0,08	1,54±0,07
3	0,95±0,05	1,13±0,06*	1,19±0,06*	1,19±0,06*
4	1,08±0,06	1,42±0,08	1,48±0,08	1,79±0,08
5	1,08±0,06	1,61±0,09	1,64±0,09	2,11±0,09
6	1,17±0,06	1,36±0,06	1,53±0,09	1,54±0,09
	01.06.12	10.06.12	21.06.12	08.07.12
1	1,11±0,07*	1,36±0,07*	1,38±0,08*	1,38±0,08*
2	0,84±0,03	1,07±0,05	1,19±0,06	1,20±0,06
3	0,77±0,03	1,10±0,05	1,16±0,06	1,16±0,06
4	0,81±0,03	1,17±0,05	1,24±0,06	1,24±0,06
5	0,83±0,03	1,16±0,05	1,28±0,06	1,29±0,06
6	0,72±0,02	1,09±0,05	1,23±0,04	1,24±0,04
	31.05.13	10.06.13	20.06.13	08.07.13
1	0,89±0,03	1,14±0,03	1,27±0,04*	1,28±0,04*
2	0,81±0,03	1,01±0,03	1,13±0,04	1,14±0,04
3	0,67±0,03	0,95±0,04	1,07±0,04	1,09±0,04
4	0,73±0,03	1,02±0,04	1,13±0,04	1,14±0,04
5	0,83±0,03	1,05±0,04	1,17±0,04	1,19±0,04
6	0,71±0,03	0,98±0,04	1,10±0,04	1,12±0,04

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица И.3 – Годичный прирост бокового побега березы повислой в 2009–2013гг.

№ПН	Сроки наблюдений			
	1.06.09	11.06.09	26.06.09	13.07.09
1	6,10±0,24	8,12±0,32	8,29±0,54	8,46±0,43
2	6,10±0,51	8,28±0,52	10,02±0,59	10,38±0,58
3	6,20±0,31	9,06±0,64	9,69±0,74	10,31±0,64
4	5,89±0,25	8,97±0,40	10,01±0,48	10,65±0,40
5	6,17±0,24	9,42±0,37	9,85±0,58	10,00±0,56
6	5,68±0,20	8,70±0,36	8,95±0,46	9,05±0,44
	01.06.10	10.06.10	21.06.10	08.07.10
1	2,33±0,12	4,64±0,22	7,30±0,35	8,56±0,38
2	3,17±0,16*	7,28±0,35*	10,08±0,48	11,57±0,50*
3	2,03±0,10	4,69±0,21	7,75±0,32	8,52±0,34
4	2,54±0,13	5,22±0,26	8,61±0,39	9,86±0,45
5	1,84±0,08	4,64±0,22	7,83±0,36	9,07±0,40
6	2,13±0,09	5,59±0,28	8,65±0,40	9,35±0,43
	24.05.2011	02.06.2011	10.06.2011	23.06.2011
1	3,00±0,16	5,28±0,31	8,30±0,42	9,42±0,51
2	3,49±0,18	7,07±0,35	10,15±0,58*	11,03±0,62*
3	3,49±0,17	7,02±0,36	9,65±0,46	10,19±0,57
4	3,12±0,13	6,36±0,34	9,88±0,43	11,60±0,62
5	3,59±0,20	6,77±0,29	9,35±0,49	9,82±0,43
6	2,91±0,12	5,74±0,27	9,29±0,33	9,33±0,41
	01.06.12	10.06.12	21.06.12	08.07.12
1	2,59±0,15	4,85±0,25	7,81±0,34	8,14±0,39
2	3,15±0,13*	5,37±0,24*	8,23±0,35*	8,62±0,36*
3	2,27±0,12	4,33±0,23	7,45±0,33	7,65±0,35
4	2,46±0,11	4,72±0,20	7,76±0,29	7,98±0,31
5	2,09±0,10	4,16±0,18	7,02±0,27	7,21±0,29
6	2,14±0,09	4,35±0,15	7,38±0,20	7,59±0,25
	31.05.13	10.06.13	20.06.13	08.07.13
1	4,21±0,24*	6,32±0,46*	8,24±0,66*	8,45±0,67*
2	5,14±0,23*	7,39±0,62*	9,51±0,67*	9,72±0,69*
3	3,94±0,17*	6,22±0,45*	8,46±0,62*	8,68±0,63*
4	2,54±0,12	4,79±0,25	6,93±0,54	7,09±0,57
5	2,06±0,11	4,27±0,24	6,47±0,68	6,66±0,70
6	1,95±0,09	4,11±0,29	6,32±0,55	6,51±0,58

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Площадь и масса листьев исследуемых древесных растений

Таблица К.1 – Площадь листьев в см² и масса листьев рябины сибирской (2009–2013 гг.)

№ПН	признаки		
	Площадь листьев	Масса сухих листьев	Масса сырых листьев
2009			
1	27,40±1,50*	0,35±0,01*	0,60±0,06
2	31,60±2,91*	0,37±0,01*	0,76±0,07
3	38,11±2,52	0,39±0,02*	0,84±0,03
4	38,40±2,73	0,43±0,02	0,95±0,05
5	39,51±2,91	0,45±0,02	1,03±0,10
6	44,92±3,22	0,53±0,03	1,05±0,10
2010			
1	106,35±5,21*	0,63±0,03	1,46±0,07
2	118,19±5,80	0,89±0,04	2,07±0,10
3	130,33±6,30	0,79±0,03	1,92±0,09
4	131,80±5,30	0,64±0,03	1,63±0,08
5	118,17±4,52	0,57±0,03*	1,40±0,07
6	127,4±6,31	0,72±0,04	1,76±0,09
2011			
1	105,67±5,80	0,78±0,08	1,67±0,11
2	89,59±3,35*	0,60±0,03	1,37±0,07
3	107,09±7,26	0,72±0,05	1,79±0,11
4	104,04±7,64	0,67±0,05	1,69±0,12
5	91,15±5,13*	0,94±0,05*	2,18±0,09
6	123,16±8,23	0,67±0,05	1,57±0,10
2012			
1	103,20±5,90	0,34±0,01*	1,33±0,08
2	104,03±5,52	0,45±0,02	1,40±0,11
3	114,06±6,29	0,77±0,03	1,84±0,18
4	119,11±4,36	0,53±0,03	1,71±0,17
5	98,78±5,14	0,32±0,02*	1,11±0,18
6	106,14±7,38	0,47±0,02	1,42±0,08
2013			
1	99,23±5,12	0,64±0,03*	1,56±0,12
2	101,10±5,32	0,63±0,04*	1,63±0,13
3	126,21±7,12*	0,87±0,06	1,72±0,17
4	109,35±5,63	0,83±0,04	1,74±0,19
5	98,60±5,19	0,62±0,05	1,34±0,08
6	106,84±6,28	0,78±0,05	1,67±0,18

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

Таблица К.2 – Площадь листьев в см² и масса листьев березы повислой на ПН 2009–2013гг.

№ПН	признаки		
	Площадь листьев	Масса сухих листьев	Масса сырых листьев
2009			
1	5,16±0,26*	0,066±0,001	0,11±0,001
2	5,90±0,25	0,073±0,002*	0,15±0,012
3	5,61±0,19	0,079±0,001	0,157±0,01
4	6,02±0,22	0,077±0,002	0,166±0,01
5	6,37±0,34	0,085±0,002	0,167±0,01
6	6,43±0,38	0,085±0,003	0,169±0,01
2010			
1	13,49±0,65*	0,12±0,006	0,29±0,015
2	17,18±0,85	0,10±0,005	0,24±0,012
3	15,99±0,79	0,11±0,006	0,26±0,013
4	13,25±0,66*	0,09±0,004	0,21±0,010
5	15,72±0,78	0,10±0,005	0,25±0,012
6	16,52±0,82	0,11±0,005	0,27±0,013
2011			
1	14,14±0,52*	0,09±0,005	0,21±0,012
2	12,46±0,40*	0,08±0,003*	0,17±0,006
3	15,72±0,60*	0,11±0,005	0,24±0,010
4	14,55±0,45*	0,11±0,003	0,24±0,008
5	16,25±0,50	0,11±0,003	0,27±0,007
6	17,29±0,57	0,12±0,004	0,28±0,009
2012			
1	13,89±0,43*	0,096±0,004	0,24±0,012
2	18,57±0,73*	0,093±0,005	0,22±0,008
3	16,23±0,64	0,090±0,004	0,18±0,006
4	14,11±0,78	0,081±0,003	0,17±0,005
5	15,24±0,57	0,083±0,003	0,19±0,006
6	16,33±0,87	0,098±0,041	0,26±0,012
2013			
1	11,47±0,35*	0,070±0,001*	0,14±0,001*
2	9,13±0,21*	0,084±0,004	0,17±0,005
3	8,11±0,23*	0,084±0,003	0,17±0,005
4	12,41±0,30*	0,065±0,001*	0,15±0,003
5	13,54±0,39	0,076±0,001	0,16±0,004
6	14,57±0,42	0,087±0,002	0,19±0,005

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от бПН при $p < 0,05$

Таблица К.3 – Площадь хвои в см² и масса хвои ели сибирской на ПН в 2009–2013 гг.

№ПН	признаки		
	Площадь хвоинки	Масса 50 сухих хвоинок	Масса 50 сырых хвоинок
2009			
1	4,19±0,13*	0,11±0,006*	0,24±0,01
2	3,23±0,23*	0,13±0,008*	0,27±0,02
3	4,90±0,31	0,14±0,009*	0,29±0,02
4	3,79±0,33*	0,15±0,011*	0,32±0,02
5	3,95±0,14	0,2±0,009*	0,43±0,02
6	6,65±0,22	0,29±0,011	0,62±0,02
2010			
1	3,79±0,33*	0,15±0,01*	0,32±0,02
2	3,95±0,14	0,20±0,01*	0,43±0,02
3	6,65±0,22	0,29±0,01	0,62±0,02
4	4,64±0,22*	0,17±0,01*	0,46±0,02
5	3,36±0,13*	0,16±0,01*	0,39±0,02
6	7,38±0,19	0,36±0,02	0,84±0,04
2011			
1	3,18±0,24	0,08±0,005*	0,21± 0,012
2	4,12±0,18	0,11±0,007*	0,27±0,014
3	4,76±0,21	0,15±0,007*	0,35±0,014
4	4,90±0,24	0,16±0,008*	0,39±0,017
5	5,03±0,26	0,13±0,006*	0,30±0,011
6	5,67±0,28	0,23±0,011	0,54±0,029
2012			
1	3,24±0,15*	0,24±0,01*	0,46±0,02*
2	3,68±0,16*	0,23±0,01*	0,44±0,03*
3	5,84±0,31	0,40±0,03	0,63±0,03*
4	4,11±0,38	0,26±0,02*	0,49±0,02*
5	3,27±0,24*	0,27±0,02*	0,51±0,023*
6	6,58±0,42	0,57±0,04	0,97±0,06
2013			
1	4,05±0,27	0,11±0,003*	0,26±0,01*
2	3,09±0,14*	0,14±0,003*	0,29±0,012*
3	4,97±0,28	0,13±0,006	0,27±0,025
4	3,52±0,16*	0,16±0,007	0,32±0,020
5	3,58±0,27	0,21±0,012	0,36±0,024
6	5,97±0,29	0,26±0,005	0,46±0,036

Примечание: * – отмечены достоверные отличия от 6ПН при $p < 0,05$

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Содержание общей серы в листьях исследуемых древесных растений

Таблица Л.1 – Содержание общей серы в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (2009–2013 гг.)

№ ПН	мг/г сухого вещества				
	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
1	0,77±0,05	0,68±0,04	0,48±0,02	0,59±0,03	0,54±0,03
2	1,07±0,07	0,91±0,05	0,55±0,03	0,86±0,06	0,77±0,06
3	0,64±0,04	0,62±0,02	0,44±0,02	0,50±0,03	0,43±0,02
4	0,69±0,04	0,68±0,01	0,43±0,01	0,61±0,03	0,42±0,03
5	0,87±0,01	0,73±0,05	0,44±0,02	0,69±0,06	0,54±0,04
6	0,59±0,03	0,53±0,01	0,33±0,01	0,27±0,01	0,31±0,02

Таблица Л.2 – Содержание общей серы в листьях березы повислой на исследуемых ПН (2009 – 2013 гг.)

№ ПН	мг/г сухого вещества				
	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
1	1,22±0,06	1,42±0,05	1,16±0,05	1,32±0,06	1,45±0,06
2	1,23±0,05	1,40±0,02	1,05±0,04	1,35±0,07	1,38±0,04
3	1,14±0,06	1,01±0,05	0,87±0,04	1,11±0,04	0,96±0,03
4	1,37±0,07	0,99±0,05	0,83±0,04	0,92±0,03	0,53±0,02
5	1,34±0,07	1,11±0,04	0,91±0,05	1,02±0,04	1,32±0,06
6	0,99±0,05	1,03±0,05	0,87±0,04	0,95±0,04	1,04±0,04

Таблица Л.3 – Содержание общей серы в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН (2009 – 2013 гг.)

№ ПН	мг/г сухого вещества				
	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
1	0,84±0,05	0,63±0,02	0,79±0,03	0,56±0,02	0,65±0,03
2	1,34±0,05	0,64±0,02	0,81±0,03	0,51±0,02	0,73±0,03
3	1,15±0,06	0,57±0,02	0,45±0,02	0,48±0,01	0,69±0,04
4	1,06±0,06	0,57±0,03	0,49±0,01	0,45±0,01	0,57±0,03
5	1,14±0,06	0,56±0,03	0,68±0,02	0,54±0,02	0,55±0,03
6	0,76±0,03	0,61±0,02	0,53±0,01	0,46±0,01	0,48±0,02

ПРИЛОЖЕНИЕ М

Содержание общего азота в листьях исследуемых древесных растений

Таблица М.1 – Содержание общего азота в хвое ели сибирской на исследуемых ПН (2009 – 2013 гг.)

№ ПН	мг/г сухого вещества				
	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
1	0,21±0,01	0,29±0,01	0,34±0,02	0,31±0,01	0,35±0,02
2	0,24±0,02	0,33±0,02	0,36±0,02	0,33±0,02	0,38±0,03
3	0,21±0,01	0,25±0,01	0,18±0,01	0,24±0,01	0,22±0,02
4	0,19±0,01	0,22±0,01	0,19±0,01	0,23±0,01	0,18±0,01
5	0,24±0,01	0,26±0,01	0,21±0,01	0,28±0,01	0,25±0,02
6	0,21±0,01	0,19±0,01	0,19±0,01	0,18±0,09	0,19±0,01

Таблица М.2 – Содержание общего азота в листьях березы повислой на исследуемых ПН (2009 – 2013 гг.)

№ ПН	мг/г сухого вещества				
	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
1	0,28±0,01	0,29±0,01	0,41±0,02	0,32±0,02	0,39±0,03
2	0,41±0,02	0,32±0,02	0,42±0,02	0,36±0,02	0,42±0,03
3	0,26±0,01	0,22±0,01	0,41±0,02	0,28±0,02	0,38±0,03
4	0,34±0,02	0,27±0,01	0,37±0,02	0,27±0,02	0,37±0,03
5	0,36±0,02	0,25±0,01	0,41±0,02	0,24±0,01	0,26±0,02
6	0,36±0,02	0,28±0,01	0,39±0,01	0,26±0,01	0,25±0,02

Таблица М.3 – Содержание общего азота в листьях рябины сибирской на исследуемых ПН (2009 – 2013 гг.)

№ ПН	мг/г сухого вещества				
	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
1	0,23±0,01	0,34±0,01	0,37±0,02	0,36±0,03	0,32±0,03
2	0,38±0,01	0,35±0,02	0,41±0,02	0,35±0,02	0,28±0,02
3	0,33±0,01	0,32±0,02	0,34±0,02	0,33±0,02	0,26±0,02
4	0,26±0,01	0,29±0,01	0,35±0,02	0,28±0,02	0,20±0,02
5	0,36±0,01	0,27±0,01	0,32±0,01	0,25±0,02	0,20±0,01
6	0,33±0,01	0,26±0,01	0,24±0,01	0,19±0,01	0,18±0,01