

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Марийский государственный университет»

*На правах рукописи*



**Старикова Екатерина Александровна**

**ЭКОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
ХВОЙНЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ**

1.5.15. Экология (биологические науки)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научный руководитель:

доктор биологических наук, профессор

Воскресенская Ольга Леонидовна

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА	10
1.1 Хвойные растения в озеленении городской среды .....	10
1.2 Влияние атмосферного загрязнения на состояние хвойных растений .....	24
1.3 Влияние факторов городской среды на пигментный аппарат хвойных растений .....	33
1.4 Влияние тяжелых металлов на хвойные растения .....	39
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ .....	46
2.1 Эколого-биологическая характеристика объектов исследования .....	46
2.2 Методы исследования.....	52
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ПРИРОДНУЮ СРЕДУ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ.....	59
3.1 Физико-географическая характеристика г. Йошкар-Олы.....	59
3.2 Характеристика районов исследования .....	60
3.3 Особенности загрязнения окружающей городской среды и оценка экологической ситуации г. Йошкар-Олы .....	62
3.3.1 Состояние атмосферного воздуха г. Йошкар-Олы.....	62
3.3.2 Оценка физико-химических свойств городских почв.....	68
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ .....	77
4.1 Видовой состав и жизненное состояние исследуемых растений и их сравнительная характеристика по районам г. Йошкар-Олы .....	77
4.2 Аккумуляция тяжелых металлов в системе «почва-растение» в условиях городской среды .....	88
4.2.1 Зольность хвойных растений .....	89

4.2.2 Содержание тяжелых металлов в хвойных растениях в условиях городской среды.....	92
4.2.3 Биогеохимическая характеристика хвойных растений.....	109
4.3 Изучение динамики пигментного комплекса у опытных растений в условиях г. Йошкар-Олы и их сравнительная характеристика.....	116
4.3.1 Содержание хлорофилла <i>a</i> и <i>b</i> в хвойных растениях в сезонной динамике .....	118
4.3.2 Содержание каротиноидов в хвойных растениях в сезонной динамике.....	129
4.3.3 Соотношения фотосинтетических пигментов хвойных растений....	134
4.4 Анализ активности окислительно-восстановительных ферментов у изучаемых растений.....	146
4.4.1 Изменение активности каталазы хвойных растений в городских условиях .....	149
4.4.2 Изменение активности пероксидазы хвойных растений в городских условиях .....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	162
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	164
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	166
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	168
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	214

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время все актуальнее становится вопрос оптимизации качества городской среды. Одними из главных компонентов для формирования благоприятной экологической обстановки урбанизированных территорий являются эффективные в санитарном отношении и достаточно устойчивые к загрязнению атмосферы и почв промышленными выбросами зеленые насаждения (Бухарина и др., 2007; Воскресенский, Воскресенская, 2011a; Мударисов, Валиев, 2013; Алябышева и др., 2013; Бочкова и др., 2019; Самохвалов, Синичкин, 2020; Ma et al., 2023).

Хвойные растения отличаются высокой чувствительностью к неблагоприятным воздействиям в окружающей среде. По сравнению с лиственными растениями, они имеют многолетние ассимиляционные органы, сохраняют свои декоративные качества в течение всего года, а также долговечны и биологически устойчивы. Но в озеленении городских территорий они используются реже, чем лиственные древесные растения (Собчак, 2009; Ковригина, Петункина, 2011; Пашкова, 2015; Титова, 2015; Седых и др., 2017; Бочкова и др., 2019; Marin et al., 2009; Clapp et al., 2014).

Среди хвойных растений, используемых в озеленении городских территорий, имеются устойчивые и перспективные интродуцированные виды. К ним относятся можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* L.), туя западная (*Thuja occidentalis* L.) и ель колючая (*Picea pungens* Engelm.).

**Степень разработанности темы исследования.** Важность указанной проблемы отмечались многими учеными (Кулагин, 1974; Николаевский, 1979; Сергейчик, 1984; Неверова, 2001; Собчак и др., 2001; Куровская, 2002; Филиппова, 2005; Воскресенская, Сарбаева, 2006; Сазонова, 2006; Бухарина и др., 2007; Зотикова и др., 2007; Поварницина, 2007; Пахарькова и др., 2009, 2010; Собчак, Куровская, 2009; Тужилкина, 2009; Аношкина, 2011; Ковригина, Петункина, 2011; Рябухина, 2013; Пашкова, 2015; Кулагин, Шаяхметова, 2016; Калякина и др., 2018; Соболева и др., 2018; Дубровина, Зубкова, 2020; Суслина и

др., 2021; Соколова, 2023 и др.). Однако исследования, посвященные комплексному изучению вопросов, связанные с адаптацией хвойных растений к условиям городской среды, характеризуются недостаточной разработанностью и требуют дальнейшего изучения. Так, слабо изученными остаются вопросы комплексного воздействия факторов урбанизированной среды на жизненное состояние, аккумуляцию тяжелых металлов, пигментный комплекс и работу ферментативной антиоксидантной системы у *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens*.

**Цель работы** – провести комплексное изучение эколого-физиологических особенностей хвойных растений (на примере *Juniperus sabina* L., *Thuja occidentalis* L., *Picea pungens* Engelm.) в условиях городской среды.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1) охарактеризовать условия произрастания *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* на территории г. Йошкар-Олы и оценить их жизненное состояние;

2) определить содержание тяжелых металлов (свинец, кадмий, медь и железо) в почве и выявить закономерности их накопления в вегетативных органах хвойных растений, произрастающих в разных функциональных зонах города;

3) изучить сезонные изменения и специфические характеристики процесса накопления фотосинтетических пигментов в хвое исследованных растений в зависимости от условий произрастания;

4) исследовать активность окислительно-восстановительных ферментов хвои интродуцированных хвойных растений в условиях урбанизированной среды и их роль в адаптации растений;

5) предложить рекомендации по оптимизации условий произрастания хвойных растений в условиях города.

**Научная новизна.** Впервые в г. Йошкар-Оле проведена комплексная оценка влияния факторов городской среды на морфологические и физиолого-биохимические показатели *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens*. Обнаружено снижение процента здоровых экземпляров хвойных растений в промышленной и жилой зонах относительно рекреационных территорий. Представлена биогеохимическая характеристика трех видов-интродуцентов в г. Йошкар-Оле.

Рассмотрены индивидуальные реакции растений, обеспечивающие контроль над поступлением тяжелых металлов из почвы в вегетативные органы. Межсезонный анализ подтвердил, что усиление антропогенной нагрузки негативно влияет на работу фотосинтезирующего комплекса, особенно у *T. occidentalis* и *P. pungens*. Обнаружена вариабельность активности окислительно-восстановительных ферментов хвой растений в условиях городской среды. Усиление антропогенной нагрузки на окружающую среду способствовало активированию пероксидазы и снижению активности каталазы у всех изученных видов. Впервые предложены критерии для комплексной оценки состояния хвойных растений в условиях урбосреды, включающие количественный анализ их пигментного комплекса и ферментативной антиоксидантной системы.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные в ходе исследований результаты расширяют и дополняют современные представления об адаптационном потенциале интродуцированных хвойных растений в условиях урбанизированной среды. Доказана связь физиолого-биохимических изменений у исследуемых растений от величины техногенных нагрузок на природный комплекс. Установлена роль почвенного фактора в ухудшении состояния хвойных растений г. Йошкар-Олы. Выявлены различия хвойных растений в работе фотосинтетического аппарата и ферментативных систем при повышении загрязнения среды.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по экологической оптимизации городских насаждений с использованием изученных видов. *T. occidentalis* и *P. pungens* с учетом их показателей могут быть рекомендованы как виды-индикаторы при организации мониторинга состояния городской среды. Результаты исследования представлены в Комитет экологии и природопользования администрации городского округа «Город Йошкар-Ола». Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Общая экология», «Экологический мониторинг и нормирование загрязнения окружающей среды», «Урбоэкология», «Промышленное и бытовое озеленение», «Методы эколого-аналитических

исследований» на кафедре экологии и фармации Марийского государственного университета.

**Методология и методы исследования.** Полевые и лабораторные исследования были проведены с использованием общепринятых методов изучения жизненного состояния древесных растений, химических методов изучения состава городских почв, физиологических методов по оценке минерального питания, интенсивности фотосинтеза, активности работы ферментной системы древесных растений. Полученные результаты обработаны с применением адекватных статистических методов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. В г. Йошкар-Оле *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* проявляют индивидуальную реакцию на степень загрязнения воздушного бассейна и почвы.

2. Распределение тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Fe) в тканях хвойных растений носит видоспецифический характер: максимальное накопление наблюдается в побегах; установлена иерархия металл накопительной способности: *T. occidentalis* > *P. pungens* > *J. sabina*.

3. В условиях городской среды у хвойных растений происходит адаптация процесса фотосинтеза: в промышленной зоне наблюдается интенсивная утрата хлорофиллов *a* и *b* и повышенное накопление каротиноидов, обусловленное отрицательным воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды.

4. Антиоксидантная ферментативная система хвойных растений демонстрирует адаптивные изменения в ответ на изменение условий среды. Повышенная нагрузка (промышленная зона) вызывает активацию пероксидазы и одновременно снижает активность каталазы.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие на всех стадиях исследования: от определения целей и задач, выбора методов исследований и анализа литературы до постановки и проведения полевых и лабораторных опытов, статистической обработки данных, интерпретации и обобщения полученных результатов, подготовки иллюстративного материала, написания текста, формулирования заключений и практических рекомендаций.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Результаты исследования соответствуют паспорту специальности 1.5.15. Экология (биологические науки), а именно: п. 1. Закономерности влияния абиотических и биотических факторов на организмы. Экофизиология (факториальная экология). Адаптации организмов к различным факторам среды. Жизненные формы и адаптивные типы. Изменение организмами среды обитания.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследования подтверждается комплексным подходом, включающим морфологические, геоботанические, химические и физиологические методы исследования, достаточным количеством биологических и аналитических повторностей. Полученные результаты проанализированы с применением современных методов анализа данных. Натурные исследования сочетались с лабораторным анализом образцов почвы и растительного материала. Научные положения, выводы, практические рекомендации обоснованы экспериментальными данными, полученными лично автором.

Результаты исследований и материалы диссертационной работы были представлены и обсуждены на 69-ой Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление» (Нижний Новгород, 2016); XII Всероссийском популяционном семинаре памяти Николая Васильевича Глотова (1939–2016) «Проблемы популяционной биологии» (Йошкар-Ола, 2017); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования в современных условиях» (Киров, 2017); 71-ой, 72-ой Всероссийских с международным участием школах-конференциях молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление» (Нижний Новгород, 2018, 2019); VII Международной научной конференции «Принципы и способы сохранения биоразнообразия» (Йошкар-Ола, 2019); Всероссийских научных конференциях «Современные проблемы естественных наук и фармации» (Йошкар-Ола, 2023, 2025).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки Российской Федерации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, практических рекомендаций, перспектив дальнейшей разработки темы, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 240 страницах, содержит 9 таблиц, 24 рисунка и 4 приложения. Список литературы включает 380 источников, из которых 42 – на иностранном языке.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность за всестороннюю и многолетнюю поддержку своему научному руководителю д.б.н., проф. кафедры экологии и фармации О.Л. Воскресенской, к.б.н., доц., зав. кафедрой экологии и фармации Е.А. Алябышевой за помощь в проведении анализов, за ценные замечания, рекомендации и консультации, к.б.н., доц., директору института естественных наук и фармации Е.В. Сарбаевой за рекомендации и консультации, д.б.н., проф. кафедры экологии и фармации Г.О. Османовой за ценные замечания и поддержку, к.б.н., доц. кафедры биологии Л.В. Рыжовой за помощь в статистической обработке результатов, М.А. Ивановой и Е.С. Овчинниковой за помощь при сборе материала, профессорско-преподавательскому составу кафедры экологии и фармации института естественных наук и фармации в формировании научных представлений, а также родителям Эмме Анатольевне и Александр Сергеевичу, брату Михаилу Александровичу и родственникам за неоценимую помощь и поддержку.

# ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА

## 1.1 Хвойные растения в озеленении городской среды

В городских условиях зеленые насаждения выполняют ряд важных функций: средоформирующую, санитарно-гигиеническую, рекреационную. Кроме основных они выполняют ряд других, важных для экологии урбоэкосистем функций: аккумулируют пылевые аэротехногенные выбросы, выполняя роль биофильтров, увлажняют воздух, защищают от солнца и сильных ветров, поглощают шум, ряд токсичных газов, смягчают жару и сухость, образуют теневые участки в рекреационных зонах, повышают ионизацию воздуха, выделяют фитонциды. Эффективность этих процессов во многом зависит от существующей системы озеленения и формирующего ее видового состава растений, степени экологической напряженности на озелененных территориях различного функционального назначения. В связи с изменением среды города в неблагоприятную для растений сторону, они снижают устойчивость, долговечность, эффективность выполнения своих функций, повреждаются насекомыми и заболеваниями (Горышина, 1991; Уфимцева, Терехина, 2005; Бухарина, Двоглазова, 2010; Соловьева и др., 2010; Воскресенский, Воскресенская, 2011а; Беляков, Макарова, 2012; Рунова, Гнаткович, 2013; Якушевская, Якимова, 2013; Бухарина и др., 2015; Горелова и др., 2015; Симонова и др., 2016; Авдеева, Панов, 2017; Шелухо, Симонова, 2017; Лящева и др., 2022; Шихова, 2023; Косовская и др., 2021; Бессчетнова и др., 2022; Сарбаева, 2024; Gunnarsson et al., 2017; Thaweerworadej, Evans, 2022).

Класс Хвойные (*Pinopsida*) – наиболее многочисленный и широко распространенный класс из отдела голосеменных (*Pinophyta*), включающий 7 семейств, 69 родов и около 630 видов растений. На сегодняшний день в озеленении городских территорий используется около 100 видов и

150 декоративных форм хвойных растений (Александрова, Александров, 2005; Коляда, 2010; Герасимова и др., 2017; Mendes et al., 2018).

Расширение ассортимента хвойных растений, используемых в озеленении городов России, в настоящее время является одной из актуальных задач. В сравнении с европейскими странами общее количество видов хвойных, применяемых в практике ландшафтного дизайна, в целом невелико (Коляда, 2010). В озеленении городских территорий широко используются интродуцированные виды хвойных растений. Интродукция представляет собой осознанную деятельность человека, направленную на переселение определенного вида за границы его природного ареала с целью последующего выращивания и размножения в новой экологической обстановке. К интродуцентам относятся такие виды, которые ранее не были характерны для конкретной географической зоны (Чернышов и др., 2007; Рунова, Крамская, 2012; Ерина, 2020).

На сегодняшний день список интродуцированных хвойных древесно-кустарниковых видов довольно большой и постоянно обновляется. Ежегодно в Россию импортируются тысячи различных сортов, разновидностей и форм хвойных растений, происходящие из европейских, североамериканских, японских, китайских, австралийских и иных регионов мира. В этих странах развитие декоративного садово-паркового озеленения рассматривается как приоритетное направление повышения качества экологической обстановки (Чернышов и др., 2007).

Известно, что в условиях урбосреды интродуцированные виды часто демонстрируют повышенную устойчивость и долговечность по сравнению с аборигенными видами (Ерина, 2020; Кочуров, Чубченко, 2023). Применение интродуцированных видов способствует значительному улучшению эстетических характеристик и санитарно-гигиенического состояния озелененных участков, оптимизации фитосреды антропогенного происхождения, а также снижению расходов на производство посадочного материала и содержание городских зеленых насаждений (Ерина, 2020). Вместе с тем, не все интродуцированные растения способны успешно приспособиться к экстремальным климатическим условиям,

таким как, например, длительные зимние морозы или летние засухи, а также недостаточный уровень агротехнических мероприятий (Чернышов и др., 2007).

Как считает А.Б. Романова с соавторами (2021), статус хвойных видов растений в системе городского озеленения нуждается в пересмотре. Фитонцидность, длительность вегетации, архитектоника и пластика крон, окраска хвои делает их незаменимыми участниками в формировании озелененных пространств как конструктивных элементов городской архитектуры и оказывает положительное влияние на их средообразующие функции. Выбор ассортимента и размещение посадочных мест хвойных деревьев должен учитывать экологическую устойчивость видов, форм и сортов, способствовать созданию непрерывной системы насаждений.

Хвойные деревья и кустарники обладают множеством ценных функций, позволяющих широко использовать их в озеленении городских территорий: эстетической, психоэмоциональной и санитарно-гигиенической. Особенно их роль важна в крупных промышленных городах (Артемьев, Россина, 2019). Одними из них являются их высокие декоративные качества не зависимо от сезонности года. Многообразие форм, окраски хвои, скорость роста позволяют использовать хвойные деревья и кустарники в различных вариациях оформления – в одиночных посадках, для создания декоративных групп, в составе каменистых горок. Хвойные широко культивируются в садах, парках и оранжереях всего мира (Коляда, 2010; Кухлевская и др., 2019; Jakhbarova et al., 2023). Декоративные формы хвойных растений приобретают все большую популярность в современном озеленении (Семкина, Тишкина, 2021; Jakhbarova et al., 2023).

В. Лархер (1978) отмечает, что более уравновешенный водный режим характерен для хвойных деревьев. Они благодаря целому ряду морфологических и функциональных особенностей способны произрастать в самых разных по степени водоснабжения местообитаниях. К таким особенностям относятся: высокая ксероморфность листового аппарата, обеспечивающая сохранение влаги и тканей и устойчивость к завяданию, толстостенный эпидермис с подстилающей его гиподермой, погруженные устьица (благодаря этому увеличивается

диффузионный путь пара из межклеточного пространства в атмосферу, а интенсивность транспирации снижается наполовину), закрываемые зимой смоляными пробками, высокий осмотический потенциал корней и хвои, пластичность корневой системы и др. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), например, может выжить как в условиях заболачивания, так и засухи (Судачкова и др., 1990). У хвойных деревьев с оводненностью тканей тесно связана интенсивность смолывыделения, являющаяся показателем их жизнеспособности (Воскресенская, Сарбаева, 2006).

Круглогодичное сохранение хвои требует, прежде всего, решения вопроса водообеспечения (Жумагулов, 2010). Несмотря на ограниченную площадь всасывающей поверхности корневой системы у хвойных деревьев, различия в объеме поглощенной ими воды сравнительно невелики относительно лиственных видов. Вероятно, это объясняется способностью хвойных формировать обильную микоризу, создавать плотные скопления тонких корней в области капиллярной «каймы», проявлять высокую поглотительную активность корней и демонстрировать эффективную стратегию водного баланса (Воскресенская, Сарбаева, 2006).

Основным преимуществом хвойных является их санирующее действие (Сунгурова и др., 2023). В летний период растения задерживают до 86% пыли. Очищающее действие хвойных видов еще более существенно, чем лиственных (Ступакова и др., 2011). Известно, что хвойные виды осаждают до 42% выпавшей пыли, в то время как широколиственные виды до 30%. В литературе имеются данные о том, что грубые, шероховатые и покрытые волосками листовые поверхности характеризуются повышенной пылездерживающей способностью по сравнению с гладкими и плотными. Образование гуттационных и смолистых выделений дополнительно усиливает фиксацию взвешенных частиц. Наибольшее накопление пыли наблюдается преимущественно на участках листа, где формируется турбулентный пограничный слой атмосферы (Бухарина, Двоглазова, 2010).

О.М. Ступакова с соавторами (2011), С.О. Григорьева, М.В. Репях (2020), Н.Р. Сунгурова с соавторами (2023) установили, что количество осаждаемой пыли на единицу массы хвои превышает аналогичный показатель для листьев примерно в 1,5 раза. Хвойные виды в отличие от лиственных, могут быть более эффективными в плане сбора ультрамелких частиц благодаря сложной структуре хвоинок (Чернышенко, 2018).

Так, исследования, проведенные Л.В. Афанасьевой (2018), подтверждают, что при микроскопическом исследовании структуры хвои лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) установлено, что у деревьев, произрастающих в непосредственной близости от автомобильных дорог, 40–50% площади поверхности хвои было занято адсорбированными твердыми частицами, формирующими либо плотные скопления, либо распределенными неравномерно по всей поверхности листового аппарата.

Среди хвойных видов есть как газоустойчивые виды: ель колючая (*P. pungens*), туя западная (*T. occidentalis*); среднегазоустойчивые: лиственница сибирская (*L. sibirica*), можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.), так и неустойчивые: ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) Н. Karst.), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*) (Воскресенская и др., 2005).

Хвойные растения обладают значительным шумозащитным эффектом за счет наличия густой хвои в течение всего года. Также хвойные насаждения заметно уменьшают скорость ветра в городе зимой (Сунгурова и др., 2023). Эффективность шумоподавления определяется структурой и плотностью зеленых насаждений, а также видовым составом используемых древесных и кустарниковых растений. Виды родов *Picea* A. Dietr., *Abies* Mill., *Thuja* L. занимают лидирующее положение в этом отношении, их шумозащитные свойства не зависят от сезонности (Литвенкова, 2005). Такие виды как лиственница сибирская, пихта сибирская, ель колючая, ель европейская, сосна крымская рекомендуются высаживать при проектировании шумозащитной полосы из зеленых насаждений (Токарева, Леонтьев, 2018).

Хвойные растения также обладают ионизирующей способностью (Ступакова и др., 2011; Бухарина и др., 2007; Кухлевская и др., 2019; Григорьева, Репях, 2020; Сунгурова и др., 2023). Особо выражена ионизирующая способность у *P. sylvestris*, *P. sibirica*, *L. sibirica*, *J. communis* (Сунгурова и др., 2023). Например, насаждения *P. sylvestris* увеличивают степень аэроионной насыщенности окружающей среды на 18–42%, тогда как *T. occidentalis* повышает ее на 56–68% (Дубовицкая, Золотарева, 2014).

У голосеменных растений, произрастающих в городских условиях, особо ценятся их фитонцидные свойства. Фитонциды играют важную роль в процессах ионизации атмосферы, в детоксикации промышленных выбросов, снижению концентрации взвешенных частиц, регулирования роста и развития, как самих растений, так и патогенных микроорганизмов растительного и животного происхождения, а также укрепления иммунной реакции организмов. Данную задачу хвойные виды выполняют круглогодично. Ряд представителей хвойных отличаются выраженной резистентностью к неблагоприятным абиотическим факторам, включая дефицит влаги и загрязнение воздушного бассейна, – это виды родов можжевельника (*Juniperus* L.), пихты (*Abies* Mill.), лиственницы (*Larix* Mill.), ели (*Picea* A. Dietr.) и сосны (*Pinus* L.) (Сидоркина, Макаревич, 2015). Среди наиболее активных очистителей воздушной среды выделяются *T. occidentalis*, *P. pungens* и *P. sylvestris* (Чернышов и др., 2007; Бухарина, Двоглазова, 2010; Кочергина, Дарковская, 2010; Якушевская, Якимова, 2013; Дубовицкая, Золотарева, 2014; Сидоркина, Макаревич, 2015).

М.В. Кочергиной и А.С. Дарковской (2010) исследована фитонцидная активность хвойных растений, произрастающих на территории ООПТ г. Воронежа. По шкале М.В. Кочергиной для таких видов как можжевельник обыкновенный (*J. communis*), лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.), сосна веймутова (*Pinus strobus* L.), пихта одноцветная (*Abies concolor* (Gordon) Lindl. ex Hildebr.), лиственница сибирская (*L. sibirica*), можжевельник виргинский (*Juniperus virginiana* L.) и лжетсуга Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) фитонцидная активность оценивается как очень высокая (81–100%). Высокая

фитонцидная активность (61–80%) характерна для кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel), ели обыкновенной (*P. abies*), кедра корейского (сосна корейская) (*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.), ели сизой (*P. glauca* (Moench) Voss), сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour), туи западной (*T. occidentalis*) и ели колючей (*P. pungens*); средняя (41–60%) – для можжевельника казацкого (*J. sabina*), пихты бальзамической (*Abies balsamea* (L.) Mill.), тиса ягодного (*Taxus baccata* L.), пихты белокорой (*Abies nephrolepis* (Trautv. ex Maxim.) Maxim.); низкая (21–40%) – для биоты восточной (*Biota orientalis* L.).

Особое место среди хвойных растений, используемых для озеленения городских ландшафтов, занимают виды семейства Кипарисовые. Это самое большое по числу родов и третье по числу видов семейство хвойных, включает 19 родов и около 130 видов, широко распространенных как в южном, так и в северном полушарии (Токарева, 2019; Jakhbarova et al., 2023). Представители этого семейства – можжевельники и туи хорошо переносят засушливые условия, что делает их незаменимыми в озеленении южных городов. Среди представителей семейства кипарисовых встречаются деревья и кустарники, в том числе стелющиеся формы, прижатые к земле, например, микробиота перекрестнопарная (*Microbiota decussata* Kom.) (Токарева, 2019).

Но все же применение их в городских насаждениях существенно ограничивается недостаточной устойчивостью большинства хвойных растений к городским условиям (Воскресенская, Сарбаева, 2006; Экология..., 2007; Махрова, Сапелин, 2016; Дубровина, Зубкова, 2020; Артемьев, 2021; Бессчетнова и др., 2022).

К примеру, в практике озеленении южных регионов России широко применяются редкие для других регионов страны древесные виды, такие как: сосна лучистая (*Pinus radiata* D. Don), сосна Эллиотта (*Pinus elliotti* Engelm.), сосна мягковатая (*Pinus muricata* D. Don), сосна жесткая (*Pinus rigida* Mill.), сосна гибкая (*Pinus flexilis* E. James), туя складчатая (*Thuja plicata* Donnex D. Don), торрея калифорнийская (*Torreya californica* Torr.), таксодиум двурядный (*Taxodium distichum* (L.) Rich.), секвойдендрон гигантский (*Sequoiadendron*

*giganteum* Buchh.), секвойя вечнозеленая (*Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.) (Коляда, 2010).

Так, в г. Керчь хвойные деревья и кустарники составляют 14,2% видов, массово в насаждениях используются только один вид хвойных деревьев. Туя восточная (*Thuja orientalis* L.) и ее форма *T. orientalis* 'Globosa' встречаются повсеместно во всех типах насаждений (Потапенко, Летухова, 2022).

По данным А.В. Скока (2018), на территории скверов, парков и зеленых зон Бежицкого района г. Брянска произрастает 6 видов хвойных растений: ель европейская (*Picea abies* (L.) Н. Karst.), ель колючая (*P. pungens*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), туя западная (*T. occidentalis*), можжевельник казацкий (*J. sabina*), лиственница европейская (*L. decidua*).

Большое количество видов хвойных растений г. Волгограда являются интродуцентами: сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), ель колючая (*P. pungens*), можжевельник средний (*Juniperus media*), можжевельник чешуйчатый (*Juniperus squamata* Lamb.), можжевельник казацкий (*J. sabina*), можжевельник горизонтальный (*Juniperus horizontalis* Moench), можжевельник виргинский (*J. virginiana*), можжевельник обыкновенный (*J. communis*), туя западная (*T. occidentalis*), туя восточная (*T. orientalis*), лиственница европейская (*L. decidua*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), лжетсуга Мензиса (*P. menziesii*) и сосна крымская (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe) (Ерина, 2020).

Из хвойных растений в Центральном Черноземье естественно произрастают сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), лиственница европейская (*L. decidua*) (Попова и др., 2016). Участие хвойных видов в озеленении основных улиц г. Воронежа составляет менее 1%, встречаются такие виды как *P. pungens*, *P. sylvestris*, *T. occidentalis* (Кочергина, Царегородцев, 2020).

Наиболее распространенными видами хвойных растений, применяемыми в озеленении транспортных магистралей г. Самары, являются сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), ель обыкновенная (*P. abies*), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), ель колючая (*P. pungens*), лиственница европейская (*L. decidua*), туя западная (*T. occidentalis*) (Митрошенкова, Ильина, 2019).

В озеленении г. Тольятти хвойные растения представлены 6 видами и 35 сортами. В садах и парках в основном встречаются ель обыкновенная, сосна обыкновенная (естественные насаждения). Несмотря на значительное количество хвойных растений, в количественном соотношении – преобладают посадки лиственных растений. Хвойные в основном представлены единично или небольшими группами в пределах парков, садов и скверов ключевых объектов городской инфраструктуры. В структуре зеленых насаждений г. Тольятти доминируют интродуцированные виды из-за широкого ассортимента культивируемых сортов. Так, в качестве основных элементов озеленения традиционно используют различные декоративные формы видов *Picea pungens* 'Glauca', *Larix decidua* 'Compacta' и *Thuja occidentalis* 'Brabant') (Горячева, Изотова, 2021).

Как указывают Е.Ю. Герасимова с соавторами (2017), «...в Оренбургских парках используется в основном ель колючая форма зеленая (*Picea pungens* Engelm., f. *viridis* Reg.), ель колючая форма голубая (*Picea pungens* Engelm., f. *glauca* Reg.), ель обыкновенная форма плакучая (*Picea excelsa* Link, f. *pendula* Jacq.et Herinqc.), туя западная форма мощная (*Thuja occidentalis* L., f. *robusta* Carr.), туя западная форма колонновидная (*Thuja occidentalis* L., f. *fastigiata* Jaeg.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ldb.)» (Герасимова и др., 2017, с. 64).

Из хвойных кустарников чаще всего используют представителей рода *Juniperus* L.: *Juniperus sabina* 'Tamariscifolia', *Juniperus sabina* 'Variegata', *Juniperus sabina* 'Blue Danube', *Juniperus horizontalis* 'Golden Carpet' и *Juniperus horizontalis* 'Variegata' (Герасимова и др., 2017).

Р.Г. Калякиной с соавторами (2019) установлено, что в озеленении г. Оренбурга используется ограниченный ассортимент хвойных видов. Наиболее распространены ель обыкновенная (*P. abies*), лиственница Сукачева (*Larix sukaczewii* Djil.), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), туя западная (*T. occidentalis*) и можжевельник казацкий (*J. sabina*). Причем два последних вида используются лишь как солитеры и локально для создания отдельных композиций, что связано с

необходимостью дополнительного ухода за данными видами. Также используются пихта сибирская (*A. sibirica*), можжевельники китайский (*Juniperus chinensis* L.), горизонтальный (*J. horizontalis*), скальный (*Juniperus scopulorum* Sarg.) и сосна горная (*P. montana*).

По данным М.П. Чернышова с соавторами (2007) в городах Центральной части России в широком ассортименте встречаются виды аборигенных, интродуцированных и экзотических хвойных деревьев и кустарников из рода ель (*Picea* A. Dietr.), лиственница (*Larix* Mill.), можжевельник (*Juniperus* L.), пихта (*Abies* Mill.), сосна (*Pinus* L.), кипарисовик (*Chamaecyparis*), тис (*Taxus* L.), туя (*Thuja* L.) и др.

В г. Орле в количественном отношении доля хвойных деревьев и кустарников составляет 12,5% от общего количества декоративных культур, используемых в озеленении. Ассортимент хвойных представлен такими видами как ель европейская (*P. abies*), лиственница европейская (*L. decidua*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), туя западная (*T. occidentalis*), можжевельник обыкновенный (*J. communis*), можжевельник казацкий (*J. sabina*) (Догадина, Алексашкина, 2019).

О.Ю. Емельянова с соавторами (2020) выделяют *Picea abies* 'Cristata' и *Picea pungens* 'Glausa' как высоко декоративных, устойчивых к комплексу неблагоприятных факторов внешней среды вида из рода *Picea* A. Dietr. для озеленения населенных пунктов Орловской области. А для ландшафтных садов и парков также рекомендуют *Picea abies* 'Virgata', обладающую, наряду с адаптивностью, оригинальным строением кроны.

В г. Москве 1/4 часть всех используемых в озеленении древесных растений составляют виды из Северной Америки, из хвойных относятся 17 таксонов. Довольно широко встречаются туя западная (*T. occidentalis*), ель колючая (*P. pungens*) и ее формы, сосна веймутова (*P. strobus*), остальные виды встречаются единично (Коляда, 2010).

В городских насаждениях г. Санкт-Петербурга встречаются 65 видов и форм хвойных растений, относящихся к 11 родам 3 семействам. Широко

распространены в насаждениях лиственница сибирская (*L. sibirica*), ель сизая (*Picea glauca* (Moench) Voss) и туя западная (*T. occidentalis*), остальные хвойные представлены лишь единично. За последние годы более заметно распространилась сосна горная (*P. mugo*) (Фирсов и др., 2016).

Как указывает А.Г. Хмарик (2022) аборигенная дендрофлора г. Санкт-Петербурга представлена всего тремя видами хвойных растений: *P. sylvestris*, *P. abies*, *J. communis*, которые не выдерживают антропогенной нагрузки городской застройки, в первую очередь по причине высокой чувствительности к атмосферным загрязнителям. Анализ исследований показал, что в озеленении г. Санкт-Петербурга широко представлены 7 таксонов хвойных растений: *Picea pungens* 'Glauca', *Picea pungens* 'Argentea', *P. abies*, *L. sibirica*, *P. sylvestris*, *T. occidentalis*. По количеству видов и форм преобладают представители родов *Picea* A. Dietr., *Pinus* L., *Larix* Mill. (Хмарик, 2022).

Хвойные растения в Республике Коми представлены ограниченным разнообразием видового состава, который, в свою очередь, обладает невысокими декоративными качествами. На территории г. Сыктывкара встречаются аборигенные виды флоры Республики Коми: пихта сибирская (*A. sibirica*), сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tou), ель сибирская (*P. obovata*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), ель обыкновенная (*P. abies*) (Мартынов, 2015).

Так, Л.И. Решетникова (2018) обращает внимание на то что, подбирая ассортимент хвойных видов растений для северных регионов, нужно учитывать следующие биолого-климатические особенности, влияющие на рост и развитие растений: отношение к свету, к почве, а также зимостойкость, так же учитывать устойчивость насаждений к загрязнению воздуха и почвы. Например, зимостойкими хвойными растениями являются ель сибирская (*P. obovate*), ель колючая (*P. pungens*), туя западная (*T. occidentalis*), сосна веймутова (*P. strobus*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*); средней морозостойкостью обладают и могут подмерзать: лиственница сибирская (*L. sibirica*), пихта одноцветная (*A. concolor*), туювик поникающий (*Thujaopsis dolabrata* Siebold et Zuss.), кипарисовик Лавсона

(*Chamaecyparis lawsoniana* (A.Murray bis) Parl.), можжевельник даурский (*Juniperus davurica* Pall.), кедр корейский (сосна корейская) (*P. koraiensis*), но данным хвойным растениям требуется дополнительный уход (укрытие растений в зимний период, обрезка обмерзших ветвей).

И.Л. Бухарина с соавторами (2007) указывают на то, что в озеленении г. Ижевска (Удмуртская Республика) среди хвойных видов чаще всего встречается *P. pungens*.

Н.П. Бунькова с соавторами (2020) отмечают, что в озеленении городов Урала используются только 5 видов хвойных растений. Исследование объектов озеленения внутри городской застройки и в лесопарках г. Екатеринбурга показало, что активно используются такие местные виды хвойных как сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), сосна сибирская (*P. sibirica*), лиственница Сукачева (*L. sukaczewii*), ель сибирская (*P. obovata*). Значительно реже в озеленении встречаются пихта сибирская (*A. sibirica*), можжевельник обыкновенный (*J. communis*). В качестве наиболее перспективных интродуцированных видов для озеленения г. Екатеринбурга рекомендуют: *P. abies*, *J. sabina*, *Picea pungens* 'Hoopsii', *T. occidentalis* (Коростелева и др., 2021).

Как выделяют Р.О. Собчак и Л.В. Куровская (2009), хвойные деревья являются единственными вечнозелеными древесными растениями в сибирских городах. В озеленении городов Сибирского региона используют преимущественно лиственные породы древесных растений. На основе анализа списка растений питомников сибирских городов, в ассортименте хвойных растений таких городов как Омск, Новосибирск, Барнаул, Томск, Красноярск и Иркутск, в основном встречаются следующие виды: можжевельник казацкий (*J. sabina*), туя западная (*T. occidentalis*), пихта сибирская (*A. sibirica*), ель обыкновенная (*P. abies*), ель колючая (*P. pungens*), сосна черная (*P. nigra*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), сосна стланиковая (*P. pumila*). Часто в сибирских городах встречаются можжевельник обыкновенный (*J. communis*), можжевельник скальный (*Juniperus scopulorum* Sarg.), можжевельник чешуйчатый (*J. squamata*), можжевельник виргинский (*J. virginiana*), лиственница европейская (*L. decidua*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), ель

сибирская (*P. obovate*), ель сербская (*P. omorica*), сосна кедровая сибирская (*P. sibirica*) и сосна веймутова (*P. strobus*) (Ющенко и др., 2020).

Ассортимент хвойных видов, используемый в озеленении городов Тюменской области, ограниченный и их состояние в основном неудовлетворительное. Встречаются такие виды как сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), сосна кедровая сибирская (*P. sibirica*), лиственница даурская (*L. gmelinii*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), лиственница Сукачева (*L. sukaczewii*), пихта сибирская (*A. sibirica*), ель сибирская (*P. obovate*), можжевельник обыкновенный (*J. communis*) (Сродных, 2011).

И.А. Ющенко с соавторами (2020), проведя анализ видового состава озелененных территорий г. Тюмени, рекомендуют расширить ассортимент хвойных видов для разнообразия и повышения декоративности городских озелененных территорий. И предлагают использовать следующие виды: *P. omorika*, *Picea abies* 'Maxwellii', *Pinus sylvestris* 'Watereri', *P. mugo*, *Juniperus communis* 'Meyer', *J. horizontalis* и *J. sabina*, так как эти виды зимостойкие и устойчивые к городским условиям растения, которые можно использовать как в групповых, так и одиночных посадках в скверах и парках. Также советуют внедрять в озеленение виды, произрастающие в городах Сибири: можжевельник чешуйчатый (*J. squamata*), можжевельник виргинский (*J. virginiana*), можжевельник ложноказацкий (*Juniperus pseudosabina* Fisch. & C.A. Mey.), лиственница европейская (*L. decidua*), лиственница даурская (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), ель канадская (*Picea glauca* (Moench) Voss), ель сибирская (*P. obovata*), ель восточная (*Picea orientalis* (L.) Peterm.), ель черная (*Picea mariana* (Mill.) Britton, Sterns & Poggenb.), ель ситхинская (*Picea sitchensis* (Bong.) Carriere), сосна стланиковая (*P. pumila*).

В озеленении г. Красноярска, как и многих других сибирских городов, преимущество отдано лиственным видам растений, которые характеризуются более быстрым ростом, чем хвойные. Хвойные насаждения города представлены, в основном, *P. pungens*, *P. obovata*, *L. sibirica*, *P. sylvestris* (Ступакова и др., 2011; Демиденко, 2021). В количественном выражении на объектах озеленения общего

пользования г. Красноярска лидирует вид – лиственница сибирская. Отмечено, что ель колючая отличается хорошим состоянием, так как экземпляры с неудовлетворительным состоянием не выявлены. Наихудшей адаптацией к городским условиям среды отличается сосна обыкновенная (Аксянова и др., 2021).

С.О. Григорьева и М.В. Репях (2020) предлагают использовать в озеленении городов Красноярского края композиционные решения, позволяющие оптимально сочетать в процессе озеленения хвойные и лиственные древесные виды и в качестве хвойного компонента использовать ель сибирскую и лиственницу сибирскую, так как эти виды достаточно хорошо зарекомендовали себя в озеленении, обладая высокими ветро-пылезащитными свойствами, быстрой интенсивностью роста, вечнозеленым внешним видом у *P. obovata* и изменчивостью окраски хвои в разное время года у *L. sibirica*.

В г. Барнауле произрастает 8 видов хвойных растений, относящихся к шести родам и двум семействам: ель сибирская (*P. obovata*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), пихта сибирская (*A. sibirica*), сосна сибирская (*P. sibirica*), можжевельник казацкий (*J. sabina*), туя западная (*T. occidentalis*). Но чаще всего в озеленении используются ель обыкновенная (*P. abies*) и ель сибирская (*P. obovata*) (68% от общего количества хвойных растений), лиственница сибирская (*L. sibirica*) (17%), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*) (10%), редко в городе встречается сосна кедровая сибирская (*P. sibirica*) и можжевельник казацкий (*J. sabina*). А такие виды как туя западная (*T. occidentalis*) и пихта сибирская (*A. sibirica*) представлены единичными экземплярами (Сперанская, Галкина, 2004).

В озеленении городов Кемеровской области используются ель сибирская (*P. obovata*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), пихта сибирская (*A. sibirica*), сосна кедровая сибирская (*P. sibirica*), среди интродуцентов ведущее место занимает ель колючая (*P. pungens*) (Ковригина, Петункина, 2011).

Ассортимент хвойных интродуцентов в г. Братске в основном представлен елью колючей (Рунова, Крамская, 2012).

Хвойная дендрофлора г. Сургута представлена аборигенными видами, среди них: сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), сосна кедровая сибирская (*P. sibirica*), пихта сибирская (*A. sibirica*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), ель сибирская (*P. obovata*), можжевельник обыкновенный (*J. communis*) и интродуцированными видами: сосна кедровая стланиковая, кедровый стланик (*P. pumila*), ель европейская, или обыкновенная (*P. abies*), ель колючая (*P. pungens*), можжевельник казацкий (*J. sabina*) (Макарова, Макаров, 2018).

На юге Дальнего Востока по сравнению с европейской частью России североамериканские виды хвойных растений в озеленении встречается намного меньше (Коляда, 2010). Среди немногочисленных голосеменных растений, используемых в озеленении на юге Приморского края, большой интерес представляет туя западная (Острошенко, Коляда, 2017).

Использование лиственных видов деревьев в озеленении городов имеет свои недостатки: опадающая листва уменьшает привлекательность городской среды (снижает эстетический эффект), а также создает дополнительные проблемы для санитарии и гигиены (усиливает санитарно-гигиеническое воздействие). Таким образом, лиственные деревья, несмотря на свои достоинства, оказывают негативное влияние на экологию и чистоту городов в условиях российского климата. Именно эти факторы обуславливают необходимость широкого введения хвойных видов деревьев в городские посадки.

## **1.2 Влияние атмосферного загрязнения на состояние хвойных растений**

Городская среда отличается от естественной (природной) среды широким диапазоном разного действия климатических, эдафических, орографических факторов и также характера загрязнений (Горышина, 1991; Собчак и др., 2001; Воскресенская, Сарбаева, 2006; Бухарина и др., 2007; Бухарина и др., 2012; Сунгурова и др., 2023).

Для урбанизированной среды характерны следующие особенности: уплотнение и обеднение почвы питательными веществами; загрязнение воздуха и почвы выхлопными газами автотранспорта; повышение температуры и освещенности; антропогенная трансформация климата и микроклимата; дефицит влаги; специфический режим ухода за деревьями (обрезка, полив, борьба с болезнями и вредителями, внесение удобрений и др.) (Макарова, Макаров, 2018; Румянцев и др., 2023).

Наиболее негативное влияние на растительность в пределах урбанизированных территорий оказывают три основных фактора: комплексное воздействие урбанизированной среды; загрязненность атмосферного воздуха и почв; рекреационные нагрузки (физическое уничтожение и механические повреждения) (Шелухо, Симонова, 2017; Афанасьева, 2018).

Исследования (Горышина, 1991; Воскресенская, Сарбаева, 2006; Тужилкина, Плюсина, 2014, 2020; Бухарина и др., 2015) показывают, что негативное воздействие неблагоприятных условий городской среды на растения первоначально проявляется на физиолого-биохимическом уровне, далее распространяется на ультраструктуру клеток и лишь впоследствии вызывает визуально наблюдаемые симптомы повреждений: хлорозы, некрозы, преждевременное опадание листьев и замедленный рост. Величина ущерба, наносимого растению, в значительной степени обусловлена двумя факторами: концентрацией токсичных веществ и длительности его воздействия (Бухарина, Пашкова, 2015).

Растения по-разному реагируют на влияние факторов городской среды. Одни виды менее устойчивы и способны переносить неблагоприятные условия, подвергаясь различным повреждениям. Другие наоборот – более выносливы, и их устойчивость в городской среде обеспечивается не выработкой новых адаптивных свойств, а проявлением приспособлений, развившихся ранее, для защиты от различных неблагоприятных экологических факторов (Горышина, 1991; Якушевская, Якимова, 2013; Авдеева, Панов, 2017; Шелухо, Симонова, 2017).

Подвергаясь постоянному воздействию антропогенных стрессоров, древесные растения вырабатывают механизмы приспособления к особенностям городской среды. Эти адаптационные процессы включают формирование защитных реакций на различных уровнях организации живого организма: биохимическом, физиологическом и морфологическом, обеспечивающих поддержание гомеостаза и сохранение нормальных темпов роста и развития особей. Нарушение физиологических функций у растений в условиях городской среды является ответной реакцией организма на комплекс негативных факторов. Для своевременного выявления изменений состояния растений, произрастающих в условиях урбосреды, целесообразно применять физиолого-биохимические характеристики ассимиляционных структур. Данные характеристики оказывают значительное влияние на интенсивность процессов роста и размножения растений и обладают высокой чувствительностью к внешним изменениям среды обитания. Деревья, произрастающие в городских условиях, помимо естественных стрессовых факторов, испытывают дополнительные нагрузки антропогенного характера, важнейшим из которых выступает загрязнение атмосферного воздуха (Торлопова, Робакидзе, 2003; Тужилкина, 2009; Бухарина, Двоеглазова, 2010; Якубова, 2011; Nayak et al., 2013).

По мнению Ю.В. Беляевой (2017), из всех факторов городской среды воздушное загрязнение в наибольшей степени отрицательно влияет на состояние городских насаждений. Основными источниками атмосферного загрязнения в городах являются транспорт, энергетические системы города и промышленность, автотранспорт вносит 70% токсичных выбросов в атмосферу города. В число наиболее распространенных загрязняющих веществ относятся пыль (взвешенные вещества различной природы), сернистый ангидрид, окислы азота, окись углерода и различные углеводороды (Видякина, Семенова, 2012).

Воздействие атмосферных загрязнений на растения может осуществляться двумя путями:

- 1) прямое действие газообразных соединений с ассимиляционным аппаратом, включающее фолитарное поглощение загрязняющих веществ,

выщелачивание питательных элементов из тканей растений, отмирание отдельных органов растительного организма, снижение показателей роста и продуктивности;

2) косвенное, т.е. через почву (нарушается снабжение растений питательными веществами из-за повышения кислотности почвы и накопления в ней загрязняющих веществ) (Николаевский, 1979; Орехов, Козлов, 2010; Пахарькова и др., 2010; Легощина и др., 2011; Рунова и др., 2011; Неверова и др., 2012; Шадманова, Чуйков, 2012; Seyyedneja et al., 2011).

По мнению В.С. Николаевского (1979), активации повреждаемости растений газами способствует повышенная температура, влажность воздуха и солнечная радиация, т.е. факторы, повышающие газообмен и поглощение токсичных газов. При пониженной освещенности и ночью повреждаемость растений уменьшается. Понижение газообмена зимой у хвойных растений также предохраняет от повреждений.

Хвойные виды растений чувствительны даже к незначительному загрязнению воздуха, поскольку у них более низкий уровень метаболизма, продолжительный срок жизни хвои, что приводит к большему поглощению токсикантов и, по сравнению с лиственными, несовершенная проводящая система (Ступакова и др., 2011; Варлам, Русак, 2017; Скок, 2018; Соболева и др., 2020).

Загрязнение атмосферного воздуха вызывает физиологические нарушения и биохимические превращения в тканях хвои древесных растений, затрагивая процессы обмена веществ и приводя к модификации внутриклеточной структуры. Накопительный эффект загрязняющих веществ обуславливает возникновение как внутренних, так и внешних изменений в хвое (Соболева и др., 2020). В зависимости от интенсивности воздействия газообразных загрязнений происходят различные нарушения физиологических функций растений: нарушается биосинтез хлорофилла, угнетается действие ферментных систем, повреждаются и отмирают целые группы клеток и участки тканей, что может привести к гибели растений (Экология..., 2007).

Одним из быстро реагирующих признаков на состояние экологической среды у хвойных растений является хвоя. Морфологические и анатомические изменения у растений считаются одними из информативных параметров к техногенному загрязнению. Хвойные растения имеют ряд анатомических и морфологических особенностей, отличающих их от покрытосеменных растений. Например, хвоя является хорошим биомонитором загрязнителей воздуха из-за их восковой поверхности, которая склонна накапливать газообразные загрязнители, а также загрязняющие частицы (Пугаев, Лукаткин, 2014; Zeiner, Cindric, 2021).

Аэрозольные частицы проникают в ткани хвои через устьица и кутикулу, повреждая их. Поглощенные токсиканты растворяются в пленочной воде, покрывающей поверхность хвои, и образующиеся ионы проникают через кутикулу и достигают клеток эпидермиса. Далее они мигрируют по свободному пространству к соседним клеткам мезофилла и проводящим сосудам, через которые транспортируются в другие органы растения (Пахарькова и др., 2009). При сильном уровне загрязнения взвешенными частицами часто наблюдается полное закупоривание устьиц и разрушение покровных тканей. Высокий уровень адсорбции взвешенных частиц хвоей деревьев свидетельствует о высокой очищающей способности городских насаждений (Михайлова и др., 2023). Кутикула, представляя собой защитный покров, вместе с тем довольно легко проницаема для ряда различных веществ, в том числе газов и воды. Поражение листьев и хвои атмосферными загрязнителями обусловлены в большей степени кутикулярной проницаемостью, чем численностью открытых устьиц. Так, показатели толщины кутикулы при действии токсикантов могут снижаться у *P. sibirica*, *A. sibirica*, оставаться на уровне контрольных – *P. sylvestris* или увеличиваться – *P. obovata*. Кроме изменения толщины кутикулы в загрязненных районах отмечено, что она становится часто волнистой, извилистой, рассеченной и даже прерывистой, что еще более облегчает проникновение токсических веществ во внутренние ткани хвои (Собчак и др., 2001).

В литературных источниках (Неверова и др., 2012; Rai et al., 2011) подчеркивается, что длительное воздействие атмосферных загрязнителей приводит

к значительным модификациям анатомической структуры хвои и усилению ее ксероморфных черт. Клетки эпидермиса являются наиболее подверженными действию загрязнителей воздуха, но восковой слой кутикулы служит потенциальным барьером для большинства загрязняющих газов. Тем не менее, кислые газы могут диссоциировать, и реагировать с кутикулярными восками, проникая через поврежденную кутикулу.

Так, анализ морфометрических показателей роста сосны обыкновенной, проведенный Р.О. Собчак и Л.В. Куровской (2009) показал, что с увеличением техногенной нагрузки происходит уменьшение линейного прироста ствола, снижение класса бонитета и апикальной доминантности, а также увеличение интенсивности плодоношения. По морфолого-анатомическим изменениям побегов и хвои установили, что в городских условиях у сосны значительно снижается густота охвоения побегов и появляется склонность к ксероморфизму в строении листового аппарата: под действием техногенных эмиссий у растений утолщается кутикула, клетки мезофилла становятся более вытянутыми и уменьшается размер хвоинок.

О.А. Неверовой с соавторами (2012) в примагистральных посадках г. Худжанда (Республика Таджикистан) у сосны эльдарской (*Pinus eldarica* Ten.) обнаружены негативные изменения анатомической структуры хвои: снижение диаметра смоляных ходов и толщины кутикулы, адаптивные изменения – увеличение длины хвои и площади ее поверхности. О.М. Легощина с соавторами (2013) у хвои *P. obovata* в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово выявили снижение длины, площади и поверхности хвои, толщины кутикулы и гиподермы, увеличение асимметрии центрального проводящего пучка, сокращение числа смоляных каналов; в числе адаптации обнаружили: увеличение толщины эпидермы и эндодермы, возрастание площади смоляных каналов и центрального цилиндра.

О.Н. Дегтярева с соавторами (2005), изучая морфометрические изменения хвои и стебля у ели сибирской, сосны сибирской, сосны обыкновенной, пихты сибирской, лиственницы сибирской, произрастающих в условиях

урбанизированной среды, выявили, что на ростовые процессы хвои и стеблей оказывает влияние специфика климатических условий в определенные годы, а также уровень загрязнения и рекреационная нагрузка. Р.И. Шаяхметова и Н.Н. Егорова (2016) указывают, что в условиях антропогенного воздействия у *P. sylvestris* происходит увеличение длины, толщины и ширины хвои, мезофилла, диаметра смоляных ходов, разрастание флоэмы и сокращение ксилемы.

С.В. Вишнякова и Л.И. Аткина (2011) при исследовании состояния хвои *P. pungens* на улицах г. Екатеринбурга установили, что вследствие загрязнения выбросов автотранспорта длина, ширина, толщина, диаметр центрального проводящего пучка, площадь поверхности хвои уменьшаются.

Согласно С.В. Соболевой и соавторами (2018), ассимиляционный аппарат хвойных растений высоко чувствителен к ухудшению качества атмосферного воздуха, что проявляется в изменении морфометрических параметров хвои: ее плотности, объема и прироста, варьирующихся в зависимости от интенсивности антропогенного воздействия. У *P. sylvestris*, например, в городских посадках снижается высота, протяженность кроны, уменьшается диаметр ствола, ширина кроны, густота охвоения, площадь поперечного сечения хвои (Авдеева, Панов, 2017).

Особенно опасны для хвойных видов кислые газы, которые, проникая внутрь хвоинок через устьица, вызывают гибель клеток и тканей. Соединения серы отрицательно влияют на рост и продуктивность растений, особенно сернистый газ (Пахарькова и др., 2010; Al Sayegh Petkovsek et al., 2008). Исследования показывают, что средняя продолжительность жизни хвои сосны обыкновенной в экологически чистых условиях достигает 5–6 лет, тогда как в загрязненных местах этот показатель снижается до 2–3 лет. Аналогичным образом, продолжительность жизни хвои ели европейской уменьшается с 6–7 лет до 3–4 лет в промышленных районах (Пахарькова и др., 2010).

Так, у *P. sylvestris*, под влиянием сернистого газа происходит уменьшение продолжительности жизни хвои, некроз тканей, отмирание побегов, уменьшение

ширины годичных колец, редение кроны, увеличивается содержание эфирных масел в хвое (Чиркова, 2002; Бозшатаева и др., 2017).

Как отмечают Я.Э. Лорсанова (2009), А.П. Щербатюк (2013), хвоя *P. sylvestris* образует на своей поверхности тем больший толстый слой воска, чем выше концентрация или продолжительнее действие на нее диоксида серы; другой признак – снижение рН содержимого клеток. Типичными признаками повреждения этим токсикантом являются у *P. sylvestris* побурение кончиков игл хвои.

Соединения фтора дают специфическую реакцию хвои: происходит побеление листовой пластинки у основания, и последующее потемнение, связанное с некрозом, уменьшается площадь хвои (Шелухо, 2006).

В.П. Шелухо (2006) отмечает, что у хвои *P. sylvestris* выделяет три стадии повреждений: первая – повреждаются только хлоропласты, вторая – повреждаются и другие органоиды, третья – органоиды исчезают или превращаются в бесструктурную массу.

При повышенном загрязнении атмосферы происходит уменьшение оводненности хвои, а также повышается кислотность гомогената хвои (Зотикова и др., 2007). Например, влажность хвои *P. obovata* и *P. sylvestris* при повышении техногенной нагрузки (увеличении запыленности и загазованности атмосферы) снижается незначительно. Это обусловлено закупоркой устьиц хвои, снижением интенсивности газообменных процессов и транспирации (Соболева, 2020).

При воздействии задымления сокращается плодоношение у хвойных видов, уменьшается размер их шишек и семян, резко снижается всхожесть семян. Процессы ослабления, развития болезни и отмирания дерева протекает у различных видов хвойных по-разному, например, у ели гораздо позже по сравнению с другими видами хвойных. Сначала появляются внешние признаки повреждения (хлороз и некроз хвои), а затем медленно происходит также и физиологическое ослабевание (Шелухо, 2006).

Хвойные растения, произрастающие в городских условиях, испытывают целый комплекс негативных факторов. Как указывают О.Л. Воскресенская,

Е.В. Сарбаева (2006), Р.О. Собчак, Л.В. Куровская (2009), Н.В. Пахарькова с соавторами (2010), Л.Н. Ковригина, Л.О. Петункина (2011), С.Р. Кособокова, Л.В. Морозова (2015) на уровне целого организма у хвойных растений уменьшается линейный прирост ствола, протяженность кроны и бонитет, снижается охвоенность кроны, показатель обесхвоенности проявляется склонность к снижению апикальной доминантности, отмечается искривление веток, трещины ствола, излишнее выделение смолы, разрушается крона, растения становятся слабыми и отмирают, жизненный потенциал древостоев значительно понижается.

Также хвойные растения в городских условиях поражаются вредителями и болезнями. Например, в г. Сургуте усыхание хвойных растений вызывает комплекс болезней и вредителей: шютте, некротико-раковые болезни, ржавчина, мериоз и альтернариоз, пилильщики и хермесы. Т.А. Макарова и П.Н. Макаров (2018) отмечают, что чаще поражается хвоя молодых растений, что вызывает нарушение структурно-функционального состояния фотосинтетического аппарата, приводящее к серьезным патофизиологическим и патоморфологическим изменениям больных растений. Степень поражения растений вредителями и болезнями выше в молодых культурах, однородных по породному составу.

Таким образом, в городских условиях могут происходить следующие изменения хвои: появление хлорозов и некрозов, усыхание, преждевременное ее старение; изменение окраски (от темно-зеленой до красно-коричневой), уменьшение линейных размеров (длины и ширины); уменьшение площади поверхности хвои и нарушение функционального состояния генеративных органов, прироста текущего периода; сокращение продолжительности жизни хвои; преждевременное опадение хвои, изменение количества воскового слоя кутикулы; колебание накопления фенольных соединений, ослабление интенсивности фотосинтеза, разрушение пигментов (Пахарькова и др., 2010; Ковригина, Петункина 2011; Шадманова, Чуйков, 2012; Выходцева, Рыхлова, 2015;

Саватеева, Щербакова, 2016; Бозшатаева и др., 2017; Ribaric-Lasnik et al., 1999; Kivimäenpää et al., 2003).

### **1.3 Влияние факторов городской среды на пигментный аппарат хвойных растений**

Наиболее чувствителен к факторам внешней среды процесс фотосинтеза, он тесно связан с физиологическим состоянием листового аппарата и растения в целом, а также с условиями произрастания растения (Бухарина, Пашкова, 2015). Процесс фотосинтеза играет важнейшую роль в обеспечении роста, развития, а также накопления биомассы растительных организмов. Основные факторы окружающей среды, влияющие на фотосинтетическую деятельность растений: свет, температура, концентрация углекислоты в атмосфере, водообеспеченность и минеральный состав почв. Не менее важную роль в процессе фотосинтеза играют эндогенные факторы, такие как внутренняя организация ассимиляционного аппарата листа, содержание фотосинтетических пигментов (Чукина и др., 2024).

Фотосинтетическая система служит важным индикатором реагирования растений на изменения внешних условий и показателем уровня их адаптации в новых экологических условиях. Одним из основных критериев оценки данной адаптации является содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов) в клетках растений (Титова, 2010; Овечкина, Шаяхметова, 2015; Тужилкина, 2017; Афанасьева, 2018; Соколова и др., 2023).

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллы *a* и *b*, каротиноиды) в ассимиляционных органах является одним из информативных параметров растительного организма на условия произрастания и позволяющим оценить функциональное состояние древесных видов. Состав пигментов рассматривается как высокочувствительный показатель, характеризующий структуру фотосинтетического аппарата растений. Количественные вариации содержания пигментов влияют на эффективность функционирования

фотосинтетического комплекса, скорость аккумуляции продуктов фотосинтеза и, соответственно, вызывают последующие физиолого-биохимические процессы, оказывающих непосредственное воздействие на темпы роста и общую продуктивность растений (Николаевский, 1979; Собчак и др., 2001; Сарбаева, Воскресенская, 2008; Овечкина, Шаяхметова, 2015; Бухарина, Гибадулина, 2019; Дубровина, Зубкова, 2020; Суслина и др., 2021; Самусик, Головатый, 2023; Сунцова и др., 2023; Чукина и др., 2024; Matysiak, 2001; Minocha et al., 2009).

В.С. Николаевский (1979), И.А. Тарчевский (2002), О.А. Неверова (2009) подчеркивают, что одним из биохимических критериев, отражающим реакцию растений на изменение внешних условий и степень их адаптации к новым экологическим условиям, служит содержание хлорофиллов и каротиноидов. Первым звеном на биохимическом уровне, подвергшимся воздействию токсичных компонентов, являются хлоропласты. Накопление токсикантов внутри хлоропластов приводит к разрушению их структуры и нарушению функций. Деструкция мембран хлоропластов является одной из важных причин депрессии фотосинтеза. В результате нарушения мембран под влиянием вредных веществ осуществляется выход из них пигментов и распад пигментного комплекса. Пигменты у растений выполняют роль не только акцепторов световой энергии, но и принимают участие в обезвреживании образующихся перекисей и радикалов кислорода, регуляции роста и развития (Гетко, 1989; Николаевский, 1999; Сунцова и др., 2023).

В условиях городской среды у древесных растений отмечается снижение ассимиляционной активности; уменьшение содержания хлорофилла; изменяется структура хлоропластов; уменьшение содержания аскорбиновой кислоты, нуклеиновых кислот, белков; нарушение водного обмена; а также изменение морфологической структуры органов растений (Бухарина, Двоглазова, 2010). На концентрацию хлорофиллов неоднозначное влияние оказывают внешние экологические факторы (промышленное загрязнение) и генетическая природа растения (онтогенетические или возрастные особенности) (Дубровина, Зайцев, 2021). В литературе отмечается снижение количества хлорофиллов *a* и *b*, а также

суммы хлорофиллов под воздействием загрязняющих веществ окружающей среды (Дегтярева, 2022).

Из древесных растений и кустарников наибольшие значения фотосинтетической активности и продуктивности характерны для листопадных деревьев и кустарников (световые листья), наименьшее – для вечнозеленых хвойных деревьев и кустарничков с листьями эрикоидного типа (Лархер, 1978). Хвойные древесные растения по интенсивности фотосинтеза в расчете на единицу площади листовой поверхности уступают травянистым растениям (Бухарина, Пашкова, 2015).

Пылевидные частицы в атмосферном воздухе, содержащиеся во взвешенном состоянии, нарушают нормальную жизнедеятельность организмов. Запыленность воздуха нарушает работу устьичного аппарата растений, ограничивает процесс транспирации, снижает интенсивность фотосинтеза, понижает уровень сахаров в тканях, темпы накопления сухого вещества и роста растений (Артамонов, 1986; Экология..., 2007).

Двуокись азота даже в малых концентрациях ( $0,01 \text{ мг/м}^3$ ) вызывает нарушение азотного обмена у растений, например, влияние окислов азота оказывает отрицательное действие на процесс фотосинтеза (Артамонов, 1986; Экология..., 2007).

Сернистый ангидрид благодаря высокой гигроскопичности быстро реагирует с водяным паром атмосферы и превращается в аэрозоль серной кислоты, который проникает в хлоропласты и взаимодействует с хлорофиллом, вызывая превращение его в феофитин. Этот процесс сопровождается падением уровня каротиноидов, снижением уровня фотосинтеза (Экология..., 2007).

Атмосферные загрязнители способны вызывать уменьшение количества фотосинтетических пигментов и изменять структуру хлоропластов, что оказывает негативный эффект на функционирование фотосинтетического аппарата. Ведущими факторами подавления активности фотосинтетической системы служат содержащиеся в атмосфере частицы пыли и сажи (Бухарина, Пашкова, 2015).

Влияние газообразных токсикантов на пигменты разнообразно и зависит от концентрации загрязнителей (Собчак, 2009; Тужилкина, 2009; Титова, 2013). В условиях сильного воздействия поллютантов наблюдается уменьшение содержания фотосинтетических пигментов, хлорофилл *b* и каротиноиды более чувствительны к промышленным выбросам, чем хлорофилл *a* (Николаевский, 1999; Соколова и др., 2023).

Содержание фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной в г. Риддере (Республика Казахстан) зависит от места произрастания и интенсивности техногенной нагрузки (Соколова и др., 2023). В.В. Тужилкина и С.Н. Плюснина (2020) считают, что реакция пигментного комплекса хвои на загрязнение воздуха неодинакова и зависит от техногенной нагрузки и условий местопроизрастания. Согласно исследованиям Л.А. Семкиной и Е.А. Тишкиной (2021), накопление пигментов, например, у *J. communis* зависит от условий местообитаний – экологических и эдафических показателей.

В ходе полученных результатов исследований М.В. Оскорбиной с соавторами (2010) устойчивость фотосинтетического аппарата хвойных к неблагоприятному воздействию факторов среды на структурном уровне определяется соотношением мезофилла и структурных (защитных) тканей в хвое. У сосны обыкновенной и ели сибирской выявлено разное соотношение структурных элементов в хвое, что может определять разную устойчивость их фотосинтетической активности к действию таких экстремальных факторов, как почвенная и атмосферная засуха.

Пигментный аппарат растений довольно активно реагирует на различные изменения, происходящие в окружающей среде, в частности на техногенное загрязнение. Установлено, что осаждение газопылевых веществ на поверхности листового аппарата древесных растений приводит к разнонаправленному изменению функционирования пигментной системы (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов) растений (Самусик, Головатый, 2023).

Л.Н. Сунцова с соавторами (2023), проведя сравнительный анализ пигментов в хвое *P. obovata*, *P. pungens* и *L. sibirica* в условиях г. Красноярска, не

выявили видовых отличий, но в условиях урбанизированной среды происходило снижение всего фонда пигментов относительно контрольных условий, которое усиливалось с возрастанием степени техногенного воздействия.

Загрязнители атмосферы оказывают неодинаковое воздействие у разных по газоустойчивости видов, как на количественное содержание пигментов, так и на их соотношение (Сергейчик, 1984; Собчак и др., 2001).

В литературных источниках также описано, что при долгосрочном воздействии токсических веществ на природную среду, содержание пигментов в древесных растениях может увеличиваться. Это может быть связано с накоплением различных соединений, играющих важную роль в синтезе пигментов, среди которых продукты окисления углеводов, органических кислот, пролина, глицерина, а также компоненты белкового гидролиза (Гетко, 1989; Тужилкина, Плюснина, 2020; Дегтярева, 2022).

Так, по исследованиям А.П. Дегтяревой (2022), большее количество хлорофиллов в хвое сосны обыкновенной в городской среде можно расценивать как адаптационный признак к избыточному поступлению загрязняющих веществ и меньшему количеству освещенности. Колебания количества пигментов в листовом аппарате возникают в результате воздействия различных абиотических факторов, таких как почвенная и атмосферная засуха, избыток или недостаточность освещения, низкие температуры, корневой гипоксии, солевое засоление грунтов, а также промышленные выбросы и автомобильное загрязнение (Самусик, Головатый, 2023). Как отмечают многие исследователи (Собчак и др., 2001; Собчак, 2009; Бухарина, Пашкова, 2015; Рябухина и др., 2015; Титова, Розломий, 2015; Дубровина, Зубкова, 2020; Кулькова и др., 2021; Бессчетнова, Бессчетнов, 2024) накопление и характер изменения пигментного комплекса в хвое видоспецифичны и зависят от уровня аэротехногенного воздействия.

Так, Н.Н. Бессчетнова с соавторами (2022), исследовавшие сезонный характер содержания пигментов в хвое 9-ти декоративных форм и сортов *T. occidentalis* в условиях Нижегородской области, выяснили достаточно выраженную специфичность и существенные межсортовые различия в

содержании пигментов в течение вегетационного периода. А.В. Кулькова с соавторами (2021) отмечают, что при сохранении общих тенденций в сезонной динамике параметров пигментного состава хвои разные представители рода ель обладают заметной видоспецифичностью в этом отношении и демонстрируют существенность межвидовых различий в течение всего года. О.А. Дубровина и Т.В. Зубкова (2020) выделяют видовые различия по сумме фотосинтетических пигментов в хвое *P. pungens* и *T. occidentalis* в период вегетации, произрастающих в разных функциональных зонах г. Ельца.

В условиях урбанизированной среды, под воздействием совокупного множества неблагоприятных факторов, у представителей одного и того же вида хвойных растений, например, у *P. sylvestris*, наблюдается как увеличение содержания пигментов (Самусик, Головатый, 2023; Дегтярева, 2022), так и снижение их концентрации (Павлова и др., 2010; Рябухина, 2013; Кулагин, Шаяхметова, 2016). Высокие концентрации промышленных газов могут как ингибировать пигментообразование, так и стимулировать. Например, результаты, полученные А.С. Донцовым с соавторами (2016) в ходе исследования содержания пигментов хвои *P. obovata*, показали, что в условиях городской среды достоверно снижалось содержание хлорофиллов *a* и *b* и суммы каротиноидов.

Интродуцированные виды растений зачастую проявляют большую устойчивость и продолжительность существования в условиях урбанизированной среды по сравнению с аборигенными представителями (Ерина, 2020; Кочуров, Чубченко, 2023). Так, согласно исследованию И.Л. Бухариной и А.С. Пашковой (2015), интродуцент – *P. pungens* демонстрирует значительно большую устойчивость к загрязнению воздуха в г. Ижевск, реагируя изменениями фотосинтетического аппарата исключительно при высоком уровне эмиссий (например, в магистральных посадках), в отличие от аборигенного вида – *P. abies*.

Кроме того, исследования, выполненные Л.В. Афанасьевой (2018), подтверждают значительное влияние загрязненного атмосферного воздуха на пигментный комплекс хвои *L. sibirica* в различных функциональных районах г. Улан-Удэ. В хвое исследуемого вида было зафиксировано повышение общего

содержания пигментов от 1,2 до 1,7 раза по сравнению с контрольными условиями. Максимальное превышение концентраций хлорофиллов и каротиноидов наблюдалось у растений, произрастающих вдоль автотрасс, достигая значений в 1,5–2,2 раза выше фона. Автор полагает, что увеличение доли хлорофилла *b* и каротиноидов способно повышать эффективность усвоения солнечной энергии за счет формирования большего числа фотореакционных центров.

Вредные газы нарушают световую и темновую стадии фотосинтеза, воздействуют на состояние хлорофилла, активность ферментов, электрон-транспортную цепь (Сунцова и др., 2023).

#### **1.4 Влияние тяжелых металлов на хвойные растения**

Проблема загрязнения природной среды тяжелыми металлами (ТМ) продолжает оставаться актуальной на сегодняшний день. Традиционно к категории тяжелых металлов относят химические элементы переходных групп с атомной массой свыше 50 единиц, обладающие свойствами металлов или металлоидов и относящиеся к числу наиболее токсичных (Медведев, Деревягин, 2017; Карбасникова и др., 2019; Кабанова и др., 2021; Жуйкова, 2022). В группу ТМ входят более сорока элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева (Ведерников и др., 2009). К очень токсичным относятся Be, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, As, Se, Te, Pb, Cd, Hg, Rb и др. (Медведев, Деревягин, 2017).

Вместе с тем, ряд тяжелых металлов в малых дозах играют роль микроэлементов, необходимых для нормального протекания процессов роста и развития растений (Колясникова и др., 2011; Kaźmierczak et al., 2024). Это физиологически необходимые для живых организмов элементы (Zn, Cu, марганец, Fe, Co, Mo), а также металлы, действие которых пока до конца не изучено (Pb, Ni, Ca, Pb). Все обнаруженные в растениях химические элементы в той или иной степени участвуют в важных физиологических и биохимических процессах

(Карбасникова и др., 2019). Чаще всего термин «тяжелые металлы» рассматривается не с химической, а с медицинской и природоохранной точек зрения, поскольку учитывается их биологическая активность и токсичность (Медведев, Деревягин, 2017; Кабанова и др., 2021).

Главными антропогенными источниками поступления ТМ в окружающую среду являются выбросы промышленных предприятий, тепловых и атомных электростанций, транспортные средства, а также сбросы производственных сточных вод (Пугаев, Лукаткин, 2014; Петухов и др., 2020; Жуйкова, 2022; Eltier, Sivacioglu, 2021; Kaźmierczak et al., 2024).

Растения являются концентраторами тяжелых металлов, которые могут поступать в их ассимилирующие органы как из почвы (через корневую систему), так и непосредственно из атмосферного воздуха (фолиарное поглощение) (Ильин, 1991; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Неверова, Еремеева, 2006; Воскресенская и др., 2013; Сухарева, 2013; Медведев, Деревягин, 2017; Медведева и др., 2019; Жуйкова, 2022; Sulaiman, Hamzah, 2018; Turkyilmaz et al., 2018). Так, величина фолиарного поглощения зависит от биологических особенностей вида, площади ассимилирующей поверхности дерева и его физиологического состояния (Медведева и др., 2019).

Определить точную долю участия корневого и листового путей абсорбции в увеличении содержания ТМ в растительной ткани весьма затруднительно из-за отсутствия четких зависимостей между концентрациями металлов в окружающей среде и организме растений. Процесс проникновения тяжелых металлов в растения характеризуется сложностью и многофакторностью, поскольку регулируется совокупностью почвенных, экологических и биологических факторов. Наличие возможности поступления металлов одновременно обоими путями – через корневую систему и листовой аппарат – усиливает их аккумуляцию растениями, увеличивая риск негативного влияния на растения, и смежных трофических цепей, включая человека (Титов и др., 2007).

Т.В. Дегтярева и В.А. Титоренко (2014) считают, что скорость аккумуляции тяжелых металлов растениями может варьировать в зависимости от расположения

их местообитаний в различных функциональных зонах города, каждая из которых обладает характерными особенностями техногенных воздействий и экологическими условиями, влияющими на жизнедеятельность растительных сообществ. На степень поглощения растениями ТМ влияет их расстояние до источника загрязнения (Медведева и др., 2019; Кабанова и др., 2021). При близком расположении зеленых насаждений к автостраде в листьях и хвое древесных растений наблюдается повышенное содержание ТМ (Кабанова и др., 2021).

Различия в способности аккумуляции тяжелых металлов разными видами древесных растений определяются их индивидуальными физиологическими и морфологическими характеристиками. Избыточное содержание тяжелых металлов в растительном организме может изменяться в течение вегетационного периода. Одной из причин может являться неспособность потока, поступающего из почвы в растения, равномерно в течение всей вегетации насыщать тяжелыми металлами прирост биомассы, который в середине лета достигает максимума, и, хотя темп их поступления более или менее равномерен, возникает так называемый «эффект разбавления». Растения, относящиеся к различным видам и семействам, обладают неодинаковой толерантностью к избытку тяжелых металлов в окружающей среде (Копылова, 2012; Дроздова, Макаренко, 2015).

У растений имеются различные механизмы, которые препятствуют проникновению металлов в их органы и ткани (Медведева и др., 2019). Толерантность к тяжелым металлам контролируется на генетическом уровне, а также в значительной мере зависит от периода онтогенеза растения (Карбасникова и др., 2019). Между растениями и почвой происходит активное взаимодействие по формированию пулов ТМ, опосредованное видоспецифическими корневыми выделениями растений, микрофлорой и другими почвенными факторами (Пугаев, Лукаткин, 2014).

Корневая система играет важную роль в защите растений от негативного воздействия избыточного поступления ТМ. Благодаря способности задерживать излишние ионы, корни обеспечивают поддержание оптимальных концентраций

химических элементов в надземных частях растения, обеспечивая воспроизводительную функцию растений в целом. По сравнению с внешним загрязнением, поступление токсичных веществ непосредственно через корневую систему представляет большую опасность для жизнедеятельности растений (Залывская и др., 2009; 2021).

Как известно, защитная функция корневых систем растений от негативного воздействия ТМ обеспечивается клетками пояса Каспари, которые препятствуют продвижению вещества по межклеточному пространству и ограничивают поступление их в проводящие ткани (Медведева и др., 2019). Древесные растения имеют более глубокие корни, большую биомассу и характеристики более длительного цикла роста, что, таким образом, может иметь более долгосрочное положительное влияние на восстановление после загрязнения тяжелыми металлами (Кабанова и др., 2021). Вместе с тем, благодаря механизмам устойчивости, действующих на разных уровнях организации, некоторые виды растений способны расти и развиваться без серьезных нарушений физиологических процессов при довольно высоких концентрациях ТМ в окружающей среде (Масленников и др., 2015).

Фотосинтезирующие органы растений выступают активными аккумуляторами тяжелых металлов, вследствие чего оценку экологического статуса растительных объектов возможно проводить посредством анализа содержания ТМ именно в ассимиляционных тканях даже при отсутствии визуальных симптомов стресса (Дубровина, Зубкова, 2020). Контакт и первичная адсорбция ТМ происходят преимущественно на поверхности листьев. Это делает крону древесных насаждений эффективным естественным фильтром против распространенных ксенобиотиков, однако одновременно подвергает ее значительному риску повреждений токсичными соединениями различной природы (Олива и др., 2021).

Одним из негативных эффектов аккумуляции тяжелых металлов является их взаимодействие с SH-группами белков. Встраиваясь в молекулу белка или фермента, ТМ вызывают замедление клеточного деления, изменяют структуру и

проницаемость мембран, снижают активность ферментов (Колясникова и др., 2011; Скрипальщикова и др., 2016).

Насаждения теряют устойчивость, деревья суховершиняют и отмирают, изменяется окраска и густота ассимиляционного аппарата, рост замедляется (Кабанова и др., 2021). Изменения на органном уровне организации растений в условиях загрязнения проявляются визуально в виде изменений окраски листовых пластинок (характерными хлорозами, побурением, покраснением и др.), развитием некротических зон, ускоренным старением тканей и преждевременным листопадом (Колясникова и др., 2011). Известно, что хвойные растения являются эффективными биоаккумуляторами пыли и тяжелых металлов, так как хвоя подвергается многолетнему техногенному загрязнению (Горелова и др., 2015).

Угнетающий эффект загрязнителей на хвойные растения обусловлен образованием слоя на липких поверхностях хвои, включая частицы незагрязненной терригенной пыли, приводящие к закупорке устьиц. Этот механизм нарушает газообмен между тканями и окружающей средой, инициирует химические реакции под действием кислых и щелочных компонентов пыли, препятствует нормальному дыхательному процессу и другим важным физиологическим реакциям, снижает интенсивность фотосинтеза за счет уменьшения количества солнечного света, достигающего хлоропластов. Без весеннего промывания дождем, покрытая пылью хвоя утрачивает свою жизненную активность и преждевременно осыпается.

Таким образом, концентрация ТМ находится в прямой зависимости от уровня антропогенных выбросов транспорта, особенно в городской среде, характеризующейся низкой толерантностью хвойных видов к автомобильным выхлопам (Залывская и др., 2009; Бородина, 2012, 2016; Пугаев, Лукаткин, 2014; Горелова и др., 2015; Сидоркина, Макаревич, 2015; Смирнова и др., 2019; Korzeniowska et al., 2021; Eltner, Sivacioglu, 2021; Cui et al., 2022).

Иногда поверхностное загрязнение растений в результате оседания металлосодержащих частиц из воздуха на листовую аппарат может быть значительным. В атмосферном воздухе или в составе аэрозолей постоянно

присутствуют ионы тяжелых металлов, их количество постепенно растет за счет техногенных выбросов. Хвоя способна накапливать тяжелые металлы, как из атмосферы, так и из почвы (Залывская и др., 2009; Менщиков и др., 2020; Sulaiman, Hamzah, 2018).

Тяжелые металлы и их соединения проявляют токсические свойства по отношению к растительным организмам после превышения допустимых порогов концентрации, вызывая нарушение внутриклеточного равновесия и сопровождающиеся внешними проявлениями в форме уменьшения метрических показателей и массы хвои (Соболева и др., 2020).

Аккумуляция ТМ в органах древесных растений различно. Как отмечают Э.Р. Радостева и А.Ю. Кулагин (2011), наибольшее среднесуммарное количество техногенных металлов накапливается в многолетних частях растений (корневая система, кора и ветви) относительно ассимиляционных органов. С.В. Пугаевым и А.С. Лукаткиным (2014) выявлена специфика аккумуляции ТМ листовым аппаратом хвойных деревьев и кустарников. Так, виды, накапливающие наибольшее количество ТМ в хвое: *P. sylvestris* (Mn), *P. pungens* (Zn), *L. deciduas* (Cu и Fe).

С.В. Горелова с соавторами (2015) провели исследование по биогеохимической активности наиболее распространенных видов голосеменных интродуцентов (*T. occidentalis*, *J. sabina*, *P. pungens*) в условиях воздействия полиметаллического загрязнения почв и воздуха в районе воздействия металлургических предприятий. Например, туя западная является аккумулятором V, Cr, Fe, Ni, As в районе воздействия металлургических предприятий и чувствительна к компонентам выбросов. Концентрация Ni в органах туи при полиметаллическом загрязнении снижается. Ель колючая аккумулирует Fe в районе воздействия металлургических предприятий, способна накапливать Cr, Fe, Ni, Zn в побегах при воздействии автотранспортной эмиссии. Можжевельник казацкий, туя западная, тис ягодный могут аккумулировать значительные количества V, Cr, Fe, Ni, As в вегетативных органах (Горелова и др., 2015). Хвоя 4-го года жизни характеризовалась более высоким содержанием тяжелых металлов в сравнении с хвоей 1-го года жизни (Варлам, Русак, 2017).

**Заключение по обзору литературы.** В ходе анализа литературных данных выяснили, что чаще всего в озеленении городских территорий встречаются следующие виды из семейства Сосновые (*Pinaceae*): ель колючая (*P. pungens*), ель европейская или обыкновенная (*P. abies*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), лиственница европейская (*L. decidua*), лиственница сибирская (*L. sibirica*); из семейства Кипарисовые (*Cupressaceae*): туя западная (*T. occidentalis*) и ее декоративные формы, можжевельник казацкий (*J. sabina*), можжевельник виргинский (*J. virginiana*). Несмотря на распространенность, данные виды в антропогенно измененных условиях остаются мало изученными, так как основное внимание большинства исследователей уделяется состоянию растений чувствительных к условиям городской среды.

Хвойные виды растений, произрастающие в условиях городской среды, привлекают большой научный и практический интерес (Лархер, 1978; Судачкова и др., 1990; Сперанская, Галкина, 2004; Александрова, Александров, 2005; Литвенкова, 2005; Воскресенская, Сарбаева, 2006; Бухарина и др., 2007; Собчак, Куровская, 2009; Коляда, 2010; Кочергина, Дарковская, 2010; Ковригина, Петункина, 2011; Ступакова и др., 2011; Рунова, Крамская, 2012; Сидоркина, Макаревич, 2015; Мартынов, 2015; Фирсов и др., 2016; Герасимова и др., 2017; Афанасьева, 2018; Макарова, Макаров, 2018; Догадина, Алексашкина, 2019; Ерина, 2020; Ющенко и др., 2020; Романова, 2021; Горячева, Изотова, 2021; Семкина, Тишкина, 2021; Потапенко, Летухова, 2022; Сунгурова и др., 2023; Sulaiman, Hamzah, 2018; Mendes et al., 2018; Zeiner, Cindric, 2021; Jakhbarova et al., 2023; и др.). Однако остается актуальным вопрос оптимального подбора видового ассортимента хвойных видов, наилучшим образом приспособленных к специфике городских стресс-факторов. Хотя численно хвойные виды заметно уступают лиственным видам, наблюдается положительная динамика расширения разнообразия хвойных видов в озеленительных насаждениях. Тем не менее, полноценная картина адаптационного потенциала и конкурентоспособности хвойных растений в городе невозможна без комплексного изучения особенностей городской среды и эколого-физиологических характеристик конкретных видов.

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

### 2.1 Эколого-биологическая характеристика объектов исследования

В качестве объектов исследований были выбраны можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* L. ‘Tamariscifolia’), туя западная форма типичная (*Thuja occidentalis* L.), ель колючая (*Picea pungens* Engelm. ‘Glauca’) как наиболее распространенные представители интродуцированных видов хвойных растений в озеленении г. Йошкар-Олы.

Для получения информации о влиянии комплекса экологических факторов на хвойные растения в условиях городской среды были выбраны для исследования насаждения данных видов растений в трех функциональных зонах г. Йошкар-Олы: рекреационной, селитебной, промышленной (приложение 1).

Несмотря на широкое распространение и их ценность для озеленения городских территорий, некоторые эколого-физиологические показатели таких хвойных интродуцентов, как *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens*, в сравнительном изучении на территории г. Йошкар-Олы не проводились. Ниже представлена эколого-биологическая характеристика исследуемых видов.

**1. Можжевельник казацкий** (*Juniperus sabina* L.) относится к роду Можжевельник (*Juniperus* L.), подсемейству Можжевеловые (*Juniperoideae*), семейству Кипарисовые (*Cupressaceae* Bartl.), порядку Сосновые (*Pinales*), классу Хвойные (*Pinopsida*) и отделу Хвойные (*Pinophyta*). Представляет собой двудомный кустарник высотой 1–2 м с горизонтально распростертыми ветвями.

Естественный ареал охватывает регионы Центральной и Юго-Восточной Европы, Европейскую часть России: горы Кавказа, Крыма, Алтайские горы, степную зону Сибири и Казахстана, Западные Саяны, горы средней Азии и севера

Монголии (Колесников, 1974; Лазарева и др., 2004; Плотникова, 2006; Чернышов и др., 2007; Казакова, Барайщук, 2012).

Кора красновато-серого цвета: у молодых растений гладкая, у взрослых – трещиноватая. Хвоя представлена двумя формами: молодые ветви несут игловидную хвою длиной 2,5–8 мм и шириной 0,5–0,8 мм, сверху она мягкая и имеет синевато-зеленую окраску; взрослые особи обладают мелкими чешуевидными хвоинками длиной около 1–2 мм и шириной 0,6–0,7 мм, формой близкой к ланцетовидной или ромбической, на спинке с килем и железкой (Валягина-Малютина, 2001; Лазарева и др., 2004; Чернышов, 2007).

Шишкягоды представляют собой одиночные образования небольших размеров, имеющие округло-овальную форму диаметром около 6–8 (до 12) мм и шириной примерно 5–6 мм. Они окрашены в темно-коричневый с голубовато-синим оттенком с характерным серовато-голубоватым восковым налетом. Каждая шишкягода состоит из 4–6 мелких чешуек и расположена на коротких плодоножках длиной порядка 2–6 мм. Внутри содержится два семени овальной формы, покрытых отчетливо выраженными продольными ребрами (килем), однако количество семян варьирует – иногда встречается одно, три, четыре или шесть семян. Период созревания плодов приходится преимущественно на осенний период либо весну следующего года (Булыгин, 2001).

*J. sabina* светолюбивый, нуждается в полноценном освещении, плохо переносит даже легкое затемнение; способен выдерживать морозы до  $-28^{\circ}\text{C}$ ; отличается стойкостью к воздействию газов и дыма; обладает малой требовательностью к условиям почвы, успешно произрастает на кислых, карбонатных, песчаных и скалистых почвах, также обладает почвозащитными свойствами (Чернышов и др., 2007; Трейвас, 2010).

В культуре вид известен с 1584 г., может быть использован для укрепления склонов, на приречных местах, в групповых посадках, солитерах, партерах (Лазарева и др., 2004). Можжевельник казацкий широко используется в озеленении городских территорий благодаря наличию культиваров с разными характеристиками кроны и окраской хвои: ‘*Tamariscifolia*’ – низкорослый

кустарник с декоративной оригинальной вечнозеленой кроной с восходящими ветвями с хвоей голубовато-зеленой или светло-зеленой; ‘*Cupressifolia*’ – низкий стелющийся кустарник с распростертыми побегами, отходящими от основания куста с голубовато-зеленой хвоей; ‘*Erecta*’ – кустарник более 2 м высотой, с косо вверх восходящими ветвями, образующими пирамидальную форму, с темно-зеленой хвоей (Александрова, 2005; Чернышов и др., 2007); ‘*Variegata*’ – кустарник высотой 1 м и шириной до 1,5 м с изогнутыми верхушками побегов, с бело-пестрой окраской хвои и др. (Александрова, 2003; Лазарева и др., 2004).

**2. Туя западная (*Thuja occidentalis* L.)** – представитель вечнозеленых голосеменных растений, относящийся к роду Туя (*Thuja* L.), семейству Кипарисовые (*Cupressaceae* Bartl.), порядку Сосновые (*Pinales*), классу Хвойные (*Pinopsida*), отделу Хвойные (*Pinophyta*).

Естественным ареалом обитания вида является восточный регион Северной Америки и зона хвойных и хвойно-широколиственных лесов. Оптимальными условиями роста являются влажные биотопы вдоль берегов водоемов, заболоченные территории и известняковые почвы, распространенные вплоть до высоты 900 метров над уровнем моря. На родине крупное дерево высотой до 30 м с диаметром ствола до 1,5 м (Лазарева и др., 2004; Воскресенская, Сарбаева, 2006; Острошенко, Коляда, 2017).

Кора ствола красноватая или серовато-коричневая, продольно отслаивающаяся (Острошенко, Коляда, 2017). Хвоя *T. occidentalis* ромбическая, чешуевидная, размером 3–4 мм, расположенная на побегах супротивно, образующая четкую перекрестно-противоположную структуру в четырех рядах. Цвет хвоинок преимущественно темно-зеленый, концы закруглены (Валягина-Малютина, 2001; Маевский, 2014). Молодые растения характеризуются наличием двух форм хвои: колючей игловидной и плоской чешуевидной, сменяющих друг друга по мере взросления. Постепенно игловидная хвоя утрачивается, уступая место исключительно чешуевидному типу. Шишки на растении появляются приблизительно в возрасте 30 лет. Темпы прироста у данного вида низкие, особенно ярко выраженная медленная динамика наблюдается в первые 10 лет.

Характерна способность формировать множественную стволую систему, способствующую формированию кустистой структуры. Продолжительность жизненного цикла достигает 300 лет. Однако, по мере старения особи скорость вегетативного роста существенно снижается, нижняя крона оголяется, снижая декоративность культуры (Вострикова, 2010).

Туя западная нетребовательна к почве, зимостойка, засухоустойчива, жизнестойка, умеренно светолюбива. Среди представителей хвойных видов *T. occidentalis* лучше всего переносит загазованность воздуха и вытаптывание почвы (Артамонов, 1992).

В культуре *T. occidentalis* известна с 1534–1545 гг. (Лазарева и др., 2004). Выведены более 120 декоративных форм *T. occidentalis*. Благодаря разнообразному внешнему виду и окраске формы данного вида можно использовать их в различных ландшафтных композициях. Чаще всего она используется в качестве солитера, однако нередко включается в состав декоративных групп, а также для создания изгородей и аллей (Острошенко, Коляда, 2017).

В практике озеленения городов используются следующие культивары *T. occidentalis*, различающиеся по морфологическим признакам: ‘*Albospicata*’ – с беловатыми кончиками побегов; ‘*Aureospicata*’ – с блестящими веточками, золотистыми на концах; ‘*Cristata*’ – подушковидная с гребенчато вверх направленными побегами; ‘*Douglasii Pyramidalis*’ – с побегами, расположенными гребневидно; ‘*Fastigiata*’ – с короткими восходящими ветвями; ‘*Filiformis*’ – со свисающими нитевидными побегами; ‘*Globosa*’ – шаровидная; ‘*Hoveyi*’ – шаровидно-яйцевидная; ‘*Lutea*’ – пирамидальная с ярко-желтыми листьями; ‘*Plicata nana*’ – складчатая низкая; ‘*Resurva nana*’ – обратно загнутая низкая; ‘*Riversii*’ – с желтовато-зелеными листьями; ‘*Umbraculifera*’ – расprostертая или округлая с тонкими поникающими побегами; ‘*Vervaeiniana*’ – с тонкими желтыми побегами, зимой желтовато-бронзовыми; ‘*Wagneriana*’ – овальная с прямостоячими ветвями (Александрова, 2003; Лазарева и др., 2004; Чернышов и др., 2007).

**3. Ель колючая** (*Picea pungens* Engelm.) – однодомное перекрестноопыляемое вечнозеленое дерево, достигающее высоты от 30 до 45 м, относится к роду Ель (*Picea* A. Dietr.), семейству Сосновые (*Pinaceae*), порядку Сосновые (*Pinales*), классу Хвойные (*Pinopsida*), отделу Хвойные (*Pinophyta*).

Естественный ареал обитания вида характеризуется более экстремальными условиями произрастания: повышенной сухостью воздуха и почвы, резко континентальным режимом, условиями высокогорной солнечной радиации. *P. pungens* произрастает вдоль рек, на северных склонах гор, на высоте 2000–3300 м, обычно не образует больших лесных массивов на Скалистых горах запада Северной Америки (штаты Колорадо, Вайоминг, Юта, Аризона, Нью-Мексико) (Лазарева и др., 2004; Бухарина, Поварницина, 2008; Вернигора, 2008; Орлова и др., 2009; Овсянников, Шавнин, 2013; Титова, 2013).

Крона плотная, конусовидная, образованная горизонтально поставленными мутовчатыми ветвями. Диаметр ствола достигает порядка 1 м. Кора характеризуется шелушением и имеет коричневато-серый оттенок. Молодые побеги отличаются значительной толщиной, обладают оранжево-коричневой окраской и могут быть как гладкими, так и слегка опушенными. Ветви формируют правильные компактные ярусы, ориентированные преимущественно горизонтально или наклоненно вниз под различными углами относительно оси роста. Почки имеют серый цвет, характеризуются широкой овальной формой и отсутствием выделения смолы; наружные чешуи почек отклонены назад на концах. Хвоя жесткая, грубая и острая, длина варьирует примерно от 2 до 3 см, форма – четырехгранная. Окраска хвои колеблется от синевато-зеленого до серебристо-белого оттенков, с более светлыми окончаниями, что соответствует разным формам *P. pungens* (Александрова, 2003; Валягина-Малюткина, 2001; Лазарева и др., 2004; Лоскутов, 2008; Бирючев, 2012; Титова, 2013). По литературным данным продолжительность жизни хвои ели колючей составляет 4–6 (9) лет, а продолжительность жизни особей – 100 лет (Бухарина, Поварницина, 2008).

Семена созревают к осени; зрелые шишки овально-цилиндрические, рыхлые, 5–8 см длиной и около 3 см толщиной, светло-коричневато-серые. Кроющие чешуи мягкие, кожистые, сильно морщинистые, по краю волнистые. Шишки раскрываются осенью, тогда происходит и высыпание семян, разносимых ветром (Булыгин, 2001; Лоскутов, 2008).

Вид ветроустойчив, зимо- и морозоустойчив, засухоустойчив, успешно адаптируется к высоким температурам воздуха, относительно неприхотлив к почвенному плодородию, но не является солеустойчивым видом, в условиях избыточного увлажнения растет плохо. В условиях городской среды у ели колючей отмечается замедленный рост, особенно на сухих почвах (Бухарина и др., 2007; Лазарева и др., 2004; Бухарина, Поварницина, 2008; Вернигора, 2008; Лоскутов, 2008; Вишнякова, Аткина, 2011; Бирючев, 2012; Титова, 2013).

*P. pungens* отличается значительными ландшафтно-эстетическими качествами. Ее умеренная требовательность к условиям произрастания, уникальная окраска хвои и своеобразная конфигурация кроны обеспечивают данному виду статус наиболее эстетически привлекательного представителя рода *Picea* A. Dietr. После введения в культуру в 1862 году, данный вид широко распространился (Лазарева и др., 2004). Особенно декоративны такие культивары *P. pungens* как: ‘Argentea’ – с конусовидной кроной и четко мутовчато расположенными горизонтальными ветвями с серебристо-белой хвоей; ‘Glauca’ – с симметричной, конусовидной кроной, хвоя голубовато-сизая; ‘Glauca Globoza’ – карликовая форма высотой до 1 м, молодые побеги желтовато-коричневатые, крона округлая, хвоя слегка серповидная, бело-голубая; ‘Koster’ – с опущенными вниз плакучими ветвями, хвоя слегка серповидная, голубовато-зеленая; ‘Hoopsii’ – с равномерноразветвляющейся густой кроной, хвоя голубовато-белая; ‘Spek’ – с конусовидной кроной, хвоя серповидно-изогнутая, голубая; и др. (Александрова, 2003; Лазарева и др., 2004). И.И. Крючкова, З.Я. Нагимов (2015) отмечают, что голубая и серебристая формы *P. pungens* эффектны на зеленом фоне лиственных видов.

## 2.2 Методы исследования

Эколого-физиологические исследования хвойных растений были проведены в вегетационные периоды 2015–2022 гг. Для проведения комплексных исследований хвойных интродуцентов были заложены 15 пробных площадей (ПП) в трех функциональных зонах (рекреационная, селитебная, промышленная) г. Йошкар-Олы (56°38' с.ш., 47°52' в.д.).

Исследуемые функциональные зоны характеризуются различным уровнем антропогенной нагрузки на окружающую среду, связанной с загрязнением атмосферного воздуха и почвы (описание функциональных зон см. в главе 3).

Исследования по эколого-физиологическим особенностям *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* проводили у одновозрастных (45 лет) (средневозрастное генеративное состояние – g<sub>2</sub>) учетных растений. Отбор учетных растений проводили по 10 экземпляров каждого исследуемого вида в каждой функциональной зоне. Отбор проб хвои второго года жизни проводили со средней части кроны растений южной экспозиции. Всего проведено 29700 физиолого-биохимических анализов хвои.

*Исследование атмосферного воздуха.* Мониторинг атмосферного загрязнения г. Йошкар-Олы осуществлялся согласно следующим нормативным документам: ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов»; РД 52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы». В пробах атмосферного воздуха определяли концентрацию CO, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> (мг/м<sup>3</sup>) с помощью газоанализатора ПГА-200, взвешенных веществ (мг/м<sup>3</sup>) – анализатором пыли ИКП-5.

*Подготовка проб почвы к анализу.* В каждой пробной площади (ПП) функциональных зон было отобрано по 10 проб почвы. Подготовку почвенных проб выполняли в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 17.4.4.02-2017. Пробы почвы из подкроновых участков хвойных растений брали из зоны расположения корневой системы (0–20 см) методом конверта. Для проведения физико-химического анализа почвы отбирали смешанный образец, который составляли из

10 индивидуальных почвенных образцов. Средний образец массой 1 кг отбирали путем квартирования из исходного смешанного образца, после чего производили тщательное перемешивание, удаление корней и посторонних включений (камней), сушку до достижения воздушно-сухого состояния. Полученную пробу измельчали в фарфоровой ступке и подвергали просеиванию через сито с размером отверстий 1 мм. Из данного образца отбирали среднюю пробу для проведения анализов. Всего было проведено 2100 физико-химических анализов почвы.

*Определение удельной электрической проводимости водной почвенной вытяжки* проводили по ГОСТ 26423-85.

*Определение pH водной почвенной вытяжки* определяли потенциометрическим методом на рН-метре марки 150 МИ (ГОСТ 26423-85).

*Содержание органического вещества в почве* определяли гравиметрическим методом (ГОСТ 26213-91).

*Содержание тяжелых металлов (свинец, кадмий, медь, железо)* в почвенных и озоленных растительных образцах (хвоя второго года жизни и побеги второго порядка) определяли методом атомно-абсорбционного спектрального анализа на спектрометре «AAAnalyst 400» (Perkin Elmer, USA) (Методика выполнения..., 2007). Почвенные и растительные образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 105°C до постоянной массы. Для определения содержания тяжелых металлов высушенный растительный материал предварительно озоляли в муфельной печи при температуре 500°C в течение 4 часов. После охлаждения тиглей определяли массу золы и рассчитывали зольность образцов по формуле:

$$\omega_{\text{зола}} = \frac{m_{\text{зола}}}{m_{\text{высуш}}} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $\omega_{\text{зола}}$  – содержание золы, мг на 1 кг сухого образца;

$m_{\text{зола}}$  – масса золы;

$m_{\text{высуш}}$  – масса высушенного образца (Журавлева, 1974).

Полученную золу растворяли в смеси 2 мл концентрированной азотной и 6 мл концентрированной соляной кислот. После растворения золы растворы отфильтровывали через обеззоленные фильтры в мерные колбы на 25 мл. Окончательно объемы растворов доводили до метки на мерных колбах раствором азотной кислоты концентрацией 0,1 моль/дм<sup>3</sup> (фоновый раствор).

Определение содержания ионов металлов проводили методом градуировочного графика. Для построения градуировочного графика были приготовлены стандартные калибровочные растворы вышеперечисленных ионов металлов с использованием государственных стандартных образцов. Все калибровочные растворы были приготовлены с использованием раствора азотной кислоты концентрацией 0,1 моль/дм<sup>3</sup> (фоновый раствор).

Стандартные калибровочные растворы и растворы исследуемых образцов последовательно через распылительное устройство вводились в пламя горелки атомно-абсорбционного спектрометра «AAnalyst-400» (PerkinElmer, USA, 2008). В качестве горючего газа использовался ацетилен, в качестве газа-окислителя – воздух.

Содержание элементов в пересчете на сухой образец считали по формуле:

$$C_{э} = \frac{C_p \times V_p}{M_c}, \quad (2)$$

где  $C_{э}$  – содержание элемента, мг/кг;

$C_p$  – содержание элемента в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;

$V_p$  – объем раствора, в котором была растворена зола (25 см<sup>3</sup>);

$M_c$  – масса сухого образца, г (Методика выполнения..., 2007).

Оценку степени накопления тяжелых металлов растениями проводили на основе коэффициента биологического поглощения (КБП), рассчитываемого как отношение содержания металла в золе растений к валовому содержанию элемента в почве (Перельман, 1975; Авдощенко, Климова, 2021):

$$\text{КБП} = \frac{C_{з}}{C_{п}}, \quad (3)$$

где КБП – коэффициент биологического поглощения;

$C_z$  – концентрация элемента в золе растений, мг/кг;

$C_n$  – концентрация элемента в почве или горной породе, на которой произрастает данное растение, или кларк литосферы, мг/кг.

Для оценки способности видов растений к концентрации элементов также рассчитывали биогеохимическую активность вида (БХА) (Айвазян, 1974; Енчилик и др., 2018; Авдощенко, Климова, 2021). Это суммарная величина, получаемая при сумме коэффициентов биологического поглощения отдельных микроэлементов:

$$\text{БХА} = \sum \text{КБП}_i, \quad (4)$$

где БХА – биогеохимическая активность вида;

$\sum \text{КБП}_i$  – сумма коэффициентов биологического поглощения отдельных микроэлементов.

*Оценка жизненного состояния хвойных растений.* На каждой пробной площади определяли категории жизненного состояния хвойных растений (1 – здоровое дерево; 2 – поврежденное (ослабленное); 3 – сильно поврежденное (сильно ослабленное); 4 – отмирающее дерево; 5 – сухостой) по биоморфологическим признакам кроны: форма и густота кроны, охвоенность, окраска хвои, доля повреждения хвои от некрозов, хлорозов, пятнистостей и др., количество мертвых ветвей на стволе и т.д. (Алексеев, 1989; Методические рекомендации..., 2003) (приложение 2).

На основании результатов оценки жизненного состояния хвойных растений рассчитывали относительное жизненное состояние (ОЖС) древостоя по В.А. Алексееву (1989) для *P. pungens* и *T. occidentalis* по формуле:

$$L_n = \frac{100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4}{N}, \quad (5)$$

где  $L_n$  – относительное жизненное состояние древостоя по числу деревьев;

$n_1$  – число здоровых деревьев на пробной площади;

$n_2$  – число ослабленных деревьев на пробной площади;

$n_3$  – число сильно ослабленных деревьев на пробной площади;

$n_4$  – число отмирающих деревьев на пробной площади;

100, 70, 40, 5 – коэффициенты, выражающие жизненное состояние здоровых, ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев, %;

$N$  – общее число деревьев на пробной площади (включая сухостой).

При  $L_n = 80–100\%$  жизненное состояние древостоя оценивается как «здоровое» (КС I), при  $L_n = 79–50\%$  – «ослабленное» (КС II), при  $L_n = 49–20\%$  – «сильно ослабленное» (КС III), при  $L_n = 19\%$  и ниже – «полностью разрушенный» (КС IV) (Алексеев, 1989).

*Определение видового состава травяной растительности.* Для характеристики травянистого покрова насаждений определяли видовой состав и проективное покрытие видов, закладывая в пределах ПП учетные площадки (УП) размером  $1 \text{ м}^2$  (Полевой экологический практикум, 2000).

При определении видового состава древесных растений и травяной растительности исследуемых зон использовали следующие определители: «Определитель сосудистых растений центра европейской России» (Губанов и др., 1995), «Деревья и кустарники Средней полосы Европейской части России» (Валягина-Малютина, 1998), «Деревья и кустарники зимой. Определитель древесных и кустарниковых пород по побегам и почкам в безлистном состоянии» (Валягина-Малютина, 2001), «Деревья и кустарники. Энциклопедия природы России» (Алексеев, 1997), «Флора средней полосы европейской части России» (Маевский, 2014).

*Определение содержания фотосинтетических пигментов.* Хвою второго года жизни собирали в последнюю декаду исследуемых месяцев (май, июль, октябрь, декабрь) в период с  $11^{\circ\circ}$ – $14^{\circ\circ}$  часов, так как в это время наблюдается наибольшее содержание пигментов в хвое. Пробу свежего растительного материала после растирания в фарфоровой ступке с  $\text{CaCO}_3$  экстрагировали в 100%-ном ацетоне. Содержание хлорофиллов  $a$  и  $b$ , каротиноидов определяли на спектрофотометре ПЭ-5400В (ПромЭкоЛаб, 2012) при длинах волн 662 и 644 нм – хлорофиллы  $a$  и  $b$ , 440,5 нм – каротиноиды.

Расчет концентрации пигментов в вытяжке проводили по формулам D. Wettstein (1957) в 100% растворе ацетона:

$$C_a = 9,784 \times D_{662} - 0,99 \times D_{644}; \quad (6)$$

$$C_b = 21,426 \times D_{644} - 4,65 \times D_{662}; \quad (7)$$

$$C_{a+b} = 5,134 \times D_{662} + 20,436 \times D_{644}; \quad (8)$$

$$C_{кар} = 4,695 \times D_{440,5} - 0,268 \times (C_{a+b}), \quad (9)$$

где  $C_a$  – концентрация хлорофилла  $a$  (мг/л);

$C_b$  – концентрация хлорофилла  $b$  (мг/л);

$C_{a+b}$  – концентрация суммы хлорофиллов  $a$  и  $b$  (мг/л);

$C_{кар}$  – концентрация каротиноидов (мг/л);

$D_{440,5}$ ,  $D_{644}$ ,  $D_{662}$ , – оптические плотности в центрах поглощения пигментов при 440,5, 644 и 662 нм.

Содержание пигментов в ацетоновой вытяжке вычисляли по формуле:

$$A = \frac{C \times V}{P \times 1000}, \quad (10)$$

где  $A$  – содержание пигмента (мг/г сырой массы);

$C$  – концентрация пигмента (мг/л);

$V$  – объем вытяжки пигмента (мл);

$P$  – навеска хвои (г).

Расчет доли хлорофиллов в светособирающем комплексе (ССК) от их суммы производили с учетом того, что, во-первых, весь хлорофилл  $b$  находится в ССК, и, во-вторых, соотношение хлорофиллов  $a/b$  в ССК равно 1,2 (Lichtenthaler, 1987; Гавриленко и др., 1975; Гавриленко, Жигалова, 2003).

*Определение активности окислительно-восстановительных ферментов.*

Активность ферментов определяли сразу же в день отбора хвои. Определение активности каталазы (КФ 1.11.1.6) проводили газометрическим методом (Prasad et al., 1999). Навеску хвои массой 100 мг растирали в ступке. Реакционная среда (15 мл) содержала: 5 мл 3%-ного раствора  $H_2O_2$  и 10 мл растительной вытяжки. После добавления  $H_2O_2$  активность фермента определяли по скорости выделения  $O_2$  в течение 5 мин и выражали в мл выделенного  $O_2$  на грамм сырой массы в минуту ( $мл O_2 \times г^{-1} \times мин^{-1}$ ) (Методы..., 2018).

Определение активности пероксидазы (КФ 1.11.1.7) – колориметрическим методом с бензидином (Бояркин, 1951). Навеску хвои 100 мг растирали в ступке с водой и переносили в мерную колбу на 25 мл. Растительную вытяжку настаивали 5–10 минут и центрифугировали в течение 10 мин при 3000 оборотах в минуту, надосадочную жидкость использовали для дальнейшего определения активности фермента. Для определения активности брали две кюветы толщиной 1 см. В контрольную кювету помещали 2 мл бензидина, 2 мл фильтрата, 2 мл воды. По контрольной кювете установили ноль прибора (ФЭК). Определение проводили красным светофильтром при длине волны  $\lambda=670$  нм. Во вторую кювету (опыт) вливали 2 мл бензидина, 2 мл фильтрата, 2 мл 0,3%-ного раствора  $H_2O_2$ , при этом сильная струя перекиси перемешивает содержимое кюветы. Одновременно с вливанием  $H_2O_2$  включали секундомер. В опытной кювете раствор синел, и стрелка прибора передвигалась справа налево. Отмечали время, за которое стрелка достигала 0,2 деления прибора (ед. оптической плотности).

Активность пероксидазы в хвое рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{D \times E}{t \times d}, \quad (11)$$

где  $A$  – активность пероксидазы, ( $\Delta D_{670} \Gamma^{-1} \times c^{-1}$ );

$D$  – оптическая плотность (0,2);

$E$  – разведение сырой навески (перерасчет на 1 кг сырой навески);

$t$  – время, с;

$d$  – толщина слоя жидкости, толщина кюветы (1 см) (Методы..., 2018).

*Статистический анализ данных.* Статистическую обработку данных проводили с помощью программ Microsoft Office Excel и «Statistica 10.0». В работе использовали следующие статистические характеристики: среднее арифметическое и его ошибка, минимальные и максимальные значения в выборке,  $t$ -критерий Стьюдента, двух- и трехфакторный дисперсионный анализ, множественные сравнения, коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

## **ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ПРИРОДНУЮ СРЕДУ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ**

### **3.1 Физико-географическая характеристика г. Йошкар-Олы**

Город Йошкар-Ола ( $56^{\circ}38'$  с.ш.,  $47^{\circ}52'$  в.д.) расположен на территории Марийской низменности восточной части Восточно-Европейской равнины в 50 км к северу от реки Волги, на южной границе таежной зоны в районе смешанных лесов. Город располагается на берегах реки Малой Кокшаги, делящей его на две части. Согласно официальным данным на 1 января 2025 года численность населения составляла 296004 человека. Общая площадь территории города составляет 101,8 км<sup>2</sup>.

Г. Йошкар-Ола расположен на Оршанско-Кокшагской равнине, находящейся в тектоническом отношении в зоне Чебоксарского прогиба и западном крыле Мари-Вятского Увала. Перепад высот от 87 до 110 м, уклоны поверхности варьируют в диапазоне от 0,5 до 1,5°. Частично территория города расположена в пойме реки Малая Кокшага и на ее террасах, где отмечаются минимальные значения высоты, тогда как максимальные отметки достигаются вблизи микрорайона «Дубки».

Кристаллический фундамент, находящийся на глубинах порядка 1500–2000 м, послужил основой для формирования мощной толщи осадочных отложений, накапливавшихся на протяжении длительного периода. Структура Оршанско-Кокшагской равнины представлена глинистыми, мергелистыми и песчано-каменистыми образованиями татарского яруса, покрытыми сверху различными по мощности слоями покровных суглинков. Данные слои на территории города не выходят на поверхность, поскольку скрыты подстилающими осадочными отложениями, выступающими материнскими породами для городских почв и

обеспечивающими поступление необходимых минералов для произрастания растительного покрова.

Для г. Йошкар-Олы характерен умеренно континентальный тип климата с четким делением на четыре сезона года. Основными факторами, определяющими формирование климата региона, являются уровень солнечной радиации, состояние подстилающих поверхностей и атмосферная циркуляция.

Средняя годовая температура воздуха равна  $+3,2^{\circ}\text{C}$ , при этом средняя температура января составляет  $-12,4^{\circ}\text{C}$ , июля  $+18,6^{\circ}\text{C}$ . Экстремально зафиксированные показатели температур находятся в диапазонах от минимальной отметки  $-47^{\circ}\text{C}$  до максимальной  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Количество атмосферных осадков достигает около 550 мм в год, преимущественно выпадая в виде дождя. В зимний период отмечается до 135 мм осадков в виде снега, формируя средний слой снежного покрова высотой от 35 до 50 см, сохраняющийся стабильно в течение примерно 155 суток.

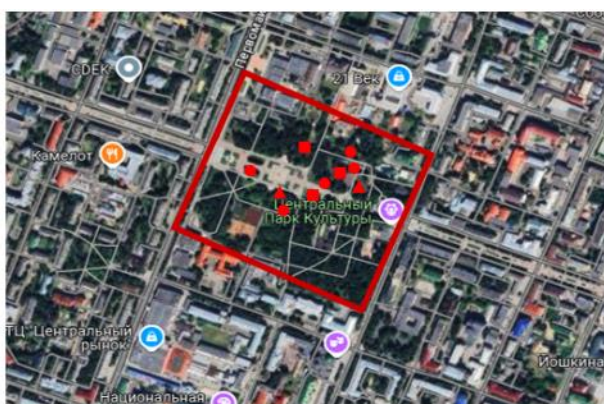
Скорость ветра равна 4–5 м/с. В теплый сезон преимущественными направлениями воздушных потоков являются северо-восточные, северные, северо-западные и западные, тогда как зимой превалируют южные, юго-западные и юго-восточные ветра.

Продолжительность вегетационного периода варьируется в пределах от 126 до 128 дней. Климатические условия г. Йошкар-Олы оптимальны для роста и развития древесных, кустарниковых и травянистых видов, характерных для зон умеренного пояса (Экология..., 2004, 2007; Энциклопедия..., 2009; Информационный отчет..., 2020; Информационный портал..., 2023).

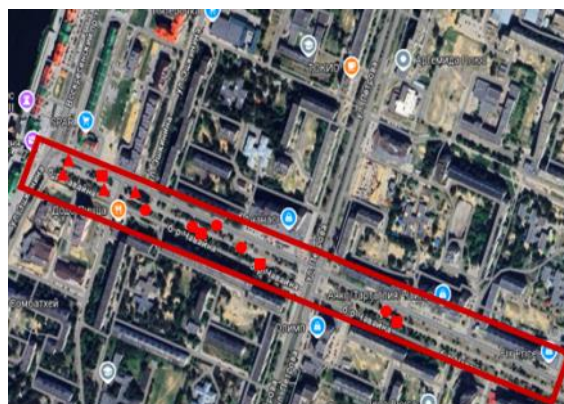
### **3.2 Характеристика районов исследования**

В каждой из исследуемых функциональных зон, различающихся по степени антропогенного воздействия – рекреационной (Центральный парк культуры и отдыха (ЦПКиО)) (I), селитебной (бульвар Чавайна) (II), промышленной (улица Строителей) (III) (рисунок 1г). В каждой функциональной зоне города

закладывали по 5 пробных площадей размером 0,25 га каждая, охватывающих большинство насаждений *J. sabina*, *T. occidentalis*, *P. pungens*. Всего было заложено 15 пробных площадей.



а) рекреационная зона (ЦПКиО)  
56.636740, 47.890121



б) селитебная зона (бульвар Чавайна)  
56.631155, 47.915193



в) промышленная зона (ул. Строителей)  
56.614017, 47.866623



г) расположение исследуемых функциональных зон г. Йошкар-Олы

▲ – *J. sabina*, ■ – *T. occidentalis*, ● – *P. pungens*

Рисунок 1 – Карта-схема г. Йошкар-Олы с обозначением мест отбора почвенных и растительных образцов

**Районы исследования.** Рекреационная зона (ЦПКиО) (рисунок 1а) расположена в центральной части г. Йошкар-Олы и представляет собой городской парк ландшафтного типа площадью 12,5 га. Зеленые насаждения относятся к категории общего пользования.

Селитебная зона (бульвар Чавайна) (рисунок 1б) находится в заречной части города и выступает ключевым структурирующим линейным планировочным элементом зеленой инфраструктуры города. Данная территория

выполняет связующую функцию между правой и левой частями города, обеспечивая единство градостроительной организации пространства. Характеризуется хорошей транспортной доступностью и высокой плотностью застройки жилых домов; зеленые насаждения причисляются к категории общего пользования.

*Промышленная зона (улица Строителей)* (рисунок 1в) расположена в южной части г. Йошкар-Олы. Здесь расположены основные промышленные предприятия города, зафиксировано постоянное интенсивное движение автотранспорта (1980 авт./ч) и повышенный уровень загазованности и запыленности воздушной среды; зеленые насаждения относятся к категории специального назначения (санитарно-защитные насаждения промзоны).

### **3.3 Особенности загрязнения окружающей городской среды и оценка экологической ситуации г. Йошкар-Олы**

#### **3.3.1 Состояние атмосферного воздуха г. Йошкар-Олы**

Город Йошкар-Ола – это многопрофильный промышленный, культурно-научный центр Республики Марий Эл. Основные отрасли промышленности представлены машино- и приборостроением, металлообработкой, деревопереработкой и пищевой индустрией. Экологическая ситуация отдельных районов города отличается неравномерностью и обусловлена двумя факторами: выбросами вредных веществ от стационарных промышленных объектов и быстро развивающегося автопарка (Митякова и др., 2020; Доклад..., 2022, 2023).

Главной экологической проблемой, вызванной деятельностью предприятий, становится неоптимальное расположение жилой зоны относительно основного промышленного сектора. Так, в южных кварталах города, где сосредоточены крупные промышленные предприятия, фиксируется повышенная плотность транспортного потока, что способствует увеличению концентрации загрязнителей

в атмосфере и ухудшению качества воздушной среды (Информационный отчет..., 2020).

По данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Марий Эл (таблица 1), суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников предприятий по Республике в 2015 году – 22,35 тыс. тонн (в г. Йошкар-Оле – 8,15 тыс. тонн); в 2016 году – 36,44 тыс. тонн (в г. Йошкар-Оле – 8,43 тыс. тонн); в 2017 году – 34,99 тыс. тонн (в г. Йошкар-Оле – 8,27 тыс. тонн); в 2018 году – 37,85 тыс. тонн (в г. Йошкар-Оле – 4,25 тыс. тонн); в 2019 году – 37,85 тыс. тонн; в 2020 году – 55,04 тыс. тонн; в 2021 году – 38,71 тыс. тонн, в 2022 году – 32,69 тыс. тонн (Доклад..., 2015–2022).

Таблица 1 – Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух по Республике Марий Эл (Доклад..., 2023)

Год	Выбросы от стационарных источников, тыс. тонн	Основные загрязняющие вещества, выбрасываемые от стационарных источников, тыс. тонн							Уловлено и обезврежено, тыс. тонн	Выбросы от автотранспорта, тыс. тонн	Суммарный выброс, тыс. тонн	Вклад автотранспорта в суммарный выброс, %
		Твердые вещества	Диоксид серы	Диоксид азота	Оксид углерода	Углеводороды (без ЛОС)	ЛОС	Прочие				
2015	22,35	3,58	0,72	3,83	5,33	5,38	2,64	0,82	9,97	58,00	80,34	72,19
2016	36,44	3,36	1,06	4,25	5,55	18,14	2,68	1,36	8,23	57,40	93,83	61,17
2017	34,99	3,23	0,82	4,35	5,46	16,16	3,64	1,31	8,46	57,70	92,69	62,25
2018	37,85	2,45	0,65	4,12	4,87	21,73	2,73	1,27	10,11	58,10	95,95	60,55
2019	37,85	2,28	0,66	3,78	4,39	22,33	2,92	1,03	10,58	16,40	53,80	43,84
2020	55,04	2,53	0,84	5,43	15,06	26,76	3,29	1,09	9,84	15,75	70,78	28,62
2021	38,71	2,87	0,95	4,31	9,13	18,32	1,97	1,14	11,84	14,87	53,57	27,75
2022	32,69	2,87	1,02	3,58	4,89	17,17	1,95	1,21	10,39	14,50	47,20	30,73

Примечание: ЛОС – летучие органические соединения

Таким образом, в последние годы (2020–2021 гг.) было отмечено увеличение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух как в г. Йошкар-Оле, так и в Республике Марий Эл в целом.

За период 2015–2018 гг. наблюдалось устойчивое повышение суммарного выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух г. Йошкар-Олы. В последующий период с 2019 по 2022 гг. было дальнейшее усиление выбросов загрязнений, связанных с функционированием промышленных предприятий. В 2018 году наблюдалось наибольшее количество выбросов, поступивших в воздушный бассейн города, от автотранспорта за все годы наблюдения (95,95 тыс. тонн).

Город Йошкар-Ола относится к городам с умеренной степенью загрязнения атмосферы (Алябышева и др., 2013). Согласно представленным данным из «Доклада об экологической ситуации в Республике Марий Эл», в период с 2019 по 2022 гг. в г. Йошкар-Оле выявлена тенденция двукратного уменьшения относительной доли автомобильных выбросов в общем объеме загрязнения атмосферного воздуха по сравнению с предшествующим периодом 2015–2018 гг.

Среди приоритетных загрязняющих веществ, выбрасываемых стационарными источниками, выделяются диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксид углерода (CO), взвешенные вещества, а также ряд углеводородов, включающих бензин нефтяной, ксилол, толуол, этилацетат и бутилацетат (Доклад..., 2015–2023).

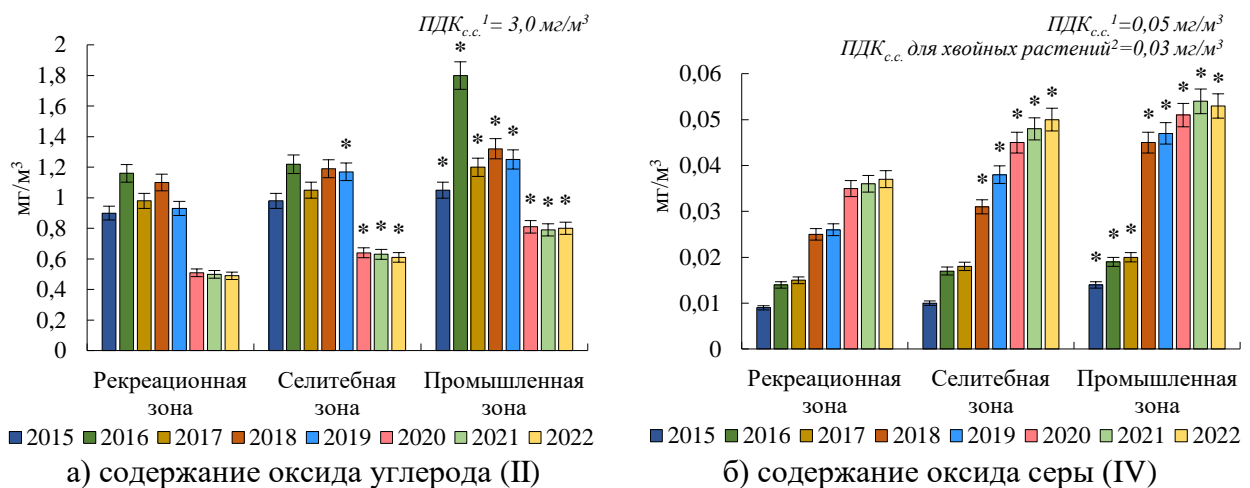
Основные предприятия, оказывающие значительное негативное воздействие на качество атмосферного воздуха г. Йошкар-Олы: АО «Марийский машиностроительный завод», АО «НП «Завод искусственных кож», МУП «Йошкар-Олинская ТЭЦ-1», АО «Контакт», АО «ОКТБ Кристалл», ЗАО СКБ «Хроматэк», ООО «НПФ «Мета-хром», ООО «НПФ «Геникс», АО «Йошкар-Олинский мясокомбинат» и др. (Доклад..., 2023).

Ведущими источниками загрязнения почв города являются бытовые отходы коммунального хозяйства, выбросы автотранспорта и железнодорожного

транспорта, продукты сгорания теплоэлектростанций и промышленных производств, сброс сточных вод, а также строительные отходы (Доклад..., 2021).

Мониторинг состояния атмосферного воздуха на территории г. Йошкар-Олы показал, что, несмотря на отдельные случаи превышения максимально-разовых концентраций отдельных загрязняющих веществ, среднегодовые концентрации содержания каждого определяемого вещества были ниже установленных ПДК и соответствовали установленным санитарно-гигиеническим нормам для населенных пунктов (Информационный отчет..., 2018; Доклад..., 2021).

В ходе работы нами было определено содержание оксида углерода (II), оксида серы (IV), оксидов азота и взвешенных веществ в атмосферном воздухе исследуемых функциональных зонах г. Йошкар-Олы (рисунок 2–4).



Примечание: <sup>1</sup> – по СанПиН 1.2.3685-21;

<sup>2</sup> – по Коплан-Дикс, Алеховой, 2002;

\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

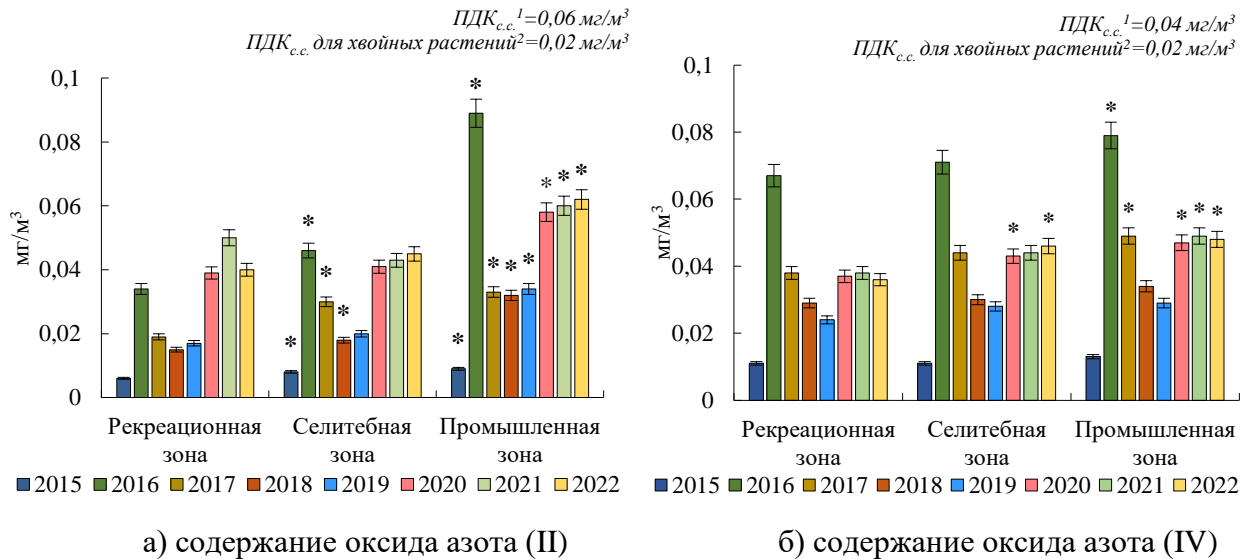
Рисунок 2 – Изменение содержания оксида углерода (II) и оксида серы (IV) в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы

Содержание оксида углерода (II) в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы не превышало пределы установленного санитарного норматива ( $\text{ПДК}_{\text{с.с.}}=3,0 \text{ мг/м}^3$ ) (рисунок 2а). В изучаемых зонах города концентрация CO изменялась от 0,49 до

1,80 мг/м<sup>3</sup>. При этом наибольшая концентрация оксида углерода (II) была определена в 2016 году: в рекреационной зоне – 1,16 мг/м<sup>3</sup>, в селитебной – 1,22 мг/м<sup>3</sup>, в промышленной зоне – 1,80 мг/м<sup>3</sup>. Содержание исследуемого параметра на протяжении 2020–2022 гг. снизилось по сравнению с 2015–2019 гг. в 2 раза. Концентрация СО в атмосферном воздухе промышленной зоны была выше в 1,2 раза по сравнению с рекреационной и селитебной зонами.

Данные мониторинга атмосферного воздуха за исследуемый период наблюдений свидетельствуют об увеличении концентрации оксида серы (IV) (рисунок 2б). Так, наибольшее содержание SO<sub>2</sub> было отмечено в 2022 году, что по сравнению с данными 2015 года было выше в рекреационной зоне в 4 раза, в селитебной – в 5 раз, в промышленной – в 3,8 раза. Однако содержание оксида серы (IV) не превышало предельно допустимых концентраций (ПДК<sub>с.с.</sub>=0,05 мг/м<sup>3</sup>) во всех исследуемых зонах города. Но были обнаружены превышения ПДК для хвойных растений (ПДК<sub>с.с.</sub>=0,03 мг/м<sup>3</sup>): в рекреационной зоне в 1,2 раза, в селитебной – в 1,3–1,7 раза, в промышленной – в 1,5–1,8 раза.

Как показали результаты наших исследований (рисунок 3а), концентрация оксида азота (II) за все годы наблюдений была ниже ПДК<sub>с.с.</sub> (ПДК<sub>с.с.</sub>=0,06 мг/м<sup>3</sup>). Но были превышения ПДК<sub>с.с.</sub> в 2–2,6 раза для хвойных растений во всех трех зонах города. Содержание NO в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы изменялось от 0,006 мг/м<sup>3</sup> до 0,089 мг/м<sup>3</sup>. Максимальные значения концентрации данного соединения были отмечены в 2016 году в промышленной зоне. За весь период наблюдений (2015–2022 гг.) содержание оксида азота (II) в атмосферном воздухе промышленной зоны была выше в 1,2–1,7 раза по сравнению с значениями рекреационной зоны.



Примечание: <sup>1</sup> – по СанПиН 1.2.3685-21;

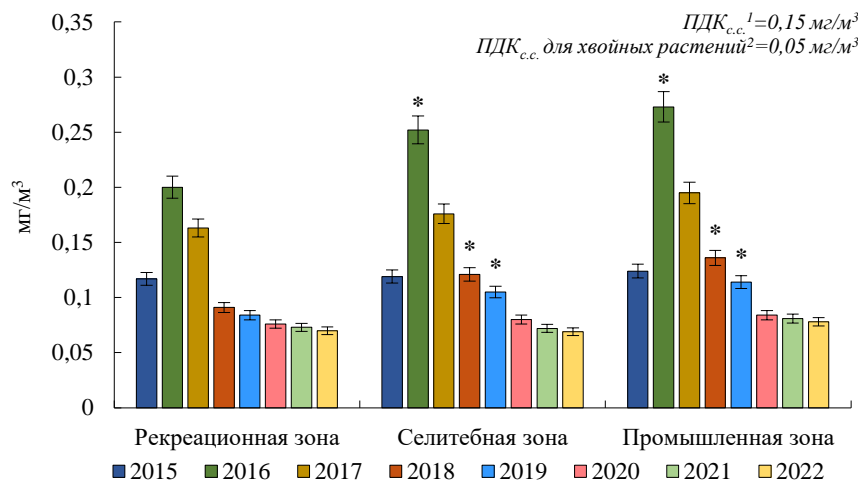
<sup>2</sup> – по Коплан-Дикс, Алеховой, 2002;

\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 3 – Изменение содержания оксидов азота в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы

За период проведения исследований только в 2016 году были обнаружены превышения санитарно-гигиенических нормативов для NO<sub>2</sub> в 1,7–1,9 раза (рисунок 3б). Среднесуточные ПДК для хвойных растений составляют 0,02 мг/м<sup>3</sup> (Коплан-Дикс, Алехова, 2002). В 2016–2022 гг. во всех изученных функциональных зонах г. Йошкар-Олы концентрация оксида азота (IV) превысила ПДК<sub>с.с.</sub> для хвойных растений: в рекреационной зоне – в 1,2–3,4 раза, в селитебной зоне – в 1,4–3,6 раза, в промышленной зоне – в 1,5–3,9 раза.

Максимальные значения концентрации взвешенных веществ в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы были отмечены в 2016 году, что превышали значения ПДК<sub>с.с.</sub> в 1,3–1,8 раза (рисунок 4). За весь период наблюдений нами были обнаружены превышения ПДК для хвойных растений (ПДК<sub>с.с.</sub>=0,05 мг/м<sup>3</sup>): в рекреационной зоне в 1,4–4 раза, в селитебной в 1,4–5 раза, в промышленной в 1,6–5,5 раза.



Примечание: <sup>1</sup> – по СанПиН 1.2.3685-21;

<sup>2</sup> – по Коплан-Дикс, Алеховой, 2002;

\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 4 – Изменение содержания взвешенных веществ в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы

Таким образом, исходя из полученных результатов наблюдений, в промышленной зоне наблюдалось превышение ПДК<sub>с.с.</sub> по SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub>; во всех трех зонах были обнаружены превышения ПДК<sub>с.с.</sub> для хвойных растений: по оксиду серы (IV) – в 1,5 раза, по оксидам азота (II) и (IV) – в 3,5 раза и по взвешенным веществам – в 4,5 раза.

### 3.3.2 Оценка физико-химических свойств городских почв

Почва городских территорий представляет собой сложную и неоднородную природно-антропогенную биогеохимическую систему; это специфический элемент биосферной оболочки Земли, аккумулирующий разнообразнейшие химические элементы и соединения, выполняя природоохранную функцию фильтра и регулятора миграции веществ в сопредельные экосистемы и биотические компоненты (Зайцев, Галямова, 2012; Воскресенская и др., 2013; Гончаров и др., 2015).

Основное отличие урбанизированных почв от естественных заключается в наличии специального почвенного горизонта – «урбик», расположенного на поверхности, искусственно созданного и подвергнутого интенсивному механическому перемешиванию, содержащего значительные включения техногенных материалов, бытовых и строительных отходов. Верхний слой горизонта обладает различной степенью гумусированности, зависящей от функционально-территориальной принадлежности (промышленная, жилая, рекреационная) и длительности существования. Отличительные признаки «урбика» включают повышенную концентрацию карбонатных солей, тяжелые металлы, процессы засоления, увеличенное уплотнение и сниженную влагоемкость (Воскресенский, Воскресенская, 2011а).

Кислотность почв представляет собой важную физико-химическую характеристику, обусловленную присутствием ионов водорода. Реакция почвенного раствора оказывает существенное влияние на протекающие в почве процессы трансформации как минеральных, так и органических составляющих: растворимость веществ, осаждение соединений, диссоциативные явления, формирование и стабильность комплексов, а, следовательно, и миграция, и аккумуляция веществ в почвенном профиле (Русак, Обзор, 2021).

Исследования, выполненные И.И. Митяковой с соавторами (2020), свидетельствуют о преобладании легко- и среднесуглинистых почв на территории г. Йошкар-Олы. Учитывая, что легкие суглинки отличаются повышенной буферной способностью по сравнению с песчаными и супесчаными разновидностями почв, можно сделать вывод, что городские почвы демонстрируют высокую устойчивость к процессам загрязнения.

В таблице 2 представлены физические свойства почв исследуемых функциональных зон г. Йошкар-Олы.

Содержание органического вещества в почве варьировало от 4,24 до 9,84% (таблица 2). Наименьшее содержание органического вещества было определено в пробах почвы рекреационной зоны (4,24%). В почвах селитебной и промышленной зон значения исследуемого показателя было в 2,3 раза выше

( $p=10^{-6}$ ). Вероятно, это связано с тем, что в промышленной зоне исследуемая территория не убирается и не утилизируется естественный опад.

Таблица 2 – Оценка физических свойств городских почв (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Функциональная зона	Физические свойства		
	Содержание органического вещества, %	pH водной почвенной вытяжки, ед. изм.	Удельная электрическая проводимость водной почвенной вытяжки, мСм/см
Рекреационная	4,24±0,631	5,56±0,093	118,87±0,357
Селитебная	<b>9,78±0,616*</b>	<b>6,52±0,081*</b>	<b>159,31±1,315*</b>
Промышленная	<b>9,84±0,354*</b>	<b>6,81±0,061*</b>	<b>178,21±0,409*</b>

*Примечание:* \* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p<0,05$ )

Установлено, что значения pH почв были равны 5,56–6,81 ед. Почвы имеют кислую и слабокислую реакцию среды. Минимальные значения исследуемого показателя были отмечены для проб почв, отобранных на территории рекреационной зоны (5,56 ед.), а наибольшие значения – в промышленной зоне (6,81 ед.). Оптимальное значение реакции среды, обеспечивающее эффективное усвоение растениями микроэлементов из почвы, согласно литературным данным (Самойленко и др., 2018), должно находиться в интервале pH 6,9–7,1 ед. изм.

По основным физико-химическим показателям почвы города значительно отличаются от своих природных аналогов. Повышенную щелочность городских почв многие исследователи связывают с проникновением в них, преимущественно посредством поверхностного стока и дренажных вод, хлоридов кальция и натрия, а также других солевых соединений, используемых для обработки дорог и пешеходных зон в зимнее время. Еще одним фактором является освобождение ионов кальция в результате химического взаимодействия атмосферных осадков с фрагментами строительных материалов, обладающих щелочной реакцией (цемент, кирпич и др.). Во всех случаях отмечается закономерное снижение показателя кислотности (pH) почвенных растворов с увеличением глубины почвенного профиля (Митякова и др., 2020).

Электропроводность почв является одной из наиболее удобных и быстро определяемых характеристик, позволяющая дать оценку почвенного плодородия (гранулометрический и минералогический состав, гумусированность, рН, влажность, свойства, определяющие почвеннопоглощающий комплекс и ряд других), уточнить расположение границ контуров гетерогенности агрохимических показателей (Субботина, Батье-Салес Хорхе, 2013).

Значения удельной электрической проводимости почв (УЭП) изменялись от 118,87 до 178,21 мСм/см (таблица 2). Так, наименьшие значения электрической проводимости почвенных вытяжек были отмечены в пробах почв, отобранных в рекреационной зоне (118,87 мСм/см). Удельная электропроводность почвенных вытяжек проб с селитебной и промышленной зон была в 1,3 и 1,5 раза выше ( $p=10^{-2}$ ), чем в рекреационной зоне. Наибольшие значения данного показателя были определены в почвах промышленной зоны (178,21 мСм/см).

рН почвы показывает, насколько она является щелочной или кислотной, что может повлиять на результаты электропроводности. Также рН измеряет ионы: положительно заряженные ионы  $H^+$  заставляют вещество быть более кислым, а отрицательно заряженные  $OH^-$  ионы приводят к тому, что вещество становится более щелочным. Так как эти ионы несут заряды, они также могут нести электричество. Чем больше ионов, тем выше электропроводность. Поэтому, чем более кислая или щелочная почва, тем выше электропроводность. И наоборот, чем ближе рН к нейтральному, тем меньше это повлияет на электропроводность почвы (Карманова, 2021).

Таким образом, почвы исследуемых функциональных зон имеют кислую и слабокислую реакцию, значения удельной электропроводности почв изменялись от 118,87 до 178,21 мСм/см.

**Тяжелые металлы в почве.** Содержание ТМ в растительных организмах представляет собой интегральный индикатор степени загрязнения почвы и приземного слоя атмосферы. Проникновение ТМ внутрь растений осуществляется как путем поглощения корневой системой, так и аэрогенно. Основным механизмом накопления данных элементов является адсорбция через корни, при

этом почва играет первостепенную роль в качестве источника поступления ТМ в ткани растений (Бородина, 2013; Воскресенская и др., 2013; Медведев, Деревягин, 2017; Петухов и др., 2020; Авдощенко, Климова, 2021; Жуйкова, 2022; Sulaiman, Hamzah, 2018). Тяжелые металлы, оседающие на поверхности почвы, фиксируются твердой фазой почвы, поглощаются живыми организмами или подвергаются миграции вместе с фильтрующейся водой. Интенсивность таких процессов зависит от комплекса физико-химических свойств почв. Реакция играет очень важную роль и определяет подвижность тяжелых металлов в почве, а также их биодоступность и токсичность по отношению к живым организмам (Parzych, Jonczak, 2014).

Нами было проанализировано содержание валовых форм Pb, Cd, Cu и Fe в корнеобитаемом слое городских почв (таблица 3).

Таблица 3 – Содержание валовых форм тяжелых металлов в почвах г. Йошкар-Олы (средние значения за 2015–2022 гг.)

Функциональная зона	Содержание ТМ, мг/кг			
	Pb	Cd	Cu	Fe
Рекреационная	5,94±0,049	0,36±0,026	5,63±0,053	245,80±1,298
Селитебная	<b>7,91±0,144*</b>	0,41±0,013	<b>7,64±0,065*</b>	<b>269,30±0,397*</b>
Промышленная	<b>20,10±0,962*</b>	<b>1,11±0,021*</b>	<b>10,70±0,247*</b>	<b>273,13±0,561*</b>
ОДК <sup>1</sup> (мг/кг)/ фоновые значения <sup>2</sup> (мг/кг)	65,0 / 26,0	1,0 / < 4,0	66,0 / 25,0	- / 5752,5

Примечание: <sup>1</sup> – по СанПиН 1.2.3685-21;

<sup>2</sup> – по Эколого-географический атлас Республики Марий Эл: <http://geo12.pf/atlas>;

\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной (p<0,05)

**Свинец (Pb).** Источниками поступления свинца являются выбросы металлургических предприятий, осадки коммунальных и промышленных сточных вод. Наибольшее количество свинца содержится в почве на расстоянии 1,2–2 м от дороги и аккумулируется в верхнем (0–10 см) слое почвы, но может оказывать разнообразное воздействие на растения и почву на полосе шириной 50–100 м, редко 300 м. Распространение такого влияния зависит от климатических условий района исследования (интенсивность жидких осадков в летний период), дендрологического состава придорожных посадок, биологических особенностей

культивируемых видов древесной и кустарниковой растительности и других не менее важных факторов (Обущенко, Гнеденко, 2014; Карбасникова и др., 2019; Залывская и др., 2021).

В почвах соединения свинца оказывают отрицательное влияние на микробиологическую активность, вследствие чего происходит нарушение углеродного обмена и уменьшение скорости разложения органических веществ (Михайлова, Шергина, 2011).

Представленные в таблице 3 данные показывают, что содержание свинца в почвах различных функциональных зон г. Йошкар-Олы варьировала от 5,94 до 20,10 мг/кг. Содержание данного элемента в почве промышленной зоны оказалась в 3,4 раза выше, чем в почве рекреационной зоны.

И.И. Митякова с соавторами (2023) установили, что валовое содержание свинца в почвах селитебной и промышленной зон г. Йошкар-Олы было выше в 3,6 раза, чем в контроле, но не превышало гигиенические нормативы. Согласно исследованиям В.С. Воскресенского, О.Л. Воскресенской (2011а), аналогичная ситуация наблюдалась и в промышленных зонах города, где содержание свинца также было больше установленных нормативов.

**Кадмий (Cd)** считается одним из самых токсичных элементов, относится к рассеянными элементам и содержится в виде примеси во многих минералах. В силу ряда специфических особенностей, способен поступать в растения в избыточном количестве, даже когда уровень его валового содержания в почве не превышает ПДК. Кадмий наиболее подвижен в кислых почвах в интервале рН равном 4,5–5,5, тогда как в щелочных он относительно неподвижен (Филимонова и др., 2013; Медведев, Дервягин, 2017).

Химический состав материнской породы – главный фактор, определяющий фоновое содержание кадмия в почве. В почву он попадает при сжигании углеводородов, с суперфосфатом (как примесь), входит в состав фунгицидов, пластмассы. Большое содержание кадмия в почве ингибирует микробиологические и ферментативные процессы. Также легко поступает в

растения из почвы через корневую систему и улавливается из атмосферы, ассимилирующей фитомассой (Медведев, Деревягин, 2017).

Анализ содержания кадмия в почвах рекреационных и селитебных зон г. Йошкар-Олы выявил отсутствие статистически значимых различий между ними ( $p > 0,05$ ) (таблица 3). Однако в почве промышленной зоне содержание кадмия оказалось значительно выше – оно превысило показатели остальных зон в 2,7–3,1 раза и достигло уровня 1,11 мг/кг, лишь немного превосходя ориентировочно-допустимую концентрацию (ОДК=1,0 мг/кг). Полученные нами результаты согласуются с ранее опубликованными исследованиями Р.Р. Ивановой (2012), согласно которым содержание кадмия в придорожных почвах г. Йошкар-Олы составляет диапазон от 0 до 2 мг/кг, что находится ниже пределов ПДК.

*Медь (Cu)* относится ко II-ому классу опасности, среди обширной группы ТМ не самый токсичный элемент, в определенных концентрациях необходим живым организмам, включая человека. Медь – это микроэлемент и участвует в важнейших биохимических процессах в организмах животных и растений, выступая в качестве кофактора для целого ряда оксидоредуктаз. К природным источникам поступления меди в окружающую среду относят медьсодержащие минералы почвообразующих пород, поверхностные и подземные воды, атмосферные осадки. Среди техногенных источников поступления меди в урбоэкосистемы наиболее значимы выбросы металлообрабатывающих предприятий, минеральные и органические удобрения, пестициды, автомобильный и железнодорожный транспорт, осадки сточных вод, продукты сжигания угля и нефтепродуктов (Старцев, 2019).

Подвижность ионов меди еще выше, чем подвижность ионов кадмия. Так, минимальное содержание меди в городской почве обнаружено в рекреационной зоне и составляло 5,63 мг/кг, в селитебной зоне было выше в 1,4 раза ( $p = 10^{-6}$ ), а в промышленной зоне – в 1,9 раза ( $p = 10^{-6}$ ) (таблица 3).

Согласно исследованиям, проведенным О.А. Ягдаровой, О.Л. Воскресенской (2014), определен рост содержания меди в почвенных

образцах г. Йошкар-Олы: пригородной и жилой зон в 2,5–6 раза, а в промышленной зоне почти в 9 раз.

В исследованиях Р.Х. Гиниятуллина и соавторов (2018), проведенных на территории промышленного центра г. Стерлитамака, показано, что в условиях промышленного загрязнения содержание в почве подвижных форм тяжелых металлов было выше у меди в 3,4 раза, кадмия – в 3,2 раза, свинца – в 3,7 раза, чем в контроле.

**Железо (Fe)** важнейший почвообразующий элемент, занимает второе место после алюминия и четвертое среди всех элементов земной коры по распространенности в литосфере среди металлов (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Копылова, Лескова, 2016).

Как показали результаты нашей работы (таблица 3), содержание железа в почве различных функциональных зон г. Йошкар-Олы варьировалось от 245,80 мг/кг до 273,13 мг/кг. Наименьшее содержание исследуемого показателя было в почве рекреационной зоне (245,80 мг/кг), а наибольшее – в промышленной зоне (273,13 мг/кг).

Проведенные исследования позволили установить следующее распределение уровней накопления валовых форм ТМ (Pb, Cd, Cu, Fe) в почвах г. Йошкар-Олы: максимальное содержание отмечалось в почвах, отобранных в промышленной зоне города. Напротив, минимальное накопление тяжелых металлов определено в почвах рекреационной зоны. При анализе полученных данных установлено, что содержание валовых форм исследуемых металлов в почвах г. Йошкар-Олы не превышает установленные гигиенические нормы (ОДК), за исключением кадмия, уровень которого составил 1,1 ОДК. Наибольшее содержание валовых форм тяжелых металлов было характерно для почв промышленной зоны города. Исходя из количественного содержания тяжелых металлов в почвах г. Йошкар-Олы, можно построить следующий убывающий ряд по ТМ:  $Fe > Pb > Cu > Cd$ .

**Заключение.** Таким образом, за период исследований не было обнаружено значительных превышений санитарно-гигиенических нормативов для  $CO$ ,  $SO_2$ ,

NO, NO<sub>2</sub> и взвешенных веществ в атмосферном воздухе, но были обнаружены превышения ПДК<sub>с.с.</sub> для хвойных растений: по диоксиду серы – в 1,5 раза, по оксидам азота – в 3,5 раза, по взвешенным веществам – в 4,5 раза. При возрастании антропогенной нагрузки наблюдалось изменение рН почвы до 6,81 ед., а также увеличение органических веществ, удельной электропроводности почвенной вытяжки и содержания тяжелых металлов. В почвах исследуемых функциональных зон г. Йошкар-Олы не было выявлено превышений гигиенических нормативов (ОДК) по содержанию валовых форм Pb, Cu кроме Cd (незначительное превышение).

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

### 4.1 Видовой состав и жизненное состояние исследуемых растений и их сравнительная характеристика по районам г. Йошкар-Олы

Согласно муниципальной программе городского округа «Город Йошкар-Ола» «Формирование современной городской среды в городском округе «Город Йошкар-Ола» на 2018–2024 годы», общая площадь зеленых насаждений в пределах городской черты составляет 1144 га, из них: насаждения общего пользования (парки, сады, скверы и бульвары) – 108 га, лесопарки – 609 га, городские леса – 284 га, озеленение автомобильных дорог общего пользования – 143 га (Муниципальная программа..., 2019).

Хвойные растения в насаждениях общего пользования г. Йошкар-Олы составляют примерно 15–20%. Ассортимент деревьев и кустарников г. Йошкар-Олы представлен липой сердцелистной (*Tilia cordata* Mill.), топодем бальзамическим (*Populus balsamifera* L.), березой повислой (*Betula pendula* Roth), осинной (*Populus tremula* L.), каштаном конским обыкновенным (*Aesculus hippocastanum* L.), кленом ясенелистным (*Acer negundo* L.), кленом платанолистным (*Acer platanoides* L.), яблоней ягодной (*Malus baccata* (L.) Borkh.), яблоней домашней (*Malus domestica* Borkh.), черемухой обыкновенной (*Padus avium* Mill.), ивой козьей (*Salix caprea* L.), ивой белой (*Salix alba* L.), вязом шершавым (*Ulmus glabra* Huds.), пузыреплодником калинолистным (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.), караганой древовидной (*Caragana arborescens* Lam.), рябиной обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.), шиповником морщинистым (*Rosa rugosa* Thunb.), сиренью обыкновенной (*Syringa vulgaris* L.), сиренью венгерской (*Syringa josikaea* J. Jacq.), боярышником кроваво-красным (*Crataegus sanguinea* Pall.), кизильником блестящим (*Cotoneaster lucidus* Schldl.), жимолостью

татарской (*Lonicera tatarica* L.), бузиной красной (*Sambucus racemosa* L.), снежноягодником белым (*Symphoricarpos albus* Bl.) и т.д.

Нами проведена инвентаризация флоры древесно-кустарниковой и травянистой растительности в исследуемых функциональных зонах г. Йошкар-Олы (таблица 4).

Зеленые насаждения на территории **Центрального парка культуры и отдыха (рекреационная зона)** относились к категории общего пользования. На исследуемых пробных площадях произрастает 279 древесных растений. Среди них наибольшим числом представлены ель колючая (*P. pungens*) (ПП № 1, ПП № 4), береза повислая (*B. pendula*) (ПП №1), карагана древовидная (*C. arborescens*) (ПП № 2), можжевельник казацкий (*J. sabina*) (ПП № 3, ПП № 4), спирея средняя (*S. media*) (ПП № 3), липа сердцелистная (*T. cordata*) (ПП № 4), туя западная (*T. occidentalis*) (ПП № 5).

Здесь травяной покров был хорошо развит, общее проективное покрытие варьировало от 85% (ПП № 4) до 100% (ПП № 2). Ярусы выделить невозможно, так как травяная растительность скашивается. Преобладают такие виды как пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), клевер ползучий (*Trifolium repens* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), подорожник средний (*Plantago media* L.), люцерна хмелевая (*Medicago lupulina* L.), овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), горец птичий (*Polygonum aviculare* L.), подорожник большой (*Plantago major* L.), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina* L.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.). Некоторые виды отмечены только на одной из пробных площадей: мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.) (ПП № 1), щавель конский (*Rumex confertus* Willd.) (ПП № 2), подмаренник мягкий (*Persicaria maculosa* Gray.) (ПП № 3), горец почечуйный (*Persicaria maculata* (Raf.) A. Love & D. Love) (ПП № 3) (приложение 3).

Таблица 4 – Видовой состав исследуемых насаждений г. Йошкар-Олы

Функциональная зона	Пробная площадь	Видовой состав	Количество растений, шт.	Доля особей вида, %
Рекреационная	ПП № 1	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	12	23,1
		Ель колочая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	15	28,8
		Ель обыкновенная ( <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	5	9,7
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	2	3,8
		Яблоня домашняя ( <i>Malus domestica</i> Borkh.)	8	15,3
		Сирень обыкновенная ( <i>Syringa vulgaris</i> L.)	10	19,3
	Итого		52	100
	ПП № 2	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	14	15,9
		Ель колочая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	8	9,1
		Дуб черешчатый ( <i>Quercus robur</i> L.)	2	2,2
		Ива пепельная ( <i>Salix cinerea</i> L.)	3	3,4
		Каштан конский обыкновенный ( <i>Aesculus hippocastanum</i> L.)	5	5,7
		Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	4	4,5
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	1	1,1
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	2	2,3
		Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	2	2,2
		Тополь бальзамический ( <i>Populus balsamifera</i> L.)	2	2,3
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	4	4,6
		Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	5	5,7
		Дерен белый ( <i>Swida alba</i> (L.) Opiz)	11	12,5
		Карагана древовидная ( <i>Caragana arborescens</i> Lam.)	25	28,5
	Итого		88	100
	ПП № 3	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	5	4,5
		Ель колочая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	3	2,7
		Ель обыкновенная ( <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	3	2,7
		Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	2	1,8
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	3	2,7
		Орех манчжурский ( <i>Juglans mandshurica</i> Maxim.)	1	0,9
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	4	3,6
		Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)	40	35,6
		Рябинник рябинолистный ( <i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A. Braun)	15	13,4
		Скумпия кожевенная ( <i>Cotinus coggygia</i> Scop.)	1	0,9
		Спирея средняя ( <i>Spiraea media</i> Schmidt)	35	31,2
	Итого		112	100
	ПП № 4	Ель колочая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	15	19,5
		Ель обыкновенная ( <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	9	11,7
		Каштан конский обыкновенный ( <i>Aesculus hippocastanum</i> L.)	2	2,6
		Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	3	3,9
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	13	16,9
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	10	13
		Боярышник кроваво-красный ( <i>Crataegus sanguinea</i> Pall.)	10	13
Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)		15	19,4	
Итого		77	100	
ПП № 5	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	4	6,4	
	Ель обыкновенная ( <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	2	3,2	
	Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	3	4,9	
	Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	3	4,9	
	Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	2	3,2	

Продолжение таблицы 4

Функциональная зона	Пробная площадь	Видовой состав	Количество растений, шт.	Доля особей вида, %	
		Тис ягодный ( <i>Taxus baccata</i> L.)	1	1,6	
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	37	59,7	
		Черемуха обыкновенная ( <i>Padus avium</i> Mill.)	3	4,9	
		Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	2	3,2	
		Вишня обыкновенная ( <i>Cerasus vulgaris</i> Mill.)	2	3,2	
		Гортензия древовидная ( <i>Hydrangea arborescens</i> L.)	1	1,6	
		Форзиция промежуточная ( <i>Forsythia × intermedia</i> Zabel)	2	3,2	
	Итого		62	100	
Селитебная	ПП № 1	Ель колочая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	4	2,9	
		Каштан конский обыкновенный ( <i>Aesculus hippocastanum</i> L.)	1	0,7	
		Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	5	3,6	
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	12	8,6	
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	3	2,2	
		Тополь бальзамический ( <i>Populus balsamifera</i> L.)	2	1,4	
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	4	2,9	
		Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	13	9,3	
		Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	3	2,2	
		Жимолость татарская ( <i>Lonicera tatarica</i> L.)	15	10,8	
		Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)	35	25,2	
		Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)	30	21,6	
		Сирень обыкновенная ( <i>Syringa vulgaris</i> L.)	12	8,6	
		Итого		139	100
	ПП № 2	Ель колочая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	2	1,7	
		Вяз мелколистный ( <i>Ulmus pumila</i> L.)	2	1,7	
		Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	5	4,2	
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	27	22,7	
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	10	8,4	
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	3	2,5	
		Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	14	11,8	
		Жимолость татарская ( <i>Lonicera tatarica</i> L.)	3	2,5	
		Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)	15	12,6	
		Сирень обыкновенная ( <i>Syringa vulgaris</i> L.)	35	29,4	
	Шиповник морщинистый ( <i>Rosa rugosa</i> Thunb.)	3	2,5		
		Итого		119	100
	ПП № 3	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	1	1,2	
		Вяз мелколистный ( <i>Ulmus pumila</i> L.)	2	2,5	
		Ель колочая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	4	4,9	
		Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	2	2,5	
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	15	18,5	
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	4	4,9	
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	2	2,5	
Черемуха обыкновенная ( <i>Padus avium</i> Mill.)		2	2,5		
Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)		12	14,8		
Жимолость татарская ( <i>Lonicera tatarica</i> L.)		4	4,9		
Калина обыкновенная ( <i>Viburnum opulus</i> L.)		5	6,2		
Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)		1	1,2		
Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)		15	18,5		
Сирень обыкновенная ( <i>Syringa vulgaris</i> L.)	12	14,9			
	Итого		81	100	

Продолжение таблицы 4

Функциональная зона	Пробная площадь	Видовой состав	Количество растений, шт.	Доля особей вида, %
Селитебная	ПП № 4	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	3	3,1
		Вяз мелколистный ( <i>Ulmus pumila</i> L.)	2	2,1
		Ель колючая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	2	2,1
		Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	2	2,1
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	39	40,6
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	7	7,3
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	6	6,3
		Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)	12	12,5
		Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	1	1
		Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)	15	15,6
		Сирень обыкновенная ( <i>Syringa vulgaris</i> L.)	5	5,2
		Шиповник морщинистый ( <i>Rosa rugosa</i> Thunb.)	2	2,1
	Итого		96	100
	ПП № 5	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	4	7,4
		Вяз мелколистный ( <i>Ulmus pumila</i> L.)	2	3,7
		Ель колючая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	8	14,8
		Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	2	3,7
		Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	2	3,7
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	17	31,5
		Тополь бальзамический ( <i>Populus balsamifera</i> L.)	4	7,4
Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)		8	14,8	
Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)		5	9,3	
Снежнаягодник белый ( <i>Symphoricarpos albus</i> L.) S.F.Blake	2	3,7		
Итого		54	100	
Промышленная	ПП № 1	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	6	5,3
		Ель колючая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	1	0,9
		Ель обыкновенная ( <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	2	1,8
		Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	5	4,5
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	5	4,5
		Осина дрожащая ( <i>Populus tremula</i> L.)	8	7,1
		Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	2	1,8
		Барбарис обыкновенный ( <i>Berberis vulgaris</i> L.)	10	8,9
		Жимолость обыкновенная ( <i>Lonicera xylosteum</i> L.)	4	3,6
		Калина обыкновенная ( <i>Viburnum opulus</i> L.)	3	2,7
		Карагана древовидная ( <i>Caragana arborescens</i> Lam.)	5	4,5
		Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)	27	24
		Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)	31	27,7
	Шиповник майский ( <i>Rosa majalis</i> Herrm.)	3	2,7	
	Итого		112	100
	ПП № 2	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	6	7,8
		Ель колючая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	1	1,3
		Ель обыкновенная ( <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst.)	1	1,3
		Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	15	19,2
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	5	6,4
Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)		2	2,6	
Черемуха обыкновенная ( <i>Padus avium</i> Mill.)		3	3,8	
Яблоня домашняя ( <i>Malus domestica</i> Borkh.)		7	9	
Жимолость обыкновенная ( <i>Lonicera xylosteum</i> L.)		5	6,4	
Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)		10	12,8	
Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)		20	25,6	
Шиповник морщинистый ( <i>Rosa rugosa</i> Thunb.)	3	3,8		
Итого		78	100	

## Окончание таблицы 4

Функциональная зона	Пробная площадь	Видовой состав	Количество растений, шт.	Доля особей вида, %
Промышленная	ПП № 3	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	8	6,8
		Ель колючая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	1	0,8
		Ива белая ( <i>Salix alba</i> L.)	5	4,3
		Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	21	17,9
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	2	1,8
		Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)	1	0,8
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	3	2,6
		Черемуха обыкновенная ( <i>Padus avium</i> Mill.)	2	1,8
		Барбарис обыкновенный ( <i>Berberis vulgaris</i> L.)	10	8,5
		Можжевельник казацкий ( <i>Juniperus sabina</i> L.)	15	12,8
		Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)	35	29,8
		Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	9	7,8
		Сирень обыкновенная ( <i>Syringa vulgaris</i> L.)	3	2,6
		Шиповник морщинистый ( <i>Rosa rugosa</i> Thunb.)	2	1,7
	Итого		117	100
	ПП № 4	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	9	8,3
		Вяз шершавый ( <i>Ulmus glabra</i> Huds.)	5	4,6
		Ива белая ( <i>Salix alba</i> L.)	1	0,9
		Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)	12	11
		Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)	20	18,4
		Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)	2	1,8
		Тополь советский пирамидальный ( <i>Populus x sowietica pyramidalis</i> Jabl.)	2	1,8
		Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)	8	7,4
		Черемуха обыкновенная ( <i>Padus avium</i> Mill.)	4	3,6
		Барбарис обыкновенный ( <i>Berberis vulgaris</i> L.)	5	4,6
		Жимолость обыкновенная ( <i>Lonicera xylosteum</i> L.)	5	4,6
		Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)	25	23
		Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)	4	3,6
		Шиповник майский ( <i>Rosa majalis</i> Herrm.)	7	6,4
	Итого		109	100
	ПП № 5	Береза повислая ( <i>Betula pendula</i> Roth)	5	5,8
		Вяз шершавый ( <i>Ulmus glabra</i> Huds.)	3	3,4
		Ель колючая ( <i>Picea pungens</i> Engelm.)	9	10,2
Каштан конский обыкновенный ( <i>Aesculus hippocastanum</i> L.)		5	5,7	
Клен платанолистный ( <i>Acer platanoides</i> L.)		8	9,1	
Клен ясенелистный ( <i>Acer negundo</i> L.)		13	14,8	
Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> Ledeb.)		2	2,3	
Липа сердцелистная ( <i>Tilia cordata</i> Mill.)		1	1,1	
Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L.)		7	7,9	
Яблоня ягодная ( <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.)		3	3,4	
Пузыреплодник калинолистный ( <i>Physocarpus opulifolius</i> (L.) Maxim.)		20	22,6	
Рябина обыкновенная ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.)		5	5,8	
Шиповник морщинистый ( <i>Rosa rugosa</i> Thunb.)	7	7,9		
Итого		88	100	

Примечание: Латинские названия высших растений даны по сводке С.К. Черепанова (1995) и справочнику Н.В. Абрамова (2008)

Зеленые насаждения **бульвара Чавайна (селитебная зона)** относились к категории общего пользования. На исследуемых пробных площадях произрастает 489 древесных растений. Среди них численным преимуществом представлены такие виды как можжевельник казацкий (*J. sabina*) (ПП № 1), пузыреплодник калинолистный (*P. opulifolius*) (ПП № 1, ПП № 4), сирень обыкновенная (*S. vulgaris*) (ПП № 2–3), липа сердцелистная (*T. cordata*) (ПП № 2–5), яблоня ягодная (*M. baccata*) (ПП № 3, 5), ель колючая (*P. pungens*) (ПП № 5).

Травяной покров хорошо развит. Общее проективное покрытие травяного покрова в насаждениях селитебной зоны изменялось от 85% (ПП № 3) до 98% (ПП № 2). Выделение вертикальных структурных ярусов травяной растительности не представлялось возможным вследствие регулярного антропогенного воздействия в виде покоса. Преобладающими видами были ежа сборная (*D. glomerata*), подорожник средний (*P. media*), тысячелистник обыкновенный (*A. millefolium*), люцерна хмелевая (*M. lupulina*), будра плющевидная (*Glechoma hederacea* L.), пырей ползучий (*E. repens*), одуванчик лекарственный (*T. officinale*), клевер ползучий (*T. repens*), горец птичий (*P. aviculare*), кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub). Следующие виды отмечены только на одной из пробных площадей: клевер пашенный (*Trifolium arvense* L.) (ПП № 1), полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.) (ПП № 2), мыльнянка лекарственная (*Saponaria officinalis* L.) (ПП № 2), дымянка лекарственная (*Fumaria officinalis* L.) (ПП № 2), донник белый (*Melilotus albus* Medikus) (ПП № 5), вербейник монетчатый (*Lysimachia nummularia* L.) (ПП № 5), льнянка обыкновенная (*Linaria vulgaris* Mill.) (ПП № 5), фиалка трехцветная (*Viola tricolor* L.) (ПП № 5) (приложение 3).

Зеленые насаждения на **ул. Строителей (промышленная зона)** относились к категории специального назначения (санитарно-защитные зеленые зоны промышленных предприятий). На исследуемых пробных площадях произрастает 504 древесных растений. Наибольшим числом представлены такие виды как пузыреплодник калинолистный (*P. opulifolius*) (ПП № 1–5), можжевельник

казацкий (*J. sabina*) (ПП № 1), клен платанолистный (*A. platanoides*) (ПП № 2), клен ясенелистный (*A. negundo*) (ПП № 3–5).

Общее проективное покрытие травяного покрова в насаждениях промышленной зоны варьировало от 83% (ПП № 4) до 100% (ПП № 5). В первом ярусе встречаются ежа сборная (*D. glomerata*), колокольчик крапиволистный (*Campanula trachelium* L.), бодяк полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), цикорий обыкновенный (*Cichorium intybus* L.), кострец безостый (*B. inermis*), вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth), люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.); во втором – клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), клевер средний (*Trifolium medium* L.), люцерна посевная (*Medicago sativa* L.), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.); в третьем – одуванчик лекарственный (*T. officinale*), подорожник большой (*P. major*), подорожник ланцетный (*Plantago lanceolata* L.), тысячелистник обыкновенный (*A. millefolium*), хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.); четвертый – земляника обыкновенная (*Fragaria vesca* L.), вероника дубравная (*V. chamaerdrys*), подмаренник мягкий (*Galium mollugo* L.), будра плющевидная (*G. hederacea*) (приложение 3).

Проведенный анализ свидетельствует о высокой степени развития травяного покрова в пределах изучаемых функционально-территориальных зон. В насаждениях г. Йошкар-Олы в основном встречаются лиственные виды древесных растений. Это объясняется тем, что эта группа растений обладает быстрым ростом, по сравнению с хвойными растениями. В озеленении г. Йошкар-Олы используется ограниченный ассортимент хвойных видов. Наиболее распространены аборигенные виды: ель обыкновенная (*P. abies*), лиственница сибирская (*L. sibirica*), сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), а среди интродуцированных: ель колючая (*P. pungens*), туя западная (*T. occidentalis*), можжевельник казацкий (*J. sabina*).

Жизненное состояние – один из параметров, отражающих степень устойчивости растений в ходе роста и развития; это совокупность морфоструктурных и ростовых характеристик, эффективность использования ресурсов местообитания, а также способность противостоять стрессовым воздействиям. Оценивая жизненное состояние древесных растений, произрастающих в городских условиях, можно дать рекомендации для создания наиболее продуктивных и долговечных зеленых насаждений (Прохоренко и др., 2017).

Жизненное состояние наиболее точно отражает реакцию деревьев на воздействия окружающей среды. Важным показателем является состояние кроны. Если крона становится редкой, просвечивающейся, с большим количеством пустот, это говорит о повреждениях. Наблюдая за этим признаком, можно быстро оценить, насколько сильно деревья пострадали от природных (например, засуха, вредители) или антропогенных (например, загрязнение окружающей среды) факторов (Лисотова и др., 2018).

Снижение жизнеспособности у растений происходит из-за низкого качества почв и почвогрунтов, ограниченной площади питания растений, загрязнения воздуха, действия химических реагентов, механических повреждений и поражения болезнями и вредителями, высоких рекреационных нагрузок (Морозова, 2024). Возможность выполнять растениями средозащитных функций в городской среде главным образом зависит от их жизненного состояния. Здоровые и хорошо развитые растения способны в большей степени оказывать положительное влияние на урбанизированную среду (Седых и др., 2017).

Сначала нами был проведен визуальный анализ состояния хвойных насаждений по «Методические рекомендации по оценке жизнеспособности деревьев и правилам их отбора и назначения к вырубке и пересадке» (Методические..., 2003). В ходе анализа нами установлено, что хвойные растения имели хорошее или удовлетворительное качественное состояние (категории: без признаков ослабления, ослабленные и сильно ослабленные). Растений в неудовлетворительном состоянии (усыхающих) не было обнаружено.

Далее провели сравнительную оценку состояния исследуемых видов по характеристике кроны, основываясь на шкале жизненности, предложенной В.А. Алексеевым (1989; 1990). Результаты исследований представлены в таблице 5.

Хвойные насаждения, произрастающие на территории г. Йошкар-Олы, относятся к КС I (здоровые), однако можно отметить, что у *T. occidentalis* в разных зонах города отмечено отклонение от 91 до 82%, а у *P. pungens* значения  $L_n$  были стабильны – 85% (таблица 5).

Таблица 5 – Оценка жизненного состояния хвойных растений г. Йошкар-Олы

Функциональная зона	Распределение хвойных растений по категориям жизненного состояния, %					$L_n$ , %	КС вида
	Здоровые	Ослабленные	Сильно ослабленные	Отмирающие	Сухостой		
<i>J. sabina</i>							
Рекреационная	85	15	0	0	0	-	-
Селитебная	70	20	10	0	0	-	-
Промышленная	70	20	10	0	0	-	-
<i>T. occidentalis</i>							
Рекреационная	75	25	0	0	0	91	I
Селитебная	70	25	5	0	0	82	I
Промышленная	70	20	10	0	0	85	I
<i>P. pungens</i>							
Рекреационная	70	25	5	0	0	85	I
Селитебная	70	20	10	0	0	85	I
Промышленная	73	17	10	0	0	85	I

Примечание:  $L_n$  – относительное жизненное состояние древостоя по числу деревьев; КС – категории состояния деревьев

Жизненное состояние хвойных растений по категориям в насаждениях рекреационной зоны следующее: здоровые особи *J. sabina* составляют 85%, ослабленные – 15%; *T. occidentalis*: здоровые – 75%, ослабленные – 25%; *P. pungens*: здоровые – 80%, ослабленные – 20% (таблица 5). Наиболее часто встречающимися повреждениями были механические повреждения, усыхание хвои, в меньшем количестве наблюдались сухие ветви в кронах. Оценка относительного жизненного состояния хвойных насаждений показала высокий уровень категории здоровых деревьев: *T. occidentalis* – 91%, *P. pungens* – 94%.

В селитебной зоне по сравнению с рекреационной снизился процент особей, имеющих здоровое жизненное состояние: у *J. sabina* – в 1,4 раза (70%), у *P. pungens* и *T. occidentalis* – на 5 и 6,7% соответственно. В насаждениях хвойных растений, произрастающих в данной зоне, появились сильно ослабленные особи. Так, особи *J. sabina* характеризовались наибольшим процентом сильно ослабленных растений (20%), по сравнению с остальными видами: *P. pungens* – 11%, *T. occidentalis* – 5%. Снижение жизненного состояния растений *J. sabina* обусловлено недостаточностью агротехнических мероприятий и высоким уровнем рекреационной нагрузки, усугубляемым механическим воздействием снежного покрова зимой. Относительное жизненное состояние древостоя оценивалось как здоровое: *T. occidentalis* и *P. pungens* – 82% (таблица 5).

Среди особей *J. sabina* и *T. occidentalis*, произрастающих в промышленной зоне, было отмечено следующее распределение категорий жизненного состояния (таблица 5): 70% характеризовались как здоровые, 20% имели признаки угнетенности – ослабленные, 10% находились в состоянии сильно ослабленных. Здоровых особей *P. pungens* было 76%, ослабленных – 17%, сильно ослабленных – 10%. Наиболее распространенными повреждениями были: усыхание хвои и наличие сухих ветвей в кронах. Относительное жизненное состояние древостоя как *T. occidentalis*, так и у *P. pungens* оценивалось как здоровое (85%).

Таким образом, по результатам проведенных исследований жизненного состояния исследуемых видов растений было установлено, что в разных функциональных зонах г. Йошкар-Олы произрастали хвойные растения трех жизненных состояний: здоровые, ослабленные и сильно ослабленные. Значительную часть исследуемых растений во всех зонах города оценивали, как здоровые: *J. sabina* и *T. occidentalis* – 75%, *P. pungens* – 80%.

О.Л. Воскресенская, Е.В. Сарбаева (2006), Н.Б. Прохоренко с соавторами (2017), считают, что ухудшение жизненного состояния растений может происходить в зависимости от концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. При слабом загрязнении ухудшение жизненного состояния будет наблюдаться лишь у отдельных особей. Такие факторы как почвенные

условия, условия освещения, конкуренция с другими видами также оказывают влияние на жизненное состояние растений.

С.А. Седых с соавторами (2017) указывают, что наибольший стресс хвойные растения испытывают в скверах, расположенных вблизи автодорог. Характерные изменения: повреждения и искривление ствола, облом и усыхание верхушек, признаки заселения стволовыми вредителями. Хвоя желтоватая или желто-зеленая, осыпается при прикосновении, особенно у нижних ветвей. У единичных особей было местное повреждение ствола и усыхание отдельных ветвей. У кустарниковых форм – повреждение отдельных корневых лап, облом ветвей.

Распределение хвойных растений по категориям жизненного состояния и появление ослабленных и сильно ослабленных особей может быть следствием отсутствия должного ухода за ними и усилением антропогенного воздействия. Наиболее распространенными повреждениями хвойных растений, произрастающих в г. Йошкар-Оле, были механические повреждения, слабая очищаемость стволов от мертвых ветвей в кроне, пожелтевшая хвоя, усыхание хвои, особенно в местах с повышенной рекреационной нагрузкой.

#### **4.2 Аккумуляция тяжелых металлов в системе «почва-растение» в условиях городской среды**

Серьезной проблемой современности является загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами, происходящее в основном из-за деятельности человека. Тяжелые металлы обладают высокой токсичностью для всех живых организмов и негативно влияют на растения фитоценозов урбоэкосистем, способствуя торможению их роста и развития, вызывая структурно-функциональные изменения в фотосинтетическом аппарате, преждевременное старение, пожелтение листового аппарата, нарушение процессов дыхания, транспирации, транспорта веществ и т.д. Следствием может стать снижение

продуктивности как отдельного растения, так и целого фитоценоза и вплоть до гибели всего растительного сообщества.

Основными источниками тяжелых металлов в окружающую среду являются: промышленные предприятия, тепловые и атомные электростанции, транспорт, промышленные сточные воды (Ведерников и др., 2009; Титов и др., 2014; Медведев, Деревягин, 2017; Пугаев, Лукаткин, 2014; Петухов и др., 2020; Соболева и др., 2020; Жуйкова, 2022; Voskresenskaya et al., 2017; Zeiner, Cindric, 2021; Cui et al., 2022; Chen et al., 2022). Таким образом, антропогенная деятельность является одной из главных причин распространения тяжелых металлов в окружающей среде, представляя угрозу для экосистем и здоровью людей.

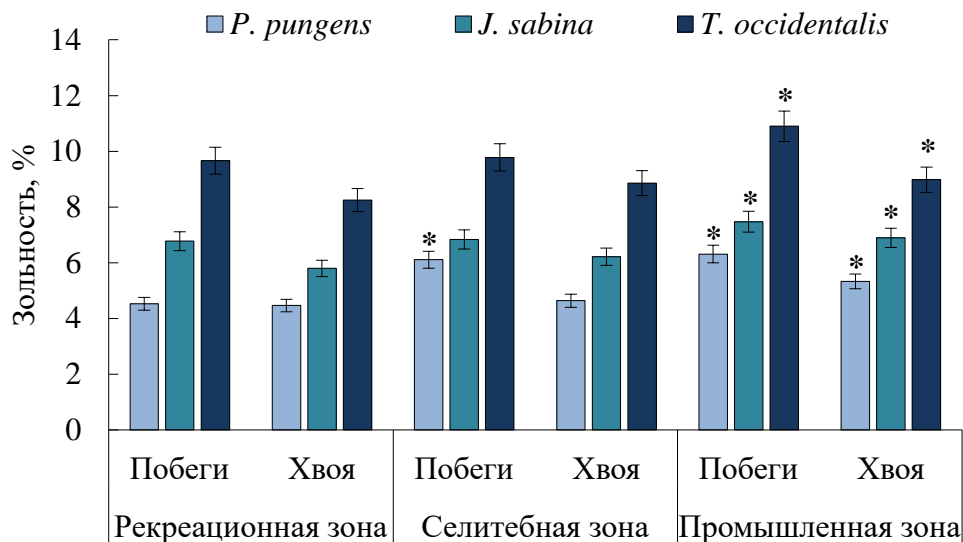
#### **4.2.1 Зольность хвойных растений**

Зольность растительных тканей представляет собой количественное отношение минеральной составляющей к органической фракции растения. Значение зольности листьев определяется такими факторами, как таксономическая специфика вида, условия почвообразования, гидротермический режим местообитания и степень техногенной нагрузки. Данный показатель демонстрирует выраженную зависимость от сезонных изменений (Сибиркина, 2013; Подоль, Попова, 2015; Сибиркина, Лихачев, 2017; Ташекова, Торопов, 2017; Тюлькова, 2017).

Фотосинтезирующие фракции растений играют основную роль в потреблении зольных элементов и азота. Известно также, что химический состав физиологически активных ассимилирующих органов хвойных растений определяется поглощением элементов из почвы и атмосферы, ретранслокацией их из более старых тканей и выщелачиванием атмосферными осадками. Растения на 50–98% состоят из воды. Сухое вещество, остающееся после высушивания, наполовину состоит из углерода. Минеральная часть (зола) составляет от 0,2 до

20% сухого веса. В листьях растений содержание золы относительно велико. Состав золы зависит от содержания минеральных веществ в почве, и любой химический элемент, имеющийся в данном местообитании, может быть обнаружен в растении (Робакидзе и др., 2022).

Результаты определения зольности хвойных растений представлены на рисунке 5. Так, содержание золы в побегах *P. pungens* составило 4,53–6,31%, *J. sabina* – 6,73–7,47%, а *T. occidentalis* – 9,66–10,90%. При этом несколько бóльшую зольность имели побеги хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы. Например, содержание золы в побегах *P. pungens* с данной зоны было в 1,4 раза больше, чем у растений из рекреационной зоны (6,31%).



\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 5 – Зольность хвойных растений в условиях г. Йошкар-Олы  
(среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Анализ зольности хвои продемонстрировал сходную тенденцию с побегами (рисунок 5): у хвойных растений, произрастающих в рекреационной зоне, этот показатель был минимальным – у *P. pungens* (4,47%), *J. sabina* (5,80%) и *T. occidentalis* (8,25%). Между тем, растения, произрастающие в промышленной

зоне, характеризовались значением зольности, превышающим аналогичный показатель рекреационной зоны в 1,2 раза.

Средняя зольность побегов и хвои *T. occidentalis* была выше, чем у *J. sabina* и *P. pungens* и соответственно равна 10,11% (9,66–10,90%) и 8,69% (8,25–8,98%). По результатам наших исследований, зольность в побегах изученных видов выше, чем в хвое растений во всех функциональных зонах.

Согласно данным М.Д. Уфимцевой и Н.В. Терехиной (2005), самой высокой зольностью обладает хвоя (5–10%), меньше – кора и корни, наименьшая зольность – у древесины (0,2–0,5%).

Согласно исследованиям, проведенным С.В. Соболевой с соавторами (2019), было установлено, что содержание зольных элементов в хвое ели сибирской и сосны обыкновенной демонстрирует закономерное снижение при переходе от промышленных территорий к природным лесным массивам.

Загрязнение атмосферного воздуха, заключающееся в увеличении несвойственных для него минеральных компонентов, постепенно отражается на растительном организме, ухудшая функционирование и устойчивость насаждений. Такие изменения объясняются тем, что минеральные вещества активно участвуют в обменных процессах растений и изменение качественного и количественного состава минералов, особенно тяжелых металлов, отражается в первую очередь на состоянии ассимиляционного аппарата (Соболева и др., 2019).

По исследованию М.Д. Уфимцевой и Н.В. Терехиной (2005), существует прямая зависимость между уровнем зольности растительного организма и степенью его адаптированности к экологическим условиям места произрастания: повышение показателя зольности свидетельствует о лучшей способности растения противостоять неблагоприятным факторам окружающей среды.

В своих исследованиях А.Р. Сибиркина и С.В. Лихачев (2017) указывают на то, что высокие показатели зольности (2,32 при значениях 1,59–2,95%) органов и тканей *P. sylvestris* свидетельствуют о высокой газопоглощительной способности растения, наличии механизмов активной аккумуляции химических элементов не только из почвы, но и из атмосферного воздуха. По мнению С.В. Соболевой с

соавторами (2018), основной причиной увеличения содержания минеральной фракции в ассимиляционном аппарате является пыль, поднимаемая автотранспортом и оседающая на хвое древостоев.

Таким образом, высокие показатели зольности вегетативных органов *T. occidentalis* могут свидетельствовать о высокой газопоглощительной способности данного вида, наличии механизмов активной аккумуляции ТМ как из почвы, так и из атмосферного воздуха. Представленные экспериментальные данные демонстрируют последовательное возрастание концентрации зольных веществ в побегах и хвое изученных видов растений от рекреационной к промышленной зоне. Этот факт отражает рост доли минеральных составляющих, включая тяжелые металлы, аккумулируемых растениями в процессе адаптации к техногенному загрязнению окружающей среды.

#### **4.2.2 Содержание тяжелых металлов в хвойных растениях в условиях городской среды**

Одним из важнейших показателей экологической нагрузки территории служит уровень накопления тяжелых металлов в компонентах экосистемы, включая аккумуляцию в растениях. Минеральные элементы играют ключевую роль в метаболических процессах, поэтому изменения их качественного и количественного состава оказывают значительное влияние на процессы роста и развития растений, что находит отражение в функционировании ассимиляционного аппарата в целом. Загрязнение атмосферы, заключающееся в привнесении несвойственных для нее минеральных компонентов, ухудшает функционирование и устойчивость древесных насаждений (Соболева и др., 2020; Cui et al., 2022).

Наиболее информативным критерием, указывающим на активность металлов в почвенном растворе, является уровень накопления их в растениях. По накоплению в фитомассе того или иного элемента можно судить об экологически

значимом его содержании в почве, а в химическом составе растений могут отражаться особенности геохимической среды (Бородина, 2013).

Аккумуляция тяжелых металлов в тканях растений определяется рядом факторов, среди которых выделяют видовые особенности, физико-химические характеристики самого металла и способ его проникновения в организм растения (Авдощенко, Климова, 2020). Распространение тяжелых металлов по органам растений различно (Жуйкова, 2022).

Наибольшей токсичностью в повышенных концентрациях обладают такие тяжелые металлы, как свинец и кадмий (Kandziora-Ciupa et al., 2016).

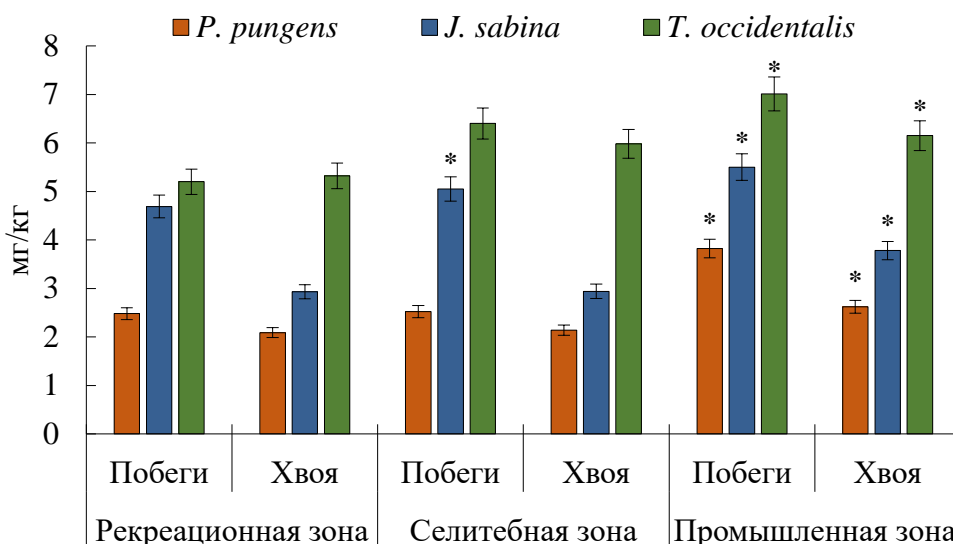
**Свинец (Pb)** представляет собой элемент среднего накопления в растительных организмах. Поскольку он не относится к числу необходимых микроэлементов для жизнедеятельности растений, его абсорбция сравнительно низка. Тем не менее, Pb обладает высокой токсичностью и классифицируется как вещество I класса опасности. Повышенная концентрация свинца в почве вызывает угнетение дыхательных и фотосинтетических процессов, снижая продуктивность синтеза фитомассы. Помимо этого, избыточная доза Pb оказывает негативное воздействие на клеточное деление, затрудняет водоснабжение корней, подавляет деятельность ряда ферментов, нарушает нормальный метаболизм и ухудшает доступность для растений важных биогенных соединений (Ильин, Сысо, 2001; Винокурова, Денисова, 2008; Михайлова, Шергина, 2011; Медведев, Деревягин, 2017; Гиниятуллин и др., 2018; Авдощенко, Климова, 2020; Авдощенко, Климова, 2021; Štofejšová et al., 2021; Shikhova et al., 2024).

Оптимальной является для растений содержание свинца 1,5–10,0 мг/кг, фитотоксичный уровень – от 60 и более мг/кг (Авдощенко, Климова, 2021).

К основным источникам свинца как элемента-загрязнителя относятся выхлопные газы, аэрозоли автотранспорта и техногенная пыль, которая содержит большое количество свинца в виде соединений, плохо растворимых в воде, например, оксидов и сульфидов (Шергина, Михайлова, 2011; Shikhova et al., 2024). В результате техногенного поступления соединений свинца в урбоэкосистему во всех компонентах значительно повышается содержание этого

элемента. Особенно сильно содержание Pb возрастает в почвах и растениях, расположенных вдоль автомагистралей. Свинец поступает в растения не только из почв через корневую систему, но и активно поглощается ассимиляционными органами растений из атмосферного воздуха. Поэтому посадки древесных растений вдоль дорог в значительной степени задерживают потоки свинца от автотранспорта, а их структура и расположение часто соответствуют размерам и конфигурации свинцовых аномалий на территории города (Михайлова, Шергина, 2011; Залывская и др., 2021).

Как показали результаты нашей работы (рисунок 6), минимальное содержание свинца было обнаружено в побегах растений *P. pungens*, произрастающих в рекреационной и селитебной зонах – 2,48 и 2,52 мг/кг соответственно. Аккумуляция данного элемента растениями, произрастающими в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, была 1,5 раза выше ( $p=10^{-6}$ ), чем в других зонах. Содержание свинца в хвое *P. pungens* в различных функциональных зонах было от 2,14 до 2,62 мг/кг. Среднее количество свинца в хвое было в 1,3 раза ниже, чем в побегах.



\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p<0,05$ )

Рисунок 6 – Содержание свинца в хвойных растениях г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Содержание Pb в вегетативных органах *J. sabina* варьировало в диапазоне от 2,93 до 5,50 мг/кг (рисунок 6). Минимальное значение концентрации данного металла в побегах (4,69 мг/кг) характерно для особей, произрастающих в рекреационной зоне. В промышленной же зоне было отмечено статистически значимое повышение содержания свинца в побегах в 1,2 раза ( $p=0,006$ ). Содержание свинца в хвое данного вида колебалась от 2,93 до 3,78 мг/кг и зависело от зоны произрастания. Под воздействием антропогенного загрязнения урбанизированной среды (промышленная зона) уровень содержания свинца в хвое увеличивался в 1,3 раза. Средний показатель аккумуляции свинца в побегах *J. sabina* оказался примерно в 1,6 раза выше, чем в хвое.

Максимальной способностью к аккумуляции свинца среди исследуемых видов во всех рассматриваемых функциональных зонах были растения *T. occidentalis*. Наибольшая аккумуляционная способность Pb в вегетативных органах наблюдалась у особей в жилой и промышленной зонах ( $p=10^{-6}$ ) и составила для побегов – 6,40 и 7,0 мг/кг, для хвои – 5,98 и 6,15 мг/кг соответственно (рисунок 6). Содержание свинца в побегах *T. occidentalis* было больше на 8,1%, чем в хвое.

Биоаккумулятивная способность по отношению к свинцу для исследуемых видов увеличивалась по мере усиления загрязнения окружающей среды. В промышленной зоне наибольшей металлоаккумуляционной способностью к свинцу обладала *T. occidentalis*: побеги – 7,01 мг/кг, хвоя – 6,15 мг/кг.

Таким образом, среди исследуемых видов меньше всего свинец накапливался *P. pungens*: содержание свинца в побегах было в 1,7–2,1 раза ниже, чем в побегах *J. sabina* и *T. occidentalis*, а в хвое – в 1,4–2,6 раза ниже. По уровню накопления свинца хвойные растения образуют следующую убывающую последовательность количественных значений: *T. occidentalis* > *J. sabina* > *P. pungens*.

Результаты проведенного дисперсионного анализа свидетельствуют о том, что содержание свинца в надземных частях исследованных хвойных растений достоверно зависит от нескольких факторов: «функциональная зона» ( $p=10^{-3}$ ),

«вид» ( $p=10^{-3}$ ), «орган растения» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействия указанных факторов «функциональная зона × вид × орган» ( $p=10^{-3}$ ).

Хорошо изучено влияние свинца и других ТМ, попадающих на листья растений в составе пыли. Пыль с ТМ нарушает тепловой баланс листа, уменьшая поглощение света и, как следствие, снижая фотосинтез; пыль забивает устьица; изменяется кислотность (рН) осадков на поверхности листа, что приводит к вымыванию из тканей растений важных питательных веществ (биогенных элементов).

На клеточном уровне токсическое действие свинца объясняется несколькими механизмами. Считается, что свинец блокирует работу ферментов. Кроме того, свинец может вызывать свертывание (коагуляцию) белков, нарушая их функции. Также есть данные указывающие на то, что свинец может замещать в составе ферментов такие важные элементы, как магний и цинк, тем самым полностью выключая ферменты из работы и приводя к нарушению обмена веществ в растениях (Зальвская и др., 2021). В совокупности все эти факторы приводят к угнетению роста и развития растений, и, в тяжелых случаях, к их гибели.

Исследование, проведенное О.С. Зальвской с соавторами (2021), показало, что уровень накопления свинца на листовом аппарате зависит от ряда факторов: формы листовой пластики (ее изрезанности), наличия волосков (опушенности), а также количества смоляных веществ и воска на поверхности листа. Авторы отмечают, что дожди способствуют снижению уровня загрязнения. Так, отмечается, что дождевой водой смывается от 30 до 60% свинца с листьев. Таким образом, морфологические особенности листьев и погодные условия оказывают существенное влияние на степень их загрязнения свинцом.

В исследованиях Н.С. Шиховой (2012), проведенных на территории г. Владивостока показано, что выявлен существенный размах варьирования в содержании свинца в ассимиляционных органах растений от 0,81 до 25,67 мг/кг. Среди изученных семейств, обладающих наилучшими аккумулятивными

способностями к свинцу в городских условиях, также вошли представители семейства *Pinaceae* (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc., *P. sylvestris*).

Н.С. Шихова (2012) подчеркивает, что интенсивная аккумуляция свинца хвойными растениями в городских экосистемах обусловлена определенными специфическими характеристиками, характерными именно для представителей данной систематической группы.

Известно, что продолжительность жизни хвои в природных условиях произрастания составляет от 2–3 у *P. sylvestris* до 8–10 лет у *Picea ajanensis* (Lindl. Et Gord) Fisch. ex Carr. Хотя в городских условиях продолжительность жизни хвои значительно сокращается, накопление загрязняющих веществ хвойными растениями осуществляется в течение продолжительного времени, охватывающего несколько вегетационных сезонов, тогда как у листопадных деревьев этот процесс ограничен одним сезоном роста. Значительная ассимиляционная площадь хвои, особенности протекания биохимических и биофизических процессов у хвойных способствуют повышенной способности к адсорбции загрязняющих элементов на поверхности ассимиляционного аппарата, обеспечивая последующее вовлечение этих соединений в биологический круговорот.

Н.А. Бородина (2012) указывает, что в условиях техногенной нагрузки наблюдается рост уровня содержания свинца в хвое *P. sylvestris*. Так, максимальные значения концентраций данного элемента достигают 2,0 мг/кг в хвое сосны обыкновенной, произрастающей вдоль дорог г. Благовещенска.

Многочисленные исследования (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Бородина, 2013) демонстрируют наличие определенной взаимосвязи химического состава почвы и соответствующих показателей у растений. Тем не менее, непосредственная корреляция между содержанием ТМ в растениях и содержанием этих элементов в почве зачастую нарушается вследствие выраженной избирательной способности самих растений к накоплению элементов (Ильин, 1991; Бородина, 2013; Масленников и др., 2015). Это явление обусловлено наличием адаптивных механизмов, позволяющих организмам

избирательно поглощать необходимые элементы. По-видимому, формирование элементного состава растений зависит одновременно от генетических факторов и внешних воздействий среды обитания. Причем относительный вклад каждого фактора изменяется в зависимости от конкретных условий внешней среды: при усилении техногенного воздействия ведущую роль приобретает экологическая составляющая (Масленников и др., 2015).

В.Б. Ильин (1991) считает, что установленная прямая зависимость содержания ТМ в растительных организмах от соответствующего уровня этих элементов в почве нередко оказывается нарушенной ввиду наличия у растений свойства избирательно аккумулировать микроэлементы согласно своим физиологическим потребностям.

*Кадмий (Cd)* не является элементом, необходимым для нормального функционирования растений, несмотря на это, он активно абсорбируется как корневой системой, так и листовым аппаратом. Являясь веществом первого класса токсичности, кадмий отличается высокой подвижностью в почвенных горизонтах и доступной формой для всасывания растениями, способствуя легкому поступлению в ткани растений как через корни, так и азрально (Ильин, Сысо, 2001; Сибиркина, 2013; Филимонова и др., 2013; Авдощенко, Климова, 2020, 2021; Kumar et al., 2019; Štofejová et al., 2021).

Кадмий значительно замедляет темпы роста и развитие растительного организма, ослабляет интенсивность фотосинтеза, приводит к изменениям в проницаемости клеточных мембран, активности ряда ферментных систем, нарушает транспирацию и газообмен (Ильин, Сысо, 2001; Гиниятуллин и др., 2018; Авдощенко, Климова, 2021).

Фитотоксическое воздействие кадмия проявляется формированием барьеров для проникновения жизненно важных питательных элементов, включая Zn, Mn, Cu, Ca, Mg, P и Ni. Роль кадмия как микроэлемента, необходимого для жизнедеятельности растений, не доказана. Данный элемент характеризуется низким естественным уровнем концентрации и принадлежит к категории интенсивно поглощаемых растениями веществ. Граница безопасной

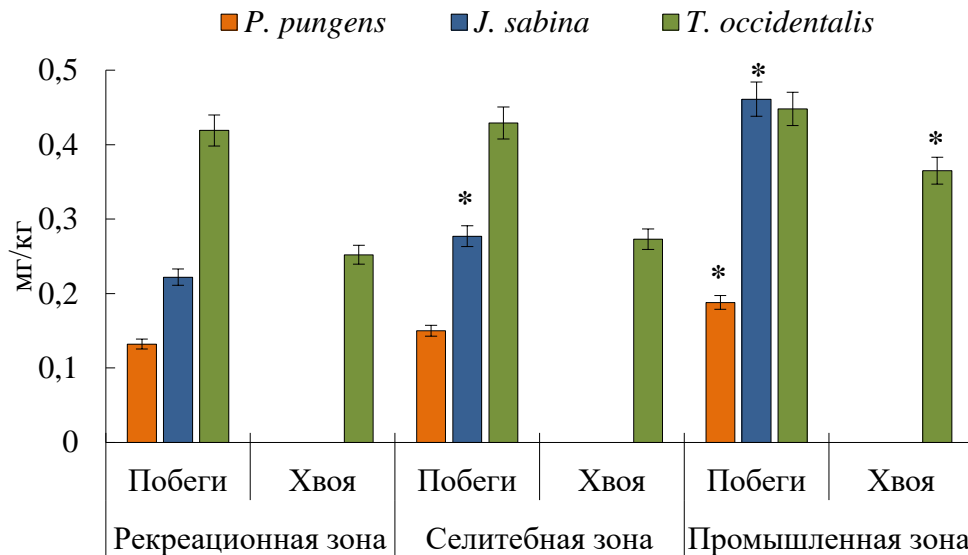
концентрации кадмия в растительном организме, не оказывающей негативного эффекта на физиологические процессы, составляет около 0,35 мг/кг сухой массы. ПДК кадмия варьируют в зависимости от типа используемого растительного материала: предельно допустимый уровень установлен на отметке 0,05–0,1 мг/кг для растений, выращенных в регионах Севера, 0,3 мг/кг – для кормовых культур, используемых в животноводстве, и 1,0 мг/кг – для биологически активные добавки и чайных сборов (Ильин, 1991; Авдощенко, Климова, 2020, 2021).

Имеются данные о накоплении кадмия преимущественно корневой системой растений непосредственно из окружающей среды, в то время как другие вегетативные органы, включая листья, характеризуются значительно меньшей степенью поглощения. Этот факт обусловлен особыми механизмами регуляции внутри растительного организма, препятствующими транспортировке токсичного вещества из корневой системы в генеративные органы. Обоснованием служит существование специализированных белковых комплексов в тканевых структурах корней, обладающих способностью связывать металлы до определенного уровня, после превышения которого возникает риск развития некротических изменений корневых тканей (Олива и др., 2021).

В литературных источниках имеются сведения о подавлении образования хлорофилловых пигментов в растениях, которые были обработаны кадмием. Установлено также, что хлорофилл обладает способностью концентрировать Cd в растительных тканях (Филимонова и др., 2013).

Содержание кадмия в побегах *P. pungens* составляло 0,13–0,19 мг/кг, *J. sabina* – 0,22–0,46 мг/кг, *T. occidentalis* – 0,42–0,45 мг/кг (рисунок 7).

В ходе работы было установлено, что в промышленной зоне определена тенденция к увеличению содержания кадмия: у *P. pungens* данный показатель возрастал в 1,5 раза ( $p=10^{-6}$ ), а у *J. sabina* – в 2 раза ( $p=10^{-6}$ ) по сравнению с растениями, произрастающими в рекреационной зоне.



Примечание: в хвое *J. sabina* и *P. pungens* Cd было <0,01 мг/кг  
\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 7 – Содержание кадмия в хвойных растениях г. Йошкар-Олы  
(среднее значение за период 2015–2022 гг.)

В хвое *P. pungens* и *J. sabina* содержание кадмия было менее 0,01 мг/кг (рисунок 7). Растения *T. occidentalis*, произрастающие в рекреационной зоне, обладали наименьшей способностью к накоплению кадмия (0,25 мг/кг). Статистически значимых различий в содержании кадмия в хвое растений из рекреационной и селитебной зон не было выявлено ( $p > 0,05$ ). Хвоя *T. occidentalis*, произрастающая в промышленной зоне, содержала наибольшее количество исследуемого элемента (0,36 мг/кг) ( $p = 10^{-6}$ ). Таким образом, наибольшей способностью к накоплению кадмия обладает *T. occidentalis*.

Проведенный дисперсионный анализ выявил статистически значимые влияния факторов на содержание кадмия в вегетативных органах изученных видов хвойных растений. Установлено, что значительное воздействие оказывают следующие факторы: «функциональная зона» ( $p = 10^{-3}$ ), «вид растения» ( $p = 10^{-3}$ ), «орган растения» ( $p = 10^{-3}$ ) и взаимодействие между факторами «функциональная зона» × «вид» × «орган» ( $p = 10^{-3}$ ).

Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в г. Нур-Султан, проведенный С.А. Кабановой с соавторами (2021), показал, что

наибольшей способностью к поглощению элементов обладает ель сибирская, наименьшей – ель колючая. О.А. Дубровина и Т.В. Зубкова (2020) установили, что наибольшей способностью к аккумулярованию ТМ в однолетней хвое отличается *T. occidentalis* по сравнению с *P. pungens*. Наибольшее количество накопленных элементов обнаружено в зонах с интенсивной транспортной нагрузкой, однако декоративные качества указанных хвойных видов не изменяются.

Lutfia Amer A. Eltier и A. Sivacioglu (2021) провели аналогичное исследование содержания тяжелых металлов (Cr, Ni, Fe, Mg, Cu, Ca, Zn, Mn, Pb и Cd) в ряде хвойных деревьев, применяемых в озеленении г. Кастамону (Турция). В ходе исследования выяснили, что у большинства видов зарегистрированы высокие концентрации тяжелых металлов, что связано с близостью места отбора проб к дороге с интенсивным движением. Сосна крымская (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana* Lamb. (Holmboe)) имеет самые низкие концентрации пяти из десяти тяжелых металлов, за ней следует *P. pungens* с тремя ТМ. Растения *T. orientalis* имели самые высокие концентрации четырех (Fe, Pb, Cr) из десяти тяжелых металлов.

При обычных концентрациях в почвенном растворе поглощение тяжелых металлов корнями растений является активным и контролируется метаболическими процессами внутри корней, при высоких концентрациях в их транспорте к корням растений преобладающую роль играет диффузия. Поступление тяжелых металлов в растения через корневую систему зависит, прежде всего, от количества этих металлов в почве. Коэффициенты корреляции между содержанием металлов в растениях и средах при разных условиях (тип почвы, влажность, кислотность и др.) могут быть достаточно высоки – в некоторых случаях превышают величину 0,80. При этом наблюдается как линейная, так и нелинейная зависимость содержания металлов в растениях от их концентрации в почве (Дроздова, Макаренко, 2015).

**Медь (Cu)** относится к числу незаменимых микроэлементов, необходимых для всех живых организмов. В растениях у нее важнейшие физиологические

функции: повышает интенсивность фотосинтеза; способствует образованию хлорофилла, биосинтезу лигнина, алкалоидов; участвует в белковом обмене и формировании клеточных стенок, в реакции дисмутации супероксидного радикала; оказывает влияние и на механизмы, определяющие устойчивость растений к заболеваниям. Данный микроэлемент входит в состав медьсодержащих белков, в первую очередь пластоцианина, ферментов (цитохромоксидазы, полифенолоксидазы, изофермента супероксиддисмутаза, аскорбатоксидазы, аминоксидазы) и других соединений. Одновременно фиксируется проявление токсического эффекта меди, выражающееся в угнетении фитомассы, снижении содержания общей воды и количества хлорофилла, подавлении процессов абсорбции и транспорта ионов отдельных микроэлементов (Ильин, Сысо, 2001; Медведев, Деревягин, 2017; Гиниятуллин и др., 2018; Авдощенко, Климова, 2021; Азаренко, 2021; Дубровина и др., 2022).

По уровню абсолютного содержания в растительных организмах медь классифицируется как элемент средней концентрации, тогда как по показателям способности к биоаккумуляции – как элемент со средней степенью поглощения. Оптимальная концентрация меди в растениях составляет диапазон от 1 до 10 мг/кг сухой массы, превышение значения в 20 мг/кг свидетельствует о ее токсическом воздействии (Авдощенко, Климова, 2020, 2021).

Согласно данным, полученным О.А. Дубровиной с соавторами (2022), среднее содержание меди в растениях варьирует в пределах 2,0–7,0 мг/кг воздушно-сухого вещества, при этом токсические показатели начинаются с диапазона 15–20 мг/кг. Исследование A. Parzych et al. (2017) показало, что содержание Cu в надземных органах растений варьирует от 5 до 20 мг/кг и существенно различается в зависимости от органа, систематической принадлежности конкретного вида и рода.

Элемент относится в категорию веществ второй группы опасности согласно классификации. Отмечено, что фитотоксический потенциал Cu превышает таковой у Zn и Ni. Исследованиями установлено наличие двух типов реакции растительного организма на избыточное поступление меди: латентное

отравление, проявляющееся отсутствием оптимального прироста биомассы; острое отравление, сопровождающееся визуально наблюдаемыми поражениями органов растений (Авдощенко, Климова, 2021).

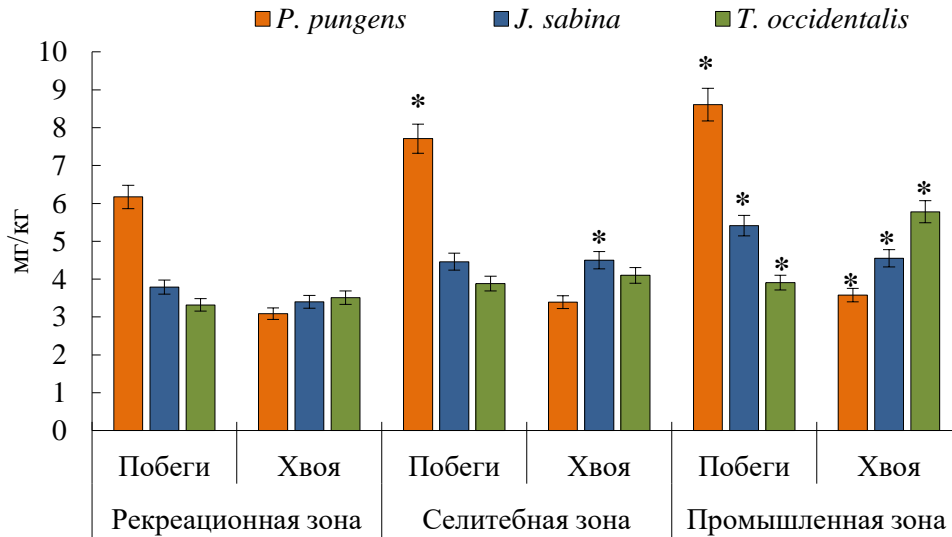
Как показывают исследования Р.Н. Матвеевой с соавторами (2019), медь, содержащаяся в хвое сосны сибирской кедровой, участвует при образовании нуклеиновых кислот ДНК и РНК. Недостаток меди отрицательно сказывается на вступлении растений в репродуктивную стадию развития.

Основным источником поступления меди в окружающую среду вследствие техногенного рассеяния являются промышленные выбросы и отходы от предприятий черной металлургии (при высокотемпературных процессах), транспорта, сжигание топлива в различных отраслях промышленности. В воздушной среде медь находится преимущественно во взвешенной форме в виде соединений оксида меди (Дубровина и др., 2022).

Так, наибольшее содержание меди было определено в побегах *P. pungens*, хвоя же характеризовалась наименьшим содержанием данного элемента (рисунок 8). Особенно высокие значения меди наблюдались у растений в промышленном районе города (8,61 мг/кг), где по сравнению с рекреационной зоной содержание элемента было выше в 1,4 раза ( $p=10^{-6}$ ).

У *J. sabina* и *T. occidentalis* с повышением степени загрязнения среды содержание меди также увеличивалось как в побегах, так и в хвое. Большую аккумуляционную способность меди в побегах также имели растения *J. sabina*. По мере усиления антропогенного загрязнения среды аккумуляционная способность побегов *J. sabina* возросла в 1,4 раза, хвои – в 1,3 раза. При этом у *T. occidentalis* в 1,2 раза больше меди накапливалось в хвое, чем в побегах.

Аккумуляция меди в органах хвойных растений зависит от влияния факторов: «вид» ( $p=10^{-3}$ ), «функциональная зона» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «функциональная зона» × «вид» × «орган» ( $p=10^{-3}$ ).



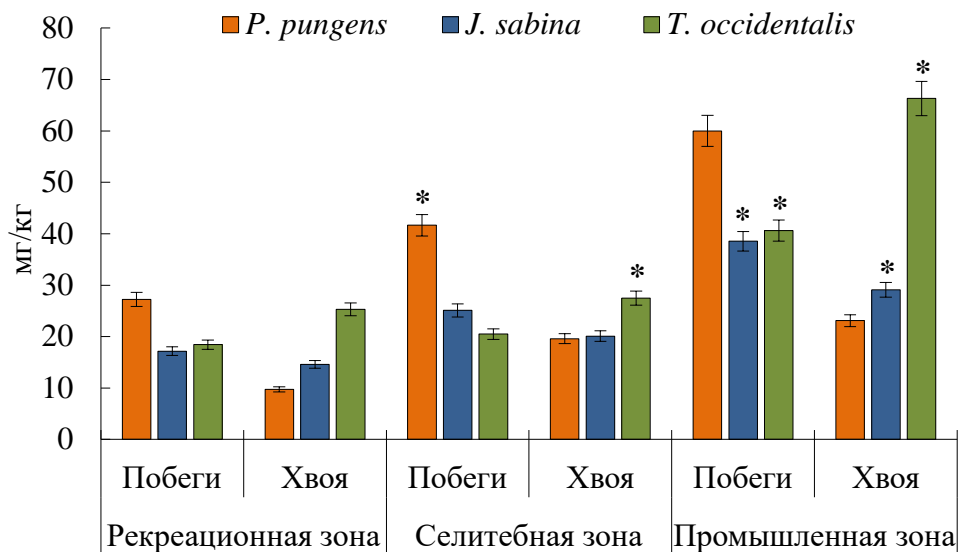
\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 8 – Содержание меди в хвойных растениях г. Йошкар-Олы  
(среднее значение за период 2015–2022 гг.)

**Железо (Fe)** играет ведущую роль среди всех содержащихся в растениях тяжелых металлов. В составе соединений, содержащих гем (все цитохромы, каталаза, пероксидаза) и в негемовой форме (железосерные центры), железо принимает участие в функционировании основных редокс-систем фотосинтеза и дыхания. В растениях железо входит в состав многих биологически активных соединений. При увеличении его концентрации в воздухе происходит и увеличение его количества в клетках растений. Железо вытесняет другие биофильные микроэлементы, заменяя их в процессе жизнедеятельности клетки. Железо – биогенный элемент, необходимый для нормального функционирования и жизнедеятельности живых организмов, его повышенное поступление в окружающую среду может оказывать отрицательное воздействие на все составляющие биосферы (Шубина, Юрьев, 2009; Копылова, Лескова, 2016; Масленников и др., 2016; Asati et al., 2016).

Железо, находясь в хвое, участвует в образовании хлорофилла (Матвеева и др., 2019). Среднее содержание железа в растениях составляет 0,02–0,08% (20–80 мг/кг сухой массы) (Масленников и др., 2016).

На рисунке 9 представлены результаты по содержанию железа в хвойных растениях в условиях г. Йошкар-Олы.



\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 9 – Содержание железа в хвойных растениях г. Йошкар-Олы  
(среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Максимальное содержание железа в побегах было у хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне: *P. pungens* – 60,0 мг/кг, *J. sabina* – 38,53 мг/кг, *T. occidentalis* – 40,62 мг/кг. Среди рассматриваемых видов повсеместно наблюдается наибольшее содержание железа именно в побегах ели колючей, максимальные величины зафиксированы в промышленной зоне города, где содержание железа примерно в 2,2 раза превосходит аналогичный показатель в рекреационной зоне (при  $p = 10^{-6}$ ).

Максимальное содержание железа в хвое было определено также, как и в побегах, у растений промышленной зоны (рисунок 9): у *P. pungens* – 23,10 мг/кг, у *J. sabina* – 29,10 мг/кг, у *T. occidentalis* – 66,30 мг/кг. Наибольшей металлоаккумулирующей способностью по отношению к железу в функциональных зонах отличались побеги *P. pungens*, однако в хвое данного вида было отмечено минимальное содержание этих элементов.

В ходе проведенного дисперсионного анализа было выявлено, что на содержание Fe у хвойных растений оказывают влияние такие факторы, как «функциональная зона» ( $p=10^{-3}$ ), «вид» ( $p=10^{-3}$ ), «орган» ( $p=10^{-3}$ ), а также взаимодействие факторов «функциональная зона  $\times$  вид  $\times$  орган» ( $p=10^{-3}$ ).

Л.В. Афанасьева (2018) отмечает, что в селитебной зоне хвоя *L. sibirica* в большей степени загрязнена серосодержащими соединениями, повышен уровень меди, никеля, кадмия, свинца, железа. Согласно данным С.В. Гореловой с соавторами (2015) большинство древесных растений аккумулирует железо в большом количестве при высоком содержании его в почве и атмосфере.

Проведенное исследование Н.А. Бородиной (2013) показало, что процесс накопления элементов в хвое хвойных интродуцентов, произрастающих на городских почвах, обусловлен несколькими ключевыми факторами: содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах, физиологическая потребность растений в конкретных микроэлементах, степень биологической доступности каждого химического элемента и видовой состав растений.

Нами был проведен корреляционный анализ зависимости между содержанием тяжелых металлов в хвое *J. sabina*, *T. occidentalis*, *P. pungens* и их валовым содержанием в почве. Высоких корреляций между накоплением тяжелых металлов в золе хвои *J. sabina*, *T. occidentalis*, *P. pungens* и их валовым содержанием в почве не было выявлено. Умеренные положительные связи обнаружены между содержанием железа в хвое *J. sabina*, произрастающих в промышленной зоне, и его содержанием в почве ( $r_s = 0,45$ ,  $p < 0,05$ ), а также между свинцом ( $r_s = 0,31$ ,  $p < 0,05$ ). В ходе анализа обнаружена умеренная положительная связь ( $r_s = 0,45$ ,  $p < 0,05$ ) между содержанием кадмия в почве и хвое растений *T. occidentalis*, произрастающих в селитебной зоне. Установлена статистически значимая связь между содержанием свинца в почве и хвое у растений *P. pungens*, произрастающих в селитебной зоне ( $r_s = 0,70$ ,  $p < 0,05$ ).

Таким образом, содержание Pb, Cd, Cu, Fe в вегетативных органах хвойных растений в условиях г. Йошкар-Олы возросло в экологическом ряду функциональных зон, отражающем увеличение антропогенного воздействия.

Возможно, повышенное содержание ТМ в хвойных растениях, произрастающих в промышленной зоне, обусловлено увеличенным поступлением данных элементов из почвы. Действительно, почвы промышленной зоны отличались значительно более высоким содержанием исследованных металлов относительно почв рекреационной зоны. Среди изученных представителей хвойных растений наиболее выраженной способностью к аккумуляции тяжелых металлов обладает *T. occidentalis*, затем *J. sabina*, а наименьшей способностью к накоплению ТМ – *P. pungens*. Наши исследования согласуются с результатами, полученными Т.В. Зубковой и О.А. Дубровиной (2020): наиболее выраженной способностью к аккумуляции тяжелых металлов обладает туя западная.

**Суммарное содержание тяжелых металлов в вегетативных органах хвойных растений.** На рисунке 10 представлены результаты суммарного содержания ТМ в хвойных растениях на территории г. Йошкар-Олы.

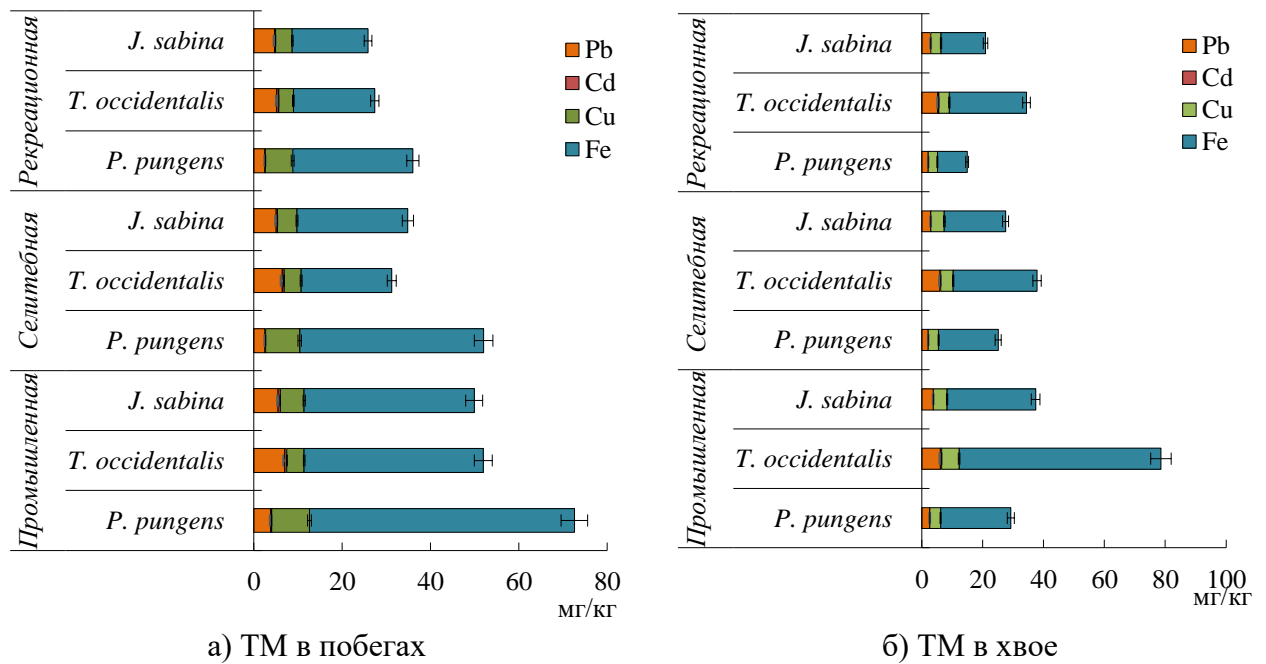


Рисунок 10 – Суммарное содержание тяжелых металлов в хвойных растениях (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Суммарное содержание Pb, Cd, Cu, Fe в побегах *J. sabina*, произрастающего в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы, составило 25,87 мг/кг, в селитебной зоне – 34,88 мг/кг, в промышленной зоне – 49,90 мг/кг (рисунок 10а). При этом на долю

железа приходилось 72–77%, свинца – от 11% до 21%, меди – до 13%, кадмия – 11–15%. При возрастании общего содержания ТМ в побегах *J. sabina* в городской среде было отмечено увеличение доли железа и уменьшение доли свинца и меди.

Анализ суммарного содержания ТМ в побегах *P. pungens*, произрастающих в условиях г. Йошкар-Олы, выявил, что содержание исследуемых металлов у растений рекреационной зоны было равно 36,01 мг/кг, в процентном соотношении преобладало железо – 76%, на долю меди пришлось 17%, свинца – 7%. В селитебной и промышленной зонах в побегах *P. pungens* накапливалось железо (до 80–83%), медь (до 12–15%), свинец (до 5%) (рисунок 10а).

Таким образом, наибольшее содержание ТМ характерно для побегов хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, при этом в процентном соотношении преобладало железо. Для побегов *P. pungens* в этой зоне была характерна максимальная металлоаккумулирующая способность (72,68 мг/кг).

Суммарное содержание Pb, Cd, Cu, Fe в хвое *J. sabina*, произрастающего в рекреационной зоне (рисунок 10б), составило 20,93 мг/кг, в селитебной – 27,54 мг/кг, в промышленной – 37,43 мг/кг. Распределение элементов характеризовалось доминирующим вкладом железа, составляющего от 70 до 78% общего количества, в то время как доля свинца достигала максимума 14%, а меди – до 16%. Для образцов хвои *J. sabina*, собранных в промышленной зоне, было отмечено увеличение общей концентрации тяжелых металлов в 1,8 раза.

Суммарное содержание изученных ТМ в хвое *T. occidentalis*, в данных функциональных зонах (рисунок 10б), составило в рекреационной зоне 34,38 мг/кг, в селитебной зоне – 37,85 мг/кг, в промышленной зоне – 78,59 мг/кг. При этом на долю железа приходилось до 72–84%, свинца – 8–16%, меди – 7–11%, кадмия – 1%. В промышленной зоне суммарное содержание ТМ в хвое *T. occidentalis* было больше в 2,3 раза, при этом отмечалось увеличение процентной доли железа и уменьшение доли свинца и меди.

Анализ суммарного содержания тяжелых металлов в хвое растений *P. pungens*, произрастающих в городских условиях (рисунок 10б),

продемонстрировал следующее распределение элементов: в рекреационной зоне содержание составило 14,93 мг/кг, в селитебной зоне – 25,13 мг/кг, в промышленной зоне – 29,30 мг/кг. В процентном отношении анализ показал преобладающую роль железа, доля которого составила от 65 до 79%; медь занимала второе место с долей от 12 до 21%, а свинец составлял от 9 до 14%.

В ходе проведенной работы выяснили, что наибольшее количество тяжелых металлов в хвое было у растений *T. occidentalis*, наименьшее – у *P. pungens*. Максимальное содержание ТМ характерно для побегов хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, при этом в процентном соотношении преобладало железо.

Наибольшей способностью к поглощению ТМ, следовательно, к очищению окружающей среды от ТМ, обладает *T. occidentalis* (средние значения суммарно накопленных тяжелых металлов составили 87,11 мг/кг), далее *P. pungens* (76,76 мг/кг) и *J. sabina* (65,51 мг/кг). Наименьшее содержание ТМ в хвое исследуемых видов растений характерно для *P. pungens*. У всех исследуемых видов в побегах содержание тяжелых металлов выше, чем в хвое.

Сравнительный анализ выявил, что в хвое *T. occidentalis* в бóльших концентрациях накапливалось железо, свинец, кадмий по сравнению с хвоей *J. sabina* и *P. pungens*. В отличие от побегов, хвоя перечисленных видов характеризовалась сниженными уровнями накопления большинства исследованных тяжелых металлов, исключая лишь медь в хвое *T. occidentalis*. Также было определено, что побеги *P. pungens* содержали больше железа, в то время как в побегах *T. occidentalis* обнаружили большее содержание свинца.

#### **4.2.3 Биогеохимическая характеристика хвойных растений**

Круговорот химических элементов в системе «почва – растения – почва» – важная составляющая общего механизма функционирования наземных экосистем биосферы. Растения поглощают элементы, накапливают их в своих органах и возвращают их вместе с опадом в почву. Эти взаимодействия носят циклический

характер, они определяют особенности почвообразования и влияют на развитие ландшафта в целом. Растения поглощают микроэлементы и накапливают их в своих тканях с разной интенсивностью, в зависимости от свойств самих элементов, физиологических потребностей, видовой геохимической специализации, уровней содержания доступных форм в почвах, наличия барьерных механизмов поглощения различными органами. При техногенных воздействиях на ландшафт растения вырабатывают специфические механизмы адаптации, которые защищают клеточный метаболизм от вредного влияния избыточных количеств тяжелых металлов (Енчилик и др., 2018).

Систему «почва – растение» необходимо рассматривать как структуру, объединенную потоком химических элементов. В связи с тем, что процессы аккумуляции ТМ в почве и растениях городской среды тесно связаны, их предлагается исследовать совместно (Карбасникова и др., 2019).

***Коэффициент биологического поглощения тяжелых металлов.*** Для оценки миграционной активности исследуемых тяжелых металлов (Pb, Cu, Cd и Fe) в системе «почва – растение» рассчитывали коэффициент биологического поглощения (КБП), отражающий степень перехода химических элементов из почвы в ткани растений. Данный показатель определяется как отношение концентрации элемента в золе различных частей растения к его концентрации в почве (Перельман, 1975; Лапытова, Винокурова, 2012; Обущенко, Гнеденко, 2014; Пугаев, Лукаткин, 2015; Авдощенко, Климова, 2020; Sulaiman, Hamzah, 2018).

Поглощение химических элементов растениями находится в прямой зависимости от химической природы самого элемента, систематической принадлежности растения и иных индивидуальных характеристик последних. Помимо этого, химическим элементам присуще различное распределение внутри органов растительного организма, включая специфику накопления в стеблях, корнях, листьях, хвое и прочих органах (Исагалиев и др., 2021).

Растения различаются по способности к аккумуляции тяжелых металлов и подразделяются на три группы:

1) аккумуляторы и гипераккумуляторы – характеризуются значительным

накоплением металлов преимущественно в надземных органах вне зависимости от низкой или высокой концентрации данных элементов в почвенном субстрате;

2) индикаторы – демонстрируют прямую зависимость концентрации металла в тканях от его наличия в почве либо окружающей среде, таким образом выступая чувствительными маркерами состояния среды обитания;

3) исключатели – способны аккумулировать тяжелые металлы главным образом в корневой системе, ограничивая проникновение ионов в остальные части растения даже при высоких уровнях загрязнения внешней среды. Данная группа включает большую часть растений (Титов и др., 2011; Щербаков и др., 2013; Авдощенко, Климова, 2021; Жуйкова, 2022).

Несмотря на значительную межвидовую вариативность способности растений к аккумуляции тяжелых металлов, для процесса биоаккумуляции элементов характерны отчетливые тенденции. Например, интенсивность накопления позволяет выделить ряд элементов в разные группы (Ильин, 1991):

1) легко поглощаемые: Cd, Cs, Rb;

2) средней степени поглощаемые: Zn, Mo, Cu, Pb, Ag, As, Co;

3) слабо поглощаемые: Mn, Ni, Li, Cr, Be, Sb.

3) труднодоступные: Se, Fe, Ba, Te (Толкач, Позняк, 2017).

При анализе зависимостей от физико-химических свойств исследованных элементов первоначально осуществлялось их ранжирование исходя из интенсивности процесса поглощения. Это позволило выявить различные уровни усвояемости элементов растениями, представленные следующим образом:

1. Элементы биологического накопления при КБП > 1:

- КБП  $\geq 10$  – элементы энергичного накопления;
- КБП < 10 – элементы сильного накопления.

2. Элементы биологического захвата (КБП < 1):

- КБП = 0,1 – элементы слабого накопления и среднего захвата;
- КБП = 0,01 – элементы слабого захвата;
- КБП = 0,001 и менее – элементы очень слабого захвата (Перельман, 1989; Авдощенко, Климова, 2021).

В таблице 6 представлены результаты рассчитанных коэффициентов биологического поглощения и группировок по интенсивности биологического поглощения ТМ в разных органах хвойных растений.

Как видно из таблицы 6, к элементам сильного накопления относятся два элемента: Cu в побегах *P. pungens*, произрастающих в рекреационной и селитебной зонах (КБП=1,09; КБП=1,01 соответственно) и Cd в побегах *T. occidentalis* (КБП=1,15; КБП=1,0 соответственно) с этих же зон.

К элементам слабого накопления относился свинец, как в побегах, так и в хвое растений, произрастающих в г. Йошкар-Оле. Аналогичный низкий уровень накопления характерен для кадмия и меди. Кроме того, железо также демонстрирует ограниченную способность к накоплению в растениях, хотя этот эффект наблюдается лишь частично и зависит от конкретных условий окружающей среды. По КБП свинца и кадмия составили следующий ряд: *T. occidentalis* > *J. sabina* > *P. pungens*. КБП Cu были самыми высокими среди тяжелых металлов, и виды хвойных по биопоглощению этого элемента расположились в следующем убывающем ряду: *P. pungens* > *J. sabina* > *T. occidentalis*.

Железо относится к элементам слабого захвата (Седельникова, Чанкина, 2017). Хотя содержание валовых форм Fe в почве было значительно выше, железо поглощалось хвойными растениями в меньшей степени по сравнению с другими тяжелыми металлами. Возможно, такая особенность может свидетельствовать о достаточно хорошо развитых защитных механизмах корневой системы растений относительно данного металла. КБП железа среди исследуемых тяжелых металлов были минимальными. Аналогичные данные были получены С.В. Пугаевым и А.С. Лукаткиным (2014), исследовавшими содержание тяжелых металлов у 6-ти видах хвойных растений на территории Ботанического сада МГУ им. Н.П. Огарева (г. Саранск). КБП железа были минимальными, и порядок хвойных видов был следующим: *T. occidentalis* > *P. pungens* > *J. sabina*.

Таблица 6 – Коэффициенты биологического поглощения тяжелых металлов и биогеохимическая активность хвойных растений (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Вид	Орган	Коэффициенты биологического поглощения ТМ				БХА
		Pb	Cd	Cu	Fe	
<i>Рекреационная зона</i>						
<i>P. pungens</i>	Побеги	0,41±0,007	0,36±0,007	1,09±0,059	0,11±0,002	1,98
	Хвоя	0,35±0,010	-	0,55±0,031	0,039±0,002	0,94
<i>J. sabina</i>	Побеги	0,79±0,011	0,61±0,06	0,67±0,01	0,069±0,001	2,14
	Хвоя	0,49±0,010	-	0,60±0,05	0,059±0,001	1,15
<i>T. occidentalis</i>	Побеги	0,87±0,008	1,15±0,013	0,58±0,011	0,075±0,001	2,69
	Хвоя	0,84±0,029	0,69±0,019	0,62±0,008	0,10±0,002	2,31
<i>Селитебная зона</i>						
<i>P. pungens</i>	Побеги	<b>0,32±0,006*</b>	0,37±0,014	1,01±0,009	0,15±0,002	1,85
	Хвоя	<b>0,27±0,005*</b>	-	<b>0,44±0,023*</b>	<b>0,073±0,002*</b>	0,79
<i>J. sabina</i>	Побеги	<b>0,64±0,009*</b>	0,68±0,006	<b>0,58±0,009*</b>	<b>0,093±0,006*</b>	1,99
	Хвоя	<b>0,37±0,006*</b>	-	0,59±0,009	<b>0,074±0,001*</b>	1,04
<i>T. occidentalis</i>	Побеги	0,81±0,005	1,05±0,013	0,51±0,004	0,076±0,001	2,44
	Хвоя	0,75±0,003	0,67±0,015	0,53±0,005	0,10±0,002	2,06
<i>Промышленная зона</i>						
<i>P. pungens</i>	Побеги	<b>0,19±0,001*</b>	<b>0,17±0,004*</b>	<b>0,80±0,003*</b>	<b>0,22±0,001*</b>	1,38
	Хвоя	<b>0,13±0,002*</b>	-	<b>0,33±0,005*</b>	<b>0,085±0,002*</b>	0,55
<i>J. sabina</i>	Побеги	<b>0,27±0,003*</b>	<b>0,41±0,004*</b>	<b>0,51±0,005*</b>	<b>0,14±0,001*</b>	1,33
	Хвоя	<b>0,19±0,002*</b>	-	<b>0,42±0,003*</b>	<b>0,11±0,001*</b>	0,71
<i>T. occidentalis</i>	Побеги	<b>0,35±0,001*</b>	<b>0,40±0,018*</b>	<b>0,36±0,006*</b>	<b>0,15±0,001*</b>	1,26
	Хвоя	<b>0,30±0,004*</b>	<b>0,32±0,007*</b>	<b>0,54±0,005</b>	<b>0,24±0,002*</b>	1,41

Примечание:

	элементы сильного накопления
	элементы слабого накопления и среднего захвата
	элементы слабого захвата

\* – статистически значимые различия в функциональных зонах по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Анализ коэффициентов биологической подвижности тяжелых металлов, проведенный на примере изученных видов хвойных растений, позволяет заключить, что увеличение уровня антропогенного загрязнения территорий способствует снижению интенсивности усвоения Pb, Cu, Cd побегами и хвоей *J. sabina*, тогда как процессы накопления Fe характеризовались обратной тенденцией и не демонстрируют подобного снижения эффективности абсорбции.

Таким образом, величины КБП хвойных растений г. Йошкар-Олы различались по элементам и видам. Сравнение трех видов растений по величине

биоаккумуляции показало, что у *P. pungens* были минимальные (среди всех исследуемых видов) коэффициенты биологического поглощения Pb, Cd вегетативными органами, но максимальные КБП меди и железа побегами. При этом максимальное содержание валовых форм Pb и Cd было выявлено у растений *T. occidentalis*.

**Биогеохимическая активность хвойных растений.** Для объективной оценки способности хвойных растений к аккумуляции различных химических элементов были использованы значения коэффициентов биологического поглощения, на основании которых рассчитывался интегральный показатель – биогеохимическая активность (БХА) исследованных видов.

Биогеохимическая активность представляет собой совокупную величину, определяемую путем сложения индивидуальных значений КБП каждого отдельного элемента. Основой расчета является суммарный эффект аккумуляции элементов в составе золы растения, формирующийся вследствие интегрирования специфичных показателей «активности», характерных для разных химических компонентов. Показатель БХА служит инструментом для выявления различий между отдельными видами растительного сообщества относительно степени участия в биологическом цикле элементов, а также позволяет комплексно оценивать степень выраженности процессов биотехногенной аккумуляции в рамках определенного ландшафта (Копылова, 2012; Енчилик и др., 2018; Самойленко и др., 2018; Авдощенко, Климова, 2021).

Так, наибольшие значения биогеохимической активности *J. sabina* были характерны для растений, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы: в побегах – 2,14, в хвое – 1,15; наименьшие в промышленной зоне: в побегах – 1,33, в хвое – 0,71 (таблица 6).

Расчет величин показателя биогеохимической активности показал (таблица 6), что максимальная способность к аккумуляции тяжелых металлов характерна для растений *T. occidentalis*, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы, характеризующихся значениями данного параметра: для побегов – 2,69, для хвои – 2,31.

Биогеохимическая активность особей *P. pungens* варьировала от 0,55 до 1,98 (таблица 6). Наибольшие величины указанного показателя отмечены у растений, произрастающих в рекреационной зоне: для побегов этот показатель составил 1,98, для хвои – 0,94. Напротив, у растений, произрастающих в условиях промышленной зоны, значения БХА оказались существенно ниже: в побегах ниже в 1,4 раза, а в хвое – в 1,7 раза чем у особей рекреационной зоны.

Биогеохимическая активность отображает более истинную картину миграции тяжелых металлов в растения. Данная величина зависит главным образом от формы нахождения элемента в почве и от физиологических особенностей вида (Бускунова, Ягафарова, 2022). Изучение биогеохимического перераспределения ТМ в важнейших компонентах урбоэкосистемы – в растениях и почвах – позволяет получить реальное представление об интенсивности процессов техногенеза и основных миграционных потоках этих токсикантов на урбанизированной территории (Масленников и др., 2015).

Как отмечает Л.В. Копылова (2012), при больших концентрациях тяжелых металлов в окружающей среде у многих растений срабатывают защитные механизмы, контролирующие поступление элементов в допустимых пределах.

Согласно результатам исследования, проведенного С.В. Гореловой с соавторами (2015), изучавших биогеохимические особенности *P. pungens* и *J. sabina*, произрастающих в условиях влияния металлургического производства и автомобильного транспорта, установлено, что оба вида обладают способностью значительно усиливать накопление железа в хвое – уровень содержания элемента в ней превышает показатели концентрации в побегах примерно в 2 раза.

По показателю БХА хвойные растения образуют следующий убывающий ряд: *T. occidentalis* > *J. sabina* > *P. pungens*. Результаты показали, что показатель – БХА в рекреационной зоне был выше, чем в антропогенно загрязненных зонах, что согласуется с данными Л.В. Копыловой (2012). Несмотря на повышенное содержание ТМ в почве промышленной зоны, биогеохимическая активность хвойных растений, произрастающих здесь, оказалась сравнительно низкой. По-

видимому, такое явление обусловлено активацией защитных механизмов растений, направленных на ограничение чрезмерного поступления ТМ в них.

**Заключение.** Таким образом, зольность и содержание Pb, Cd, Cu, Fe в побегах хвойных растений г. Йошкар-Олы была больше, чем в хвое. В ходе проведенного исследования определены видовые особенности накопления тяжелых металлов различными органами хвойных растений. Наибольшей способностью накапливать тяжелые металлы обладает *T. occidentalis*, затем *J. sabina* и наименьшей способностью – *P. pungens*. Среди изученных тяжелых металлов наиболее интенсивно *J. sabina* поглощается свинец и медь, *T. occidentalis* – кадмий и свинец, *P. pungens* – медь. Меньше всего хвойными видами поглощается железо. Наибольшая биогеохимическая активность среди исследуемых видов хвойных растений характерна для *T. occidentalis* (БХА=2,034).

#### **4.3 Изучение динамики пигментного комплекса у опытных растений в условиях г. Йошкар-Олы и их сравнительная характеристика**

Хвоя и листья представляют собой главные и наиболее восприимчивые ассимилирующие структуры растений, обладающие значительной поверхностью фотосинтеза и непосредственно контактирующие с внешней средой. Их защитная система недостаточно эффективна против негативного влияния внешних факторов, что делает эти органы особенно подверженными повреждениям и преждевременному отмиранию. Вследствие этого физиолого-биохимические характеристики ассимилирующих органов служат индикаторами ранней диагностики общего состояния растений (Федоров, 1987; Николаевский, 1979; Русак и др., 2018).

Одним из ключевых биохимических индикаторных параметров выступает количественное содержание и соотношение хлорофиллов и каротиноидов в растительных тканях. Оценка уровней указанных пигментов позволяет сделать

выводы о степени адаптации растений к новым экологическим условиям (Тужилкина, 2024).

Содержание пигментов в течение периода вегетации является довольно динамичным показателем (Титова, 2013). Особое место у растений занимают адаптации, связанные с сезонами года. У каждого вида в процессе естественного отбора выработался характерный годичный цикл с определенной последовательностью и длительностью периодов интенсивного роста и развития, размножения, подготовки к зиме и зимовки. У хвойных растений в годичном цикле наблюдаются четкие ритмы перестройки обмена веществ и энергии, а также ультраструктурной организации клеток мезофилла – основной фотосинтезирующей ткани листа:

- 1) переход от летнего состояния к зимнему – конец августа – октябрь;
- 2) выход растений из состояния глубокого покоя – декабрь;
- 3) переход от зимнего состояния к летнему – март – апрель;
- 4) период активной вегетации – май – август (Новицкая, 1984).

Работ, посвященных изучению сезонной динамики содержания главных фотосинтезирующих пигментов растений – хлорофиллов и каротиноидов, немало. Например, Д.В. Логунов (2018) изучал сезонную динамику содержания пигментов у представителей рода лиственниц в условиях Нижегородской области. В.В. Тужилкина (2017) исследовала сезонные изменения содержания и соотношения хлорофиллов и каротиноидов в хвое *P. obovata* в среднетаежных лесах европейского Северо-Востока России. О.М. Легощина и др. (2016) изучали адаптацию фотосинтетического аппарата хвои ели сибирской в г. Кемерове в условиях влияния промышленных выбросов. В.З. Лапытова с соавторами (2009) провели комплексное исследование сезонной и возрастной изменчивости содержания хлорофиллов пихты сибирской, произрастающей в темнохвойных лесах Республики Марий Эл. М.С. Титова (2013) изучала особенности фотосинтезирующей активности хвои интродуцированных видов рода ели, произрастающих в дендрарии Горнотаежной станции. Т.К. Головки с соавторами (2013) рассматривали сезонные изменения состояния фотосинтетического

аппарата ели сибирской, пихты сибирской, можжевельника обыкновенного в подзоне северной тайги на европейском Северо-Востоке и т.д.

Из древесных растений и кустарников наибольшие значения фотосинтетической активности и продуктивности характерны для листопадных деревьев и кустарников (световые листья), наименьшее – для вечнозеленых хвойных деревьев и кустарничков с листьями эрикоидного типа (Лархер, 1978).

Содержание пигментов в течение вегетационного периода является динамичным показателем, что ранее было отмечено В.З. Лапытовой с соавторами (2009), М.С. Титовой (2010, 2013, 2015), Т.К. Головки с соавторами (2013), И.Л. Бухариной, А.С. Пашковой (2015), В.В. Тужилкиной (2017), О.М. Легощиной с соавторами (2016), Д.В. Логуновым (2018) и др.

Исследование влияния изменений метеорологических условий на динамику концентраций хлорофиллов и каротиноидов у хвойных растений в разные фазы вегетационного цикла, а также в условиях повышенной антропогенной нагрузки сохраняет свою научную значимость и практическую востребованность в современных экологических исследованиях (Овечкина, Шаяхметова, 2015).

#### **4.3.1 Содержание хлорофилла *a* и *b* в хвойных растениях в сезонной динамике**

Известно, что содержание хлорофиллов и каротиноидов в растительном организме является важным биохимическим показателем, отражающим реакцию растений на изменения факторов окружающей среды и свидетельствующим о степени их адаптированности к новым экологическим условиям. Непосредственное участие в фотохимических реакциях преобразования энергии в фотосинтезе принимает только 1% хлорофилла, а остальная часть пигментов служит для поглощения энергии и передачи ее к соответствующим реакционным центрам. Хлорофиллы находятся в трех типах мембранных комплексов: фотосистеме I (ФС I), фотосистеме II (ФС II) и в светособирающем комплексе

(ССК). В построении реакционных центров обеих фотосистем участвует хлорофилл *a*, хлорофилл *b* главным образом входит в состав ССК, сопряженного с ФС II. Каротиноиды – дополнительные пигменты, расширяющие спектр поглощения квантов света.

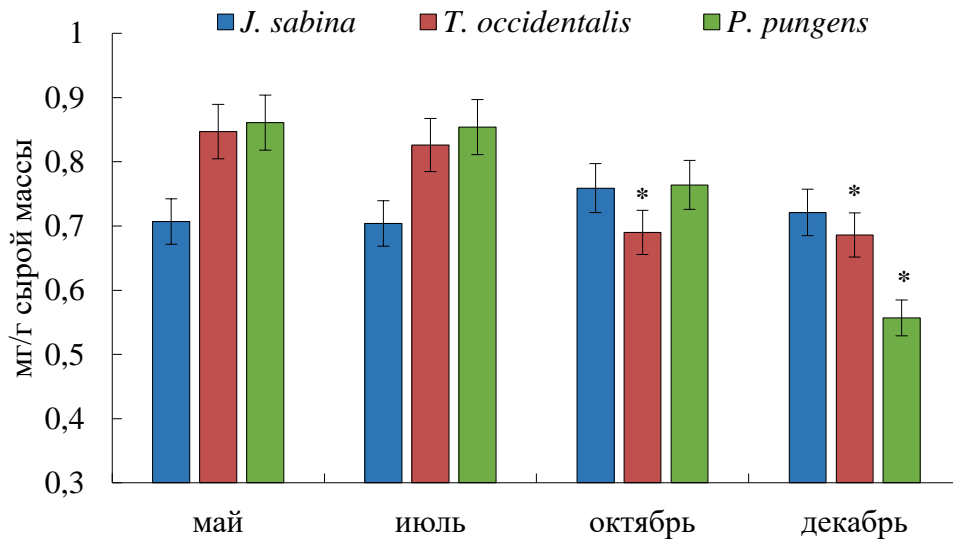
Концентрация хлорофилла в фотосинтезирующих органах растений может рассматриваться как важный критерий, позволяющий оценить взаимодействие растений с окружающей средой и определять их фотосинтетическую продуктивность (Тужилкина, 2001; Бухарина и др., 2013; Bukharina et al., 2014; Vedernikov et al., 2014).

Изучением содержания фотосинтетических пигментов в хвое представителей рода *Juniperus* занимались С.В. Загирова (2004), Н.В. Герлинг, С.В. Загирова (2011), Я.Н. Яцко с соавторами (2011), Т.К. Головки с соавторами (2013), М.С. Титова (2015), Е.А. Тишкина, Л.А. Семкина (2015, 2016, 2017, 2018), Е.А. Тишкина, Л.П. Абрамова (2018) и др.

Так, например, М.С. Титова (2015) изучала содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов в хвое дальневосточного вида – можжевельника твердого (*J. rigida*) и интродуцированных видов – можжевельника китайского (*J. chinensis*) и можжевельника полушаровидного (*J. semiglobosa*), произрастающих в дендрарии Горнотаежной станции ДВО РАН; Е.А. Тишкина и Л.А. Семкина (2017) – содержание фотосинтетических пигментов можжевельника обыкновенного в разных условиях местообитания.

*Хлорофилл a* играет ключевую роль среди функциональных пигментов, выступая основным источником энергии для осуществления фотосинтетических реакций. Остальные пигменты выполняют вспомогательную функцию, перенаправляя поглощенную ими световую энергию данному главному хлорофиллу. Представленные результаты исследований (рисунок 11) свидетельствуют о том, что содержание хлорофилла *a* в хвое *J. sabina*, произрастающих в рекреационной зоне, статистически значимо не изменялось в зависимости от сезона года ( $p > 0,05$ ).

Максимальное количество хлорофилла *a* было у *P. pungens* и *T. occidentalis* в мае и июле (0,86 мг/г сырой массы). В осенне-зимний сезон у *T. occidentalis* содержание хлорофилла *a* уменьшилось на 18% ( $p=0,009$ ), в то время как у *P. pungens* отмечено его снижение на 12% в октябре и на 34,5% в декабре по сравнению с весенне-летним периодом (рисунок 11).



\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p<0,05$ )

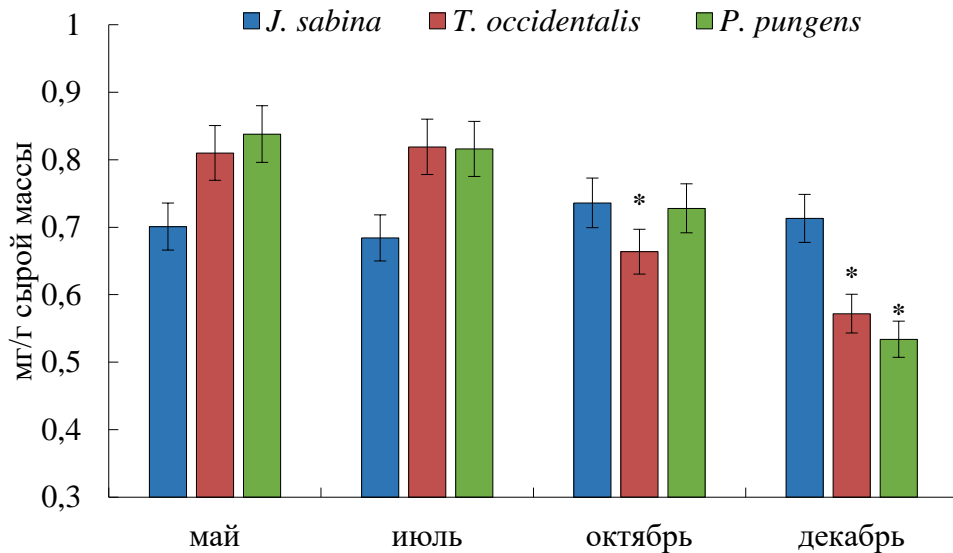
Рисунок 11 – Сезонная динамика содержания хлорофилла *a* в хвое растений, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Двухфакторный дисперсионный анализ выявил влияние фактора «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ), а также взаимодействия факторов «месяц исследования × вид» ( $p=10^{-3}$ ) на содержание хлорофилла *a* у хвойных растений, произрастающих в рекреационной зоне.

М.С. Титовой (2015) отмечается, что снижение количественного содержания пигментов в зимний период связывается со структурно-функциональной перестройкой, наблюдаемой в клетках мезофилла хвойных при их подготовке к периоду покоя. С наступлением осени в клетках хлоренхимы происходит исчезновение крахмальных зерен, изменение формы, размеров и месторасположения зеленых пластид, которые перемещаются к центральной

части клетки и группируются вокруг ядра, что снижает поглощение световой энергии.

У особей *J. sabina*, произрастающих в селитебной зоне (рисунок 12), не выявили статистически значимых различий по изучаемому показателю ( $p > 0,05$ ).



\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p < 0,05$ )

Рисунок 12 – Сезонная динамика содержания хлорофилла *a* в хвое растений, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

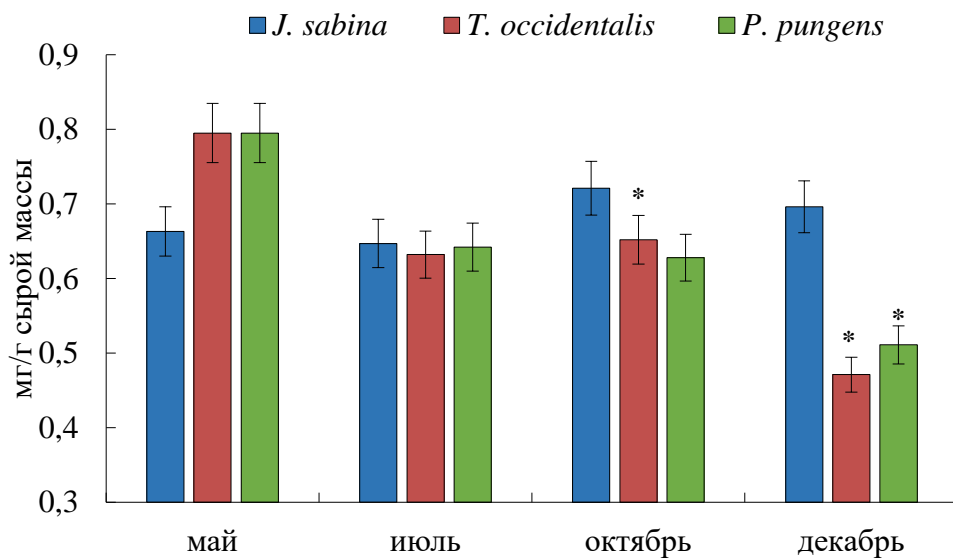
Максимальное накопление хлорофилла *a* у особей *T. occidentalis* было определено в мае и июле (до 0,81 мг/г сырой массы). В октябре концентрация указанного пигмента была ниже на 20% ( $p = 0,02$ ), а в декабре меньше в 1,4 раза по сравнению с летними значениями ( $p = 0,0001$ ). Исследования показали, что максимальное содержание хлорофилла *a* в хвое *P. pungens* наблюдалась в весенне-летний период (до 0,83 мг/г сырой массы) (рисунок 12). В зимний период уровень данного фотосинтетического пигмента был ниже в 1,6 раза по сравнению с остальными сезонами ( $p = 10^{-6}$ ).

Как указывает М.С. Титова (2010), наступление зимнего периода с устойчивым понижением температуры вызывает изменение пространственной организации органелл в клетках хвойных растений: хлоропласты

концентрируются преимущественно вблизи клеточной стенки и ядра, что сопровождается резким уменьшением синтеза пигментов.

Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ полученных результатов выявил существенное влияние фактора «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ), а также взаимодействие факторов «месяц исследования»  $\times$  «вид» ( $p=0,001$ ) на содержание хлорофилла *a* у хвойных растений, произрастающих в селитебной зоне.

У особей *J. sabina*, произрастающих в промышленной зоне (рисунок 13), статистически значимых различий по содержанию хлорофилла *a*, как и в других функциональных зонах, не выявлено ( $p>0,05$ ).



\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p<0,05$ )

Рисунок 13 – Сезонная динамика содержания хлорофилла *a* в хвое растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

В хвое растений *T. occidentalis* наибольшее содержание хлорофилла *a* было в мае (0,79 мг/г сырой массы), далее в летне-осенний период их содержание снизилось на 20% (рисунок 13). В декабре количество исследуемого пигмента было меньше в 1,4 раза ( $p=0,0001$ ) по сравнению с весенне-летним периодом. У *P. pungens* содержание хлорофилла *a* было также максимальным в мае (0,79 мг/г сырой массы), в летне-осенний период наблюдался спад на 24%. В декабре

содержание этого хлорофилла уменьшилось в 1,5 раза по сравнению с весенне-летним периодом ( $p=0,001$ ).

В ходе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа выявили существенное влияние фактора «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ), а также взаимодействие факторов «месяц исследования × вид» ( $p=0,005$ ) на содержание хлорофилла *a* у хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне.

При снижении накопления хлорофилла *a* происходит увеличение доли хлорофилла *b* или каротиноидов, которые выполняют защитные функции, что является адаптивной реакцией ассимиляционного аппарата можжевельника на различные стрессы (Тишкина, Абрамова, 2018). По результатам исследований Е.В. Сарбаевой и О.Л. Воскресенской (2008), установлено наличие выраженной дифференциации в составе фотосинтетических пигментов среди различных декоративных форм *T. occidentalis* в условиях г. Йошкар-Олы. Выявлено наименьшее содержание пигментов у особей *T. occidentalis* с рекреационной и промышленной зон, тогда как наиболее высокие концентрации отмечались у растений, произрастающих в экологически чистом районе («Дубки»).

Ряд исследователей (Неверова, 2012; Русак и др., 2018) констатируют снижение уровня хлорофиллов *a* и *b* у растений, находящихся под влиянием техногенных факторов окружающей среды. Установлено, что наибольшему разрушению подвержен хлорофилл *a*, тогда как степень деградации хлорофилла *b* значительно ниже.

Атмосферный воздух г. Йошкар-Олы характеризуется наличием загрязняющих выбросов, включающих оксиды углерода и азота, диоксид серы и азота, формальдегид, взвешенные частицы, углеводороды и прочие соединения (Алябышева и др., 2013). Попадание кислых газов в клетки растений способствует снижению рН цитоплазмы, нарушая функционирование внутриклеточных транспортных механизмов. Повреждение мембран хлоропластов вследствие этих воздействий ведет к подавлению интенсивности процессов фотосинтеза, деструкции молекул хлорофилла *a* и каротиноидов. Аналогичным негативным

воздействием обладают такие вещества, как хлор и сернистый газ, оказывая прямое влияние на стабильность пигментной системы растений.

Таким образом, возможно, что усиление техногенной нагрузки может привести к снижению содержания хлорофилла *a* в хвое *T. occidentalis* и *P. pungens*. В.С. Николаевский (1979) указывает, что хлорофилл *a* и каротиноиды более чувствительны к промышленным выбросам, чем хлорофилл *b*.

В работе В.К. Жирова с соавторами (2007) показано, что в условиях усиления антропогенной нагрузки общее содержание пигментов в хвое *P. sylvestris* уменьшается. Как отмечают С.Н. Русак и А.А. Обзор (2021), уменьшение содержания хлорофилла может свидетельствовать о загрязнении среды. Исследование, проведенное А.С. Пашковой и И.Л. Бухариной (2015), показало, что пигментный комплекс *P. pungens*, произрастающих в г. Ижевске, обладает повышенной устойчивостью к воздействию загрязнений атмосферы. Реакция пигментного аппарата проявляется лишь при экстремально высоких уровнях загрязнения воздушной среды. По сравнению с видом *P. abies*, у *P. pungens* наблюдалось относительное постоянство содержания хлорофиллов *a* и *b*, а также более высокий уровень накопления хлорофилла *a*.

Содержание хлорофилла *a* в хвое *T. occidentalis* и *P. pungens* отрицательно коррелирует с содержанием в атмосферном воздухе SO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,59$ ,  $p < 0,05$  и  $r_s = -0,57$ ,  $p < 0,05$ ), NO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,51$ ,  $p < 0,05$  и  $r_s = -0,49$ ,  $p < 0,05$ ) и взвешенных веществ ( $r_s = -0,67$ ,  $p < 0,05$  и  $r_s = -0,52$ ,  $p < 0,05$ ).

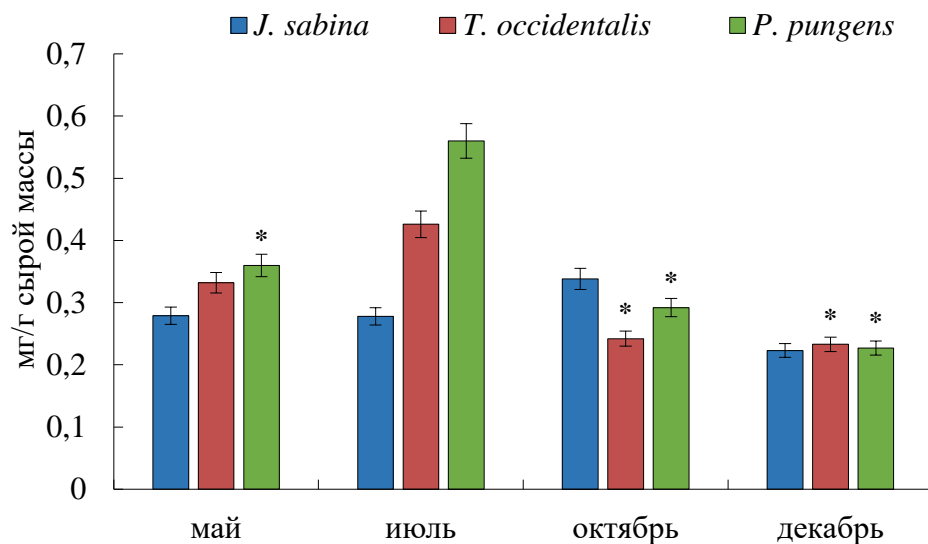
Таким образом, содержание хлорофилла *a* у *J. sabina*, произрастающих на территории г. Йошкар-Олы, составило 0,7 мг/г сырой массы. В хвое особей *T. occidentalis* и *P. pungens* наибольшие значения по хлорофиллу *a* были в весенне-летнее время и снижались в декабре.

*Хлорофилл b* необходим для образования и поддержания многотилакоидных гран хлоропластов для осуществления эффективного фотосинтеза (Тишкина, Семкина, 2018).

Растения в городских условиях характеризуются существенно меньшей концентрацией хлорофиллов по сравнению с растениями, произрастающими в

лесопарковых зонах. Исследования показывают, что именно содержание хлорофилла *a* претерпевает значительные изменения в городской среде, тогда как концентрация хлорофилла *b* остается относительно стабильной (Фролов, Горышина, 1982). В.В. Тужилкина (2001) утверждает, что воздействие загрязняющих веществ оказывает большее негативное влияние на процесс накопления хлорофилла *b* по сравнению с хлорофиллом *a*, что способно привести к угнетению активности фотосинтетической системы и нарушению метаболизма растительного организма.

Как показали результаты наших исследований (рисунок 14), количество хлорофилла *b* было значительно меньше, чем хлорофилла *a* у исследуемых видов хвойных растений, произрастающих в условиях г. Йошкар-Олы.



\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p < 0,05$ )

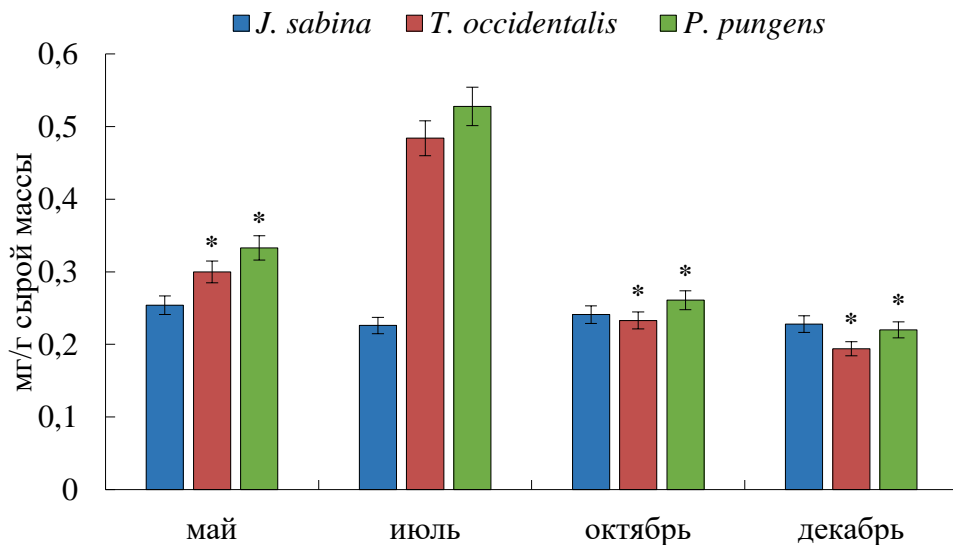
Рисунок 14 – Сезонная динамика содержания хлорофилла *b* в хвое растений, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Содержание хлорофилла *b* в хвое растений *J. sabina*, произрастающих в рекреационной зоне, в весенне-летний период составило 0,28 мг/г сырой массы. В октябре его содержание увеличилось на 20%, однако в декабре уровень снизился в 1,5 раза по сравнению с октябрём ( $p = 0,029$ ). Максимальная

концентрация данного пигмента (0,43 мг/г сырой массы) в хвое *T. occidentalis* была также в июле. В октябре содержание хлорофилла *b* было ниже на 43,7% ( $p=0,021$ ), а в декабре – на 46,5% ( $p=10^{-6}$ ) по сравнению с летними результатами. В хвое *P. pungens* максимальная концентрация хлорофилла *b* была определена в июле (0,56 мг/г сырой массы), в октябре данный показатель был меньше в 1,9 раза ( $p=10^{-6}$ ), а в декабре – в 2,5 раза ( $p=10^{-6}$ ) (рисунок 14).

В результате проведенного двухфакторного дисперсионного анализа было выявлено, что на содержание хлорофилла *b* в хвое хвойных растений, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы, оказывают влияние такие факторы как, «вид» ( $p=0,007$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «вид» × «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

На рисунке 15 представлены результаты по сезонной динамике содержания хлорофилла *b* в хвое растений, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы.



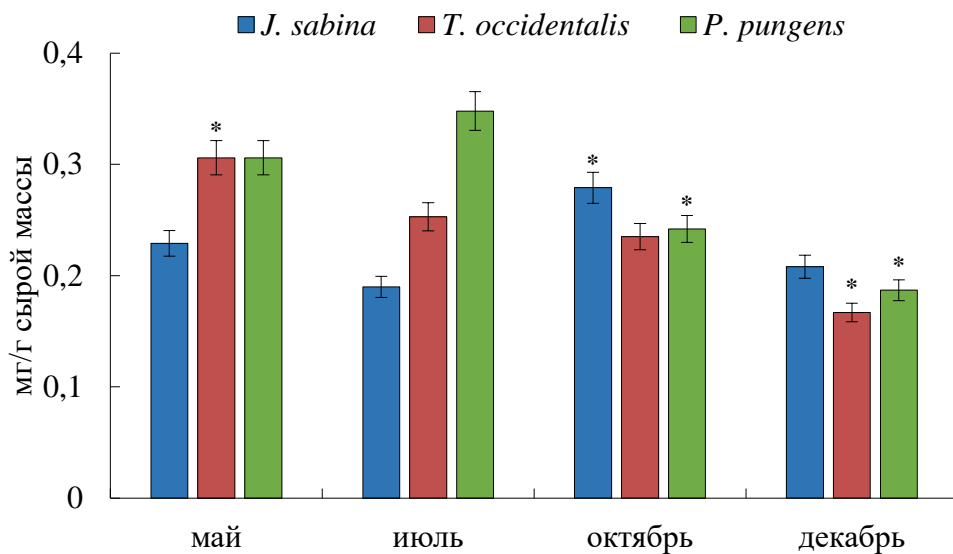
\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p<0,05$ )

Рисунок 15 – Сезонная динамика содержания хлорофилла *b* в хвое растений, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Содержание хлорофилла *b* у особей *J. sabina*, произрастающих в селитебной зоне, в зависимости от месяца исследования статистически значимых отличий не

было выявлено ( $p > 0,05$ ). Максимальные уровни данного пигмента у *T. occidentalis* были определены в июле (0,48 мг/г сырой массы), при этом в осенне-зимний период происходило значительное снижение его количества: в октябре уменьшилось в 2,1 раза ( $p = 0,02$ ), а в декабре – в 2,5 раза ( $p = 0,01$ ). Анализируя рисунок 15, можно отметить, что у *P. pungens* максимальные показатели содержания хлорофилла *b* приходились на июль (0,53 мг/г сырой массы), однако к декабрю этот показатель уменьшился в 2,4 раза ( $p = 10^{-6}$ ).

В ходе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа было выявлено, что на содержание хлорофилла *b* у хвойных растений, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы, оказывают влияние факторы: «вид» ( $p = 10^{-3}$ ), «месяц исследования» ( $p = 10^{-3}$ ), а также взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p = 10^{-3}$ ).



\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p < 0,05$ )

Рисунок 16 – Сезонная динамика содержания хлорофилла *b* в хвое растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Согласно рисунку 16, наименьшее количество хлорофилла *b* в хвое особей *J. sabina*, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, было определено в июле (0,19 мг/г сырой массы). В октябре произошло его увеличение

в 1,5 раза ( $p=0,004$ ), однако в декабре снова снизилось до 0,21 мг/г сырой массы. Наименьшее количество хлорофилла *b* в хвое особей *J. sabina*, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, было определено в июле (0,19 мг/г сырой массы). В октябре произошло его увеличение в 1,5 раза ( $p=0,004$ ), однако в декабре снова снизилось до 0,21 мг/г сырой массы (рисунок 16). В хвое растений *T. occidentalis* максимальный уровень содержания хлорофилла *b* установлен в мае (0,31 мг/г сырой массы). Начиная с июля, наблюдалась тенденция к постепенному уменьшению количественных показателей данного пигмента, достигнув снижения в 2,5 раза к декабрю ( $p=10^{-6}$ ). В хвое *P. pungens* содержание хлорофилла *b* колебалось в диапазоне от 0,19 до 0,35 мг/г сырой массы. Максимальная концентрация была определена в весенне-летний период (0,31–0,35 мг/г сырой массы). В осенне-зимний период содержания данного пигмента было меньше в 1,4–1,9 раза ( $p=0,001$ ).

Таким образом, в хвое *P. pungens* наибольшие значения содержания хлорофиллов были в июле во всех функциональных зонах. Наименьшее содержание суммы зеленых пигментов у трех видов хвойных отмечалось у растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы. Наши результаты подтверждаются данными, полученными О.М. Легощиной с соавторами (2016), изучившими адаптацию фотосинтетического аппарата хвои ели сибирской в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово.

Анализ содержания хлорофилла *b* в хвое растений показывает, что данный фотосинтезирующий пигмент также чувствителен к антропогенному загрязнению, как и хлорофилл *a*: на протяжении всей сезонной динамики при усилении степени антропогенного загрязнения происходит значительное уменьшение его содержания, кроме *J. sabina*.

Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ выявил, что на содержание хлорофилла *b* в хвое исследуемых видов, произрастающих в промышленной зоне, оказывают значимый эффект факторы «вид» ( $p=0,006$ ),

«месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ), а также значимо взаимодействие этих факторов «вид × месяц исследования» ( $p=0,019$ ).

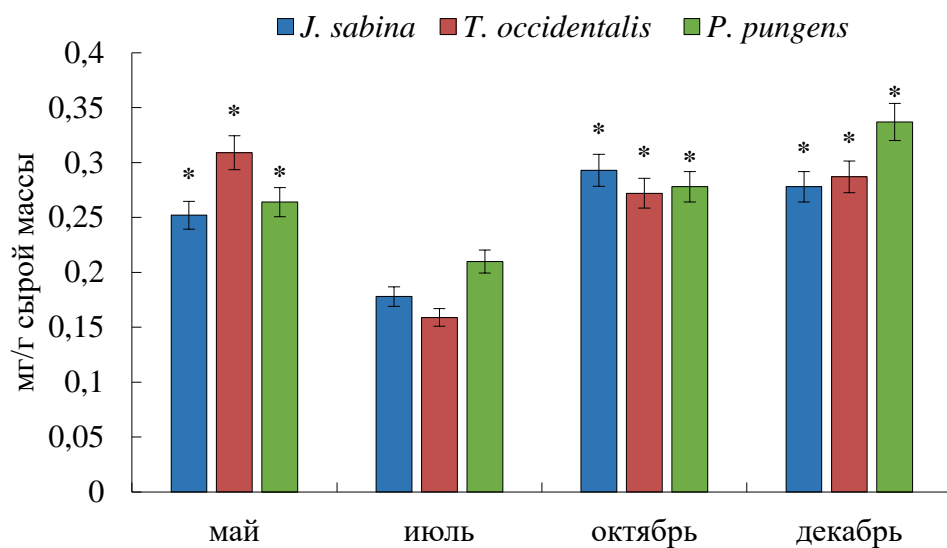
Установлены отрицательные корреляции содержания хлорофилла *b* в хвое *T. occidentalis* и *P. pungens* с содержанием  $SO_2$  ( $r_s = -0,40$ ,  $p < 0,05$  и  $r_s = -0,34$ ,  $p < 0,05$ ),  $NO_2$  ( $r_s = -0,34$ ,  $p < 0,05$  и  $r_s = -0,31$ ,  $p < 0,05$ ) и взвешенных веществ ( $r_s = -0,56$ ,  $p < 0,05$  и  $r_s = -0,47$ ,  $p < 0,05$ ) в атмосферном воздухе. Исключение составляет *J. sabina*, у которого не обнаружена взаимосвязь между содержанием данного пигмента и концентрацией загрязняющих веществ в атмосфере г. Йошкар-Олы. По результатам проведенных исследований можно заключить, что у хвойных растений в городских условиях снижается содержание хлорофиллов *a* и *b*.

#### **4.3.2 Содержание каротиноидов в хвойных растениях в сезонной динамике**

Каротиноиды представляют собой обязательные компоненты пигментной системы растений, играющие ключевую роль в функционировании фотосинтетического аппарата. Наряду с хлорофиллами, они участвуют в процессе сбора солнечной энергии в фотосистемах I и II, обеспечивая передачу собранной энергии от периферийных центров к реакционным центрам фотосинтеза. Они способствуют стабилизации белковых комплексов антенн и мембран хлоропластов, одновременно выполняя функцию защитных агентов против избытка возбужденной энергии посредством ее эффективного поглощения и рассеяния. Они действуют как эффективные тушители опасных состояний хлорофилла (триплетного состояния) и синглетного кислорода, минимизируя риск фотоингибирования. Помимо этого, каротиноиды играют важную роль в защите растений от негативных эффектов ультрафиолетового излучения, поскольку способны превращать энергию УФ-излучения в видимый спектр, вызывая эффект флуоресценции. Благодаря своим антиоксидантным свойствам, они

предотвращают окисление нестабильных органических соединений внутри клетки (Маслова и др., 2009; Сергейчик, 2015; Kirchgeßner et al., 2003; Jaleel et al., 2009).

Согласно рисунку 17, максимальный пик содержания каротиноидов в хвое растений *J. sabina*, произрастающих в рекреационной зоне, был в мае (0,38 мг/г сырой массы). В июле их уровень снизился на 42% ( $p=10^{-6}$ ); в октябре было определено увеличение концентрации относительно июльских значений на 24%. В зимний период (в декабре) содержание каротиноидов составляло 0,27 мг/г сырой массы.



\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p<0,05$ )

Рисунок 17 – Сезонная динамика содержания каротиноидов в хвое растений, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Максимальное значение содержания каротиноидов в хвое *T. occidentalis* было определено в мае (0,31 мг/г сырой массы), в июле их концентрация уменьшилась в 1,9 раза ( $p=10^{-6}$ ), а в осенне-зимнее время показатели были стабильными и варьировали незначительно в диапазоне от 0,27 до 0,29 мг/г сырой массы. Так, минимальное содержание каротиноидов в хвое *P. pungens* было определено в июле и составило 0,21 мг/г сырой массы (рисунок 17). Последующее

наблюдение показало тенденцию к увеличению концентрации указанного пигмента до декабря, достигнув пика (0,34 мг/г сырой массы).

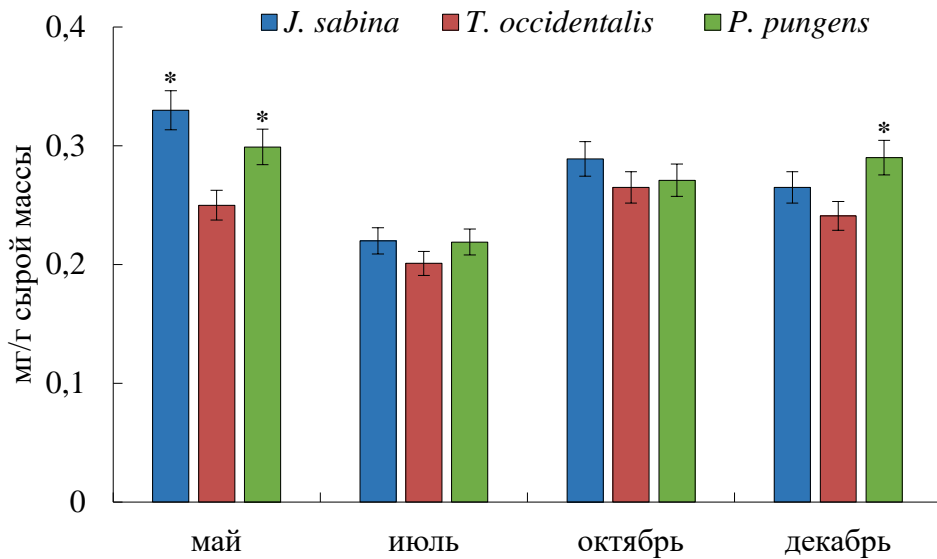
Таким образом, пигментный аппарат растений в зимние месяцы отличался повышенной концентрацией каротиноидов, превышавшей аналогичный показатель весенне-летнего периода примерно в 1,3 раза ( $p=0,04$ ). Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ выявил, что на содержание каротиноидов в хвое растений, произрастающих в рекреационной зоне, оказывало влияние фактор «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

При подавлении биосинтеза каротиноидов не формируются реакционные центры ФС II, листья у растений содержат ФС I с измененным пигментным аппаратом. Нарушение комплекса «хлорофилл *a* – каротин» приводит к уменьшению эффекта индукции флуоресценции, росту квантового выхода излучения и изменению нативных форм хлорофилла. Накопление каротиноидов повышает фотоустойчивость клеток. Каротиноиды в растениях при действии неблагоприятных факторов окружающей среды могут быть использованы в защитно-приспособительных реакциях путем участия непосредственно в качестве окислителей токсических веществ или путем активирования окислительного фосфорилирования и образования АТФ (Сергейчик, 2015).

На рисунке 18 показана сезонная динамика содержания каротиноидов в хвое растений, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы.

Максимальное содержание каротиноидов в хвое растений *J. sabina*, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы, было определено в мае (0,38 мг/г сырой массы). В июле исследуемый показатель снизился на 42% ( $p=0,046$ ), в октябре увеличился на 24%, по сравнению с летними данными, а в декабре составило 0,27 мг/г сырой массы. Наибольшее содержание каротиноидов в хвое *T. occidentalis* также было в мае (0,31 мг/г сырой массы), в июле его количество снизилось в 1,6 раза ( $p=10^{-6}$ ), а осенью, наоборот, увеличилось в 1,3 раза ( $p=0,035$ ); в декабре количество каротиноидов незначительно уменьшилось (рисунок 18). Содержание каротиноидов в хвое растений *P. pungens* имело два

пика – в мае и декабре (0,29 мг/г сырой массы). В июле было характерно снижение данного пигмента в 1,4 раза ( $p=0,016$ ).



\* – статистически значимые различия по сравнению с июлем ( $p<0,05$ )

Рисунок 18 – Сезонная динамика содержания каротиноидов в хвое растений, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Так, М.С. Титовой (2015) изучена сезонная динамика содержания каротиноидов в хвое представителей семейств кипарисовых и тисовых. Автором было установлено, что нарастание количества каротиноидов и наибольший пик накопления у всех видов наблюдался в зимние месяцы. На синтез пигмента влияет видовая специфичность и климатические особенности района произрастания. Среди аборигенных видов максимальное содержание каротиноидов отмечается у можжевельника твердого и тиса остроконечного, среди интродуцентов – у тиса остроконечного формы «низкий» и у кипарисовика Лавсона.

Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ выявил, что на содержание каротиноидов в хвое хвойных растений, произрастающих в селитебной зоне, оказывало влияние фактор «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

Как видно из рисунка 19, у растений *J. sabina*, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, наибольшее количество каротиноидов было

в мае (0,33 мг/г сырой массы); в июле было ниже в 1,5 раза, а в осенне-зимний период – выше в 1,3 раза. В хвое растений *T. occidentalis* максимум концентрации был в мае (0,80 мг/г сырой массы). Количество каротиноидов в июле снизилось в 1,7 раза. В осенне-зимний период их содержание увеличилось на 18% по сравнению с летними значениями. У растений *P. pungens* наибольшее содержание каротиноидов было в мае (0,30 мг/г сырой массы), в июле их содержание было ниже в 1,6 раза. В осенне-зимний период их количество составило 0,23 мг/г сырой массы.

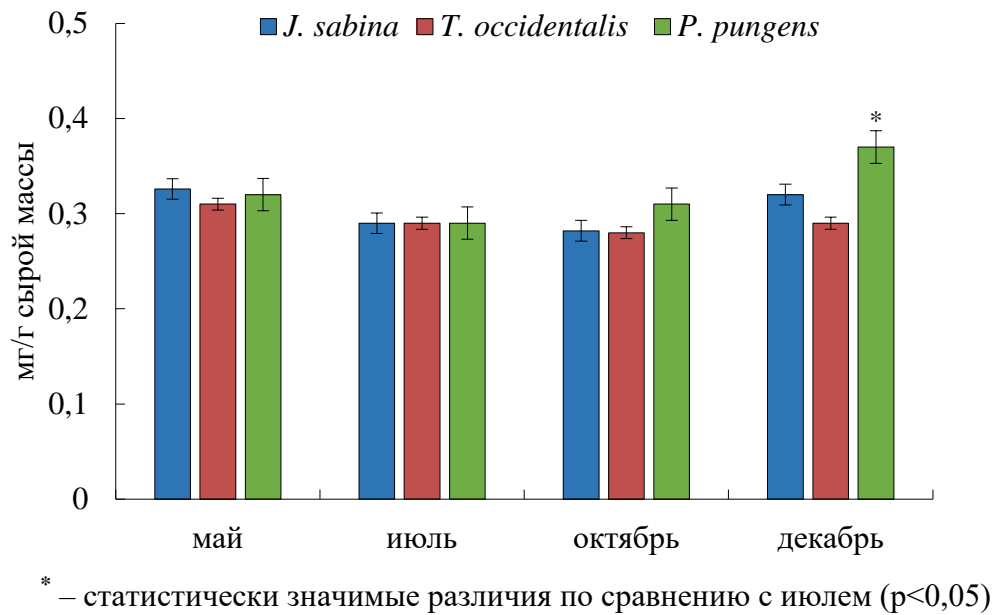


Рисунок 19 – Сезонная динамика содержания каротиноидов в хвое растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

По мнению М.С. Титовой (2010), Т.А. Беловой, А.Н. Краснопивцевой (2016), Е.А. Тишкиной, Л.П. Абрамовой (2018), высокие показатели содержания каротиноидов весной и зимой обусловлены повышенным уровнем инсоляции. В этот период желтые пигменты в большей степени выполняют защитную функцию, т.е. сохраняют хлорофиллы от избытка солнечной радиации, в остальное же время они действуют как пигменты, дополнительно поглощающие свет для фотосинтетических процессов.

Так, в отличие от зеленых пигментов, количество каротиноидов в осенне-зимний период у исследуемых видов хвойных растений имело тенденцию к росту.

В результате двухфакторного дисперсионного анализа данных установлено, что на содержание каротиноидов в хвое хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне, влияют факторы: «вид» ( $p=0,017$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

Установлены положительные корреляции содержания каротиноидов в хвое *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* с концентрацией  $SO_2$  в атмосферном воздухе ( $r_s=0,49$ ,  $p<0,05$ ,  $r_s=0,51$ ,  $p<0,05$ ;  $r_s=0,45$ ,  $p<0,05$ ),  $NO_2$  ( $r_s=0,40$ ,  $p<0,05$ ,  $r_s=0,47$ ,  $p<0,05$ ;  $r_s=0,35$ ,  $p<0,05$ ), взвешенными веществами ( $r_s=0,51$ ,  $p<0,05$ ,  $r_s=0,49$ ,  $p<0,05$ ;  $r_s=0,62$ ,  $p<0,05$ ).

Молекулы хлорофилла характеризуются функциональной гетерогенностью: одни участвуют непосредственно в составе реакционных центров фотосистем, тогда как другие обеспечивают исключительно светособирающие функции. Следовательно, исследование общего содержания фотосинтетических пигментов недостаточно полно отражает картину функционирования пигментного аппарата листа. Значимым представляется детальное изучение количественных пропорций между различными формами хлорофилла и каротиноидов внутри комплекса, поскольку именно такие взаимоотношения определяют эффективность поглощения света и передачи энергии электронов в процессе фотосинтеза.

Таким образом, сезонная динамика содержания каротиноидов в хвое *P. pungens* среди исследуемых видов растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Йошкар-Олы, в течение года изменялась в меньшей степени по сравнению с хлорофиллами *a* и *b*.

#### 4.3.3 Соотношения фотосинтетических пигментов хвойных растений

Отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b*. О степени функциональности фотосинтетического аппарата, как правило, судят по отношению хлорофилла *a* к

хлорофиллу *b*. Чем выше доля хлорофилла *a* в этом отношении, тем активнее протекает фотосинтез. В норме данный показатель соответствует 2,0–3,0 (Мокроносков, 1992; Ладыгин, 2006; Тишкина, Абрамова, 2018).

В таблице 7 представлены рассчитанные нами результаты соотношения хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* в хвое растений. Отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* в хвое исследуемых видов, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы, изменялось следующим образом (таблица 7): у *J. sabina* – от 2,66 (июль) до 3,27 (декабрь); у *T. occidentalis* – от 2,06 (июль) до 2,97 (декабрь); у *P. pungens* – от 1,54 (июль) до 2,87 (декабрь). Таким образом, минимальные значения наблюдались в июле, а максимальные – в декабре.

Таблица 7 – Сезонная динамика изменения соотношения хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* в хвое растений (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Функциональная зона	Месяц исследования	Исследуемые виды		
		<i>J. sabina</i>	<i>T. occidentalis</i>	<i>P. pungens</i>
Рекреационная	май	2,76 ± 0,149	2,69 ± 0,133	2,46 ± 0,101
	июль	2,66 ± 0,160	2,06 ± 0,125	1,54 ± 0,044
	октябрь	2,83 ± 0,209	2,88 ± 0,050	2,62 ± 0,049
	декабрь	3,27 ± 0,058	2,97 ± 0,049	2,87 ± 0,165
Селитебная	май	2,85 ± 0,120	2,75 ± 0,082	2,56 ± 0,059
	июль	3,28 ± 0,258	1,86 ± 0,157	1,56 ± 0,050
	октябрь	3,07 ± 0,059	2,89 ± 0,056	2,49 ± 0,253
	декабрь	3,17 ± 0,075	3,01 ± 0,091	2,83 ± 0,041
Промышленная	май	2,94 ± 0,059	2,87 ± 0,048	2,69 ± 0,111
	июль	3,41 ± 0,034	2,96 ± 0,259	1,91 ± 0,076
	октябрь	2,87 ± 0,164	2,92 ± 0,080	2,42 ± 0,205
	декабрь	3,34 ± 0,052	2,79 ± 0,127	2,79 ± 0,039

В ходе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа выяснили, что на отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* хвойных интродуцентов, произрастающих в рекреационной зоне, оказывают влияние факторы: «вид» ( $p=10^{-3}$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

У растений *J. sabina*, произрастающих в селитебной зоне (таблица 7), данный показатель изменялся от 2,85 (май) до 3,28 (июль). У особей *T. occidentalis* и *P. pungens* наблюдали такую же тенденцию, как и у растений, произрастающих в рекреационной зоне: минимальные значения были в июле (1,86 и 1,56), а максимальные – в декабре (3,01 и 2,83).

В ходе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа обнаружили, что на отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* хвойных растений, произрастающих в селитебной зоне, оказывают влияние факторы «вид» ( $p=10^{-3}$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

У особей *J. sabina*, произрастающих в промышленной зоне, наибольшие значения данного соотношения были в июле и декабре (3,4), а наименьшие – в мае и октябре (2,9). У *T. occidentalis* значимых различий по изменению отношения хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* по сезонам года не обнаружено ( $p>0,05$ ). У *P. pungens* данный показатель изменялся, как и у растений, произрастающих в рекреационной зоне: наибольшие значения – в декабре (2,7), наименьшие – в июле (1,9) (таблица 7).

В ходе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа обнаружили, что на исследуемое отношение хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне, оказывают влияние факторы «вид» ( $p=10^{-3}$ ), «месяц исследования» ( $p=0,034$ ) и взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

Таким образом, в целом динамика соотношения хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* у растений *T. occidentalis* и *P. pungens* в различные сезоны года и в зависимости от функциональных зон имела сходную тенденцию (таблица 7), а у растений *J. sabina* исследуемый показатель был более стабильным.

Отношение суммы хлорофиллов ( $a+b$ ) к каротиноидам имеет не менее важную роль при характеристике функционирования фотосинтетического аппарата. Это отношение в норме стабильно и быстро реагирует на изменения различных

факторов среды (Сарбаева, Воскресенская, 2008; Титова, 2010). Для высших растений величина этого соотношения изменяется от 4,6 до 8 (Ладыгин, 2006).

Отношения суммы хлорофиллов к каротиноидам у хвойных растений, произрастающих в рекреационной зоне, были следующими (таблица 8): у растений *J. sabina* наибольшие значения были характерны в июле (5,8), а наименьшие – в декабре (3,6); у особей *T. occidentalis* максимальное – в июле (8,4), а в остальные месяцы данное отношение находилось почти на одном уровне (3,2); у растений *P. pungens* наибольшее значение было отмечено в летний период (6,9), а наименьшее – в декабре (3,3). Уменьшение отношения суммы хлорофиллов к каротиноидам может свидетельствовать о снижении светособирающей способности пигментного комплекса.

Таблица 8 – Отношение суммы хлорофиллов ( $a+b$ ) к каротиноидам (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Функциональная зона	Месяц исследования	Исследуемые виды		
		<i>J. sabina</i>	<i>T. occidentalis</i>	<i>P. pungens</i>
Рекреационная	май	3,86±0,134	3,66±0,083	3,81±0,121
	июль	5,79±0,471	8,39±0,505	6,86±0,293
	октябрь	3,75±0,211	3,49±0,253	3,79±0,099
	декабрь	3,58±0,380	3,20±0,087	4,31±1,102
Селитебная	май	2,81±0,169	3,47±0,117	3,93±0,069
	июль	4,34±0,259	7,64±0,964	6,45±0,299
	октябрь	3,38±0,089	3,35±0,116	3,43±0,304
	декабрь	3,74±0,287	3,12±0,076	3,48±0,439
Промышленная	май	3,16±0,208	3,81±0,265	3,62±0,041
	июль	4,07±0,354	4,88±0,483	5,65±0,599
	октябрь	4,31±1,019	3,64±0,292	3,93±0,244
	декабрь	3,58±0,380	3,12±0,065	4,20±0,629

В результате двухфакторного дисперсионного анализа данных установили, что на отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам в хвое хвойных растений, произрастающих в рекреационной зоне, влияют факторы «вид» ( $p=0,015$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

Анализируя данное отношение у хвойных видов растений, произрастающих в селитебной части г. Йошкар-Олы (таблица 8), обнаружили, что у *J. sabina* максимальные значения были выявлены в июле (4,3), а минимальные – в мае (2,8); у растений *T. occidentalis*: наибольшие значения в июле (7,6), а в остальные месяцы было почти на одинаковом уровне (3,1); у растений *P. pungens*: наибольшие значения в летний период (6,5), а наименьшие – в октябре и декабре (3,4).

В результате двухфакторного дисперсионного анализа данных установили, что на отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам в хвое хвойных растений, произрастающих в селитебной зоне, влияют факторы «вид» ( $p=10^{-3}$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ).

Для хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне, по исследуемому показателю характерно следующее (таблица 8): у *J. sabina* в июле и октябре наблюдалось увеличение соотношения хлорофиллов к каротиноидам до 4,3, а в декабре уменьшилось на 16%. У растений *T. occidentalis* была аналогичная тенденция, как и в остальных районах исследования, но отношение данного показателя значительно ниже, чем в рекреационной зоне: в мае на 6,5%, в июле на 23,5%, в октябре на 5,5%, в декабре на 31,3%. У особей *P. pungens* данный показатель изменялся также как и у *T. occidentalis*.

Как показали результаты двухфакторного дисперсионного анализа, на отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам в хвое хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне, влияют факторы «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p=0,015$ ).

Исследования, проведенные Г.Н. Чупахиной с соавторами (2012) свидетельствуют о негативном влиянии повышенных автомобильных выхлопов на процессы синтеза фотосинтетических пигментов у деревьев видов *P. abies* и *T. cordata*. Установлено, что выбросы автотранспорта приводят к значительному уменьшению уровня накопления хлорофилла *b* по сравнению с хлорофиллом *a*,

повышению коэффициента соотношения хлорофилл *a*/хлорофилл *b*, а также снижению величины отношения суммы хлорофиллов *a* и *b* к сумме каротиноидов.

Также нами рассчитана доля хлорофилла *b* в ССК хвойных растений, произрастающих в условиях г. Йошкар-Олы (таблица 9). Как показали наши результаты исследований (таблица 9), доля хлорофиллов, локализованных в ССК, у хвойных растений, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы, изменялась следующим образом: в хвое растений *J. sabina* наибольшие значения доли хлорофиллов были в июле и октябре (0,62–0,63), а в декабре снизилось в 1,2 раза; в хвое особей *T. occidentalis* исследуемый параметр изменялся от 0,55 до 0,73 от общего фонда зеленых пигментов, минимальные значения были отмечены в осенне-зимний период (0,55), а максимальное – в июле (0,73); в хвое растений *P. pungens* доля хлорофиллов, локализованных в ССК, изменялась от 0,59 до 0,87 от общего фонда зеленых пигментов: наименьшие значения были отмечены в декабре (0,59), а максимальные – в июле (0,87) (таблица 9). По-видимому, повышенное содержание антенного хлорофилла компенсирует низкий уровень накопления зеленых пигментов.

Таблица 9 – Доля хлорофилла *b* в светособирающем комплексе хвойных растений (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Функциональная зона	Месяц исследования	Исследуемые виды		
		<i>J. sabina</i>	<i>T. occidentalis</i>	<i>P. pungens</i>
Рекреационная	май	0,60±0,033	0,59±0,027	0,64±0,019
	июль	0,61±0,025	0,73±0,032	0,87±0,015
	октябрь	0,63±0,071	0,57±0,008	0,61±0,008
	декабрь	0,52±0,008	0,55±0,019	0,59±0,031
Селитебная	май	0,58±0,019	0,59±0,016	0,61±0,011
	июль	0,54±0,032	0,79±0,034	0,87±0,018
	октябрь	0,54±0,008	0,57±0,008	0,58±0,012
	декабрь	0,53±0,010	0,55±0,014	0,65±0,073
Промышленная	май	0,56±0,008	0,57±0,007	0,61±0,028
	июль	0,49±0,003	0,59±0,041	0,76±0,020
	октябрь	0,58±0,031	0,57±0,013	0,63±0,033
	декабрь	0,50±0,006	0,57±0,019	0,58±0,006

У хвойных растений, произрастающих в селитебной зоне г. Йошкар-Олы, по исследуемому показателю наблюдали следующее (таблица 9): наибольший показатель доли хлорофиллов, локализованных в ССК, у растений *J. sabina* был определен в мае (0,58), в остальные месяцы данный параметр был на одинаковом уровне (0,54); доля хлорофиллов, локализованных в ССК, у растений *T. occidentalis* варьировала от 0,56 до 0,80 от общего фонда зеленых пигментов (таблица 9), наименьшее значение было отмечено в осенне-зимний период (0,56), а наибольшее – в июле (0,80); у *P. pungens* максимальные значения по данному показателю были отмечены в июле (0,87), минимальные – в октябре (0,59).

Доля хлорофилла *b* в светособирающем комплексе у хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне, изменялась следующим образом: у растений *J. sabina* и *T. occidentalis* статистически значимых различий по исследуемому показателю не выявлено ( $p > 0,05$ ); *P. pungens* наибольший показатель доли хлорофиллов, локализованных в ССК, отмечен в июле (0,76), наименьший – в декабре (0,58).

Также рассчитывали сумму хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов в хвое исследуемых видов хвойных растений (рисунок 20–22).

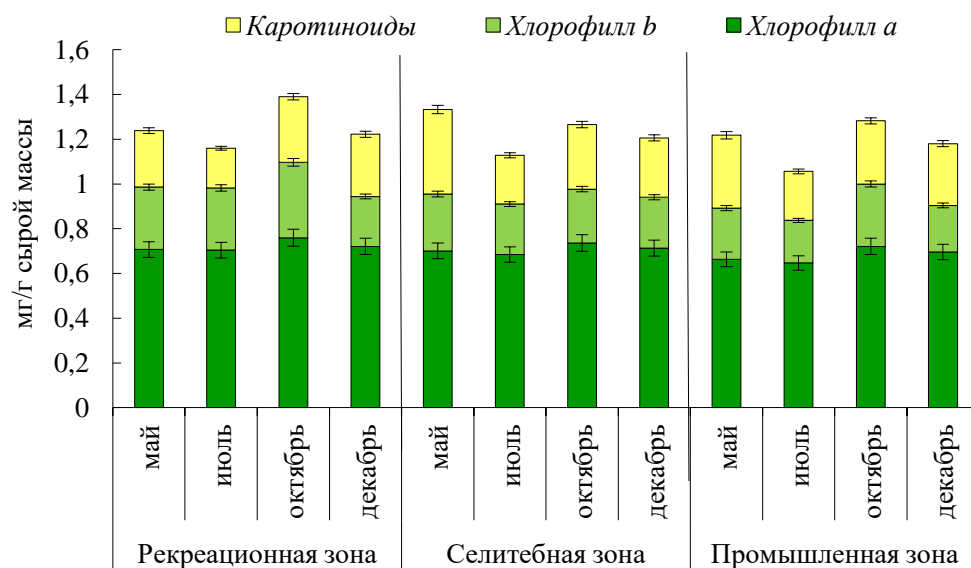


Рисунок 20 – Сезонное изменение содержания суммы хлорофиллов и каротиноидов в хвое *J. sabina* (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

В ходе исследования у растений *J. sabina*, произрастающих в рекреационной зоне (рисунок 20), пик фотосинтезирующих пигментов приходился на осенний период (1,4 мг/г сырой массы); в июле было зарегистрировано наименьшее значение суммы всех пигментов (1,2 мг/г сырой массы). У особей *J. sabina*, произрастающих в селитебной зоне, исследуемый показатель изменялся в сезонной динамике незначительно (рисунок 20): в мае было максимальное значение (1,3 мг/г сырой массы), в июле меньше на 15%, в октябре и декабре увеличилось незначительно. У растений, произрастающих в промышленной зоне, наибольшие значения суммы фотосинтезирующих пигментов были так же, как и в рекреационной зоне, в октябре (1,3 мг/г сырой массы); в декабре содержание суммы фотосинтезирующих пигментов уменьшилось на 8%.

В результате проведенного двухфакторного дисперсионного анализа на сумму пигментов в хвое *J. sabina* было выявлено, что значимое влияние оказывают факторы: «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и «функциональная зона» ( $p=0,022$ ).

Содержание суммы хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов в хвое *T. occidentalis*, произрастающих в рекреационной зоне (рисунок 21), изменялось в сезонной динамике от 1,0 до 1,5 мг/г сырой массы. Наибольшее накопление суммы всех пигментов было в мае (1,5 мг/г сырой массы) и в июле (1,4 мг/г сырой массы), далее в октябре и декабре их сумма была ниже в 1,3 раза.

У особей *T. occidentalis*, произрастающих в селитебной зоне (рисунок 21), сумма хлорофиллов и каротиноидов также была ниже в течение вегетационного периода. Так, наибольшее количество пигментов обнаружено в июле (1,50 мг/г сырой массы), а наименьшее – в декабре (1,0 мг/г сырой массы). В ходе анализа содержания суммы фотосинтезирующих пигментов в хвое растений *T. occidentalis*, произрастающих в промышленной части г. Йошкар-Олы (рисунок 21), выявили, что также, как и в других зонах, максимальный пик накопления пигментов был в мае – 1,40 мг/г сырой массы, а минимальное – в декабре (0,84 мг/г сырой массы).

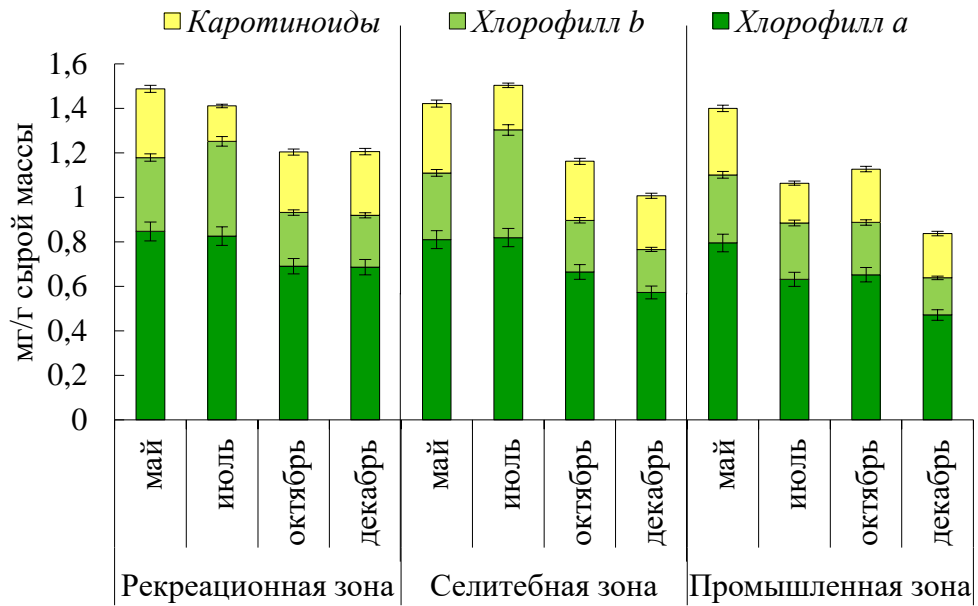


Рисунок 21 – Сезонное изменение содержания суммы фотосинтезирующих пигментов в хвое *T. occidentalis* (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

В ходе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа данных было установлено, что на содержание суммы хлорофиллов и каротиноидов в хвое туи западной влияют факторы: «функциональная зона» ( $p=10^{-3}$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ), а также взаимодействие этих факторов «функциональная зона» × «месяц исследования» ( $p=0,003$ ).

С переходом в состояние зимнего покоя, содержание хлорофиллов у *T. occidentalis* в исследуемых зонах по сравнению с летним периодом снижалось следующим образом: в рекреационной – на 42,1%, в селитебной – на 43,9%, в промышленной – на 36,6%, что свидетельствует о замедлении синтеза зеленых пигментов.

Динамика содержания пигментов в хвое у растений *P. pungens*, произрастающих в различных функциональных зонах, также различна (рисунок 22).

Содержание каротиноидов у растений, произрастающих в рекреационной зоне, было в 4,3 раза меньше, чем суммы хлорофиллов *a* и *b*. У *P. pungens* пул фотосинтезирующих пигментов наиболее высокого значения (1,60 мг/г сырой массы) достигал в весенне-летний период, каротиноидов (0,34 мг/г сырой массы)

– зимой. Начиная с июля, происходило постепенное снижение в 1,4 раза суммы пигментов до 1,12 мг/г сырой массы в декабре.

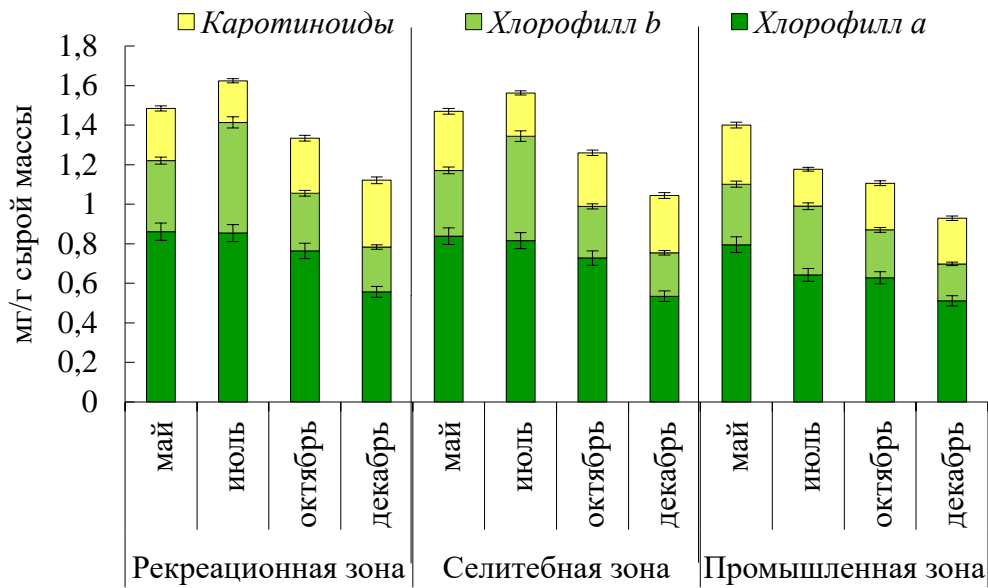


Рисунок 22 – Сезонное содержание суммы хлорофиллов и каротиноидов в хвое *P. pungens* (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Содержание суммы хлорофиллов *a+b* и каротиноидов в хвое *P. pungens*, произрастающей в селитебной зоне, изменялось в сезонной динамике от 1,0 до 1,60 мг/г сырой массы. По накоплению исследуемого показателя наблюдалась такая же тенденция, как и у растений, произрастающих в рекреационной зоне.

Несколько иная картина наблюдалась у растений *P. pungens*, произрастающих в промышленной зоне (рисунок 22): наибольшие значения накопления суммы всех пигментов приходились на май (1,40 мг/г сырой массы), наименьшее – в декабре (0,9 мг/г сырой массы). Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ выявил, что на сумму зеленых и желтых пигментов в хвое растений *P. pungens* оказывают влияние такие факторы как «функциональная зона» ( $p=10^{-3}$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «функциональная зона» × «месяц исследования» ( $p=0,015$ ).

С переходом в состояние зимнего покоя содержание хлорофиллов у *P. pungens* в исследуемых зонах по сравнению с летним периодом снижалось следующим образом: в рекреационной – на 42,1%, в селитебной – на 43,9%, в

промышленной – на 36,6%, что свидетельствует о замедлении синтеза зеленых пигментов. В декабре зарегистрировали снижение величины соотношения суммы хлорофиллов к каротиноидам, что свидетельствует об увеличении в пигментном аппарате *P. pungens* относительного содержания каротиноидов, выполняющих защитную функцию (Тужилкина, 2017). Уменьшение количества пигментов у хвойных растений зимой отмечалось и другими исследователями (Титова, 2010; Тужилкина, 2017; Lewandowska, Jarvis, 1977).

О.А. Дубровина и Т.В. Зубкова (2020) установили видовые особенности по содержанию фотосинтетических пигментов в хвое ели колючей и туи западной в период вегетации. Сумма пигментов в мае была больше в хвое *P. pungens*.

В ходе проведенного трехфакторного дисперсионного анализа было показано, что на сумму фотосинтезирующих пигментов у хвойных растений оказывают влияние факторы: «вид» ( $p=0,01$ ), «месяц исследования» ( $p=10^{-6}$ ), «функциональная зона» ( $p=10^{-6}$ ) и взаимодействие факторов «вид × месяц исследования» ( $p=10^{-6}$ ), «вид» × «месяц исследования» × «функциональная зона» ( $p=0,004$ ).

Полученные нами результаты согласуются с результатами других исследователей. Например, исследования М.С. Титовой (2013), Е.А. Тишкиной (2015), посвященные изучению сезонной динамики фотосинтетической активности хвои растений в природных экосистемах, продемонстрировали аналогичную закономерность: максимальное накопление зеленых пигментов отмечалось летом, далее наступал этап постепенного снижения концентрации хлорофиллов *a* и *b* в осенне-зимний период, одновременно фиксировалось повышение содержания каротиноидных пигментов.

И.Л. Бухарина с соавторами (2013) отмечают, что характер изменений пигментного аппарата листьев растений, произрастающих в условиях с разной степенью техногенной нагрузки видоспецифичен.

Снижение содержания хлорофиллов в хвое изученных видов в зимний период, возможно обусловлено частичным разрушением хлорофилл-белковых комплексов под действием низких температур. Некоторые авторы (Ладанова, Тужилкина, 1992; Титова, 2010, 2015) связывают со структурно-функциональной

перестройкой, наблюдаемой в клетках мезофилла хвойных при подготовке к периоду покоя. С наступлением осени в клетках хлоренхимы происходит исчезновение крахмальных зерен, изменение формы, размеров и месторасположение зеленых пластид, которые перемешиваются к центральной части клетки и группируются вокруг ядра, что снижает поглощение световой энергии.

По мнению Т.Н. Годнева с соавторами (1969), фотосинтетические пигменты у хвойных в зимнее время образуются при температуре не ниже  $-2^{\circ}\text{C}$ .

Растения, произрастающие в городской среде, подвергаются воздействию сложного комплекса стрессовых факторов, включающего почвенную и атмосферную засуху, дефицит либо избыток освещенности, экстремальные температуры окружающей среды, солевое загрязнение почвы, механическое уплотнение грунта в прикорневой зоне, токсичные выбросы автотранспортных средств и промышленных объектов. Данные факторы оказывают существенное влияние на изменение количественной концентрации фотосинтетических пигментов в ассимиляционных структурах растений (Сарбаева, Воскресенская, 2008; Тужилкина, 2009; Белова, Краснопивцева, 2016; Афанасьева, 2018).

А.Ю. Овсянников (2015) указывает, что в целом сезонные изменения содержания пигментов можно охарактеризовать как летнее увеличение с достижением максимума – летом и зимнее снижение с минимальным уровнем – декабре. Кроме того, в сезонной динамике у *P. pungens* и *P. obovata* отмечен ряд видовых особенностей.

Таким образом, в результате проведенных исследований выяснили, что содержание фотосинтетических пигментов в хвое изученных видов растений, произрастающих в условиях г. Йошкар-Олы, зависит от видовых особенностей, функциональной зоны и сезона года.

У растений *J. sabina*, *T. occidentalis*, *P. pungens*, произрастающих в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы, содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов, отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b*, отношение суммы хлорофиллов *a+b* к каротиноидам, сумма всех фотосинтезирующих пигментов была наибольшей по сравнению с остальными районами исследования.

Исследование влияния степени антропогенной нагрузки на содержание фотосинтетических пигментов в хвое представителей хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, позволило установить следующее: с ростом техногенного воздействия наблюдается достоверное уменьшение суммы как зеленых, так и желтых пигментов по сравнению с растениями, произрастающими в рекреационной и селитебной зонах. Возможно, определяющее воздействие на содержание фотосинтетических пигментов оказывает не только степень загрязнения среды, но и особенности локального микроклимата соответствующих зон.

**Заключение.** Таким образом, в ходе исследования сезонной динамики содержания фотосинтетических пигментов у хвойных растений, произрастающих в различных функциональных зонах г. Йошкар-Олы, выяснили следующее: в целом содержание пигментов в различные сезоны года можно охарактеризовать как летнее увеличение с достижением максимума в июле и зимнее снижение с минимальным уровнем в декабре.

По содержанию суммы фотосинтетических пигментов хвойные виды, произрастающие в г. Йошкар-Оле, располагаются в следующем убывающем порядке: *P. pungens* > *T. occidentalis* > *J. sabina*.

#### **4.4 Анализ активности окислительно-восстановительных ферментов у изучаемых растений**

При исследовании адаптационных механизмов растений к стрессовым условиям окружающей среды значительное внимание уделяется оценке активности антиоксидантных ферментов, выполняющих функции предотвращения образования активных форм кислорода (АФК) или их нейтрализации (Симонова и др., 2016).

Растения, произрастающие в неблагоприятных условиях окружающей среды, испытывают значительный стресс, затрагивающий их биохимический состав и, как следствие, их жизнедеятельность. Загрязнение окружающей среды,

приводящее к поступлению в клетки растений различных загрязняющих веществ, является причиной накопления токсичных соединений и может вызвать целый каскад биохимических нарушений. Одним из наиболее существенных последствий такого стресса является перекисное окисление липидов (ПОЛ).

ПОЛ запускается избытком активных форм кислорода (АФК). Эти высокореактивные молекулы, включающие в себя гидроксильный радикал ( $\text{OH}^*$ ), свободные радикалы  $\text{NO}_2^*$ ,  $\text{RO}^*$ ,  $\text{ROO}^*$ , супероксидный анион-радикал ( $\text{O}_2^{*-}$ ), синглетную форму кислорода ( $^1\text{O}_2$ ) и перекись водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Колупаев и др., 2019; Петухов и др., 2019), в обычных условиях присутствуют в клетках в низких концентрациях: гидроперекисный радикал – менее  $10^{-11}$  М, супероксид – около  $10^{-7}$  М, а пероксид водорода –  $10^{-8}$  М. Однако, под воздействием стрессовых факторов, их количество резко возрастает, что и приводит к развитию ПОЛ (Петухов и др., 2019).

Важно отметить, что разные факторы, такие как засуха, засоление почвы, воздействие тяжелых металлов, изменение температурного режима и ультрафиолетового излучения, могут привести к значительному увеличению уровня АФК. Разрушительное действие АФК распространяется на все основные биополимеры клетки: белки, нуклеиновые кислоты, углеводы и липиды клеточных мембран. Повреждение липидов приводит к изменению их структуры и свойств, что, в свою очередь, сказывается на проницаемости мембран. Увеличение проницаемости мембран для  $\text{H}^+$  – критически важный аспект ПОЛ. Нарушение протонного градиента через мембраны нарушает работу митохондрий – «энергетических станций» клетки – снижая эффективность синтеза аденозинтрифосфата (АТФ), являющегося основным источником энергии для всех клеточных процессов. В результате развивается энергетический дефицит, который может привести к гибели клетки. Более того, сильное окисление липидов может вызвать электрический пробой клеточной мембраны, полностью разрушая ее барьерную функцию и приводя к необратимым последствиям для клетки (Петухов и др., 2019).

Так, летальные концентрации кислых газов вызывают быструю инактивацию многих ферментов и фиксацию клеток без разрушения пигментов

вследствие чисто химического отравления, гидролиза и окислительного распада важных биологических белковых структур клетки (Михайлова и др., 2013).

Например, механизм токсичного действия кислых газов на растения заключается в неспецифическом нарушении деятельности многих ферментов в клетках вследствие подкисления и нарушениях ионного режима, метаболизма и накопления балластных и, вероятно, токсических продуктов, в разрушении фотосинтетических структур, в нарушении электронно-транспортных путей, в миграции энергии от пигментов к центрам их использования, в уменьшении использования световой энергии на восстановительные процессы и появлении автокаталитических цепных реакций свободнорадикального фотодинамического окисления. Окислительный стресс – это сложное химическое и физиологическое явление, сопровождающий практически все биотические и абиотические стрессы у высших растений и развивается в результате перепроизводства и накопления АФК (Гирс, 1989; Воскресенский, Воскресенская, 2011б; Demidchik, 2015).

Для защиты от негативного воздействия АФК и предотвращения развития ПОЛ в клетках растений существует антиоксидантная система. Она включает в себя как неферментные, так и ферментные компоненты. К неферментным антиоксидантам относятся различные соединения, способные нейтрализовать АФК: флавоноиды, каротиноиды, фенолы, пролин, глутатион и аскорбиновая кислота. Эти молекулы действуют как «поглотители» свободных радикалов, предотвращая их дальнейшее разрушительное воздействие; ферментные антиоксиданты: каталаза, супероксиддисмутаза и пероксидазы (Войцековская и др., 2013; Колупаев и др., 2019; Петухов и др., 2019).

За биохимическими и физиологическими реакциями у растений на антропогенное воздействие можно следить по изменениям активности антиоксидантных ферментов. В клетках растений усиливается образование АФК, что в дальнейшем может привести к усилению окислительных процессов, к окислительному стрессу (Симонова, Чемаркин, 2013).

К числу ключевых антиоксидантных ферментов относятся железосодержащие оксидазы – пероксидаза и каталаза (Карасев и др., 2015;

Симонова и др., 2016). Так, каталаза эффективно разлагает перекись водорода ( $H_2O_2$ ) на воду и кислород, предотвращая ее участие в реакциях ПОЛ. Супероксиддисмутаза нейтрализует супероксидный анион-радикал ( $O_2^{\cdot-}$ ), превращая его в менее опасную перекись водорода, которая затем утилизируется каталазой. Пероксидазы участвуют в обезвреживании различных органических гидропероксидов, предотвращая их участие в окислительных реакциях. Эффективность работы антиоксидантной системы является критическим фактором в способности растений выживать и адаптироваться к неблагоприятным условиям. Нарушение работы этой системы может привести к накоплению АФК, усилению ПОЛ и, в конечном итоге, к гибели растений (Петухов и др., 2019).

Анализ активности ферментов имеет особое значение при оценке уровня физиологического состояния растений (Боголицын и др., 2013). Наиболее часто при изучении устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды учитывается активность антиоксидантных ферментов. Например, каталаза и пероксидаза являются довольно чувствительными показателями изменения окислительно-восстановительных условий среды (Серебрякова и др., 2015).

Поэтому изучение механизмов действия антиоксидантной системы и путей ее регуляции имеет важное значение для понимания стрессоустойчивости растений и разработки методов повышения их продуктивности в условиях загрязненной окружающей среды.

#### **4.4.1 Изменение активности каталазы хвойных растений в городских условиях**

*Каталаза (КФ 1.11.1.6)* – это железосодержащий фермент, играющий жизненно важную роль в метаболизме живых организмов, особенно распространенная в растительных клетках. Ее ключевая функция – нейтрализация перекиси водорода ( $H_2O_2$ ) с выделением молекулярного кислорода и воды. Такие же функции в живых тканях выполняют и пероксидазы, функционирующие

только при относительно низком уровне пероксида. Однако каталаза имеет низкое сродство к перекиси водорода, из-за этого начинает функционировать только при высоком ее содержании в клетке. Это принципиальное различие обусловлено особенностями активного центра и механизма действия этих ферментов.

Каталаза также проявляет умеренную пероксидазную активность, т.е. катализирует реакции окисления  $H_2O_2$  различных доноров электронов, среди которых этанол и др. В этом случае перекись водорода выступает в качестве акцептора электронов, а окисляемое соединение (донор электронов) подвергается превращению (Воскресенская, Сарбаева, 2006; Воскресенский, Воскресенская, 2011б; Карасев и др., 2015; Серебрякова и др., 2015; Петухов и др., 2019; Mhamdi et al., 2010).

Каталаза является хромопротеидом и имеет в качестве небелковой группы окисленный гем. Одна молекула каталазы способна вызвать разрушение  $6 \times 10^6$  молекул  $H_2O_2$  в секунду (Петухов и др., 2019).

Таким образом, каталаза является многофункциональным ферментом, важным звеном в защитных механизмах клетки от окислительного стресса. Ее присутствие в живых системах неразрывно связано с процессами, генерирующими перекись водорода, обеспечивая поддержание гомеостаза и защиту клетки от повреждений.

Характер активности ферментов в растениях связан с видовой принадлежностью и является своеобразным индикатором реакции организма на окружающую среду (Тарчевский, 2002; Чиркова, 2002).

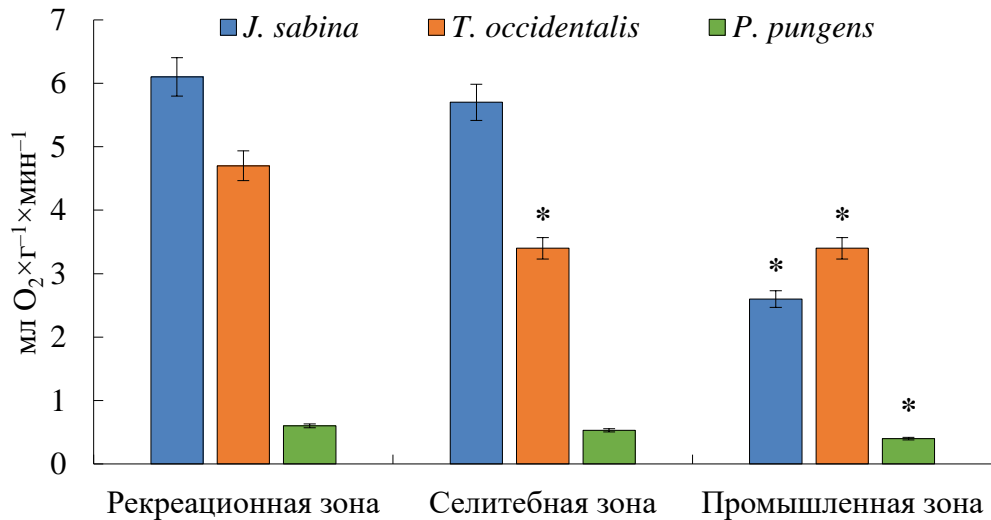
Уровень активности ферментов, например, каталазы, значительно изменяется в зависимости от условий произрастания. Наблюдается тенденция: растения, растущие в загрязненных районах, часто демонстрируют снижение активности каталазы. Однако, эта зависимость не является абсолютной, видовая устойчивость к загрязняющим веществам тесно коррелирует со стабильностью активности каталазы. Растения, обладающие высокой устойчивостью к загрязнению, характеризуются более стабильной активностью этого ключевого фермента, даже в неблагоприятных условиях. Напротив, значительное снижение

или полное ингибирование активности каталазы может служить надежным диагностическим признаком низкой устойчивости растений к антропогенному воздействию (Чиркова, 2002). Это открывает возможности для использования активности ферментов в качестве биоиндикаторов состояния окружающей среды и оценки уровня экологического стресса. Более того, способность растений противостоять техногенному стрессу во многом определяется эффективностью их антиоксидантной системы. Нормальное или даже повышенное образование антиоксидантов является одним из важнейших факторов выживания в условиях загрязнения.

Под воздействием техногенного загрязнения у древесных растений происходят значительные изменения в активности ключевых антиоксидантных ферментов, таких как каталаза и пероксидаза. Это изменение может проявляться как в виде увеличения, так и в виде уменьшения активности, что напрямую зависит от видовой специфики растения, типа загрязняющих веществ и степени воздействия.

Наибольшая активность каталазы в хвое *J. sabina* была определена у растений, произрастающих в рекреационной зоне ( $6,1 \text{ мл O}_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ ) (рисунок 23). У растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, было отмечено снижение активности данного фермента в 2,3 раза ( $p=10^{-6}$ ) по сравнению с рекреационной зоной.

В хвое растений *T. occidentalis*, произрастающих в рекреационной зоне, была максимальная активность каталазы ( $4,7 \text{ мл O}_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ ) (рисунок 23). По мере усиления антропогенной нагрузки активность этого фермента у особей, произрастающих в селитебной и промышленной зонах, уменьшилась в 1,4 раза ( $p=10^{-6}$ ) по сравнению с рекреационной зоной. У *T. occidentalis*, произрастающих в селитебной и промышленной зонах, активность каталазы статистически значимо не отличалась ( $p>0,05$ ).



\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 23 – Изменение активности каталазы в хвое растений  
(среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Максимальная активность каталазы в хвое *P. pungens*, как и у других видов было у растений, произрастающих в рекреационной зоне ( $0,6 \text{ мл O}_2 \times \text{г}^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ ) (рисунок 23). Активность данного фермента у растений, произрастающих в промышленной зоне, была ниже в 1,5 раза ( $p = 10^{-6}$ ) по сравнению с рекреационной зоной. Так, для растений *P. pungens* характерна наименьшая каталазная активность по сравнению с исследуемыми видами. Активность данного фермента в хвое была ниже в 7,4 раза, чем в хвое *T. occidentalis* и в 9,4 раза ниже, чем в хвое *J. sabina*.

Таким образом, наибольшее снижение активности каталазы было определено в хвое растений, произрастающих в промышленной зоне.

В ходе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа на активность каталазы хвойных растений оказывают влияние факторы «функциональная зона» ( $p = 10^{-2}$ ), «вид» ( $p = 10^{-2}$ ), а также взаимодействие факторов «вид  $\times$  функциональная зона» ( $p = 10^{-2}$ ).

В результате корреляционного анализа была выявлена обратная зависимость активности каталазы от содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе: с ростом уровня загрязнения активность данного фермента

в хвое *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* снижалась. На активность каталазы в хвое *J. sabina* оказывали влияние содержание SO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,68$ ,  $p < 0,05$ ), NO ( $r_s = -0,60$ ,  $p < 0,05$ ), NO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,66$ ,  $p < 0,05$ ); в хвое *T. occidentalis*: SO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,70$ ,  $p < 0,05$ ), NO ( $r_s = -0,52$ ,  $p < 0,05$ ); NO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,65$ ,  $p < 0,05$ ); в хвое *P. pungens*: SO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,35$ ,  $p < 0,05$ ), NO<sub>2</sub> ( $r_s = -0,30$ ,  $p < 0,05$ ). Также установлены отрицательные корреляции активности каталазы от содержания свинца в хвое *J. sabina* и *T. occidentalis* ( $r_s = -0,41$ ,  $p < 0,05$  и  $r_s = -0,51$ ,  $p < 0,05$ ).

Как утверждают З.А. Симонова с соавторами (2016), каталазная активность подвержена значительным изменениям, обусловленным биологическими особенностями конкретного вида растений и отражающим реакцию растительных организмов на совокупное влияние экологических условий. Максимальное проявление активности каталазы отмечается при рН около 6,5, тогда как в сильно кислотных или щелочных средах фермент проявляет пониженную активность. У деревьев, находящихся в зоне хронического влияния автомобильных выхлопов, создающих кислую среду, либо промышленных выбросов органических соединений, активность каталазы существенно снижается относительно контрольных участков. Важным фактором также выступает продолжительность негативного воздействия: увеличение длительности контакта с загрязняющими веществами ведет к прогрессирующему угнетению активности фермента вследствие накопления избыточных количеств перекиси водорода, способствующих окислению каталазы.

Так, исследования, проведенные Н.Е. Серебряковой с соавторами (2015), продемонстрировали значительное уменьшение активности фермента каталазы в листовом аппарате тополя бальзамического, клена остролистного и липы мелколистной, произрастающих в условиях техногенного загрязнения г. Нижнекамска.

Уменьшение активности каталазы может происходить вследствие либо структурных повреждений самого фермента, либо нарушений процесса его биосинтеза. Поступающие в растительные клетки загрязняющие вещества способны взаимодействовать с функциональными группами (-SH, -NH<sub>2</sub>, -COOH)

аминокислот, составляющих активный центр фермента, приводя к подавлению его каталитической способности. Помимо прямого воздействия, возможна также косвенная деструкция молекулярной структуры каталазы посредством тяжелых металлов и иных загрязняющих веществ, инициирующих процессы перекисного окисления липидов. Продукты окислительного стресса – АФК (пероксид водорода, гидроксил радикал, супероксид анион, свободные радикалы, синглетная форма кислорода) – могут индуцировать окисление углеводородных цепей аминокислот, образуя нестабильные промежуточные продукты типа гидроперекисей, малонового диальдегида и оснований Шиффа, дополнительно снижающих активность каталазы (Петухов и др., 2019).

Как отмечают Н.Е. Серебрякова с соавторами (2015), воздействие загрязняющих веществ на фотосинтетический аппарат древесных растений определяется множеством факторов, включая индивидуальные характеристики вида, интенсивность эмиссий загрязнителей, направление воздушных масс и количество атмосферных осадков. Эти условия обуславливают значительную вариабельность наблюдаемых физиологических изменений. Значительное двукратное падение активности фермента каталазы в листьях деревьев, находящихся в экологически напряженных условиях (техногенных зонах), по сравнению с растениями контрольных групп указывает на ухудшение жизненного состояния. Этот параметр может служить важным индикатором уровня толерантности древесных видов к антропогенному воздействию окружающей среды.

#### **4.4.2 Изменение активности пероксидазы хвойных растений в городских условиях**

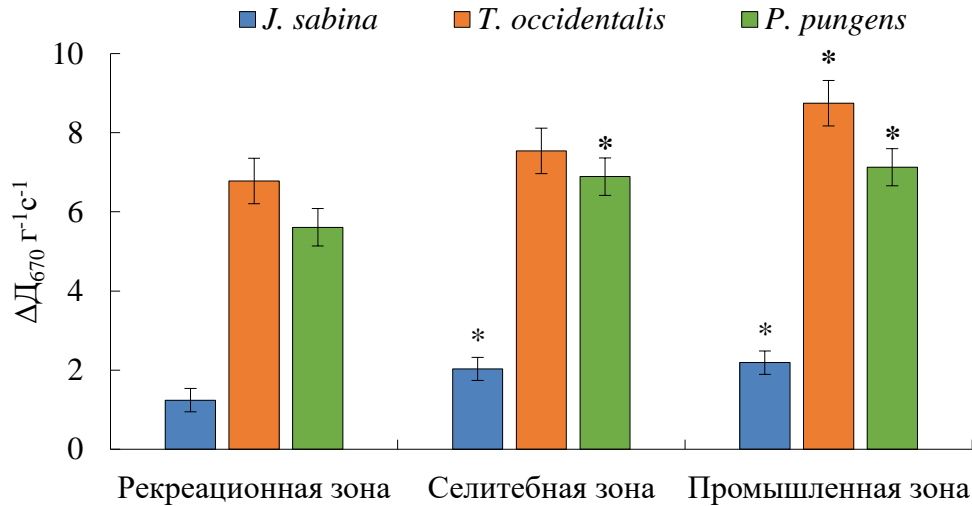
Влияние неблагоприятных факторов окружающей среды на растения является сложным и многогранным процессом. Одним из наиболее чувствительных индикаторов такого воздействия является активность

пероксидазы – фермента, играющего ключевую роль в антиоксидантной защите клеток (Симонова, Чемаркин, 2013; Бондарук, 2021).

*Пероксидаза (КФ 1.11.1.7)* представляет собой антиоксидантный фермент, обеспечивающий реакции окисления органических и неорганических веществ с участием  $H_2O_2$  или органических пероксидов в роли акцептора электронов. Данный фермент активно вовлечен в метаболизм  $H_2O_2$ , осуществляя зависимые от нее процессы окисления множества разнообразных субстратов. Фермент играет важную роль в процессах лигнификации клеточной стенки, синтезе этилена, контроле концентрации фитогормона ауксина, защите растительного организма от патогенов. Широко распространенная в растительных организмах, пероксидаза обнаруживается практически повсеместно – в органах, тканях и клетках растения. Среди наиболее характерных субстратов ее действия выступают свободные полифенольные соединения и разнообразные комплексные фенольные образования (Тарчевский, 2002; Рогожин, 2004; Воскресенская, Сарбаева, 2006; Воскресенский, Воскресенская, 2011б; Галибина и др., 2013; Симонова, Чемаркин, 2013; Бондарук, 2021).

Пероксидаза является наиболее широко представленной среди растений терминальной оксидазой. Доказано, что этот фермент проявляет высокую чувствительность к загрязнителям атмосферного воздуха. Повышение активности оксидантных ферментов в стрессовых ситуациях служит адаптивной реакцией клеток, направленной на защиту целостности биомембран. Увеличение функциональной активности пероксидазы до уровня, составляющего около 20% относительно контрольных значений, свидетельствует о потенциальной возможности восстановления нарушенных физиолого-биохимических процессов. Однако превышение указанного порога (более 20%) ассоциируется с вероятностью развития необратимых изменений и формированием очагов некроза (Симонова, Чемаркин, 2013). Исходя из значимости вышеуказанных факторов, нами было проведено исследование ее активности.

При изучении активности фермента пероксидазы у хвойных растений было установлено, что в противоположность каталазе, данный фермент в антропогенных условиях увеличивал свою активность (рисунок 24).



\* – статистически значимые различия по сравнению с рекреационной зоной ( $p < 0,05$ )

Рисунок 24 – Изменение активности пероксидазы в хвое растений  
(среднее значение за период 2015–2022 гг.)

Так, активность пероксидазы в хвое *J. sabina* изменялась от 1,24 до 2,19  $\Delta D_{670} \text{ г}^{-1} \times \text{с}^{-1}$  (рисунок 24). В хвое растений, произрастающих в рекреационной зоне, активность этого фермента была минимальной (1,24 ед. измерения). Активность пероксидазы у особей *J. sabina*, произрастающих в селитебной и промышленной зонах г. Йошкар-Олы, увеличивалась в 1,6–1,8 раза ( $p = 10^{-6}$ ) по сравнению с рекреационной зоной.

В ходе исследования было установлено (рисунок 24), что для хвои растений *T. occidentalis*, произрастающих в рекреационной зоне, была характерна минимальная активность пероксидазы – 6,78  $\Delta D_{670} \text{ г}^{-1} \times \text{с}^{-1}$ . У растений промышленной зоны значения данного параметра были статистически значимо выше на 23% ( $p = 10^{-6}$ ), чем в рекреационной зоне.

Также, как и у других исследуемых видов, в хвое растений *P. pungens*, произрастающих в рекреационной зоне, была минимальная активность

пероксидазы –  $5,61 \Delta D_{670} \Gamma^{-1} c^{-1}$ . По мере усиления техногенной нагрузки активность данного показателя увеличивалась в 1,2–1,3 раза ( $p=10^{-6}$ ) по сравнению с рекреационной зоной: в селитебной – 6,89 ед. изм., в промышленной – 7,13 ед. изм.

Сравнивая активность пероксидазы у исследуемых видов, установлено, что хвоя *T. occidentalis* характеризовалась достаточно высокими показателями активности данного фермента по сравнению с *J. sabina* и *P. pungens*. Так, уровень активности фермента в хвое *T. occidentalis* был в 1,2 раза выше, чем в хвое *P. pungens* и в 4,2 раза выше, чем в хвое *J. sabina*.

В результате проведенного статистического анализа было выявлено, что на изменение активности пероксидазы влияют факторы «функциональная зона» ( $p=10^{-3}$ ), «вид» ( $p=10^{-3}$ ) и взаимодействие факторов «вид»  $\times$  «функциональная зона» ( $p=10^{-3}$ ).

Полученные в ходе проведенного нами исследования результаты коррелируют с выводами, представленными в работе V. Artenie et al. (2004), изучавших динамику активности каталазы и пероксидазы в хвое хвойных видов *P. pungens* и *T. occidentalis*.

Пероксидаза характеризуется высокой степенью полифункциональности, разнообразием изоферментного состава и подверженностью значительным модификациям под влиянием негативных факторов окружающей среды, включая химическое загрязнение (Стаценко и др., 2008). Газообразные и взвешенные вещества атмосферы обладают способностью беспрепятственно проникать внутрь органов и тканей растений через устьичный аппарат, обеспечивая себе доступ к метаболическим процессам клеток и вступая в химические реакции на уровнях клеточных мембран и клеточных стенок. Пыль, оседая на поверхности растений, закупоривает устьица, что ведет к ухудшению газообмена, нарушению водного режима, а также затрудняет поглощение света. Все это не может не отразиться на динамике активности антиоксидантной системы в целом (Николаевский, 1999).

О.А. Неверова (2001) подчеркивает, что в условиях антропогенного загрязнения среды кислыми газами в растительных организмах формируются

органические перекиси, стимулирующие активизацию пероксидазы, способной утилизировать их в качестве источников АФК. Экспериментально установлено, что возрастание активности пероксидазы сопровождается усилением ее оксидазных свойств, следствием чего становится доминирующее функционирование фермента в качестве терминальной оксидазы при воздействии  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ . Предположительно, такие условия вызывают адаптивную реорганизацию окислительного аппарата путем угнетения прочих оксидаз, предотвращающую нарушение нормального хода дыхательных процессов (Симонова и др., 2016).

Из литературных источников известно, что в листьях пероксидаза находится в растворимом и связанном состоянии, ее активность изменяется в зависимости от вегетации растения и возраста листа (Чиркова, 2002). В.С. Николаевским (1979) установлена прямо пропорциональная связь между уровнем активности фермента и содержанием газообразных компонентов в атмосфере. Автор подчеркивает наличие строгой зависимости активности пероксидазы от устойчивости растений к негативным внешним условиям. Изменение активности антиоксидантных ферментов выступает важным индикатором адаптационной реакции растительного организма на воздействие неблагоприятных экологических факторов.

Многие загрязняющие вещества проявляют свойства мощных окислителей, способствуя их адсорбции на мембранных структурах и последующему проникновению сквозь мембранные барьеры, что ведет к развитию окислительной деградации клеточных компонентов (Сарбаева и др., 2013).

Установлено (Стаценко и др., 2008), что тяжелые металлы оказывают значительное влияние на пероксидазную активность растений. Например, увеличение концентрации железа в почвенном растворе провоцирует изменения спектра изоферментов пероксидазы у *A. hippocastanum* и *Q. robur*, выражающиеся в утрате определенных изоформ и возникновении новых.

С.А. Сергейчик (2015) считает, что увеличение активности пероксидазы в органах ассимиляции *P. sylvestris* в техногенной среде может быть индикатором

изменения качества воздушной среды в результате ее загрязнения промышленными газами, а также свидетельствовать о реализации защитно-приспособительных возможностей растений в неблагоприятных условиях произрастания.

Таким образом, активация пероксидазы у растений, несмотря на свою неспецифичность, позволяет выявлять присутствие атмосферных загрязнителей в широких диапазонах концентраций и зонировать территории по уровню экологической нагрузки исходя из степени повышения ферментативного показателя (Симонова, Чемаркин, 2013).

С помощью корреляционного анализа оценивали влияние CO, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> и взвешенных веществ в атмосферном воздухе на активность пероксидазы хвойных растений. Обнаружены статистически значимые зависимости активности пероксидазы от концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе: у *J. sabina* от SO<sub>2</sub> ( $r_s = 0,30$ ,  $p < 0,05$ ), а также от NO<sub>2</sub> ( $r_s = 0,32$ ,  $p < 0,05$ ). На активность пероксидазы в хвое *T. occidentalis* оказывали влияние концентрации SO<sub>2</sub> ( $r_s = 0,63$ ,  $p < 0,05$ ), NO<sub>2</sub> ( $r_s = 0,68$ ,  $p < 0,05$ ), NO ( $r_s = 0,65$ ,  $p < 0,05$ ) в атмосферном воздухе. Активность пероксидазы в хвое *P. pungens* также зависит от концентрации SO<sub>2</sub> ( $r_s = 0,66$ ,  $p < 0,05$ ), NO<sub>2</sub> ( $r_s = 0,64$ ,  $p < 0,05$ ) в атмосферном воздухе.

Известно, что молекулы кислых газов характеризуются наличием радикальных свойств, что в растительных клетках стимулирует резкое ускорение цепных реакций свободнорадикального окисления и образование органических перекисей. Следовательно, активация пероксидазы и каталазы может свидетельствовать о протекании интенсивных восстановительных процессов, направленных на предотвращение избыточного окисления внутриклеточного субстрата.

Так, активность железосодержащих ферментов у растений, произрастающих в зонах с различной степенью атмосферного загрязнения, характеризуется увеличением активности пероксидазы и некоторым понижением активности каталазы (Воскресенский, Воскресенская, 2011б). Существует вероятность, что рост активности одного железосодержащего фермента – пероксидазы – сопряжен с одновременным торможением активности другого – каталазы. Это делает

возможным использование мониторинга динамики активности указанных ферментов в качестве высокочувствительного метода отражения реакции растений на воздействие газов, имеющего практическое значение для экомониторинга и оценки толерантности растений к газовым компонентам внешней среды.

**Заключение.** Таким образом, изменения активности железосодержащих оксидаз (каталазы и пероксидазы) указывают на наличие сложных адаптивных процессов у *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens*, направленных на преодоление негативных воздействий городских экологических факторов. Анализ результатов показал, что наибольшая активность каталазы наблюдалась у растений всех трех исследованных видов в рекреационной зоне, где экологическая нагрузка минимальна. В частности, активность фермента в хвое *J. sabina* составила 6,1 мл  $O_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ , в хвое *T. occidentalis* – 4,7 мл  $O_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ . Напротив, в промышленной зоне, характеризующейся высоким уровнем загрязнений, активность каталазы снижалась примерно в 2 раза у *J. sabina* и на 40% у *T. occidentalis*. Наиболее низкая активность фермента отмечена у *P. pungens*, которая составляла всего лишь 0,6 мл  $O_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ .

Полученные данные позволяют сделать заключение, что снижение активности каталазы является надежным индикатором отрицательного воздействия городской среды на состояние растений, особенно в промышленных районах. Этот фермент может использоваться как потенциальный биохимический индикатор стресса, вызванного повышенным содержанием поллютантов в воздухе.

При повышении уровня антропогенного загрязнения окружающей среды наблюдается значительное возрастание активности пероксидазы. Наибольшее усиление активности данного фермента в условиях г. Йошкар-Олы было определено в хвое *J. sabina*, что указывает на повышенную чувствительность этого вида к воздействию атмосферных загрязнителей. Установлено, что повышение активности пероксидазы сопровождается существенным усилением ее оксидазных функций, причем в присутствии кислотогенных загрязнителей

преобладает выполнение ею роли терминальной оксидазы. Кислая среда способствует снижению активности каталазы, тогда как адаптивное перераспределение активности окислительных ферментов в пользу пероксидазы предотвращает нарушения дыхания, поддерживая относительную стабильность уровней окислительно-восстановительных процессов в растительном организме.

Проведенное исследование показало, что активность пероксидазы в хвое растений в условиях города демонстрирует четкую зависимость от уровня экологической нагрузки. Установлено, что растения, произрастающие в промышленной зоне, характеризовались значительно повышенной активностью фермента по сравнению с растениями рекреационной зоны. Так, активность пероксидазы у *T. occidentalis* была выше на 23%, а у *P. pungens* – в 1,2–1,3 раза по сравнению с рекреационной зоной. Наибольший показатель активности фермента был именно у *T. occidentalis*, превышая показатели *J. sabina* в 4,2 раза и *P. pungens* – в 1,2 раза. Эти результаты свидетельствуют о перспективности использования активности пероксидазы в качестве маркера оценки способности древесных растений адаптироваться к различным уровням загрязнения городской среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Промышленная зона г. Йошкар-Олы характеризовалась наибольшим уровнем техногенного загрязнения: концентрация основных загрязняющих веществ атмосферы (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO и взвешенных веществ) была в 1,2–1,5 раза выше, чем в рекреационной и селитебной зонах; в почве увеличилось содержание органических веществ на 56,4%, удельная электропроводность водной почвенной вытяжки на 33,6%, рН почвы до 6,8 ед., содержание тяжелых металлов (Pb – на 70,4%, Cd – на 67,6%, Cu – на 47,4%, Fe – на 10%).

2. В исследуемых функциональных зонах г. Йошкар-Олы были выявлены три категории жизненного состояния хвойных растений: здоровые, ослабленные и сильно ослабленные. В селитебной и промышленной зонах процент здоровых особей *J. sabina* снизился на 8,2%, *T. occidentalis* – на 9,3%, *P. pungens* остался без изменений; сильно ослабленных растений стало в 2 раза больше.

3. Определена видовая специфика накопления и распределения тяжелых металлов между вегетативными органами разных видов класса *Pinopsida*, произрастающих в урбанизированных условиях: наибольшее содержание Pb, Cd, Cu и Fe выявлено в побегах по сравнению с хвоей. У *P. pungens* наибольшие концентрации Cu и Fe накапливались в побегах; хвоя *T. occidentalis* обладала наибольшей способностью накапливать изученные тяжелые металлы. Установлено, что у хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне, содержание тяжелых металлов было выше, чем у растений других функциональных зон: содержание свинца в хвое *J. sabina* было больше на 22,5%, в побегах – на 14,7%; в хвое *P. pungens* – на 20,2%, в побегах – на 35,1%; в хвое *T. occidentalis* – на 13,5%, в побегах – на 25,8%. В условиях городской среды коэффициент биологического поглощения ТМ был больше единицы у *T. occidentalis* и *P. pungens*. *T. occidentalis* обладала наибольшей биогеохимической активностью (БХА=2,03) и способностью накапливать изученные тяжелые металлы.

4. Анализ межсезонной динамики количества пигментов у *T. occidentalis* и *P. pungens* выявил сходное изменение функционирования фотосинтетического аппарата: в весенне-летний период количество хлорофиллов *a* и *b* увеличивалось в 1,4 раза по сравнению с осенне-зимним периодом. При возрастании степени загрязнения среды масса хлорофиллов *a* и *b* снижалась у *P. pungens* и *T. occidentalis* (хлорофилла *a* на 14,7–16,8%, хлорофилла *b* – на 19,2–24%), фонд каротиноидов возрастал на 23,2–36,1%. Фотосинтетический аппарат *J. sabina* был стабильным в изменяющихся условиях среды.

5. Обнаружена высокая лабильность активности ферментов оксидоредуктаз у хвойных растений в условиях городской среды. В промышленной зоне г. Йошкар-Олы активность каталазы была ниже у *J. sabina* в 2,3 раза, у *T. occidentalis* в 1,4 раза, у *P. pungens* в 1,5 раза по сравнению с растениями рекреационной зоны. Активность пероксидазы у растений, произрастающих в условиях антропогенного воздействия, была выше у *T. occidentalis* и *P. pungens* в 1,3 раза, у *J. sabina* в 1,8 раза, по сравнению с рекреационной зоной.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При осуществлении мероприятий по благоустройству г. Йошкар-Олы целесообразно применение комбинированных посадок, включающих такие хвойные растения как *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens*, дополненных декоративными видами лиственных древесных и кустарниковых растений.

2. Для увеличения устойчивости древесно-кустарниковых насаждений необходимо выполнение системы мероприятий:

а) мониторинговые исследования состояния атмосферного воздуха, почвы, физиолого-биохимических показателей хвойных насаждений, которые позволят своевременно выявлять проблемы и принимать меры по их устранению; рекомендуется регулярно проводить визуальные осмотры, анализ почвы, оценку жизненного состояния растений в городских насаждениях, вносить необходимые изменения в уходные мероприятия;

б) разработка программы по омоложению насаждений с участием *J. sabina*, *P. pungens* и *T. occidentalis*, организация структуры насаждений, которая позволяет осуществлять замену сильно ослабленных растений;

в) в условиях города необходим уход за хвойными растениями: регулярный полив; применение комплексных удобрений, содержащих микроэлементы; своевременная санитарная обрезка сухих ветвей и т.д.;

г) все три исследуемых интродуцента класса *Pinopsida* являются перспективными видами при озеленении урбаноcреды:

– можжевельник казацкий (*Juniperus sabina* L.) характеризуется стабильными показателями содержания фотосинтетических пигментов в городских условиях, обладает малой требовательностью к условиям почвы, отличается стойкостью к воздействию газов и дыма;

– туя западная (*Thuja occidentalis* L.) – концентратор тяжелых металлов, нетребовательна к почве, лучше всего переносит загазованность воздуха и уплотнение почвы;

– ель колючая (*Picea pungens* Engelm.) обладает повышенной устойчивостью и относительным постоянством активности каталазы, высокой декоративностью благодаря голубоватой окраске хвои, ветроустойчива, зимо- и морозоустойчива, засухоустойчива, относительно неприхотлива к почвенному плодородию.

Комплексный учет вышеперечисленных мероприятий позволит АО «Город» и Комитету экологии и природопользования Администрации городского округа «Город Йошкар-Ола» создать систему устойчивого озеленения.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Представленные результаты оценки эколого-физиологических особенностей хвойных растений планируется использовать при разработке программы мониторинга экологической среды г. Йошкар-Олы, при оценке экологического каркаса, при организации открытых общественных пространств г. Йошкар-Олы (скверов, парков, бульваров и т.д.).

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АФК – активные формы кислорода

БХА – биогеохимическая активность

ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота

КБП – коэффициент биологического поглощения

КС – категории состояния деревьев

ЛОС – летучие органические вещества

ОДК – ориентировочно допустимая концентрация

ОЖС – относительное жизненное состояние

ПДК – предельно-допустимая концентрация

ПДК<sub>с.с.</sub> – предельно-допустимая среднесуточная концентрация

ПОЛ – перекисное окисление липидов

ПП – пробная площадь

РМЭ – Республика Марий Эл

РНК – рибонуклеиновая кислота

ССК – светособирающий комплекс

ТМ – тяжелые металлы

УП – учетная площадка

УЭП – удельная электропроводность

ФС I – фотосистема I

ФС II – фотосистема II

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамов, Н.В. Флора Республики Марий Эл: справочное пособие / Мар. гос. ун-т; Н.В. Абрамов. – Йошкар-Ола, 2008. – 196 с.
2. Авдеева, Е.В. Биоиндикация урбоэкосистем по морфологическим признакам хвойных растений / Е.В. Авдеева, А.И. Панов // Хвойные бореальной зоны. – 2017. – Т. XXXV, № 1-2. – С. 7–14.
3. Авдощенко, В.Г. Содержание тяжелых металлов в растениях города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край) в 2017–2018 гг. / В.Г. Авдощенко, А.В. Климова // Вестник КамчатГТУ. – 2020. – № 54. – С. 48–64.
4. Авдощенко, В.Г. Тяжелые металлы в почве и растениях города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край): монография / В.Г. Авдощенко, А.В. Климова. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2021. – 127 с.
5. Азаренко, Ю.А. Содержание меди в почвах агроландшафтов Омского Прииртышья / Ю.А. Азаренко // Вестник Омского ГАУ. – 2021. – № 4 (44). – С. 7–18.
6. Айвазян, А.Д. Геохимическая специализация флоры Алтая: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. 11.00.06 / А.Д. Айвазян. – Москва, 1974. – 21 с.
7. Аксянова, Т.Ю. Использование хвойных растений в типовых ландшафтных проектах / Т.Ю. Аксянова, О.М. Ступакова, Е.А. Усова, М.В. Филина, А.А. Горошко // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. XXXIX, № 4. – С. 245–252.
8. Александрова, М.С. Хвойные растения в вашем саду / М.С. Александрова. – М.: ЗАО «Фитон+», 2003. – 224 с.
9. Александрова, М.С. Хвойные растения в вашем саду / М.С. Александрова, П.В. Александров. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. – 160 с.
10. Алексеев, В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев / В.А. Алексеев // Лесоведение. – 1989. – № 4. – С. 51–57.
11. Алексеев, В.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / В.А. Алексеев. – Ленинград: Наука, 1990. – 200 с.

12. Алексеев, Ю.Е. Деревья и кустарники: научное издание / Ю.Е. Алексеев. – М.: АБФ, 1997. – 589 с.
13. Алябышева, Е.А. Экологическая оценка городской среды / Е.А. Алябышева, Е.В. Сарбаева, О.Л. Воскресенская, В.С. Воскресенский. – Йошкар-Ола, 2013. – 96 с.
14. Аношкина, Л.В. Состояние древесных пород в урбанизированной среде г. Братска: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Аношкина Людмила Владимировна. – Владивосток, 2011. – 21 с.
15. Артамонов, В.И. Растения и чистота природной среды / В.И. Артамонов. – М.: Наука, 1986. – 172 с.
16. Артамонов, В.И. Туя / В.И. Артамонов // Наука и жизнь. – 1992. – № 2. – С. 158–160.
17. Артемьев, О.С. Динамика численности деревьев хвойных пород в условиях крупного промышленного центра (на примере города Красноярска) / О.С. Артемьев, А.А. Россинина // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. XXXVII, № 2. – С. 97–101.
18. Артемьев, О.С. Изменение численности деревьев хвойных пород в городе Красноярске с 1990 по 2020 гг. / О.С. Артемьев // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. XXXIX, № 5. – С. 344–347.
19. Афанасьева, Л.В. Физиолого-биохимическая адаптация лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb. к условиям городской среды / Л.В. Афанасьева // Сибирский лесной журнал. – 2018. – № 3. – С. 21–29.
20. Белова, Т.А. Физиологические основы адаптации пигментной системы древесных растений к условиям светового климата городской среды // Т.А. Белова, А.Н. Краснопивцева // Auditorium. – 2016. – № 4 (12). – С. 1–4.
21. Беляева, Ю.В. Корреляционный анализ ответных реакций *Betula pendula* Roth и косвенного антропогенного воздействия в условиях различных местообитаний (г.о. Тольятти) / Ю.В. Беляева // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2017. – № 3. – С. 64–70.

22. Беляков, Т.В. Экологическое состояние зеленых насаждений в условиях городской среды / Т.В. Беляков, Ю.А. Макарова // Известия Российского Государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2012. – № 147. – С. 112–117.

23. Бессчетнова Н.Н. Пигментный состав хвои саженцев сосны горной и сосны обыкновенной в Нижегородской области / Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2024. – Т. 28, № 4. – С. 5–18. – DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-5-18.

24. Бессчетнова, Н.Н. Сезонный характер содержания пигментов в хвое туи западной в условиях Нижегородской области // Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов, М.Ю. Котынова // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2022. – № 3. – С. 38–58. – DOI: 10.21178/2079–6080.2022.3.38.

25. Бирючев, Ф.М. Особенности использования *Picea pungens* Engelm. и *Picea excelsa* (Lam.) Link в зеленом строительстве г. Евпатория / Ф.М. Бирючев // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2012. – Вып. 105. – С. 28–32.

26. Боголицын, К.Г. Динамика сезонных и возрастных изменений параметра активности пероксидазы в хвое можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) / К.Г. Боголицын, М.В. Сурсо, М.А. Гусакова, И.Н. Зубов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2013. – № 6 (336). – С. 91–99.

27. Бозшатаева, Г.Т. Использование биоиндикаторов для оценки состояния атмосферного воздуха / Г.Т. Бозшатаева, А.И. Касымбекова, Г.С. Оспанова, Г.К. Турабаева, М.Б. Кыдыралиева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 12-2. – С. 302–306.

28. Бондарук, Р.С. Влияние урбосреды на некоторые показатели растений туи западной (*Thuja occidentalis*) в условиях г. Минска / Р.С. Бондарук // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2021. – № 2. – С. 36–43.

29. Бородина, Н.А. Аккумуляция тяжелых металлов хвоей сосны в урбоэкосистеме города Благовещенска / Н.А. Бородина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 1 (8). – С. 1958–1962.
30. Бородина, Н.А. Поведение тяжелых металлов в системе «почва-растение» в условиях малопромышленного города Приамурья – Белогорска / Н.А. Бородина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 3 (3). – С. 966–969.
31. Бородина, Н.А. Эколого-химическая характеристика урбанизированных территорий Амурской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Бородина Нина Александровна. – Владивосток, 2016. – 20 с.
32. Бочкова, И.Ю. Исследование видового состава хвойных видов растений на территории бульварного кольца города Москвы / И.Ю. Бочкова, Ю.А. Хохлачева, А.В. Баева // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 5–12. – DOI: 10.18698/2542-1468-2019-3-5-12.
33. Бояркин, А.Н. Быстрый метод определения активности пероксидазы / А.Н. Бояркин // Биохимия. – 1951. – Т. 16, вып. 4. – С. 352–355.
34. Булыгин, Н.Е. Дендрология / Н.Е. Булыгин, В.Т. Ярмишко. – М.: МГУЛ, 2001. – 528 с.
35. Бунькова, Н.П. Перспективность использования можжевельника скального в озеленении города Екатеринбурга / Н.П. Бунькова, С.В. Залесов, Е.П. Платонов, М.В. Соловьева // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 7. – С. 7–12.
36. Бускунова, Г.Г. Тяжелые металлы в системе «почва – дикорастущее лекарственное растение» (на примере *Cichorium intybus* L.) / Г.Г. Бускунова, Г.А. Ягафарова // Самарский научный вестник. – 2022. – Т. 11, № 1. – С. 36–42.
37. Бухарина, И.Л. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде / И.Л. Бухарина, Т.М. Поварницина, К.Е. Ведерников. – Ижевск: Изд-во Ижевской гос. с.-х. акад., 2007. – 216 с.
38. Бухарина, И.Л. Эколого-биологическая характеристика ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) в условиях городской среды (на примере г. Ижевска) /

И.Л. Бухарина, Т.М. Поварницина // Самарская Лука. – 2008. – Т. 17, № 3 (25). – С. 618–625.

39. Бухарина, И.Л. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях: монография / И.Л. Бухарина, А.А. Двоглазова. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2010. – 184 с.

40. Бухарина, И.Л. Городские насаждения: экологический аспект: монография / И.Л. Бухарина, А.Н. Журавлева, О.Г. Большова. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. – 206 с.

41. Бухарина, И.Л. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Набережные Челны) / И.Л. Бухарина, П.А. Кузьмин, И.И. Гибадулина // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – 2013. – Вып. 1. – С. 20–25.

42. Бухарина, И.Л. Биоэкологические особенности хвойных растений в условиях городской среды: учебно-методическое издание (монография) / И.Л. Бухарина, А.С. Пашкова, К.Е. Ведерников, А.Г. Ковальчук, Е.В. Пашков – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2015. – 152 с.

43. Бухарина, И.Л. Особенности фотосинтетического аппарата ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) и ели европейской (*Picea abies* L.) в условиях городской среды [Электронный ресурс] / И.Л. Бухарина, А.С. Пашкова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3 (59). – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19386> (дата обращения: 09.09.2017).

44. Бухарина, И.Л. Состояние ассимиляционного аппарата липы мелколистной в условиях локальных мест произрастания в городских насаждениях (на примере Набережные Челны) / И.Л. Бухарина, И.И. Гибадулина // АгроЭкоИнфо. – 2019. – № 3. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st\\_326.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st_326.doc) (дата обращения: 12.07.2020).

45. Валягина-Малюткина, Е.Т. Деревья и кустарники Средней полосы Европейской части России: определитель / Е.Т. Валягина-Малюткина. – СПб: «Специальная литература», 1998. – 112 с.

46. Валягина-Малютина, Е.Т. Деревья и кустарники зимой. Определитель древесных и кустарниковых пород по побегам и почкам в безлистном состоянии / Е.Т. Валягина-Малютина. – М.: Издательство КМК, 2001. – 281 с.

47. Варлам, И.И. Биоиндикация состояния сосны сибирской (*Pinus sibirica*) в условиях урбанизированной территории (на примере г. Сургута) / И.И. Варлам, С.Н. Русак // Север России: стратегии и перспективы развития. – 2017. – Т. II. – С. 238–242.

48. Ведерников, К.Е. Динамика содержания тяжелых металлов в ассимиляционном аппарате древесных растений в условиях техногенной среды / К.Е. Ведерников, И.Л. Бухарина, М.А. Шумилова // Химическая физика и мезоскопия. – 2009. – Т. 11, № 4. – С. 483–489.

49. Вернигора, Е.Г. Морфологические реакции эпидермы хвойных пород на изменение климатических условий роста / Е.Г. Вернигора // Вестник КрасГАУ. – 2008. – Вып. 4. – С. 122–130.

50. Видякина, А.А. Влияние загрязнения воздуха на состояние древесных растений г. Тюмени / А.А. Видякина, М.В. Семенова // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. – 2012. – № 12. – С. 49–53.

51. Винокурова, Р.И. Влияние автодороги на содержание некоторых тяжелых металлов в хвое ели обыкновенной / Р.И. Винокурова, О.Н. Денисова // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2008. – № 3. – С. 75–81.

52. Вишнякова, С.В. Влияние выбросов автотранспорта на анатомические параметры хвои ели колючей в условиях г. Екатеринбурга / С.В. Вишнякова, Л.И. Аткина // Хвойные бореальной зоны. – 2011. – Т. XXVIII, № 1-2 – С. 134–136.

53. Войцековская, С.А. Исследование физиолого-биохимических показателей хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) болотных и лесных популяций / С.А. Войцековская, Э.Р. Юмагулова, Е.Н. Сурнина, Т.П. Астафурова // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2013. – № 3 (23). – С. 111–119.

54. Воскресенская, О.Л. Организм и среда: факториальная экология: учебное пособие / О.Л. Воскресенская, Е.А. Скочилова, Т.И. Копылова, Е.А. Алябышева, Е.В. Сарбаева. – Мар. гос. ун-т., Йошкар-Ола, 2005. – 180 с.

55. Воскресенская, О.Л. Эколого-физиологические адаптации туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в городских условиях: монография / О.Л. Воскресенская, Е.В. Сарбаева. – Йошкар-Ола: МарГУ, 2006. – 130 с.

56. Воскресенский, В.С. Влияние факторов городской среды на функциональное состояние древесных растений: монография / В.С. Воскресенский, О.Л. Воскресенская. – Мар. гос. ун-т., Йошкар-Ола, 2011а. – 194 с.

57. 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. – 2011б. – № 1. – С. 75–82.

58. Воскресенская, О.Л. Накопление тяжелых металлов почвой и растениями в местах сбора и временного хранения твердых бытовых отходов / О.Л. Воскресенская, В.С. Воскресенский, Е.А. Алябышева // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 43–47.

59. Вострикова, Т.В. Эколого-физиологическая реакция семенного потомства древесных растений на стресс / Т.В. Вострикова // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – 2010. – № 1. – С. 87–91.

60. Выходцева, И.С. Биоиндикация как метод оценки окружающей среды: актуальность и перспективы исследования / И.С. Выходцева, Т.А. Рыхлова // Вестник ландшафтной архитектуры. – 2015. – № 6. – С. 44–47.

61. Гавриленко, В.Ф. Большой практикум по физиологии растений. Фотосинтез. Дыхание / В.Ф. Гавриленко, М.Е. Ладыгина, Л.М. Хандобина. – М.: Высшая школа, 1975. – 392 с.

62. Гавриленко, В.Ф. Большой практикум по фотосинтезу / В.Ф. Гавриленко, Т.В. Жигалова. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 253 с.

63. Галибина, Н.А. Активность пероксидазы в органах и тканях деревьев березы повислой / Н.А. Галибина, Ю.Л. Целищева, В.П. Андреев, И.Н. Софронова, К.М. Никерова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2013. – № 4. – С. 7–13.

64. Герасимова, Е.Ю. Декоративные формы и сорта хвойных древесных растений, рекомендуемые для озеленения Южно-Уральского региона (на примере г. Оренбурга) / Е.Ю. Герасимова, В.Ф. Абаимов, А.А. Кулагин // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2017. – Т. 26, № 1. – С. 63–69.

65. Герлинг, Н.В. Структура и рост хвои *Juniperus communis* L. в еловом фитоценозе подзоны Средней тайги / Н.В. Герлинг, С.В. Загирова // Хвойные бореальной зоны. – 2011. – XXIX, № 3-4. – С. 214–218.

66. Гетко, Н.В. Растения в техногенной среде: структура и функция ассимиляционного аппарата / Н.В. Гетко. – Минск: Наука и техника, 1989. – 208 с.

67. Гиниятуллин, Р.Х. Санитарно-защитные насаждения лиственницы Сукачёва (*Larix sukaczewii* Dyl.) в условиях загрязнения стерлитамакского промышленного центра: состояние и особенности накопления тяжёлых металлов / Р.Х. Гиниятуллин, А.А. Кулагин, Г.А. Зайцев, З.Б. Бактыбаева // Гигиена и санитария. – 2018. – Т. 97, № 9. – С. 819–824. – DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-9-819-824>.

68. Гирс, Г.И. Физиология ослабленного дерева / Г.И. Гирс. – Новосибирск: Наука, 1989. – 256 с.

69. Годнев, Т.Н. О характере сезонных изменений в содержании и соотношении пигментов у хвойных в естественных условиях в связи с температурой воздуха / Т.Н. Годнев, Э.В. Ходасевич, А.И. Арнаутова // Физиология растений. – 1969. – Т. 16, вып. 1. – С. 102–105.

70. Головкин, Т.К. Сезонные изменения состояния фотосинтетического аппарата трех бореальных видов хвойных растений в подзоне Средней тайги на

европейском северо-востоке / Т.К. Головки, Я.Н. Яцко, О.В. Дымова // Хвойные бореальной зоны. – 2013. – XXXI, № 1-2. – С. 73–78.

71. Гончаров, Е.А. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова городских ландшафтов / Е.А. Гончаров, Д.И. Пигалин, Н.Г. Шурков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1 (25). – С. 87–97.

72. Горелова, С.В. Биогеохимическая активность голосеменных интродуцентов в условиях промышленно развитых урбанизированных экосистем / С.В. Горелова, М.В. Фронтасьева, А.В. Горбунов, С.М. Ляпунов, Е.Г. Мочалова, О.И. Окина // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2015. – Вып. 1. – С. 92–106.

73. Горышина, Т.К. Растение в городской среде / Т.К. Горышина. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 152 с.

74. Горячева, Е.Д. К анализу ассортимента деревьев и кустарников в насаждениях г. Тольятти / Е.Д. Горячева, Т.В. Изотова // Ландшафтная архитектура, строительство и обработка древесины: материалы научно-технической конференции СПбГЛТУ по итогам НИР 2020 года ИЛАСиОД. – Издательство: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 2021. – С. 116–125.

75. ГОСТ 17.2.3.01-86 Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. – М.: Стандартинформ, 2005. – 4 с.

76. ГОСТ 17.4.3.01-83 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2008. – 3 с.

77. ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.

78. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. – М.: Стандартинформ, 2011. – 6 с.

79. Григорьева, С.О. Композиционные сочетания с участием хвойных пород и их состояние в урбанизированной среде / С.О. Григорьева, М.В. Репях // Хвойные бореальной зоны. – 2020. – Т. XXXVIII, № 1-2. – С. 19–23.

80. Дегтярева, А.П. Особенности содержания фотосинтетических пигментов в хвое сосны обыкновенной в разных экологических условиях / А.П. Дегтярева // Научно-агрономический журнал. – 2022. – № 3 (118). – С. 70–74. – DOI: 10.34736/FNC.2022.118.3.010.70-74.

81. Дегтярева, О.Н. Мониторинг хвойных насаждений на урбанизированных территориях Республики Алтай / О.Н. Дегтярева, Р.О. Собчак, Т.П. Астафурова // Геоэкология Алтае-Саянской горной страны: ежегодный международный сборник научных статей. – 2005. – Вып. 2. – С. 244–248.

82. Дегтярева, Т.В. Накопление элементов растениями в соответствии с ландшафтно-функциональной структурой города Ставрополя / Т.В. Дегтярева, В.А. Титоренко // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9. – С. 585–589.

83. Демиденко, Г.А. Оценка состояния древесных растений объектов озеленения города Красноярска / Г.А. Демиденко // Лесное хозяйство. – 2021. – № 1 (62). – С. 109–115. – DOI: 10.34655/bgsha.2021.62.1.016.

84. Догадина, М.А. Анализ состояния и фитонцидной активности декоративных культур в урбозкосистемах (на примере г. Орел) / М.А. Догадина, О.В. Алексашкина // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 1. – С. 41–47.

85. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2015 год. – Ижевск: ООО «Принт-2», 2016. – 180 с.

86. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2016 год. – Ижевск: ООО «Принт», 2017. – 180 с.

87. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2017 год. – Ижевск: ООО «Принт», 2018. – 180 с.

88. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2018 год. – Ижевск: ООО «Принт», 2019. – 190 с.

89. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2019 год. – Ижевск: ООО «Принт», 2020. – 190 с.

90. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2020 год. – Ижевск: ООО «Принт», 2021. – 180 с.

91. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2021 год. – Ижевск: ООО «Принт», 2022. – 188 с.

92. Доклад об экологической ситуации в Республике Марий Эл за 2022 год. – Ижевск: ООО «Принт», 2023. – 188 с.

93. Донцов, А.С. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской / А.С. Донцов, Л.Н. Сунцова, Е.М. Иншаков // Хвойные бореальной зоны. – 2016. – XXXVII, № 5. – С. 246–250.

94. Дроздова, Н.И. Влияние и методы оценки природных и антропогенных воздействий на экосистемы / Н.И. Дроздова, Т.В. Макаренко // Экологический вестник. – 2015. – № 4 (34). – С. 96–102.

95. Дубовицкая, О.Ю. Декоративно-лиственные и хвойные деревья и кустарники для озеленения населенных мест / О.Ю. Дубовицкая, Е.В. Золотарева // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2014. – Т. 29, № 23 (194). – С. 38–43.

96. Дубровина, О.А. Содержание пигментного фонда в однолетней хвое ели колючей (*Picea pungens*) и туи западной (*Thuja occidentalis*), произрастающих в разных функциональных зонах г. Ельца [Электронный ресурс] / О.А. Дубровина, Т.В. Зубкова // АгроЭкоИнфо. – 2020. – № 3. – С. 1–11. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/3/st\\_315.pdf](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/3/st_315.pdf) (дата обращения: 09.06.2021).

97. Дубровина, О.А. Влияние антропогенного воздействия на содержание фотосинтетических пигментов в однолетней хвое сосны обыкновенной, произрастающей в лесопарковых зонах города Ельца [Электронный ресурс] / О.А. Дубровина, Г.А. Зайцев // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – № 1. – С. 1–7. – Режим доступа:

[http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2021/1/st\\_105.pdf](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2021/1/st_105.pdf) –

DOI: <https://doi.org/10.51419/20211105> (дата обращения: 09.06.2021).

98. Дубровина, О.А. Содержание меди и цинка в трехлетней хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Липецкой области [Электронный ресурс] / О.А. Дубровина, Г.А. Зайцев, Т.В. Зубкова // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2022. – № 1. – С. 1–10. – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/1/st\\_120.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/1/st_120.pdf) – DOI: <https://doi.org/10.51419/202121120> (дата обращения: 10.08.2023).

99. Емельянова, О.Ю. Эколого-биологические особенности видов хвойных растений рода *Picea* при оценке перспективности их распространения в Орловской области / О.Ю. Емельянова, М.Ф. Цой, Л.И. Масалова, Г.А. Павленко, А.Н. Фирсов // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. – 2020. – № 3. – С. 30–34.

100. Енчилик, П.Р. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника / П.Р. Енчилик, Е.Н. Асеева, И.Н. Семенков // Проблемы региональной экологии. Биологические науки. – 2018. – № 4. – С. 93–98.

101. Ерина, Л.С. Хвойные растения интродуценты в озеленении города Волгограда / Л.С. Ерина // Студенческий электронный журнал «СТРИЖ». – 2020. – № 6 (35.1). – С. 4–7.

102. 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.

103. Жуйкова, Т.В. Растительные системы в условиях техногенной трансформации среды / Т.В. Жуйкова; ФГАОУ ВО «РГППУ». – М.: Наука, 2022. – 339 с.

104. Жумагулов, Ж.Ж. Водный режим хвойных растений в зимний период в условиях г. Астана / Ж.Ж. Жумагулов // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. – 2010. – № 13. – С. 56–59.

105. Журавлева, Е.Г. Подготовка почвенных и растительных образцов для анализа на содержание микроэлементов / Е.Г. Журавлева // Методы определения микроэлементов в почвах, растениях и водах / под ред. И.Г. Важенина. – М.: Колос, 1974. – С. 7–24.

106. Загирова, С.В. Структурно-функциональная организация фотосинтетического аппарата хвойных растений елового фитоценоза / С.В. Загирова // Ботанический журнал. – 2004. – Т. 89, № 11. – С. 1795–1805.

107. Зайцев, В.Ф. Содержание и особенности распределения тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) в системе «почва – хвоя и листья древесных пород» на различных участках г. Усть-Каменогорска / В.Ф. Зайцев, Г.К. Галямова // Юг России: экология, развитие. – 2012. – № 4. – С. 66–71.

108. Залывская, О.С. Свинец в системе почва – древесное растение в урбанизированной среде / О.С. Залывская, С.В. Хрущева, Н.А. Бабич // Лесной журнал. – 2009. – № 1. – С. 39–43.

109. Залывская, О.С. Аккумуляция свинца в урбаносреде / О.С. Залывская, Е.Б. Карбасникова, Н.А. Бабич // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – XXXIX, № 3. – С. 191–196.

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

111. Зубкова, Т.В. Анализ содержания тяжелых металлов в однолетней хвое ели колючей (*Picea pungens*) и туи западной (*Thuja occidentalis*), произрастающих в разных функциональных зонах г. Ельца [Электронный ресурс] / Т.В. Зубкова, О.А. Дубровина // АгроЭкоИнфо. – 2020. – № 3. – С. 1–9. – Режим доступа: [https://agroecoinfo.narod.ru/journal/СТАТУИ/2020/3/st\\_316.pdf](https://agroecoinfo.narod.ru/journal/СТАТУИ/2020/3/st_316.pdf) (дата обращения: 10.08.2023).

112. Иванова, Р.Р. Оценка состояния окружающей среды по содержанию тяжелых металлов в почве и растительности города / Р.Р. Иванова // Научный журнал КубГАУ. – № 81 (07). – 2012. – С. 171–180.

113. Ильин, В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение / В.Б. Ильин. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991 – 151 с.

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

115. Информационный отчет «Проведение мониторинга состояния атмосферного воздуха на территории городского округа «Город Йошкар-Ола» за 2018 год. – Йошкар-Ола, 2018. – 46 с.

116. Информационный отчет «Проведение мониторинга состояния атмосферного воздуха на территории городского округа «Город Йошкар-Ола» за 2020 год. – Йошкар-Ола, 2020. – 42 с.

117. Информационный портал МО «Городской округ «Город Йошкар-Ола» Состояние природного комплекса [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.i-ola.ru/city/ecologia/natural\\_complex.php](https://www.i-ola.ru/city/ecologia/natural_complex.php) (дата обращения: 10.11.2024).

118. Исагалиев, М. Коэффициент биологического поглощения макро- и биомикроэлементов / М. Исагалиев, Г. Юлдашев, М. Обидов, С. Исагалиева // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции. В 2-х книгах. Книга 1. – Издательство: Алтайский государственный аграрный университет (Барнаул), 2021. – С. 319–321.

119. Кабанова, С.А. Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в зеленой зоне г. Нур-Султан / С.А. Кабанова, М.А. Данченко, С.А. Скотт, А.Н. Кабанов, Н.В. Цветкова, В.Ю. Кириллов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 4 (44). – С. 57–67. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/5>.

120. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас; пер. с англ. Д.В. Гричук и Е.П. Якина. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

121. Казакова, А.С. Применение стимуляторов роста при выращивании черенковых саженцев хвойных пород семейства кипарисовые (*Cupressaceae*) в условиях южной лесостепи Омской области / А.С. Казакова, Г.В. Барайщук // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (114). – С. 155–158.

122. Калякина, Р.Г. Эколого-биологические особенности хвойных пород деревьев в урбанизированной среде / Р.Г. Калякина, М.В. Рябухина, З.Н. Рябина, Е.М. Ангалт. – Оренбург: Оренбургский государственный аграрный университет, 2018. – 172 с.

123. Калякина Р.Г. Оценка состояния хвойных насаждений в условиях г. Оренбурга / Р.Г. Калякина, Е.М. Ангалт, Р.З. Алибаев, С.С. Тюлебаева // Аграрный вестник Приморья. – 2019. – № 4 (16). – С. 41–43.

124. Карасев, В.Н. Активность каталазы как показатель жизненного состояния древесных растений в городских условиях / В.Н. Карасев, М.А. Карасева, Н.Е. Серебрякова, Д.А. Абрамова // Актуальные проблемы лесного комплекса: сборник научных трудов. – Брянск: БГИТУ, 2015. – Вып. 43. – С. 88–90.

125. Карбасникова, Е.Б. Содержание тяжелых металлов в почве и древесной растительности в условиях городской агломерации / Е.Б. Карбасникова, О.С. Залывская, О.В. Чухина // Лесной журнал. – 2019. – № 5. – С. 216–223. – DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.216.

126. Карманова, А.А. Определение электропроводности и общей минерализации почв г. Архангельск / А.А. Карманова // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2021. – № 1. – С. 58–63.

127. Ковригина, Л.Н. Хвойные породы в городской среде / Л.Н. Ковригина, Л.О. Петункина // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 44-1. – С. 73–80.

128. Колесников, А.И. Декоративная дендрология. / А.И. Колесников. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 704 с.

129. Колупаев, Ю.Е. Антиоксидантная система растений: клеточная компартментация, защитные и сигнальные функции, механизмы регуляции (обзор) / Ю.Е. Колупаев, Ю.В. Карпец, Л.Ф. Кабашникова // Прикладная биохимия и микробиология. – 2019. – Т. 55, № 5. – С. 419–440. – DOI: 10.1134/S0555109919050088.

130. Коляда, Н.А. Об использовании североамериканских хвойных растений в озеленении городов России / Н.А. Коляда // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 9. – С. 73–76.

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

132. Коплан-Дикс, В.А. К вопросу разработки экологических нормативов качества атмосферного воздуха [Электронный ресурс] / В.А. Коплан-Дикс, М.В. Алехова // Труды НИИ Атмосфера. – 2002. – Режим доступа: <https://distant.msu.ru/mod/resource/view.php?id=14264> (дата обращения: 07.07.2023).

133. Копылова, Л.В. Накопление тяжелых металлов в древесных растениях на урбанизированных территориях Восточного Забайкалья: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Копылова Любовь Владимировна. – Улан-Уде, 2012. – 23 с.

134. Копылова, Л.В. Содержание железа в некоторых природных объектах в условиях антропогенной нагрузки (Забайкальский край) [Электронный ресурс] / Л.В. Копылова, О.А. Лескова // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 6. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=25747> (дата обращения: 12.02.2024).

135. Коростелева, М.В. Перспективные формы хвойных древесных растений для озеленения г. Екатеринбурга / М.В. Коростелева, Я.А. Крекова, С.В. Залесов, А.С. Оплетаев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 1 (103). – С. 124–130. – DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.1.046.

136. Кособокова, С.Р. Представители голосеменных растений в системе озеленения и благоустройства урбанизированных территорий аридной зоны / С.Р. Кособокова, Л.В. Морозова // Естественные науки. – 2015. – № 3 (52). – С. 18–23.

137. Косовская, М.А. Оценка функционального состояния дендроформ г. Севастополя в условиях интенсивной антропогенной нагрузки /

М.А. Косовская, Т.К. Хренова, Н.В. Лямина // Энергетические установки и технологии. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 97–104.

138. Кочергина, М.В. Видовое разнообразие и состояние уличных насаждений города Воронежа / М.В. Кочергина, А.В. Царегородцев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2020. – Т. 8, № 1 (48). – С. 64–69. – DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-64-69.

139. Кочергина, М.В. Фитонцидные свойства хвойных интродуцентов особо охраняемых природных территорий г. Воронежа / М.В. Кочергина, А.С. Дарковская // Бюллетень Ботанического сада Саратовского государственного университета. – 2010. – Вып. 9. – С. 84–88.

140. Кочуров, Б.И. Пигментный состав как биоиндикатор в урбоэкодиагностике городской среды / Б.И. Кочуров, Н.В. Чубченко // Экология урбанизированных территорий. – 2023. – № 4. – С. 26–34. – DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-26-34.

141. Кригер, Н.В. Биоиндикация урбоэкосистем по морфофизиологическим признакам хвойных древесных растений / Н.В. Кригер, М.А. Козлов, Е.С. Баранов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2013. – № 11 (86). – С. 166–168.

142. Крючкова, И.И. Особенности строения групп деревьев ели колючей в условиях г. Бугуруслан [Электронный ресурс] / И.И. Крючкова, З.Я. Нагимов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17307> (дата обращения: 10.02.2017).

143. Кулагин, А.Ю. Особенности содержания фотосинтетических пигментов в хвое сосны обыкновенной в условиях нефтяного загрязнения / А.Ю. Кулагин, Р.И. Шаяхметова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2 (2). – С. 434–437.

144. Кулагин, Ю.З. Древесные растения и промышленная среда / Ю.З. Кулагин. – М.: Наука, 1974. – 128 с.

145. Кулькова, А.В. Сезонные изменения пигментного состава хвои представителей рода ель в Нижегородской области / А.В. Кулькова,

Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. – Вып. 235. – С. 22–39. – DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.22-39.

146. Куровская, Л.В. Морфофункциональные особенности хвойных растений в условиях городской среды (на примере г. Томска): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05, 03.00.12 / Куровская Лариса Валерьевна. – Томск, 2002. – 22 с.

147. Кухлевская, Ю.Ф. Определение степени адаптивной способности, декоративности и успешности интродукции некоторых хвойных деревьев и кустарников в условиях Оренбуржья (на примере города Оренбурга) / Ю.Ф. Кухлевская, А.И. Колтунова, Е.В. Пикалова // Экосистемы. – 2020. – № 24. – С. 108–116.

148. Ладанова, Н.В. Структурная организация и фотосинтетическая активность хвои ели сибирской / Н.В. Ладанова, В.В. Тужилкина. – Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1992. – 97 с.

149. Ладыгин, В.Г. Спектральные свойства и структура хлоропластов при блокировке ранних этапов биосинтеза хлорофилла / В.Г. Ладыгин // Биофизика. – 2006. – Т. 51, вып. 4. – С. 710–723.

150. Лазарева, С.М. Хвойные интродуценты Республики Марий Эл / С.М. Лазарева, М.М. Котов, Л.И. Котова. – С.-Пб., 2002. – 136 с.

151. Лазарева, С.М. Краткие итоги интродукции хвойных в ботаническом саду МарГТУ / С.М. Лазарева // Лесной журнал. – 2004. – № 5. – С. 26–32.

152. Лапытова, В.З. Общие закономерности сезонной и возрастной изменчивости содержания хлорофиллов в хвое деревьев *Abies sibirica* / В.З. Лапытова, О.В. Силкина, А.И. Винокуров, Р.И. Винокурова // Ученые записки Казанского государственного университета. – 2009. – Т. 151. – С. 118–127.

153. Лапытова, В.З. Особенности распределения микроэлементов в хвое ели обыкновенной в условиях придорожной зоны / В.З. Лапытова, Р.И. Винокурова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 6 (38). – С. 199–202.

154. Лархер, В. Экология растений / В. Лархер. – М.: Мир, 1978. – 384 с.
155. Легощина, О.М. Анатомо-морфологические характеристики хвои ели сибирской в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово / О.М. Легощина, О.А. Неверова, А.А. Быков // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – Вып. 44, Ч. 8. – С. 54–61.
156. Легощина, О.М. Изменчивость анатомической структуры хвои *Picea obovata* Ledeb. в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово / О.М. Легощина, О.А. Неверова, А.А. Быков // Сибирский экологический журнал. – 2013. – № 5. – С. 733–739.
157. Легощина, О.М. Адаптация фотосинтетического аппарата хвои *Picea obovate* Ledeb. в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово / О.М. Легощина, О.А. Неверова, А.А. Быков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 132–135.
158. Лисотова, Е.В. Оценка жизненного состояния хвойных и лиственных древесных растений в урбанизированной среде города Красноярска / Е.В. Лисотова, Л.Н. Сунцова, Е.М. Иншаков // Хвойные бореальной зоны. – 2018. – XXXVI, № 6. – С. 498–501.
159. Литвенкова, И.А. Экология городской среды: урбоэкология / И.А. Литвенкова. – Витебск: Издательство УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2005. – 163 с.
160. Логунов, Д.В. Сезонная динамика основных пигментов в хвое некоторых представителей рода лиственница (*Larix* Mill.) в условиях Нижегородской области / Д.В. Логунов // Лесной журнал. – 2018. – № 3. – С. 37–42.
161. Лорсанова, Я.Э. Растения-индикаторы состояния окружающей среды (на примере воздействия атмосферного воздуха) / Я.Э. Лорсанова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. – № 3 (17). – С. 162–166.
162. Лоскутов, Р.И. Рост и развитие древесных растений-интродуцентов семейства *Pinaceae* Lindl. в дендрарии института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН

/ Р.И. Лоскутов // Хвойные бореальной зоны. – 2008. – Т. XXV, № 1-2. – С. 113–116.

163. Лящева, Л.В. Зимостойкость хвойных растений в условиях северной лесостепи юга Тюменской области / Л.В. Лящева, А.А. Лящев, Ю.С. Штейнберг // Известия вузов. Лесной журнал. – 2022. – № 1. – С. 49–61.

164. Маевский, П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. 11-е изд. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 635 с.

165. Майдебура, И.С. Оценка жизненного состояния древостоя в условиях города / И.С. Майдебура, Г.Н. Чупахина // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2007. – № 1. – С. 88–97.

166. Макарова, Т.А. Фитосанитарное состояние хвойных растений в насаждениях города Сургута / Т.А. Макарова, П.Н. Макаров // Вестник Сургутского государственного университета. – 2018. – № 4 (22). – С. 33–41.

167. Мартынов, Л.Г. Виды хвойных в коллекции ботанического сада Института биологии Коми научного центра и перспективы их использования в озеленении / Л.Г. Мартынов // Известия Коми научного центра УРО РАН. – 2015. – Вып. 1 (2). – С. 36–43.

168. Масленников, П.В. Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем / П.В. Масленников, В.П. Дедков, М.В. Куркина, А.С. Ващейкин, И.О. Журавлев, Н.В. Бавтрук // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2015. – № 7. – С. 57–69.

169. Масленников, П.В. Аккумуляция железа в растениях урбоэкосистем г. Калининграда [Электронный ресурс] / П.В. Масленников, Л.Н. Скрыпник, М.В. Куркина, П.В. Федуряев, А.В. Тюрганова, Е.В. Бабайцева, К.Ю. Устинова // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 3. – С. 1–10. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=24507> (дата обращения: 20.06.2017).

170. Маслова, Т.Г. Структурно-функциональные изменения фотосинтетического аппарата у зимневегетирующих хвойных растений в

различные сезоны года / Т.Г. Маслова, Н.С. Мамушина, О.А. Шерстнева // Физиология растений. – 2009. – Т. 56, № 5. – С. 672–681.

171. Матвеева, Р.Н. Содержание микроэлементов в семенах и хвое сосны кедр сибирского разного географического происхождения / Р.Н. Матвеева, Н.П. Братилова, С.М. Кубрина, Ю.Е. Щерба // Лесоведение. – 2019. – № 6. – С. 567–572.

172. Махрова, Т.Г. Хвойные интродуценты в зеленых насаждениях ВДНХ / Т.Г. Махрова, А.Ю. Сапелин // Лесной вестник. – 2016. – № 5. – С. 191–198.

173. Медведев, И.Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И.Ф. Медведев, С.С. Деревягин. – Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.

174. Медведева, М.В. Исследование влияния аэротехногенного загрязнения на накопление тяжелых металлов в системе растение-почва / М.В. Медведева, Т.С. Титова, О.Н. Бахмет, А.Н. Пеккоев, В.А. Харитонов // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 6. – С. 52–57.

175. Менщиков, С.Л. Аккумуляция металлов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в почве и снеговой воде в условиях техногенного загрязнения / С.Л. Менщиков, Н.А. Кузьмина, П.Е. Мохначев // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 94–102. – DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-94-102.

176. Методика выполнения измерений валового содержания меди, кадмия, цинка, свинца, никеля, марганца, кобальта, хрома методом атомно-абсорбционной спектроскопии. – М.: Изд. ФГУ ФЦАО, 2007. – 20 с.

177. Методические рекомендации по оценке жизнеспособности деревьев и правилам их отбора и назначения к вырубке и пересадке. – М.: Изд-во МГУЛ, 2003. – 40 с.

178. Методы эколого-биологических исследований: учебно-методическое пособие / Мар. гос. ун-т; О.Л. Воскресенская, Е.А. Алябышева, Е.В. Сарбаева, В.С. Воскресенский. – Йошкар-Ола, 2018. – 128 с.

179. Митрошенкова, А.Е. Оценка состояния древостоя хвойных растений, используемых в озеленении города Самара (по данным исследований 2018 года) / А.Е. Митрошенкова, В.Н. Ильина // Самарская Лука: проблемы региональной и

глобальной экологии. – 2019. – Т. 28, № 3. – С. 136–143. – DOI: 10.24411/2073-1035-2019-10244.

180. Митякова, И.И. Оценка экологического состояния почв г. Йошкар-Олы / И.И. Митякова, Р.Р. Иванова, Д.В. Терентьев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2020. – № 1 (45). – С. 75–89. – DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.75.

181. Митякова, И.И. Оценка экологического состояния городской среды в системе «почва – растение» города Йошкар-Олы / И.И. Митякова, Р.Р. Иванова, Т.Е. Шведова // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о земле. – 2023. – Т. 33, вып. 4. – С. 403–412. – DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-403-412.

182. Михайлова, Т.А. Особенности накопления и миграции свинца в древесных растениях и почвах г. Иркутска / Т.А. Михайлова, О.В. Шергина // Растительные ресурсы. – 2011. – Т. 47, вып. 1. – С. 56–65.

183. Михайлова, Т.А. Фитомониторинг атмосферного загрязнения в Байкальском регионе / Т.А. Михайлова, О.В. Калугина, О.В. Шергина // Сибирский экологический журнал. – 2013. – Т. 20, № 5. – С. 725–731.

184. Михайлова, Т.А. Особенности адсорбции взвешенных частиц хвоей и листьями деревьев городских лесов иркутска / Т.А. Михайлова, О.В. Шергина, А.С. Миронова // Ботанический журнал. – 2023. – Т. 108, № 5. – С. 455–472.

185. Мокроносов, А.Т. Фотосинтез: Физиолого-экологические и биохимические аспекты / А.Т. Мокроносов. – М., Изд-во МГУ, 1992. – 319 с.

186. Морозова, Г.Ю. Жизнеспособность растений в условиях урбанизированной среды / Г.Ю. Морозова // Известия вузов. Лесной журнал. – 2024. – № 6. – С. 106–120. – DOI: 10.37482/0536-1036-2024-6-106-120.

187. Мударисов, Р.Г. Привлекательность и экологическая оценка зеленых насаждений города Казани в связи с проведением Универсиады 2013 / Р.Г. Мударисов, М.Р. Валиев // Экология России: на пути к инновациям: межвузовский сборник научных трудов. – Астрахань, 2013. – Вып. 7. – С. 160–164.

188. Муниципальная программа городского округа «Город Йошкар-Ола» «Формирование современной городской среды в городском округе «Город Йошкар-Ола» на 2018–2024 годы». – Йошкар-Ола, 2019. – 14 с.

189. Неверова, О.А. Использование активности пероксидазы для оценки физиологического состояния древесных растений и качества атмосферного воздуха г. Кемерова / О.А. Неверова // *Krylovia*. – 2001. – Т. 3, № 2. – С. 122–128.

190. Неверова, О.А. Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды: аналит. обзор / О.А. Неверова, Н.И. Еремеева; Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, Ин-т экологии человека. – Новосибирск, 2006. – 88 с.

191. Неверова, О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды / О.А. Неверова // *Биосфера*. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 82–92.

192. Неверова, О.А. Изменение анатомических показателей хвои *Pinus eldarica* Ten., произрастающей в примагистральных посадках г. Худжанда [Электронный ресурс] / О.А. Неверова, О.М. Легощина, Р.С. Зокиров // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <https://s.science-education.ru/pdf/2012/4/168.pdf> (дата обращения: 10.09.2016).

193. Николаевский, В.С. Биологические основы газоустойчивости растений / В.С. Николаевский. – Новосибирск: Наука, 1979. – 280 с.

194. Николаевский, В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации / В.С. Николаевский. – М.: МГУЛ, 1999. – 193 с.

195. Новицкая, Ю.Е. Физиолого-биохимические механизмы адаптации хвойных к экстремальным факторам среды / Ю.Е. Новицкая // *Адаптация древесных растений к экстремальным условиям среды*. – Петрозаводск: Кар. фил. АН СССР, 1984. – С. 42–52.

196. Обущенко, С.В. Мониторинг содержания микроэлементов и тяжелых металлов в почвах Самарской области / С.В. Обущенко, В.В. Гнеденко // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2014. – № 7. – С. 30–34.

197. Овечкина, Е.С. Влияние антропогенных факторов на содержание пигментов сосны обыкновенной в летне-зимний период на территории Нижневартковского района / Е.С. Овечкина, Р.И. Шаяхметова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – № 6. – С. 236–241.

198. Овсянников, А.Ю. Сезонная динамика водного режима растений рода *Picea* на среднем Урале / А.Ю. Овсянников, С.А. Шавнин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 6 (44). – С. 190–193.

199. Овсянников, А.Ю. Сезонная структурно-функциональная трансформация фотосинтетического аппарата хвои *Picea pungens* Engl. и *P. obovate* Ledeb. на территории Ботанического сада УРО РАН (г. Екатеринбург): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Овсянников Алексей Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2015. – 22 с.

200. Олива, Т.В. Аккумуляция тяжелых металлов древесными породами и сельскохозяйственными культурами в условиях примагистральной экосистемы / Т.В. Олива, Е.Ю. Колесниченко, С.И. Панин, Л.А. Манохина // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 12. – С. 184–193.

201. Опекунова, М.Г. Биоиндикация загрязнений: учеб. пособие / М.Г. Опекунова. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2016. – 300 с.

202. Определитель сосудистых растений центра европейской России / И.А. Губанов, К.В. Киселева, В.С. Новиков, В.Н. Тихомиров. 2-е изд., дополн. и перераб. – М.: Аргус, 1995. – 560 с.

203. Орехов, Д.И. Изучение параметров флуоресценции хлорофилла в листьях древесных растений, растущих в условиях г. Москвы / Д.И. Орехов, Ю.П. Козлов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 4. – С. 23–28.

204. Орлова, Л.В. Виды рода *Picea* (*Pinaceae*) в дендрарии Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии / Л.В. Орлова, Е.П. Ефремова, Г.А. Фирсов, В.Т. Ярмишко // Хвойные бореальной зоны. – 2009. – Т. XXVI, № 2. – С. 178–186.

205. Оскорбина, М.В. Влияние климатических условий на динамику зеленых пигментов и фотосинтетическую продуктивность хвойных / М.В. Оскорбина, Г.Г. Суворова, Л.Д. Копытова, В.А. Осколков, Л.С. Янькова // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 4. – С. 25–30.

206. Острошенко, В.Ю. Интродукция туи западной (*Thuja occidentalis* L.) на юг Дальнего Востока России / В.Ю. Острошенко, Н.А. Коляда // Вестник ДВО РАН. – 2017. – № 5. – С. 97–101.

207. 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 // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 2. – С. 11–19.

208. Пахарькова, Н.В. Флуоресцентная диагностика зимнего покоя хвойных в урбоэкосистемах с различным уровнем загрязнения воздушной среды / Н.В. Пахарькова, О.П. Калякина, А.А. Шубин, Ю.С. Григорьев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Химия». – 2009. – Т. 2, № 4. – С. 359–367.

209. Пахарькова, Н.В. Различия в акклимационных стратегиях сосны обыкновенной и ели сибирской на загрязнение воздушной среды / Н.В. Пахарькова, О.П. Калякина, А.А. Шубин, Ю.С. Григорьев, С.В. Пахарьков // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Том XXVI, № 3-4. – С. 232–237.

210. Пашкова, А.С. Биоэкологические особенности *Picea abies* L. и *Picea pungens* Engelm. в условиях городской среды: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.01, 03.02.08 / Пашкова Анна Сергеевна. – Оренбург, 2015. – 24 с.

211. Перельман, А.И. Геохимия ландшафта. / А.И. Перельман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.

212. Перельман, А.И. Геохимия: учеб. для геол. спец. вузов. / А.И. Перельман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 528 с.

213. Петухов, А.С. Активность каталазы травянистых растений в условиях загрязнения городской среды / А.С. Петухов, Н.А. Хритохин, Т.А. Кремлева,

Г.А. Петухова // Самарский научный вестник. – 2019. – Т. 8, № 1. – С. 90–95. – DOI: 10.24411/2309-4370-2019-11115.

214. Петухов, А.С. Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) в почвах г. Тюмени / А.С. Петухов, Т.А. Кремлева, Н.А. Хритохин, Г.А. Петухова, П.И. Кайдунова // Вестник Нижневарттовского государственного университета. – 2020. – № 1. – С. 127–134. – DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/19.

215. Плотникова, Л.С. Хвойные растения / Л.С. Плотникова. – М.: Кладезь – Букс, 2006. – 93 с.

216. Поварницина, Т.М. Эколого-физиологические особенности адаптации растений к условиям крупных промышленных регионов (на примере г. Ижевска): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Поварницина Татьяна Михайловна. – Толятти, 2007. – 20 с.

217. Подоль, С.Р. Распределение и динамика химических элементов в сосновых биогеоценозах Мещерского полесья / С.Р. Подоль, З.И. Попова // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. – 2015. – № 2. – С. 87–92.

218. Полевой экологический практикум. Учебное пособие. Ч. 1 / Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2000. – 112 с.

219. Попова, В.Т. Оценка перспективности некоторых видов хвойных растений для интродукции в условиях Центрального Черноземья / В.Т. Попова, В.Д. Дорофеева, А.А. Попова // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2016. – № 4. – С. 89–97.

220. Потапенко, И.Л. Декоративные древесные растения города Керчь и перспективы их использования в озеленении / И.Л. Потапенко, В.Ю. Летухова // Экосистемы. – 2022. – № 31. – С. 72–85.

221. Прохоренко, Н.Б., Оценка жизненного состояния деревьев в урбанизированных условиях Казани / Н.Б. Прохоренко, Г.В. Демина, Д.Н. Мингазова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 2 (3). – С. 507–512.

222. Пугаев, С.В. Взаимное влияние почвы и дендрофлоры на накопление тяжелых металлов (на примере Ботанического сада МГУ им. Н.П. Огарева). Хвойные растения / С.В. Пугаев, А.С. Лукаткин // *Агрохимия*. – 2014. – № 7. – С. 53–59.

223. Пугаев, С.В. Накопление тяжелых металлов в почве и листовом аппарате растений дендрария ботанического сада Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева / С.В. Пугаев, А.С. Лукаткин // *Агрохимия*. – 2015. – № 5. – С. 74–82.

224. Радостева, Э.Р. Биоаккумуляция металлов в органах древесных растений в условиях полиметаллических отвалов Учалинского горнообогатительного комбината (Республика Башкортостан) / Э.Р. Радостева, А.Ю. Кулагин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 13, № 5 (2). – С. 200–202.

225. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы (с изменениями на 01.10.2019 г.). – Москва: б.и., 1989. – 615 с.

226. Решетникова, Л.И. Ассортимент хвойных пород деревьев и кустарников для использования в озеленении города Сыктывкара / Л.И. Решетникова // *Ландшафтная архитектура, строительство и обработка древесины: материалы научно-технической конференции СПбГЛТУ по итогам НИР 2017 года ИЛАСиОД*. – СПб.: Издательство: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (Санкт-Петербург), 2018. – С. 114–116.

227. Робакидзе, Е.А. Элементный состав доминирующих видов растений в среднетаежных ельниках (на примере Республики Коми) / Е.А. Робакидзе, К.С. Бобкова, С.И. Наймушина // *Растительные ресурсы*. – 2022. – Т. 58, № 1 – С. 87–99. – DOI: 10.31857/S0033994622010113.

228. Рогожин, В.В. Пероксидаза: строение и механизм действия / В.В. Рогожин, В.В. Верхотуров, Т.В. Рогожина. – Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2004. – 200 с.

229. Романова, А.Б. Проблемы системы озеленения урбанизированной территории на примере исторического центра города Красноярска / А.Б. Романова, Н.П. Братилова, И.А. Корниенко // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. XXXIX, № 6. – С. 462–468.

230. Румянцев, Д.Е. Рост туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в дендрарии Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН по данным дендрохронологического анализа / Д.Е. Румянцев, С.Л. Рысин, А.А. Коженкова, П.С. Александров, Н.С. Воробьева, А.А. Епишков // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 5–16. – DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-5-16.

231. Рунова, Е.М. Некоторые особенности накопления загрязняющих веществ древесными насаждениями в урбоэкосистеме г. Братска / Е.М. Рунова, Ю.Н. Алпатов, И.И. Гаврилин // Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал. – 2011. – № 10. – С. 144–148.

232. Рунова, Е.М. Интродукция декоративной древесно-кустарниковой растительности в условиях города Братска / Е.М. Рунова, Н.В. Крамская // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2012. – Т. 1. – С. 82–83.

233. Рунова, Е.М. Видовой состав зеленых насаждений общего пользования г. Братска / Е.М. Рунова, П.С. Гнаткович // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 2 (18). – С. 156–159.

234. Русак, С.Н. Фотосинтетические пигменты сосны сибирской (*Pinus sibirica* DuRoi) в биоиндикации условий окружающей среды / С.Н. Русак, И.И. Варлам, И.В. Кравченко, К.В. Казарцева // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 3. – С. 6–11.

235. Русак, С.Н. Воздействие факельных установок на хвойные растения / С.Н. Русак, А.А. Обзор // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2021. – № 2. – С. 25–30. – DOI: 10.12737/2306-174X-2021-25-34.

236. Рябухина, М.В. Эколого-биологические показатели хвойных пород деревьев в условиях аэротехногенного воздействия городской среды (на примере

г. Оренбурга): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.01 / Рябухина Мария Владимировна. – Оренбург, 2013. – 22 с.

237. Рябухина, М.В. Мониторинг дендрофлоры городской среды методом оценки биохимических маркерных показателей / М.В. Рябухина, А.В. Филиппова, С.Л. Белопухов, Т.А. Федорова // Вестник РУДН, серия Агрономия и животноводство. – 2015. – № 1. – С. 12–17.

238. Савватеева, О.А. Биоиндикация по хвойным породам деревьев / О.А. Савватеева, У.Д. Щербакова // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3. – С. 520–521.

239. Сазонова, Т.А. Эколого-физиологическое исследование реакции хвойных растений Северо-Запада России на воздействие природных и антропогенных факторов: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.16, 03.00.12 / Сазонова Татьяна Аркадьевна. – Петрозаводск, 2006. – 40 с.

240. Самойленко, Г.Ю. Мониторинг загрязненности тяжелыми металлами почвенного покрова и растений (на примере *Potentilla tanacetifolia* Willd. Ex Schlecht.) природных экосистем в условиях урбанизированной территории г. Читы / Г.Ю. Самойленко, Е.А. Бондаревич, И.А. Борискин // Самарский научный вестник. – 2018. – Т. 7, № 1 (22). – С. 110–115.

241. Самохвалов, К.В. Опыт разработки рекомендательного списка древесных растений для озеленения и реконструкции зеленых насаждений города Чебоксары на основе оценки качества городской среды / К.В. Самохвалов, Е.А. Синичкин // Самарский научный вестник. – 2020. – Т. 9, № 3. – С. 122–128. – DOI: 10.17816/snv202093120.

242. Самусик, Е.А. Реакция пигментной системы древесных растений на газопылевое загрязнение / Е.А. Самусик, С.Е. Головатый // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2023. – № 2. – С. 78–86. – DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-78-86>.

243. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года). – М., 2021. – 990 с.

244. СанПиН 1.2.3685-21 Раздел IV. Почва населенных мест и сельскохозяйственных угодий. – М., 2021. – 11 с.

245. Сарбаева, Е.В. Некоторые аспекты устойчивости туи западной в городских экосистемах [Электронный ресурс] / Е.В. Сарбаева, О.Л. Воскресенская. – Йошкар-Ола, 2008. – Режим доступа: <https://marsu.ru/science/libr/resours/thuja/index.html> (дата обращения: 15.03.2016).

246. Сарбаева, Е.В. Оценка устойчивости древесно-кустарниковых растений в урбанизированной среде [Электронный ресурс] / Е.В. Сарбаева, О.Л. Воскресенская, В.С. Воскресенский // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – Режим доступа: URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9011> (дата обращения: 01.06.2015).

247. Сарбаева, Е.В. Оценка экосистемных услуг зеленых насаждений г. Йошкар-Олы / Е.В. Сарбаева // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2024. – Т. 24, вып. 2. – С. 214–224. – DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-2-214-224>.

248. Седельникова, Л.Л. Изменчивость коэффициента биологического поглощения тяжелых металлов вегетативными органами *Нemerocallis hybrida* / Л.Л. Седельникова, О.В. Чанкина // Ученые записки ЗабГУ. Серия Биологические науки. – 2017. – Т. 12, № 1. – С. 45–51.

249. Седых, С.А. Эдафические условия роста хвойных растений на территории города Новочеркасска / С.А. Седых, Н.В. Иванисова, Л.В. Куринская, Д.В. Семенов, Д.П. Зеленков // Природообустройство. – 2017. – № 1. – С. 120–126.

250. Семкина, Л.А. Сравнительная характеристика содержания фотосинтетических пигментов *Juniperus communis* L. / Л.А. Семкина, Е.А. Тишкина // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. – 2021. – № 3 (64). – С. 116–124. – DOI: [10.34655/bgsha.2021.64.3.015](https://doi.org/10.34655/bgsha.2021.64.3.015).

251. Сергейчик, С.А. Древесные растения и оптимизация промышленной среды / С.А. Сергейчик. – Минск: Наука и техника, 1984. – 168 с.

252. Сергейчик, С.А. Эколого-физиологический мониторинг устойчивости ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в техногенной среде / С.А. Сергейчик // Биосфера. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 384–391.

253. Серебрякова, Н.Е. Диагностика жизнеспособности древесных растений г. Нижнекамска по активности фермента каталазы / Н.Е. Серебрякова, М.А. Карасева, В.Н. Карасев, Ю.В. Граница // Российский журнал прикладной экологии. – 2015. – № 4 (4). – С. 39–43.

254. Сибиркина, А.Р. Содержание кадмия в органах сосны обыкновенной ленточных боров Прииртышья Республики Казахстан / А.Р. Сибиркина // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2013. – № 2. – С. 130–137.

255. Сибиркина, А.Р. Сравнение содержания соединений кобальта в органах и тканях древесных растений / А.Р. Сибиркина, С.Ф. Лихачев // Самарский научный вестник. – 2017. – Т. 6, № 2 (19). – С. 84–87.

256. Сидоркина, З.И. Оценка состояния и возможностей восстановления аборигенных видов хвойных в городском ландшафте г. Владивостока / З.И. Сидоркина, Р.А. Макаревич // Псковский регионологический журнал. – 2015. – № 23. – С. 51–58.

257. Симонова, З.А. Активность пероксидазы *Betula pendula* как индикатор качества городской среды (на примере г. Саратова) / З.А. Симонова, Д.А. Чемаркин // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8. – С. 1097–1101.

258. Симонова, З.А. Роль железосодержащих оксидаз в адаптации древесных растений к факторам городской среды (на примере города Саратова) / З.А. Симонова, Е.И. Тихомирова, И.С. Шайденко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2 (3). – С. 801–805.

259. Скок, А.В. Оценка экологического состояния хвойных растений на урбанизированной территории / А.В. Скок // Пермский аграрный вестник. – 2018. – № 1 (21). – С. 155–159.

260. Скрипальщикова, Л.Н. Морфолого-анатомические особенности хвои сосны обыкновенной под влиянием промышленных выбросов города Красноярска

/ Л.Н. Скрипальщикова, И.А. Днепровский, В.В. Стасова, М.А. Пляшечник, Н.В. Грешилова, О.В. Калугина // Сибирский лесной журнал. – 2016. – № 3. – С. 46–56.

261. Смирнова, С.А. Содержание тяжелых металлов в хвойных деревьях (на примере лесохозяйственной показательной плантации управления лесного хозяйства г. Хэйхэ) / С.А. Смирнова, Ж.А. Димиденко, О.Н. Щербакова, Сюй Фучэнь // Охрана и рациональное использование лесных ресурсов: материалы X международного форума (Благовещенск, 5–6 июня 2019 г.). В 2 ч. Ч. 1. – Благовещенск: Изд-во Дальневосточного гос. аграрного ун-та, 2019. – С. 160–162.

262. Соболева, С.В. Исследование морфофизиологических показателей насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в разных экологических условиях / С.В. Соболева, И.С. Почекутов, Л.И. Ченцова // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 1 (136). – С. 199–205.

263. Соболева, С.В. Оценка загрязнения экосистемы города Красноярска биоиндикационным методом [Электронный ресурс] / С.В. Соболева, О.А. Есякова, И.С. Почекутов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 12-2. – С. 175–181. – Режим доступа: <https://s.applied-research.ru/pdf/2019/12-2/12975.pdf> (дата обращения: 20.01.2021).

264. Соболева, С.В. Оценка аэрогенного загрязнения с использованием сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata*) / С.В. Соболева О.А. Есякова, В.М. Воронин // Хвойные бореальной зоны. – 2020. – Т. XXXVIII, № 3-4. – С. 115–122.

265. Собчак, Р.О. Оценка состояния хвойных пород в зоне действия атмосферных загрязнителей по структурно-функциональным показателям хвои / Р.О. Собчак, Т.П. Астафурова, Т.А. Зайцева, Г.С. Верхотурова, А.П. Зотикова, О.Н. Дегтярева // Ktylovia. – 2001. – Т. 3, № 2. – С. 114–121.

266. 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.

267. Собчак, Р.О. Морфофункциональные особенности видов хвойных в условиях урбанизированной среды / Р.О. Собчак, Л.В. Куровская // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 10. – С. 214–217.

268. Соколова, Г.Г. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной в условиях техногенного загрязнения г. Риддера / Г.Г. Соколова, В.И. Корниенко, И.А. Кондратьева // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 330–335. – DOI: 10.14258/pbssm.2023150.

269. Соловьева, О.С. Зеленые насаждения как средство улучшения экологии города / О.С. Соловьева, Н.А. Соколова, О.Н. Бажин, А.Р. Гусейнова // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2010. – № 1 (8). – С. 75–83.

270. Сперанская, Н.Ю. Хвойные растения зеленых насаждений г. Барнаула / Н.Ю. Сперанская, М.А. Галкина // Известия Алтайского государственного университета. – 2004. – № 3. – С. 104–106.

271. Сродных, Т.Б. Озеленение городов Тюменского Севера: монография / Т.Б. Сродных; Минобрнауки России, Уральский государственный лесотехнический университет, переиздание. – Екатеринбург, 2011. – 140 с.

272. Старцев, А.И. Особенности накопления меди в почвах разных функциональных зон города Новокуйбышевска / А.И. Старцев // Самарский научный вестник. – 2019. – Т. 8, № 2 (27). – С. 67–71.

273. Стаценко, А.П. Растительные пероксидазы – маркеры химического загрязнения природных сред / А.П. Стаценко, Л.И. Тужилова, А.А. Вьюговский // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2008. – № 10 (92). – С. 188–191.

274. Ступакова, О.М. Обоснованность необходимости применения хвойных пород для озеленения территорий школ г. Красноярска / О.М. Ступакова, Т.Ю. Аксянова, Г.А. Гапонова // Хвойные бореальной зоны. – 2011. – XXIX, № 3-4. – С. 277–279.

275. Субботина, М.Г. Об электропроводности почв в современных исследованиях / М.Г. Субботина, Батье-Салес Хорхе // Пермский аграрный вестник. – 2013. – № 3 (3). – С. 28–33.

276. Судачкова, Н.Е. Физиология сосны обыкновенной / Н.Е. Судачкова, Г.И. Гирс, С.Г. Прокушкин и др. – Новосибирск: Наука, 1990. – 248 с.

277. Сунгурова, Н.Р. Хвойные виды в урбанофлоре Архангельска / Н.Р. Сунгурова, С.Р. Страздаускене, Г.Н. Стругова // Хвойные бореальной зоны. – 2023. – Т. XLI, № 6. – С. 466–473.

278. Сунцова, Л.Н. О состоянии пигментного аппарата хвойных в условиях урбанизированной среды города Красноярска / Л.Н. Сунцова, Е.М. Иншаков, Е.В. Лисотова, М.А. Суслина // Хвойные бореальной зоны. – 2023. – Т. 41, № 5. – С. 399–405.

279. Суслина, М.А. Анализ состояния пигментного комплекса *Picea obovata* и *Picea pungens* в условиях техногенной среды города Красноярска / М.А. Суслина, Л.Н. Сунцова, Е.М. Иншаков // Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. XXXIX, № 4. – С. 263–268.

280. Сухарева, Т.А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения / Т.А. Сухарева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2013. – № 6 (336). – С. 19–28.

281. Тарчевский, И.А. Сигнальные системы клеток растений / И.А. Тарчевский. – М.: Наука, 2002. – 294 с.

282. Ташекова, А.Ж. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды / А.Ж. Ташекова, А.С. Торопов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 5. – С. 114–124.

283. Титов, А.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина, Г.Ф. Лайдинен. – Институт биологии КарНЦ РАН. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 172 с.

284. Титов, А.Ф. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учебное пособие / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина. – Институт биологии КарНЦ РАН. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 77 с.

285. Титов, А.Ф. Тяжелые металлы и растения / А.Ф. Титов, Н.М. Казнина, В.В. Таланова. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.

286. Титова, М.С. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *Picea abies* и *Picea koraiensis* / М.С. Титова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – № 12. – С. 9–12.

287. Титова, М.С. Особенности фотосинтезирующей активности хвои интродуцированных видов *Picea A. Dietr.* в дендрарии горнотаежной станции / М.С. Титова // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11. – С. 128–132.

288. Титова, М.С. Динамика фотосинтезирующей активности хвои *Picea ajanensis* и *Picea Smithiana* в условиях зеленой зоны г. Уссурийска [Электронный ресурс] / М.С. Титова, Н.Г. Розломий // Живые и биокосные системы. – 2015. – № 12. – Режим доступа: URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-12/article-4> (дата обращения: 05.06.2017).

289. Титова, М.С. Пигментный комплекс хвои дальневосточных и интродуцированных видов рода Можжевельник (*Juniperus L.*) [Электронный ресурс] / М.С. Титова // Живые и биокосные системы. – 2015. – № 13. – Режим доступа: <http://www.jbks.ru/archive/issue-13/article-4>. – DOI: 10.18522/2308-9709-2015-13-4 (дата обращения: 05.06.2017).

290. Тишкина, Е.А. Изменчивость накопления пластидных пигментов в хвое можжевельника обыкновенного *Juniperus communis L.* / Е.А. Тишкина, Л.А. Семкина // Научные ведомости. Серия Естественные науки. – 2015. – № 21 (218), вып. 33 – С. 47–51.

291. Тишкина, Е.А. Влияние антропогенных воздействий на устойчивость ценопопуляций *Juniperus communis L.* на среднем Урале / Е.А. Тишкина, Л.А. Семкина // Вестник Удмуртского университета. – 2016. – Т. 26, вып. 1. – С. 79–84.

292. Тишкина, Е.А. Оценка состояния ценопопуляций можжевельника обыкновенного по содержанию фотосинтетических пигментов на Среднем и Южном Урале / Е.А. Тишкина, Л.А. Семкина // Лесоведение. – 2017. – № 6. – С. 127–132.

293. Тишкина, Е.А. Особенности сезонной динамики фотосинтетических пигментов в хвое интродукционных популяций *Juniperus communis* L. / Е.А. Тишкина, Л.А. Семкина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20, № 5 (3). – С. 473–478.

294. Тишкина, Е.А. Состояние фотосинтетических пигментов в интродукционных популяциях можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) / Е.А. Тишкина, Л.П. Абрамова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 2 (70). – С. 83–87.

295. Токарева, Т.Г. Шумозащитные свойства древесных растений и их использование в озеленении / Т.Г. Токарева, Р.В. Леонтьев // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ «Грани познания». – 2018. – № 4 (57). – С. 63–66.

296. Токарева, Т.Г. Фитонцидные свойства хвойных растений и их использование в урбанистическом ландшафте / Т.Г. Токарева // Электронный научно-образовательный журнал ВГСПУ «Грани познания». – 2019. – № 6 (65). – С. 126–129.

297. Толкач, Г.В. Накопление некоторых химических элементов растительностью фитоценозов Брестского района в условиях техногенного загрязнения почвенного покрова / Г.В. Толкач, С.С. Позняк // Экологический вестник. – 2017. – № 2 (40). – С. 62–66.

298. Торлопова, Н.В. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса) / Н.В. Торлопова, Е.А. Робакидзе. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 137 с.

299. Трейвас, Л.Ю. Атлас-определитель. Болезни и вредители хвойных растений / Л.Ю. Трейвас. – М.: Фитон, 2010. – 144 с.

300. Тужилкина, В.В. Пигментная система хвойных в районе влияния Сыктывкарского лесопромышленного комплекса / В.В. Тужилкина // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. – 2001. – Вып. 47. – С. 11–13.

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

302. Тужилкина, В.В. Комплексная оценка состояния хвои *Picea obovata* (Pinaceae) в условиях аэротехногенного загрязнения / В.В. Тужилкина, С.Н. Плюснина // Растительные ресурсы. – 2014. – Т. 50, вып. 4. – С. 579–587.

303. Тужилкина, В.В. Фотосинтетические пигменты хвои ели сибирской в среднетаежных лесах европейского северо-востока России / В.В. Тужилкина // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 1. – С. 65–73.

304. Тужилкина, В.В. Структурно-функциональные изменения хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения / В.В. Тужилкина, С.Н. Плюснина // Лесоведение. – 2020. – № 6. – С. 537–547.

305. Тужилкина, В.В. Фотосинтетическая активность подроста хвойных в связи с промышленными рубками / В.В. Тужилкина // Теоретическая и прикладная экология. – 2024. – № 2. – С. 22–28. – DOI: 10.25750/1995-4301-2024-2-022-028.

306. Тюлькова, Е.Г. Зольность растений в условиях городской среды (на примере города Гомеля) / Е.Г. Тюлькова // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. – 2017. – № 1. – С. 58–65.

307. Уфимцева, М.Д. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга / М.Д. Уфимцева, Н.В. Терехина. – СПб.: Наука, 2005. – 339 с.

308. Федоров, Н.И. Лесная фитопатология: учеб. пособие для лесохоз. спец. вузов / Н.И. Федоров. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 178 с.

309. Филимонова, М.В. Пигментный аппарат *Pinus sylvestris* Барсовой горы в зависимости от загрязнения среды обитания / М.В. Филимонова,

И.В. Кравченко, С.Н. Русак // Хвойные бореальной зоны. – 2013. – Т. 31, № 3-4. – С. 82–88.

310. Филиппова, А.В. Эколого-биологическая характеристика хвойных растений и локальный мониторинг (на примере г. Кемерово): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Филиппова Александра Владимировна. – Кемерово, 2005. – 21 с.

311. Фирсов, Г.А. Ассортимент хвойных в озеленении Санкт-Петербурга на рубеже веков: тенденции и перспективы / Г.А. Фирсов, А.Г. Хмарик, Л.В. Орлова, В.В. Бялт // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия Естественные науки. – 2016. – № 2 (16). – С. 7–21.

312. Фролов, А.К. Особенности фотосинтетического аппарата некоторых древесных пород в городских условиях / А.К. Фролов, Т.К. Горышина // Ботанический журнал. – 1982. – Т. 67, вып. 5. – С. 599–609.

313. Хмарик, А.Г. Таксономический состав и распространение хвойных растений в структуре зеленых насаждений Санкт-Петербурга / А.Г. Хмарик // Интродукция, сохранение и использование биологического разнообразия флоры: материалы международной научной конференции, посвященной 90-летию Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси. Часть 2. – Издательство: Республиканское унитарное предприятие «Белтаможсервис», Минск, 2022. – С. 409–412.

314. Черепанов, С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств / С.К. Черепанов. – СПб., 1995. – 991 с.

315. Чернышенко, О.В. Особенности использования поглотительной способности древесных растений в современных фитотехнологиях / О.В. Чернышенко // Лесной вестник. – 2018. – Т. 22, № 4. – С. 92–98. – DOI: 10.18698/2542-1468-2018-4-92-98.

316. Чернышов, М.П. Хвойные породы в озеленении Центральной России / М.П. Чернышов, Ю.Ф. Арефьев, Е.В. Титов, О.Н. Беспаленко, В.Д. Дорофеева, В.В. Кругляк, А.М. Пятых. – М.: Колос, 2007. – 328 с.

317. Чиркова, Т.В. Физиологические основы устойчивости растений / Т.В. Чиркова. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. – 244 с.

318. Чукина, Н.В. Морфофизиологические особенности хвои *Pinus sylvestris* L., произрастающей на отвалах Анатольско-Шиловских месторождений асбеста / Н.В. Чукина, Н.В. Лукина, Е.И. Филимонова, М.А. Глазырина, А.П. Учаев, В.Н. Климова // Лесохозяйственная информация. – 2024. – № 2. – С. 5–18. – DOI: 10.24419/LNI.2304-3083.2024.2.01.

319. 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 // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2012. – № 2 (18). – С. 171–185.

320. Шадманова, Т.Х. Экологические основы биоиндикационных исследований / Т.Х. Шадманова, Ю.С. Чуйков // Астраханский вестник экологического образования. – 2012. – № 2. – С. 157–164.

321. Шаяхметова, Р.И. Анатомические особенности хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Нижневартовского района, ХМАО-Югра / Р.И. Шаяхметова, Н.Н. Егорова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 6 (140). – С. 72–77.

322. Шелухо, В.П. Состояние хвойных насаждений в условиях загрязнения фторидами / В.П. Шелухо // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2006. – № 13. – С. 262–265.

323. Шелухо, В.П. Влияние факторов среды на состояние зеленых насаждений г. Брянска / В.П. Шелухо, Т.Ю. Симонова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – № 4 (20). – С. 69–79.

324. Шергина, О.В. Биогеохимическое перераспределение свинца в урбоэкосистеме (на примере Иркутска) / О.В. Шергина, Т.А. Михайлова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – Т. 19, № 2. – С. 203–209.

325. Шихова, Н.С. Некоторые закономерности в накоплении свинца растениями в условиях урбанизации (на примере г. Владивостока) / Н.С. Шихова // Сибирский экологический журнал. – 2012. – № 2. – С. 285–294.

326. Шихова, Н.С. Оценка функциональной эффективности древесно-кустарниковых видов в городском озеленении на примере Владивостока / Н.С. Шихова // Лесоведение. – 2023. – № 3. – С. 277–289. – DOI: 10.31857/S0024114823030105.

327. Шубина, Н.В. Влияние выбросов металлургического производства на микроэлементный состав хвои сосны / Н.В. Шубина, Ю.Л. Юрьев // Химия растительного сырья. – 2009. – № 3. – С. 173–176.

328. Щербаков, А.В. Изменчивость антиоксидантной активности можжевельника казацкого в градиенте содержания ионов меди на Южном Урале / А.В. Щербаков, С.Р. Рахматуллина, М.В. Чистякова-Мавлетова, И.Ю. Усманов // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 1081–1084.

329. Щербатюк, А.П. Растения как индикаторы состояния урбанизированных экосистем / А.П. Щербатюк // Вестник ЗабГУ. – 2013. – № 2 (93). – С. 56–60.

330. Экология города Йошкар-Олы: учеб. пособие / О.Л. Воскресенская, Е.А. Алябышева, Т.И. Копылова, Е.В. Сарбаева, А.Н. Баранова; Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2004. – 200 с.

331. Экология города Йошкар-Олы: научное издание / отв. ред. О.Л. Воскресенская. – Йошкар-Ола, 2007. – 300 с.

332. Эколого-географический атлас Республики Марий Эл [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://гео12.рф/atlas> (дата обращения: 20.01.2023).

333. Энциклопедия Республики Марий Эл. – Йошкар-Ола, 2009. – 872 с.

334. Ющенко, И.А. Хвойные растения в озеленении города Тюмени / И.А. Ющенко, М.В. Семенова, В.Л. Рябикова, А.Н. Иванова, Н.Г. Иванов // Экосистемные услуги и менеджмент природных ресурсов: материалы международной научно-практической конференции, г. Тюмень, 28–30 ноября 2019 г. – Тюмень, Вектор Бук, 2020. – С. 118–123.

335. Ягдарова, О.А. Морфофизиологические аспекты онтогенеза однолетних декоративных растений в условиях городской среды: монография / О.А. Ягдарова, О.Л. Воскресенская; Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2014. – 208 с.

336. Якубова, М.М. Экологические аспекты биохимической адаптации / М.М. Якубова // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. – 2011. – № 1. – С. 77–88.

337. Якушевская, Е.Б. Растения – индикаторы состояния городской среды / Е.Б. Якушевская, Е.П. Якимова // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2013. – № 1 (48). – С. 116–121.

338. Яцко, Я.Н. Дезоксидация пигментов виолаксантинового цикла и тепловая диссипация световой энергии у трех бореальных видов вечнозеленых хвойных растений / Я.Н. Яцко, О.В. Дымова, Т.К. Головки // Физиология растений. – 2011. – Т. 58, № 1. – С. 139–143.

339. Al Sayegh Petkovsek, S. Norway spruce needles as bioindicator of air pollution in the area of influence of the Sostanj Thermal Power Plant, Slovenia / Al Sayegh Petkovsek S., F. Batic, C.R. Lasnik // Environmental Pollution. – 2008. – Vol. 151 (2). – P. 287–291. – DOI: 10.1016/j.envpol.2007.06.036.

340. Artenie, V. The seasonal dynamics of catalase and peroxidase in evergreen plants / V. Artenie, C. Daraban, M. Iftinca // Genetică și Biologie Moleculară. – 2004. – Т. V. – P. 1–5.

341. Asati, A. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview / A. Asati, M. Pichhode, K. Nikhil // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM). – 2016. – Vol. 5, Issue 3. – P. 56–66. – DOI: 10.13140/RG.2.2.27583.87204.

342. Bukharina, I.L. Ecological and biological features of Colorado Spruce (*Picea pungens* Engelm.) in urban environment / I.L. Bukharina, K.E. Vedernikov, A.A. Kamasheva, A.S. Alekseenko, E.V. Pashkov // Advances in Environmental Biology. – 2014. – Vol. 8 (13). – P. 367–371.

343. Chen, Y. Pine needles as urban atmospheric pollution indicators: Heavy metal concentrations and Pb isotopic source identification / Y. Chen, Y. Ning, X. Bi,

J. Liu, S. Yang, Z. Liu, W. Huang // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 296. – P. 134043. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134043.

344. Clapp, J. Casey Rationale for the increased use of conifers as functional green infrastructure: A literature review and synthesis / J. Casey Clapp, H. Dennis P. Ryan III, Richard W. Harper & David V. Bloniarz // *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry*. – 2014. – Vol. 36 (3). – P. 161–178.

345. Cui, N. Heavy metal accumulation characteristics and physiological response of *Sabina chinensis* and *Platycladus orientalis* to atmospheric pollution / N. Cui, L. Qu, G. Wu // *Journal of Environmental Sciences*. – 2022. – Vol. 112. – P. 192–201. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.013>.

346. Demidchik, V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology / V. Demidchik // *Environmental and experimental botany*. – 2015. – Vol. 109. – P. 212–228.

347. Eltier, Lutfia Amer A. Determination of Heavy Metal Accumulation in Some Coniferous Species Used in Kastamonu Urban Afforestation / Lutfia Amer A. Eltier, A. Sivacioglu // *Asian Journal of Biological Sciences*. – 2021. – Vol. 14 (2). – P. 33–40. – DOI: 10.3923/ajbs.2021.33.40.

348. Gunnarsson, B. Effects of biodiversity and environment-related attitude on perception of urban green space / B. Gunnarsson, I. Knez, M. Hedblom, Å. Ode Sang // *Urban Ecosystems*. – 2017. – Vol. 20. – P. 37–49.

349. Jakhbarova, L. Study and Reproduction of the Representatives of the Cupressaceae Family Attitude to Bioecological Factors Used in Landscaping / L. Jakhbarova, E. Temirov, S. Turdiev, F. Chorshanbiev // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 575. – P. 1968–1977. – DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2\_219.

350. Jaleel, C.A. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints / C.A. Jaleel, K. Riadh, R. Gopi // *Acta Physiologiae Plantarum*. – 2009. – Vol. 31. – P. 427–436.

351. Kandziora-Ciupa, M. Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites /

M. Kandziora-Ciupa, R. Ciepał, A. Nadgórska-Socha, G. Barczyk // *Ecotoxicology*. – 2016. – 25 (5). – P. 970–981. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1654-6>.

352. Kaźmierczak, M. Exploring the Role of Shrubs in Modulating Heavy Metal Accumulation in Forest Soils in Single-Species Pine Stands / M. Kaźmierczak, E. Błońska, J. Lasota // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2024. – Vol. 235. – P. 464. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07268-1>.

353. Kirchgeßner, H.-D. Light and temperature, but not UV radiation, affect chlorophylls and carotenoids in Norway spruce needles (*Picea abies* (L.) Karst.) / H.-D. Kirchgeßner, K. Reichert, K. Hauff, R. Steinbrecher, J.-P. Schnitzler, E.E. Pfündel // *Plant, Cell and Environment*. – 2003. – Vol. 26. – P. 1169–1179.

354. Kivimäenpää, M. Cell Structural Changes in the Needles of Norway Spruce Exposed to Long-term Ozone and Drought / M. Kivimäenpää, S. Sutinen, P.E. Karlsson, G. Selldén // *Annals of Botany*. – 2003. – Vol. 92 (6). – P. 779–793. – DOI: [10.1093/aob/mcg202](https://doi.org/10.1093/aob/mcg202).

355. Korzeniowska, J. Heavy Metal Content in the Plants (*Pleurozium schreberi* and *Picea abies*) of Environmentally Important Protected Areas of the Tatra National Park (the Central Western Carpathians, Poland) / J. Korzeniowska, P. Krąż, S. Dorocki // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11, Issue 11. – P. 1231. – DOI: <https://doi.org/10.3390/min11111231>.

356. Kumar, V. Heavy metals accumulation in crop plants: Sources, response mechanisms, stress tolerance and their effects / V. Kumar, R. Kumar, J. Singh, P. Kumar // *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation*. – 2019. – Vol. 1. – P. 38–57. – DOI: [10.26832/AESA-2019-CAE-0161-04](https://doi.org/10.26832/AESA-2019-CAE-0161-04).

357. Lewandowska, M. Changes in chlorophyll and carotenoid content, specific leaf area and dry weight fraction in Sitka spruce, in response to shading and season / M. Lewandowska, P.G. Jarvis // *New Phytologist*. – 1977. – Vol. 79, Issue 2. – P. 247–256.

358. Lichtenthaler, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. / H.K. Lichtenthaler // *Methods in Enzymology*. – 1987. – Vol. 148. – P. 350–382.

359. Ma, Z. Understanding the drivers of woody plant diversity in urban parks in a snow climate city of China / Z. Ma, P. Zhang, N. Hu, G. Wang, Y. Dong, Y. Guo, C. Wang, Y. Fu, Z. Ren // *Journal of Forestry Research*. – 2023. – Vol. 34. – P. 1021–1032. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01535-9>.

360. Marin, M. Effects of air pollution on needles of *Cedrus atlantica* (Endl.) Carriere in industrial area of Pančevo (Serbia) / M. Marin, V. Koko, S. Duletic-Laušević, P.D. Marin // *Botanica Serbica*. – 2009. – Vol. 33 (1). – P. 69–73.

361. Matysiak, R. Content of carotenoids in needles of *Pinus sylvestris* L. growing in a polluted area / R. Matysiak // *Dendrobiology*. – 2001. – Vol. 46. – P. 39–42.

362. Mendes, M.M. Some conifers from the Early Cretaceous (late Aptian – early Albian) of Catefica, Lusitanian Basin, western Portugal / M.M. Mendes, P. Dinis, J. Kvaček // *Fossil Imprint*. – 2018. – Vol. 74, № 3-4. – P. 317–326. – DOI: [10.2478/if-2018-0019](https://doi.org/10.2478/if-2018-0019).

363. Mhamdi, A. Catalase function in plants: a focus on *Arabidopsis* mutants as stress-mimic models / A. Mhamdi, G. Queval, S. Chaouch, S. Vanderauwera, F.V. Breusegem, G. Noctor // *Journal of Experimental Botany*. – 2010. – Vol. 61 (15). – P. 4197–4220. – DOI: [10.1093/jxb/erq282](https://doi.org/10.1093/jxb/erq282).

364. Minocha, R. Development of a standardized methodology for quantifying total chlorophyll and carotenoids from foliage of hardwood and conifer tree species / R. Minocha, G. Martinez, B. Lyons, S. Long // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2009. – Vol. 39 (4). – P. 849–861. – DOI: [10.1139/X09-015](https://doi.org/10.1139/X09-015).

365. Nayak, R.S. Biochemical changes in some deciduous tree species around Talcher thermal power station, Odisha, India / R.S. Nayak, D. Biswal, Rupnarayan // *Journal of Environmental Biology*. – 2013. – Vol. 34 (3). – P. 521–528.

366. Parzych, A. Pine needles (*Pinus sylvestris* L.) as bioindicators in the assessment of urban environmental contamination with heavy metals / A. Parzych, J. Jonczak // *Journal of Ecological Engineering*. – 2014. – Vol. 15, № 3. – P. 29–38. – DOI: [10.12911/22998993.1109119](https://doi.org/10.12911/22998993.1109119).

367. Parzych, A. Accumulation of heavy metals in needles and bark of *Pinus* species / A. Parzych, S. Mochnacky, Z. Sobisz, N. Kurhaluk, N. Polláková // *Folia Forestalia Polonica, series A – Forestry*. – 2017. – Vol. 59 (1). – P. 34–44. – DOI: 10.1515/ffp-2017-0004.

368. Prasad, K.V.S.K. Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in *Brassica juncea* / K.V.S.K. Prasad, P. Paradha Saradhi, P. Sharmila // *Environmental and Experimental Botany*. – 1999. – Vol. 42, Issue 1. – P. 1–10.

369. Rai, R. Gaseous air pollutants: a review on current and future trends of emissions and impact on agriculture / R. Rai, M. Rajput, M. Agrawal, S.B. Agrawal // *Journal of Scientific Research*. – 2011. – Vol. 55. – P. 77–102.

370. Ribaric-Lasnik, C. Antioxidants in Norway spruce needles at field plots in the vicinity of a Thermal Power Plant in Slovenia / C. Ribaric-Lasnik, B. Turk, F. Batic, D. Grill // *Phyton, Annales Rei Botanicae, Horn* – 1999. – Vol. 39 (4). – P. 175–182.

371. Seyyedneja, S.M. A Review of Some Different Effects of Air Pollution on Plants / S.M. Seyyedneja, M. Niknejad, H. Koochak // *Research Journal of Environmental Sciences*. – 2011. – Vol. 5 (4). – P. 302–309. – DOI: 10.3923/rjes.2011.302.309.

372. Shikhova, L.N. Pb in soil and plants of European North-east of Russia / L.N. Shikhova, T.L. Egoshina, E.A. Luginina // *International Research Journal*. – 2024. – № 8 (146). – P. 1–7. – DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.3.

373. Štofejová, L. Analysis of Heavy Metal Content in Soil and Plants in the Dumping Ground of Magnesite Mining Factory Jelšava-Lubeník (Slovakia) / L. Štofejová, J. Fazekaš, D. Fazekašová // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13 (8). – P. 4508. – DOI: 10.3390/su13084508.

374. Sulaiman, F.R. Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia) / F.R. Sulaiman, H.A. Hamzah // *Ecological Processes*. – 2018. – Vol. 7 (28). – P. 1–11. – DOI: 10.1186/s13717-018-0139-3.

375. Thaweeppworadej, P. Species richness and ecosystem services of tree assemblages along an urbanisation gradient in a tropical mega-city: Consequences for

urban design / P. Thaweevoradej, K.L. Evans // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2022. – Vol. 70. – P. 127527. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127527>.

376. Turkyilmaz, A. The use of perennial needles as biomonitors for recently accumulated heavy metals / A. Turkyilmaz, H. Sevik, & M. Cetin // *Landscape and Ecological Engineering*. – 2018. – Vol. 14. – P. 115–120. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127527>.

377. Vedernikov, K. Environmental assessment and the use of plants of the genus *Picea* forests of the city of Izhevsk / K. Vedernikov, I. Bukharina, A. Alekseenko // *Australian Journal of Scientific Research*. – 2014. – Vol. 3, № 1 (5). – P. 243–248.

378. Voskresenskaya, O.L. Heavy metals in soils and plants of urban ecosystems (on the example of the city of Yoshkar-Ola) / O.L. Voskresenskaya, E.A. Alyabysheva, E.V. Sarbayeva [et al.] // *Heavy metals and other pollutants in the environment: biological aspects*. – Toronto: Apple academic press inc., 2017. – P. 111–128.

379. Wettstein, von D. Chlorophyll-letale und der submikroskopische Formwechsel der Plastiden / D. von Wettstein // *Experimental Cell Research*. – 1957. – Vol. 12 (3). – P. 427–506.

380. Zeiner, M. Accumulation of Major, Minor and Trace Elements in Pine Needles (*Pinus nigra*) in Vienna (Austria) / M. Zeiner, I.J. Cindric // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26 (11). – P. 3318. – DOI: [10.3390/molecules26113318](https://doi.org/10.3390/molecules26113318).

**ПРИЛОЖЕНИЯ**



Рисунок 1.1 – Насаждения *T. occidentalis* и *J. sabina* в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы



Рисунок 1.2 – Насаждения *P. pungens* в рекреационной зоне г. Йошкар-Олы



Рисунок 1.3 – Насаждения *J. sabina* в жилтеебной зоне г. Йошкар-Олы



Рисунок 1.4 – Насаждения *P. pungens* и *T. occidentalis* в селитебной зоне г. Йошкар-Олы



Рисунок 1.5 – Насаждения *P. pungens* и *T. occidentalis* в промышленной зоне г. Йошкар-Олы



Рисунок 1.6 – Насаждения *J. sabina* в промышленной зоне г. Йошкар-Олы

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 2.1 – Критерии оценки категорий состояния деревьев (Методические рекомендации..., 2003)

Качественное состояние деревьев	Основные признаки качественного состояния деревьев	Категория состояния (жизнеспособности) деревьев		Основные признаки категорий жизнеспособности деревьев
Хорошее	Деревья здоровые, нормального развития, густо облиственные, окраска и величина листьев нормальные, заболеваний и повреждений вредителями нет, без механических повреждений	1	Без признаков ослабления	Листья или хвоя зеленые нормальных размеров, крона густая нормальной формы и развития, прирост текущего года нормальный для данного вида, возраста, условий произрастания деревьев и сезонного периода, повреждения вредителями и поражение болезнями единичны или отсутствуют
Удовлетворительное	Деревья условно здоровые с неравномерно развитой кроной, недостаточно облиственные, заболевания и повреждения вредителями могут быть, но они в начальной стадии, которые можно устранить, с наличием незначительных механических повреждений, не угрожающих их жизни	2	Ослабленные	Листья или хвоя часто светлее обычного, крона слабожурная, прирост ослаблен по сравнению с нормальным, в кроне менее 25% сухих ветвей. Возможны признаки местного повреждения ствола и корневых лап, ветвей, механические повреждения, единичные водяные побеги
		3	Сильно ослабленные	Листья мельче или светлее обычной, хвоя светло-зеленая или сероватая матовая, крона изрежена, сухих ветвей от 25 до 50%, прирост уменьшен более чем наполовину по сравнению с нормальным. Часто имеются признаки повреждения болезнями и вредителями ствола, корневых лап, ветвей, хвои и листвы, в том числе, попытки или местные поселения стволовых вредителей, у лиственных деревьев часто водяные побеги на стволе и ветвях

Окончание таблицы 2.1

Качественное состояние деревьев	Основные признаки качественного состояния деревьев	Категория состояния (жизнеспособности) деревьев		Основные признаки категорий жизнеспособности деревьев
Неудовлетворительное	Крона слабо развита или изрежена, возможна суховершинность и/или усыхание кроны более 75% (для ильмовых насаждений, пораженных голландской болезнью с усыханием кроны более 30% и менее если имеются входные и вылетные отверстия заболонников), имеются признаки заболеваний (дупла, обширные сухобочины, табачные сучки и пр.) и признаки заселения стволовыми вредителями, могут быть значительные механические повреждения	4	Усыхающие	Листва мельче, светлее или желтее обычной, хвоя серая, желтоватая или желто-зеленая, часто преждевременно опадает или усыхает, крона сильно изрежена, в кроне более 50% сухих ветвей, прирост текущего года сильно уменьшен или отсутствует. На стволе и ветвях часто имеются признаки заселения стволовыми вредителями (входные отверстия, насечки, сокотечение, буровая мука и опилки, насекомые на коре, под корой и в древесине); у лиственных деревьев обильные водяные побеги иногда усохшие или усыхающие
		5	Сухостой текущего года	Листва усохла, увяла или преждевременно опала, хвоя серая, желтая или бурая, крона усохла, но мелкие веточки и кора сохранились. На стволе, ветвях и корневых лапах часто признаки заселения стволовыми вредителями или их вылетные отверстия.
		6	Сухостой прошлых лет	Листва или хвоя осыпались или сохранились лишь частично, мелкие веточки и часть ветвей опали, кора разрушена или опала на большей части ствола. На стволе и ветвях имеются вылетные отверстия насекомых, под корой – обильная буровая мука и грибница дереворазрушающих грибов

Таблица 2.2 – Шкала категорий жизненного состояния деревьев по характеристике кроны (Алексеев, 1989)

Наименование состояния дерева	Краткое описание состояния дерева
Здоровое дерево	Деревья не имеют внешних признаков повреждений кроны и ствола. Густота кроны обычная для господствующих деревьев (I–II классов крафта в случае применимости этой классификации). Мертвые и отмирающие ветви сосредоточены в нижней части кроны; в верхней ее половине крупных отмерших и отмирающих ветвей нет или они единичны и по периферии кроны не видны. Закончившие рост листья и хвоя зеленого или темно-зеленого цвета. Продолжительность жизни хвои типична для региона. Любые повреждения листьев и хвои незначительны (менее 10%) и не сказываются на состоянии дерева.
Ослабленное (поврежденное) дерево	Обязателен хотя бы один из следующих признаков: а) снижение густоты кроны на 30 (25–40)% за счет преждевременного опадения или недоразвития листьев (хвои) или изреживания скелетной части кроны; б) наличие 30 (25–40)% мертвых и (или) усыхающих ветвей в верхней половине кроны; в) повреждение (объедание, скручивание, ожог, хлороза, некроза и т.д.) и выключение из ассимиляционной деятельности 30% всей площади листьев (хвои) насекомыми, патогенами, пожаром, атмосферным загрязнением или по неизвестным причинам. К категории ослабленных (поврежденных) относятся также деревья с одновременным наличием признаков «а», «б» и «в» и иными повреждениями (включая ствол и корневые лапы), проявляющимися в меньших размерах, не приводящих к суммарному ослаблению жизненного состояния дерева на 30%.
Сильно ослабленное (сильно поврежденное) дерево	В верхней половине кроны обязателен хотя бы один из следующих признаков: а) снижение густоты облиствления кроны 60% за счет преждевременного опадения листьев (хвои) или изреживания скелетной части кроны; б) наличие 60% мертвых и (или) усыхающих ветвей; в) повреждение (объедание, скручивание, ожог, хлорозы, некрозы и т.д.) и выключение из ассимиляционной деятельности 60 (50–70)% всей площади листьев (хвои) насекомыми, патогенами, пожаром, атмосферным загрязнением или по неизвестным причинам.
Отмирающее дерево	Основные признаки отмирания деревьев: крона разрушена, ее густота менее 15–20% по сравнению со здоровой: более 70% ветвей кроны, в том числе ее верхней половины, сухие или усыхающие. Оставшиеся на деревьях хвоя и листья хлоротичны: они бледно-зеленого, желтоватого, желтого или оранжево-красного цвета. Некрозы имеют белесый, коричневый или черный цвет. В комлевой и средней частях ствола возможны признаки заселения стволовыми вредителями.
Сухостой	В первый год после гибели на дереве могут быть остатки сухой хвои или неопавших сухих листьев, часто имеются признаки заселения насекомыми-ксилофагами. В дальнейшем постепенно утрачиваются ветви и кора.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 3.1 – Проектное покрытие травяного покрова в насаждениях рекреационной зоны г. Йошкар-Олы

№	Вид растения	Латинское название	Проектное покрытие, %
Рекреационная зона (ЦПКиО)			
Пробная площадь № 1			
Учетная площадка № 1			
1	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	30
2	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	30
3	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	20
4	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
5	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	5
6	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		10
Учетная площадка № 2			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	40
2	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	30
3	Мать-и-мачеха обыкновенная	<i>Tussilago farfara</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		25
Учетная площадка № 3			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	50
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	20
3	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	20
4	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	10
Учетная площадка № 4			
1	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	25
2	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	25
3	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	20
4	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	20
5	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	5
6	Осот полевой	<i>Sonchus arvensis</i> L.	5
Учетная площадка № 5			
1	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	40
2	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	20
3	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	20
4	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	10
5	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
Пробная площадь № 2			
Учетная площадка № 1			
1	Мятлик луговой	<i>Poa pratensis</i> L.	60
2	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	10
3	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	10
4	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
5	Манжетка обыкновенная	<i>Alchemilla vulgaris</i> L.	5
6	Щавель конский	<i>Rumex confertus</i> Willd.	5

Продолжение таблицы 3.1

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
Учетная площадка № 2			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	30
2	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	20
3	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	20
4	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	20
5	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
Учетная площадка № 3			
1	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	50
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	20
3	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
4	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	10
5	Гравилат городской	<i>Geum urbanum</i> L.	5
6	Черноголовка обыкновенная	<i>Prunella vulgaris</i> L.	5
Учетная площадка № 4			
1	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	25
2	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	25
3	Чистотел большой	<i>Chelidonium majus</i> L.	15
4	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	15
5	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	10
6	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	5
7	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	5
Учетная площадка № 5			
1	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	35
2	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	20
3	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	15
4	Тимофеевка луговая	<i>Phleum pratense</i> L.	10
5	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
6	Кульбаба осенняя	<i>Leontodon autumnalis</i> L.	5
7	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
Пробная площадь № 3			
Учетная площадка № 1			
1	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	30
2	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	20
3	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	20
4	Лапчатка гусиная	<i>Potentilla anserina</i> L.	20
5	Черноголовка обыкновенная	<i>Prunella vulgaris</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		5
Учетная площадка № 2			
1	Лапчатка гусиная	<i>Potentilla anserina</i> L.	30
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	50
3	Черноголовка обыкновенная	<i>Prunella vulgaris</i> L.	10
4	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	10
5	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10
6	Гулявник Лезеля	<i>Sisymbrium loeselii</i> L.	10

Продолжение таблицы 3.1

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
7	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	5
8	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	5
Учетная площадка № 3			
1	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	25
2	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	25
3	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	15
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	15
5	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	15
6	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	5
Учетная площадка № 4			
1	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	20
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	20
3	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	20
4	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	20
5	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	5
6	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	5
7	Лапчатка гусиная	<i>Potentilla anserina</i> L.	5
8	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	5
Учетная площадка № 5			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	35
2	Лапчатка гусиная	<i>Potentilla anserina</i> L.	20
3	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
4	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
5	Манжетка обыкновенная	<i>Alchemilla vulgaris</i> L.	10
6	Лапчатка серебристая	<i>Potentilla argentea</i> L.	5
7	Горец почечуйный	<i>Persicaria maculata</i> (Raf.) A. Love & D. Love	5
8	Осот полевой	<i>Sonchus arvensis</i> L.	5
Пробная площадь № 4			
Учетная площадка № 1			
1	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	30
2	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	20
3	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
4	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10
5	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	10
	Участки без травяной растительности (проплешины)		20
Учетная площадка № 2			
1	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	40
2	Гравилат городской	<i>Geum urbanum</i> L.	10
3	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	10
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
5	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	5
6	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	5
7	Манжетка обыкновенная	<i>Alchemilla vulgaris</i> L.	10

Продолжение таблицы 3.1

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
8	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	5
9	Осот полевой	<i>Sonchus arvensis</i> L.	5
Учетная площадка № 3			
1	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	40
2	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	10
3	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	10
5	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	5
6	Донник белый	<i>Melilotus albus</i> Medikus	5
7	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	5
8	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	5
9	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	5
10	Манжетка обыкновенная	<i>Alchemilla vulgaris</i> L.	5
Учетная площадка № 4			
1	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	20
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	20
3	Марь белая	<i>Chenopodium album</i> L.	20
4	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10
5	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	10
6	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	10
7	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		5
Учетная площадка № 5			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	20
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
3	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	10
4	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10
	Участки без травяной растительности (проплешины)		50
Пробная площадь № 5			
Учетная площадка № 1			
1	Лапчатка гусиная	<i>Potentilla anserina</i> L.	40
2	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	20
3	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
4	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	10
5	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
6	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	5
7	Осот полевой	<i>Sonchus arvensis</i> L.	5
8	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	5
Учетная площадка № 2			
1	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	20
2	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	20
3	Лапчатка гусиная	<i>Potentilla anserina</i> L.	20
4	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10

Окончание таблицы 3.1

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
5	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
6	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	10
	Участки без травяной растительности (проплешины)		10
Учетная площадка № 3			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	40
2	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	15
3	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	10
4	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10
5	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
6	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	5
7	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	5
Учетная площадка № 4			
1	Крапива двудомная	<i>Urtica dioica</i> L.	40
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
3	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	10
4	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	10
	Участки без травяной растительности (проплешины)		30
Учетная площадка № 5			
1	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	30
2	Осот полевой	<i>Sonchus arvensis</i> L.	20
3	Чистотел большой	<i>Chelidonium majus</i> L.	20
4	Крапива двудомная	<i>Urtica dioica</i> L.	10
5	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	15
6	Гравилат городской	<i>Geum urbanum</i> L.	5

Таблица 3.2 – Проективное покрытие травяного покрова в насаждениях селитебной зоны г. Йошкар-Олы

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
Селитебная зона (бульвар Чавайна)			
Пробная площадь № 1			
Учетная площадка № 1			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	30
2	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	20
3	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
4	Лапчатка серебристая	<i>Potentilla argentea</i> L.	10
5	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	5
6	Клевер пашенный	<i>Trifolium arvense</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		20
Учетная площадка № 2			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	30
2	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	20
3	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	20

Продолжение таблицы 3.2

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
5	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
6	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		10
Учетная площадка № 3			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	40
2	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	30
3	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	20
4	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
5	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	5
Учетная площадка № 4			
1	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	35
2	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	30
3	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		30
Учетная площадка № 5			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	40
2	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	20
3	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	10
4	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
5	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	10
6	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
Пробная площадь № 2			
Учетная площадка № 1			
1	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	30
2	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	20
3	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	20
4	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
5	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
6	Полынь горькая	<i>Artemisia absinthium</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		10
Учетная площадка № 2			
1	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	30
2	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	20
3	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	20
4	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10
5	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	15
6	Кульбаба осенняя	<i>Leontodon autumnalis</i> L.	5
Учетная площадка № 3			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	40
2	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	15
3	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	15
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10

Продолжение таблицы 3.2

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
5	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	10
6	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
Учетная площадка № 4			
1	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	45
2	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	40
3	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	5
4	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	5
5	Мыльнянка лекарственная	<i>Saponaria officinalis</i> L.	3
6	Дымянка лекарственная	<i>Fumaria officinalis</i> L.	2
Учетная площадка № 5			
1	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	30
2	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	20
3	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	15
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	15
5	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	10
6	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	5
7	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
Пробная площадь № 3			
Учетная площадка № 1			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	40
2	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	30
3	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	15
4	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	5
5	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		5
Учетная площадка № 2			
1	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	40
2	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	35
3	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	10
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
5	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	5
6	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	5
Учетная площадка № 3			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	30
2	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	20
3	Лапчатка серебристая	<i>Potentilla argentea</i> L.	10
	Участки без травяной растительности (проплешины)		40
Учетная площадка № 4			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	60
2	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	20
3	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	20
Учетная площадка № 5			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	35
2	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	35

Продолжение таблицы 3.2

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
	Участки без травяной растительности (проплешины)		30
Пробная площадь № 4			
Учетная площадка № 1			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	30
2	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	15
3	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	15
4	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	10
5	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	10
6	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	8
7	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	5
8	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	3
9	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	2
10	Кульбаба осенняя	<i>Leontodon autumnalis</i> L.	2
Учетная площадка № 2			
1	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	40
2	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	15
3	Лопух большой	<i>Arctium lappa</i> L.	10
4	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	10
5	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	10
6	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	5
7	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	5
8	Марь белая	<i>Chenopodium album</i> L.	5
Учетная площадка № 3			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	40
2	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	25
3	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	10
4	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	10
5	Люцерна посевная	<i>Medicago sativa</i> L.	7
6	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	3
7	Кульбаба осенняя	<i>Leontodon autumnalis</i> L.	3
8	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	2
Учетная площадка № 4			
1	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	25
2	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	25
3	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	8
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
5	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	5
6	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		30
Учетная площадка № 5			
1	Кострец безостый	<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub	50
2	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	20

Продолжение таблицы 3.2

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
3	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	20
4	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	10
Пробная площадь № 5			
Учетная площадка № 1			
1	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	20
2	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	10
3	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	10
4	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	10
5	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	2
6	Лапчатка гусиная	<i>Potentilla anserina</i> L.	3
7	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	5
8	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	5
9	Донник белый	<i>Melilotus albus</i> Medikus	3
10	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		30
Учетная площадка № 2			
1	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	40
2	Мятлик луговой	<i>Poa pratensis</i> L.	20
3	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	20
4	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	5
5	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	5
6	Крапива двудомная	<i>Urtica dioica</i> L.	8
7	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	2
Учетная площадка № 3			
1	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	30
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	20
3	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	20
4	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	10
5	Марь белая	<i>Chenopodium album</i> L.	5
6	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	5
7	Вербейник монетчатый	<i>Lysimachia nummularia</i> L.	5
8	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	3
9	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	2
Учетная площадка № 4			
1	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	40
2	Овсяница луговая	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	20
3	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	15
4	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	10
5	Горец птичий	<i>Polygonum aviculare</i> L.	5
6	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	3
7	Осот полевой	<i>Sonchus arvensis</i> L.	3
8	Льнянка обыкновенная	<i>Linaria vulgaris</i> Mill.	2
9	Кульбаба осенняя	<i>Leontodon autumnalis</i> L.	2

## Окончание таблицы 3.2

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
Учетная площадка № 5			
1	Пырей ползучий	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	40
2	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	15
3	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	15
4	Клевер ползучий	<i>Trifolium repens</i> L.	10
5	Подорожник средний	<i>Plantago media</i> L.	5
6	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	5
7	Пастушья сумка обыкновенная	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medikus	2
8	Фиалка трехцветная	<i>Viola tricolor</i> L.	2
9	Кульбаба осенняя	<i>Leontodon autumnalis</i> L.	2
10	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	2
11	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	2

Таблица 3.3 – Проективное покрытие травяного покрова в насаждениях промышленной зоны г. Йошкар-Олы

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
Промышленная зона (ул. Строителей)			
Пробная площадь № 1			
Учетная площадка № 1			
1	Люцерна посевная	<i>Medicago sativa</i> L.	20
2	Клевер средний	<i>Trifolium medium</i> L.	15
3	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	10
4	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	10
5	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	10
6	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	3
7	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
8	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	2
9	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	5
10	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		15
Учетная площадка № 2			
1	Люцерна посевная	<i>Medicago sativa</i> L.	50
2	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	20
3	Донник лекарственный	<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall.	8
4	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	10
5	Василек луговой	<i>Centaurea jacea</i> L.	3
6	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
7	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	2
8	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	2
Учетная площадка № 3			
1	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	35
2	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	20
3	Зверобой продырявленный	<i>Hypericum perforatum</i> L.	5

Продолжение таблицы 3.3

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
4	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	5
5	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
6	Люцерна хмелевая	<i>Medicago lupulina</i> L.	2
7	Подорожник ланцетный	<i>Plantago lanceolata</i> L.	2
8	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	5
9	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
10	Василек луговой	<i>Centaurea jacea</i> L.	6
Учетная площадка № 4			
1	Мыльнянка лекарственная	<i>Saponaria officinalis</i> L.	30
2	Кострец безостый	<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub	30
3	Полынь обыкновенная	<i>Artemisia vulgaris</i> L.	10
4	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
5	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
6	Будра плющевидная	<i>Glechoma hederacea</i> L.	5
7	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	3
8	Василек луговой	<i>Centaurea jacea</i> L.	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		5
Учетная площадка № 5			
1	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	40
2	Люцерна посевная	<i>Medicago sativa</i> L.	20
3	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	10
4	Земляника обыкновенная	<i>Fragaria vesca</i> L.	8
5	Лапчатка серебристая	<i>Potentilla argentea</i> L.	5
6	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	5
7	Зверобой продырявленный	<i>Hypericum perforatum</i> L.	3
8	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	3
9	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		4
Пробная площадь № 2			
Учетная площадка № 1			
1	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	40
2	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	20
3	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	10
4	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	10
	Участки без травяной растительности (проплешины)		20
Учетная площадка № 2			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	35
2	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	20
3	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	10
4	Бедренец-камнеломка	<i>Pimpinella saxifraga</i> L.	10
5	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	10
	Участки без травяной растительности (проплешины)		15

Продолжение таблицы 3.3

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
Учетная площадка № 3			
1	Мать-и-мачеха обыкновенная	<i>Tussilago farfara</i> L.	50
2	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	10
3	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	10
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	10
5	Зверобой продырявленный	<i>Hypericum perforatum</i> L.	10
6	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	5
7	Подорожник ланцетный	<i>Plantago lanceolata</i> L.	5
Учетная площадка № 4			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	40
2	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	15
3	Донник лекарственный	<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall.	10
4	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	10
5	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	10
6	Черноголовка обыкновенная	<i>Prunella vulgaris</i> L.	5
7	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		5
Учетная площадка № 5			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	25
2	Клевер средний	<i>Trifolium medium</i> L.	20
3	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
4	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
5	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	3
6	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		35
Пробная площадь № 3			
Учетная площадка № 1			
1	Бодяк полевой	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	45
2	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	25
3	Хвощ полевой	<i>Equisetum arvense</i> L.	25
4	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	3
5	Бородавник обыкновенный	<i>Lapsana communis</i> L.	2
Учетная площадка № 2			
1	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	30
2	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10
3	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	10
4	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	10
5	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
6	Льнянка обыкновенная	<i>Linaria vulgaris</i> Mill.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		30
Учетная площадка № 3			
1	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	35
2	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	10

Продолжение таблицы 3.3

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
3	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	10
4	Люпин многолистный	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	10
5	Хвощ полевой	<i>Equisetum arvense</i> L.	10
6	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		20
Учетная площадка № 4			
1	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	50
2	Хвощ полевой	<i>Equisetum arvense</i> L.	30
3	Бодяк полевой	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	10
4	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	5
5	Люпин многолистный	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	5
Учетная площадка № 5			
1	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	60
2	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	20
3	Бодяк полевой	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	12
4	Крапива двудомная	<i>Urtica dioica</i> L.	2
5	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	2
6	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	2
7	Хвощ полевой	<i>Equisetum arvense</i> L.	2
Пробная площадь № 4			
Учетная площадка № 1			
1	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	40
2	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	20
3	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	3
4	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		35
Учетная площадка № 2			
1	Люпин многолистный	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	50
2	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	10
3	Льнянка обыкновенная	<i>Linaria vulgaris</i> Mill.	5
4	Хвощ полевой	<i>Equisetum arvense</i> L.	5
	Участки без травяной растительности (проплешины)		30
Учетная площадка № 3			
1	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	50
2	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	20
3	Бодяк полевой	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	10
4	Крапива двудомная	<i>Urtica dioica</i> L.	7
5	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	5
6	Одуванчик лекарственный	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	5
7	Мать-и-мачеха обыкновенная	<i>Tussilago farfara</i> L.	3
Учетная площадка № 4			
1	Люцерна посевная	<i>Medicago sativa</i> L.	40
2	Люпин многолистный	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	30

Продолжение таблицы 3.3

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
3	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	10
4	Полынь обыкновенная	<i>Artemisia vulgaris</i> L.	10
5	Вероника дубравная	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		8
Учетная площадка № 5			
1	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	40
2	Люпин многолистный	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	30
3	Люцерна посевная	<i>Medicago sativa</i> L.	10
4	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	2
5	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	2
6	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	2
7	Льнянка обыкновенная	<i>Linaria vulgaris</i> Mill.	2
	Участки без травяной растительности (проплешины)		12
Пробная площадь № 5			
Учетная площадка № 1			
1	Вейник наземный	<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth	80
2	Кострец безостый	<i>Bromopsis inermis</i> (Leys.) Holub	10
3	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	5
4	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	5
Учетная площадка № 2			
1	Люпин многолистный	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	25
2	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	20
3	Икотник серый	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC.	17
4	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	15
5	Хвощ полевой	<i>Equisetum arvense</i> L.	10
6	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	5
7	Крапива двудомная	<i>Urtica dioica</i> L.	3
8	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	3
9	Сныть обыкновенная	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	2
Учетная площадка № 3			
1	Люпин многолистный	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	40
2	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	30
3	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	20
4	Бедренец-камнеломка	<i>Pimpinella saxifraga</i> L.	5
5	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	3
6	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	2
Учетная площадка № 4			
1	Кострец безостый	<i>Bromopsis inermis</i> (Leys.) Holub	70
2	Вейник наземный	<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth	10
3	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	5
4	Пижма обыкновенная	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	5

## Окончание таблицы 3.3

№	Вид растения	Латинское название	Проективное покрытие, %
5	Колокольчик крапиволистный	<i>Campanula trachelium</i> L.	3
6	Бедренец-камнеломка	<i>Pimpinella saxifraga</i> L.	3
7	Бодяк полевой	<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	2
8	Полынь горькая	<i>Artemisia absinthium</i> L.	2
Учетная площадка № 5			
1	Кострец безостый	<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub	40
2	Ежа сборная	<i>Dactylis glomerata</i> L.	15
3	Мать-и-мачеха обыкновенная	<i>Tussilago farfara</i> L.	10
4	Подорожник большой	<i>Plantago major</i> L.	8
5	Подмаренник мягкий	<i>Galium mollugo</i> L.	8
6	Горошек мышиный	<i>Vicia cracca</i> L.	5
7	Цикорий обыкновенный	<i>Cichorium intybus</i> L.	2
8	Тысячелистник обыкновенный	<i>Achillea millefolium</i> L.	2
9	Полынь горькая	<i>Artemisia absinthium</i> L.	2
10	Василек луговой	<i>Centaurea jacea</i> L.	2
11	Клевер луговой	<i>Trifolium pratense</i> L.	2
12	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	2
13	Крапива двудомная	<i>Urtica dioica</i> L.	2



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной  
деятельностиФГБОУ ВО «Марийский  
государственный университет»

Э.М. Воронцова

« 09 » 2025 г.

## АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы  
Стариковой Екатерины Александровны  
«Экофизиологические особенности хвойных растений  
в условиях городской среды»**

Результаты диссертационной работы Стариковой Е.А. «Экофизиологические особенности хвойных растений в условиях городской среды» обладают актуальностью, представляют практический интерес и используются в учебном процессе кафедры экологии и фармации института естественных наук и фармации ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет».

Полученные результаты работы используются при проведении лекционных и лабораторных занятий у студентов направления подготовки 05.03.06 Экология и природопользование (направленность (профиль) Экологическая безопасность и охрана природы): «Общая экология», «Экологический мониторинг и нормирование загрязнения окружающей среды», «Урбоэкология», «Промышленное и бытовое озеленение», у студентов направления подготовки 05.04.06 Экология и природопользование (направленность (профиль) Экологический менеджмент): «Методы эколого-аналитических исследований».

Материалы диссертационной работы Стариковой Е.А. также используются при проведении учебных практик, выполнении выпускных квалификационных работ студентами института естественных наук и фармации.

Заведующий кафедрой экологии и фармации  
канд. биол. наук, доцент

Е.А. Алябышева

Директор института естественных наук и фармации  
канд. биол. наук, доцент

Е.В. Сарбаева

«ЙОШКАР-ОЛА» ОЛА ОКРУГЫН  
АДМИНИСТРАЦИЙЖЕ

ЭКОЛОГИЙ ДЕН ПÛРТÛС  
КУЧЫЛТМАШ КОМИТЕТ

424001, г. Йошкар-Ола, Комсомольский урем, 134 – 414  
(8362) 64-15-89, 42-33-60, e-mail: [eco-ola@yandex.ru](mailto:eco-ola@yandex.ru)

30.10.2015 № 11-58/1288

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

АДМИНИСТРАЦИЯ ГОРОДСКОГО  
ОКРУГА «ГОРОД ЙОШКАР-ОЛА»

КОМИТЕТ ЭКОЛОГИИ И  
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

424001, г. Йошкар-Ола, ул. Комсомольская, 134 – 414  
(8362) 64-15-89, 42-33-60, e-mail: [eco-ola@yandex.ru](mailto:eco-ola@yandex.ru)

### АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы  
Стариковой Екатерины Александровны  
на тему «Экофизиологические особенности хвойных растений  
в условиях городской среды»**

Научные положения и результаты диссертационного исследования Стариковой Екатерины Александровны по теме «Экофизиологические особенности хвойных растений в условиях городской среды» успешно внедряются в практическую деятельность при озеленении разных функциональных зон г. Йошкар-Олы. Практический интерес представляет комплексный подход к оценке влияния факторов городской среды на морфологические и физиолого-биохимические показатели *Juniperus sabina* L., *Thuja occidentalis* L. и *Picea pungens* Engelm. В частности, использованы рекомендации диссертационной работы по использованию результатов исследований хвойных растений в озеленении г. Йошкар-Олы, которые позволят существенно повысить жизнеспособность и декоративность хвойных насаждений в городской среде, улучшить состояние окружающей среды, повысить комфорт проживания горожан и способствовать созданию экологически устойчивого городского пространства.

Председатель комитета



*[Handwritten signature]*

О.С. Соловьева