

На правах рукописи

Метер

СТАРИКОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

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

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Оренбург – 2026

Работа выполнена на кафедре экологии и фармации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Марийский государственный университет».

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Воскресенская Ольга Леонидовна

Официальные оппоненты: **Жуйкова Татьяна Валерьевна,**
доктор биологических наук, профессор,
Нижнетагильский государственный социально-педагогический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный педагогический университет», директор;

Егошина Татьяна Леонидовна,
доктор биологических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова», отдел экологии и ресурсосведения растений, заведующий.


Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет».

Защита диссертации состоится «18» июня 2026 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.352.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, Оренбургская область, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, аудитория 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, Оренбургская область, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13 и на сайте <http://www.osu.ru/doc/5595/asp/259>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аринжанов
Азамат Ерсайнович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, 2011а; 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; Поварничина, 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 хвои 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 металлов по 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 Александру Сергеевичу, брату Михаилу Александровичу и родственникам за неоценимую помощь и поддержку.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА

В главе 1 представлен обзор использования хвойных видов растений в озеленении городов различных регионов России (Сперанская, Галкина, 2004; Бухарина и др., 2007; Коляда, 2010; Макарова, Макаров, 2018; Аксянова и др., 2021; Лящева и др., 2022). Проанализировано влияние атмосферного загрязнения на состояние хвойных растений (Николаевский, 1979; Горышина, 1991; Торлопова, Робакидзе, 2003; Тужилкина, 2009; Пахарькова и др., 2010; Воскресенский, Воскресенская, 2011а, 2011б; Неверова и др., 2012; Gunnarsson et al., 2017). Обобщены данные по пигментной системе хвойных растений (Воскресенская, Сарбаева, 2006; Титова, 2013, 2015; Тишкина, 2018; Суслина и др., 2021) и накоплению тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды (Горелова и др., 2015; Зубкова, Дубровина, 2020; Залывская и др., 2021; Кабанова и др., 2021; Štofejová et al., 2021).

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

2.1 Эколого-биологическая характеристика объектов исследования

Объекты исследований – насаждения можжевельника казацкого (*Juniperus sabina* L. 'Tamariscifolia'), туи западной (*Thuja occidentalis* L.) и ели колючей (*Picea pungens* Engelm. 'Glauca'), произрастающие в трех функциональных зонах г. Йошкар-Олы, различающихся по степени антропогенного воздействия: рекреационная, селитебная и промышленная.

2.2 Методы исследования

Исследования эколого-физиологических показателей *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* были проведены у одновозрастных (45 лет) (средневозрастное генеративное состояние – g₂) учетных растений в вегетационные периоды в течение 2015–2022 гг. В каждой функциональной зоне брали по 10 экземпляров каждого исследуемого вида. Отбор проб хвои второго года жизни производили со средней части кроны растений южной экспозиции. Всего проведено 29700 физиолого-биохимических анализов хвои.

Наблюдения за уровнем загрязнения атмосферы в г. Йошкар-Оле проводили в соответствии с ГОСТ 17.2.3.01-86 и РД 52.04.186-89. В пробах атмосферного воздуха определяли концентрацию CO, SO₂, NO, NO₂ (мг/м³) с помощью газоанализатора ПГА-200, взвешенных веществ (мг/м³) – с помощью анализатора пыли ИКП-5.

Почву отбирали из корнеобитаемого слоя (0–20 см) методом конверта в местах непосредственного произрастания хвойных растений, которые использовали для анализа (ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 17.4.3.01-2017). Всего было проведено 2100 физико-химических анализов почвы. рН водной почвенной вытяжки определяли потенциометрическим методом, удельную электрическую проводимость водной почвенной вытяжки – кондуктометрическим методом (ГОСТ 26423-85), содержание органического вещества – гравиметрическим методом (ГОСТ 26213-91).

Валовое содержание тяжелых металлов (ТМ) (Pb, Cd, Cu и Fe) в почвенных и растительных образцах (в хвое второго года жизни и побегах второго порядка) определяли методом атомно-абсорбционного спектрального анализа на спектрометре «АAnalyst 400» (Perkin Elmer, США) (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), а также по коэффициенту биогеохимической активности вида (БХА) – сумме коэффициентов биологического поглощения отдельных микроэлементов (Айвазян, 1974; Енчилик и др., 2018; Авдощенко, Климова, 2021).

Категории жизненного состояния хвойных растений определяли по биоморфологическим признакам кроны: форма и густота кроны, охвоенность, окраска хвои, доля повреждения хвои от некрозов, хлорозов, пятнистостей, количество мертвых ветвей на стволе и т.д. (Алексеев, 1989; Методические рекомендации..., 2003). Также рассчитывали относительное жизненное состояния древостоя для *T. occidentalis* и *P. pungens* (Алексеев, 1989).

Для характеристики травянистого покрова насаждений определяли видовой состав и проективное покрытие видов, закладывая в пределах пробных площадей учетные площадки размером 1 м² (Полевой..., 2000).

Определение содержания пигментов и активности ферментов проводили в день сбора растительного материала. Содержание пигментов определяли в мае, июле, октябре и декабре на спектрофотометре ПЭ-5400В (Россия) путем трехкратного измерения оптической плотности ацетоновой вытяжки: для хлорофилла *a* – 662 нм, хлорофилла *b* – 644 нм, каротиноидов – 440,5 нм. Расчет концентрации пигментов в вытяжке проводили по формуле D. Wettstein (1957) в 100% растворе ацетона (Гавриленко и др., 1975; Гавриленко, Жигалова, 2003).

Определение активности каталазы (КФ 1.11.1.6) проводили газометрическим методом (Prasad, 1999), активности пероксидазы (КФ 1.11.1.7) – фотоколориметрическим методом (Методы..., 2018).

Статистическую обработку данных проводили с помощью программ Microsoft Office Excel и Statistica 10.0, используя описательную статистику, корреляционный и дисперсионный многофакторный анализ.

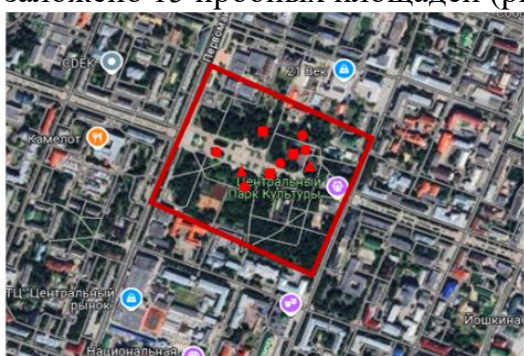
ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ПРИРОДНУЮ СРЕДУ ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

3.1 Физико-географическая характеристика г. Йошкар-Олы

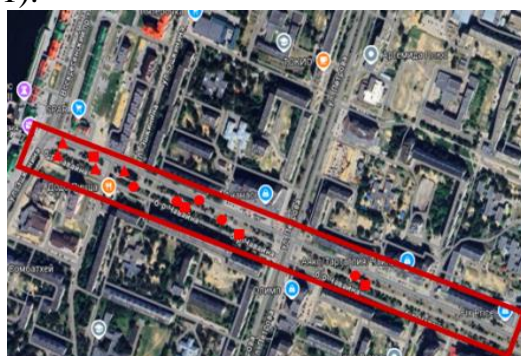
Город Йошкар-Ола (56°38' с.ш., 47°52' в.д.) – столица Республики Марий Эл, расположен на территории Марийской низменности восточной части Восточно-Европейской равнины в 50 км к северу от реки Волги, на южной границе таежной зоны в районе смешанных лесов, на берегах реки Малой Кокшаги, разделяющей город на две части. Климат умеренно-континентальный, с теплым летом и умеренно-холодной зимой. Количество осадков составляет около 550 мм в год, высота снежного покрова равна в среднем 35–50 см. Среднегодовая скорость ветра достигает 4–5 м/с. В теплый период года преобладают северо-восточные, северные, северо-западные и западные ветры, а в холодный период – южные, юго-западные и юго-восточные. Вегетационный период продолжается 126–128 дней (Экология..., 2004, 2007; Энциклопедия..., 2009).

3.2 Характеристика районов исследования

Пробные площади для отбора почвенных и растительных образцов были выбраны на участках основных функциональных зон г. Йошкар-Олы: рекреационная (Центральный парк культуры и отдыха (ЦПКиО)) (I), селитебная (бульвар Чавайна) (II), промышленная (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* и *P. pungens*. Всего было заложено 15 пробных площадей (рисунок 1).



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

ЦПКиО (рекреационная зона) (рисунок 1а) находится 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) расположена в Заречной части города, является главным линейным планировочным элементом зеленой системы города и соединяет правобережную и левобережную части г. Йошкар-Олы; характеризуется хорошей транспортной доступностью и с высокой плотностью застройки жилых домов; зеленые насаждения причисляются к категории общего пользования.

Промышленная зона (улица Строителей) (рисунок 1в) находится 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

Город Йошкар-Ола – промышленно развитый город, ведущими отраслями промышленности являются машиностроение, деревообработка, металлургическое производство, приборостроение и пищевая промышленность. Экологическая ситуация в различных районах города неоднородна и зависит от двух основных факторов: выбросов от стационарных источников загрязнения и быстро развивающегося автопарка (Митякова и др., 2020; Доклад..., 2022, 2023).

3.3.1 Состояние атмосферного воздуха г. Йошкар-Олы. За период проведения научных изысканий (2015–2022 гг.) в атмосферном воздухе исследуемых функциональных зон города не было обнаружено значительных превышений санитарно-гигиенических нормативов для CO, NO₂, SO₂ и взвешенных веществ (рисунок 2, 3).

Однако были выявлены превышения ПДК_{с.с.} для хвойных растений: по SO₂ – в 1,5 раза, по NO₂ – в 3,5 раза, по взвешенным веществам – в 4,5 раза. Наибольшее содержание CO, NO₂ и взвешенных веществ было отмечено в 2016 году, SO₂ – в 2022 году. В последние годы отмечается тенденция к снижению уровня загрязнения воздушного бассейна г. Йошкар-Олы взвешенными веществами (рисунок 2, 3).

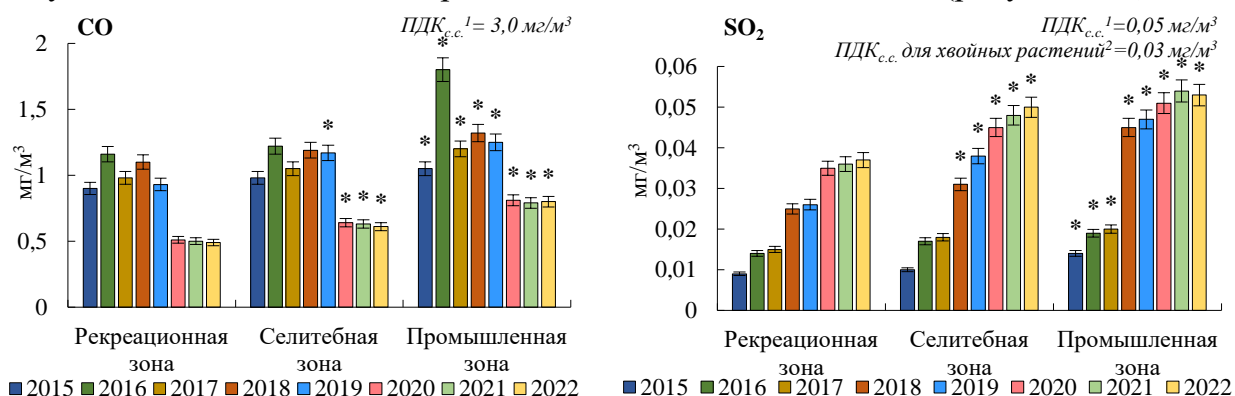


Рисунок 2 – Динамика содержания CO и SO₂ в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы

Примечание: ¹ – по СанПиН 1.2.3685-21;

² – по Коплан-Дикс, Алеховой, 2002;

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

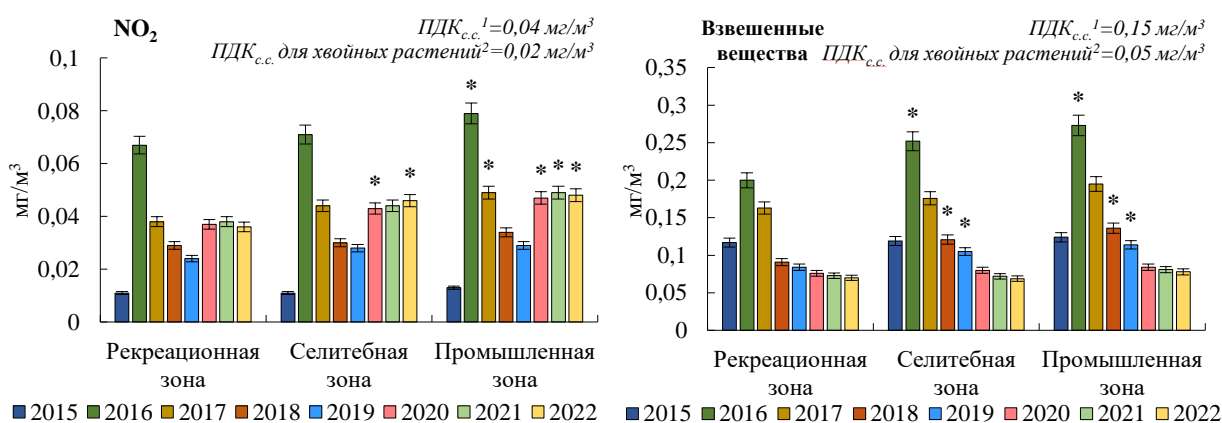


Рисунок 3 – Динамика содержания SO₂ и взвешенных веществ в атмосферном воздухе г. Йошкар-Олы

Примечание: ¹ – по СанПиН 1.2.3685-21;

² – по Коплан-Дикс, Алеховой, 2002;

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

3.3.2 Оценка физико-химических свойств городских почв. Почва на территории г. Йошкар-Олы – легкосуглинистая. Почвы исследуемых функциональных зон имели кислую и слабокислую реакцию среды (5,56–6,81 ед.). Содержание органического вещества составляло от 4,24 до 9,84%. Удельная электропроводность водной почвенной вытяжки изменялась от 118,87 до 178,21 мСм/см (таблица 1). При возрастании антропогенной нагрузки (промышленная зона) наблюдалось изменение рН почвы в сторону подщелачивания, увеличение содержания органических веществ в 2,3 раза и рост удельной электропроводности водной почвенной вытяжки в 1,5 раза.

Таблица 1 – Оценка физических свойств городских почв (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

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

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

Валовое содержание тяжелых металлов в почве было в пределах ОДК (таблица 2), за исключением кадмия (1,1 ОДК) в промышленной зоне. Интенсивность аккумуляции тяжелых металлов в почвах исследуемых функциональных зон г. Йошкар-Олы убывала в ряду: Fe > Pb > Cu > Cd.

Таким образом, результаты исследования показали, что хвойные насаждения на территории г. Йошкар-Олы произрастали в разных экологических условиях, обусловленных функциональной зональностью города.

Таблица 2 – Содержание валовых форм тяжелых металлов в почвах г. Йошкар-Олы (средние значения за 2015–2022 гг.)

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

Примечание: ¹ – по СанПиН 1.2.3685-21;

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

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

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

Видовой состав древесно-кустарниковых насаждений г. Йошкар-Олы в основном представлен лиственными видами. Хвойные растения в насаждениях общего пользования г. Йошкар-Олы составляют примерно 15–20%.

В исследуемых функциональных зонах города хвойные растения имели хорошее или удовлетворительное качественное состояние (категории: без признаков ослабления, ослабленные и сильно ослабленные) (таблица 3). Растений в неудовлетворительном состоянии (усыхающих) не было обнаружено. На изученных территориях произрастали растения трех жизненных состояний: здоровые, ослабленные и сильно ослабленные. Значительная часть хвойных растений в исследуемых зонах города оценивалась как здоровые: *J. sabina* и *T. occidentalis* – 75%, *P. pungens* – 80% (таблица 3).

Таблица 3 – Оценка жизненного состояния хвойных растений г. Йошкар-Олы

| Функциональная зона | Распределение хвойных растений по категориям жизненного состояния, % | | | | | L _n , % | КС |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|------------|----------|--------------------|----|
| | 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

Хвойные насаждения, произрастающие на территории г. Йошкар-Олы, относились к КС I (здоровые). Однако можно отметить, что у *T. occidentalis* в разных зонах города было отмечено снижение относительного жизненного состояния древостоя от 91 до 82%, а у *P. pungens* данный показатель был стабильным – 85% (таблица 3).

Распределение хвойных растений по категориям жизненного состояния и появление ослабленных и сильно ослабленных особей может быть следствием отсутствия должного ухода за ними и усиления антропогенного воздействия. Наиболее распространенными повреждениями хвойных растений, произрастающих в г. Йошкар-Оле, явились: 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

4.2.1 Зольность хвойных растений. Содержание золы в побегах *P. pungens* составило 4,53–6,31%, *J. sabina* – 6,73–7,47%, *T. occidentalis* – 9,66–10,90% (таблица 4). Зольность хвои растений, произрастающих в рекреационной зоне, была минимальной: у *P. pungens* – 4,47%, *J. sabina* – 5,80% и *T. occidentalis* – 8,25%. Содержание золы в различных органах хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне г. Йошкар-Олы, было выше по сравнению с растениями рекреационной зоны: у *J. sabina* – на 10,0–15,8%, у *T. occidentalis* – на 8,1–11,4%, у *P. pungens* – на 16,1–28,2% (таблица 4).

Таблица 4 – Зольность различных органов хвойных растений, % (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

| Функциональная зона | <i>P. pungens</i> | | <i>J. sabina</i> | | <i>T. occidentalis</i> | |
|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------------|------------|
| | Побеги | Хвоя | Побеги | Хвоя | Побеги | Хвоя |
| Рекреационная | 4,53±0,109 | 4,47±0,058 | 6,73±0,067 | 5,80±0,046 | 9,66±0,061 | 8,25±0,071 |
| Селитебная | 6,11±0,049* | 4,64±0,087 | 6,84±0,108 | 6,22±0,042 | 9,78±0,066 | 8,86±0,098 |
| Промышленная | 6,31±0,054* | 5,33±0,049* | 7,47±0,085 | 6,89±0,057* | 10,90±0,118* | 8,98±0,124 |

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

По величине зольности вегетативных органов исследуемых видов хвойных растений выявлены межвидовые различия. Наибольшая зольность была характерна для побегов и хвои *T. occidentalis*. При увеличении уровня загрязнения среды зольность вегетативных органов хвойных растений возрастала, что может служить индикаторным показателем уровня загрязнения окружающей среды.

4.2.2 Содержание тяжелых металлов в хвойных растениях в условиях городской среды. Содержание Pb, Cd, Cu и Fe в хвое и побегах *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* изменялось в зависимости от местопроизрастания (рисунок 4).

Аккумуляция тяжелых металлов в органах хвойных растений увеличивалась по мере усиления антропогенной нагрузки. Так, содержание свинца в хвое и побегах *J. sabina* и *T. occidentalis* было больше в 1,2–1,3 раза, у *P. pungens* – в 1,3–1,5 раза. Содержание кадмия в побегах *J. sabina* было больше в 2,1 раза, в побегах *P. pungens* – в 1,5 раза, а в вегетативных органах *T. occidentalis* в 1,1–1,4 раза выше. Медь накапливалась в *J. sabina* и *P. pungens* в 1,2–1,4 раза больше, в *T. occidentalis* – в 1,2–

1,6 раза; железо аккумулировалось в *J. sabina* больше в 2,0–2,2 раза, в *T. occidentalis* в 2,2–2,6 раза, в *P. pungens* – в 2,2–2,4 раза.

В ходе проведенного анализа содержания тяжелых металлов в разных органах *J. sabina*, *T. occidentalis* и *P. pungens* в условиях г. Йошкар-Олы было установлено, что их поступление и распределение по органам растений имеет видовую специфику. Максимальная способность к аккумуляции свинца и кадмия среди хвойных растений в исследуемых функциональных зонах характерна для *T. occidentalis*. Наибольшей металлоаккумулирующей способностью по отношению к меди и железу отличались побеги *P. pungens*, однако в хвое данного вида было отмечено минимальное содержание этих элементов.

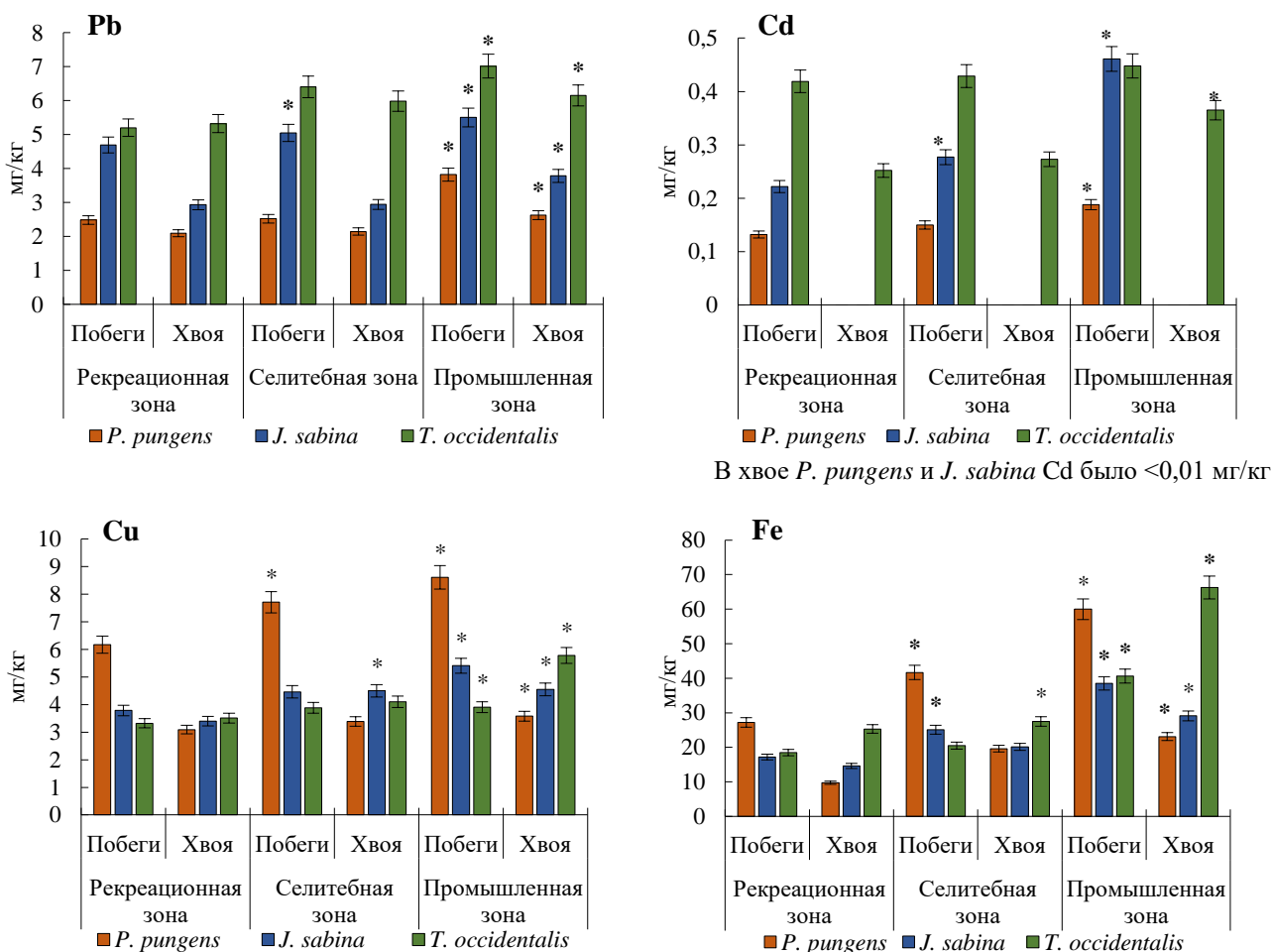


Рисунок 4 – Содержание тяжелых металлов в хвойных растениях г. Йошкар-Олы (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

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

4.2.3 Биогеохимическая характеристика хвойных растений. Коэффициенты биологического поглощения Pb и Fe у всех изученных видов хвойных растений, произрастающих в условиях городской среды, были меньше единицы, что свидетельствует о слабой поглотительной способности данных элементов. К элементам сильного накопления (КБП>1) относились: Cd в побегах *T. occidentalis* (КБП=1,15) и Cu в побегах *P. pungens* (КБП=1,10), произрастающих в рекреационной и селитебной зонах.

По показателю биогеохимической активности хвойные растения образуют следующий убывающий ряд: *T. occidentalis* > *J. sabina* > *P. pungens*. Показатель БХА в рекреационной зоне был выше, чем в антропогенно загрязненных территориях. Несмотря на то, что почва промышленной зоны отличалась наибольшим уровнем содержания ТМ, хвойные растения, произрастающие в данной зоне, характеризовались более низкими показателями БХА. Видимо, это связано с тем, что у них включаются защитные механизмы, снижающие поступление тяжелых металлов в органы хвойных растений. По способности накапливать тяжелые металлы хвойные растения располагаются в следующем убывающем ряду: *T. occidentalis* > *P. pungens* > *J. sabina*.

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 содержанием свинца в хвое и его содержанием в почве ($r_s=0,31$, $p<0,05$). 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 ($r_s=0,70$, $p<0,05$).

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

4.3.1 Содержание хлорофилла *a* и *b* в хвойных растениях в сезонной динамике. Установлено, что содержание хлорофилла *a* в хвое *T. occidentalis* и *P. pungens* в промышленной зоне в 1,4 раза ниже, чем у растений в рекреационной зоне (таблица 5). В хвое растений *J. sabina* наблюдался стабильный уровень содержания данного пигмента в сезонной динамике.

Таблица 5 – Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *J. sabina*, *T. occidentalis*, *P. pungens* в г. Йошкар-Оле (мг/г сырой массы) (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

| Вид | Функциональная зона | Хлорофилл <i>a</i> | | | | Хлорофилл <i>b</i> | | | | Каротиноиды | | | |
|------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | май | июль | октябрь | декабрь | май | июль | октябрь | декабрь | май | июль | октябрь | декабрь |
| <i>J. sabina</i> | Рекреационная | 0,71± 0,054 | 0,70± 0,028 | 0,77± 0,040 | 0,72± 0,026 | 0,28± 0,034 | 0,27± 0,020 | 0,34± 0,071 | 0,22± 0,013 | 0,25* ± 0,017 | 0,18± 0,008 | 0,29* ± 0,013 | 0,27* ± 0,019 |
| | Селитебная | 0,70± 0,085 | 0,68± 0,028 | 0,73± 0,034 | 0,71± 0,035 | 0,25± 0,033 | 0,23± 0,019 | 0,24± 0,012 | 0,21± 0,015 | 0,33± 0,066 | 0,22± 0,015 | 0,29± 0,010 | 0,28± 0,018 |
| | Промышленная | 0,66± 0,055 | 0,64± 0,036 | 0,72± 0,043 | 0,69± 0,026 | 0,23± 0,021 | 0,19* ± 0,011 | 0,28± 0,045 | 0,21± 0,045 | 0,38* ± 0,052 | 0,29* ± 0,015 | 0,28± 0,025 | 0,32± 0,019 |
| <i>T. occidentalis</i> | Рекреационная | 0,85± 0,033 | 0,83± 0,009 | 0,69* ± 0,030 | 0,68* ± 0,029 | 0,33± 0,026 | 0,42± 0,034 | 0,24* ± 0,013 | 0,23* ± 0,013 | 0,24* ± 0,009 | 0,16± 0,008 | 0,27* ± 0,013 | 0,29* ± 0,010 |
| | Селитебная | 0,81± 0,019 | 0,82± 0,019 | 0,66* ± 0,046 | 0,57* ± 0,046 | 0,30* ± 0,016 | 0,48* ± 0,036 | 0,23* ± 0,019 | 0,19* ± 0,018 | 0,25± 0,002 | 0,21± 0,019 | 0,26± 0,015 | 0,24± 0,016 |
| | Промышленная | 0,80± 0,046 | 0,63* ± 0,039 | 0,65* ± 0,066 | 0,47* ± 0,029 | 0,31* ± 0,016 | 0,25* ± 0,036 | 0,23± 0,032 | 0,17* ± 0,011 | 0,31* ± 0,014 | 0,29* ± 0,008 | 0,28± 0,017 | 0,29± 0,009 |
| <i>P. pungens</i> | Рекреационная | 0,86± 0,022 | 0,85± 0,003 | 0,76± 0,033 | 0,56* ± 0,044 | 0,36* ± 0,022 | 0,56± 0,017 | 0,29* ± 0,013 | 0,28* ± 0,045 | 0,26* ± 0,014 | 0,21± 0,007 | 0,28* ± 0,011 | 0,29* ± 0,025 |
| | Селитебная | 0,84± 0,028 | 0,82± 0,021 | 0,73± 0,040 | 0,53* ± 0,047 | 0,33* ± 0,017 | 0,53± 0,011 | 0,26* ± 0,018 | 0,22* ± 0,024 | 0,29± 0,012 | 0,22± 0,009 | 0,27± 0,014 | 0,29* ± 0,051 |
| | Промышленная | 0,79± 0,025 | 0,64* ± 0,040 | 0,63* ± 0,069 | 0,51* ± 0,054 | 0,31± 0,022 | 0,35* ± 0,028 | 0,24± 0,165 | 0,19* ± 0,019 | 0,32* ± 0,009 | 0,29* ± 0,009 | 0,31± 0,014 | 0,37* ± 0,043 |

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

* – статистически значимые различия в мае, октябре, декабре по сравнению с июлем ($p<0,05$)

В целом содержание хлорофилла *b* было значительно меньше, чем хлорофилла *a* в хвое исследуемых видов (таблица 5). Статистически значимых различий по содержанию хлорофилла *b* в хвое растений в разных функциональных зонах и по исследуемым месяцам не выявлено ($p > 0,05$). Только в хвое растений, произрастающих в промышленной зоне, в июле произошло снижение количества хлорофилла *b* в 1,4–1,7 раза по сравнению с особями из рекреационной зоны.

Содержание хлорофилла *a* в хвое *T. occidentalis* и *P. pungens* отрицательно коррелирует с содержанием в атмосферном воздухе SO_2 ($r_s = -0,59$, $p < 0,05$ и $r_s = -0,57$, $p < 0,05$), NO_2 ($r_s = -0,51$, $p < 0,05$ и $r_s = -0,49$, $p < 0,05$) и взвешенных веществ ($r_s = -0,67$, $p < 0,05$ и $r_s = -0,52$, $p < 0,05$).

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 была обнаружена взаимосвязь между содержанием данного пигмента и концентрацией загрязняющих веществ в атмосфере г. Йошкар-Олы.

4.3.2 Содержание каротиноидов в хвойных растениях в сезонной динамике.

Увеличение количества каротиноидов и наибольший пик их накопления у всех трех видов наблюдался в мае, что, возможно обусловлено повышенным уровнем инсоляции (таблица 5). В этот период каротиноиды 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 (Титова, 2010; Белова, Краснопивцева, 2016; Тишкина, Абрамова, 2018).

У хвойных растений, произрастающих в промышленной зоне, в мае и июле было характерно увеличение содержания каротиноидов в хвое по сравнению с растениями, произрастающими в рекреационной зоне (таблица 5): *J. sabina* – на 36,1%, *T. occidentalis* – на 33,7%, *P. pungens* – на 23,2%.

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 ($r_s = 0,40$, $p < 0,05$, $r_s = 0,47$, $p < 0,05$; $r_s = 0,35$, $p < 0,05$), взвешенных веществ ($r_s = 0,51$, $p < 0,05$, $r_s = 0,49$, $p < 0,05$; $r_s = 0,62$, $p < 0,05$).

Анализ межсезонных изменений фотосинтетического аппарата показал, что растения *T. occidentalis* и *P. pungens* характеризовались сходной сезонной динамикой пигментного комплекса: в весенне-летний период количество пигментов было больше на 33,6%, чем в осенне-зимний период. У растений *J. sabina* наблюдалась стабильность в работе пигментного комплекса. По сумме содержания фотосинтетических пигментов изученные виды располагаются в следующем убывающем ряду: *P. pungens* > *J. sabina* и *T. occidentalis*. Фотосинтетический аппарат исследуемых видов хвойных растений демонстрирует адаптивную реакцию пигментного комплекса на воздействие антропогенных факторов окружающей среды.

Таким образом, пигментный фонд исследуемых видов может использоваться в качестве индикатора для оценки степени антропогенного загрязнения среды.

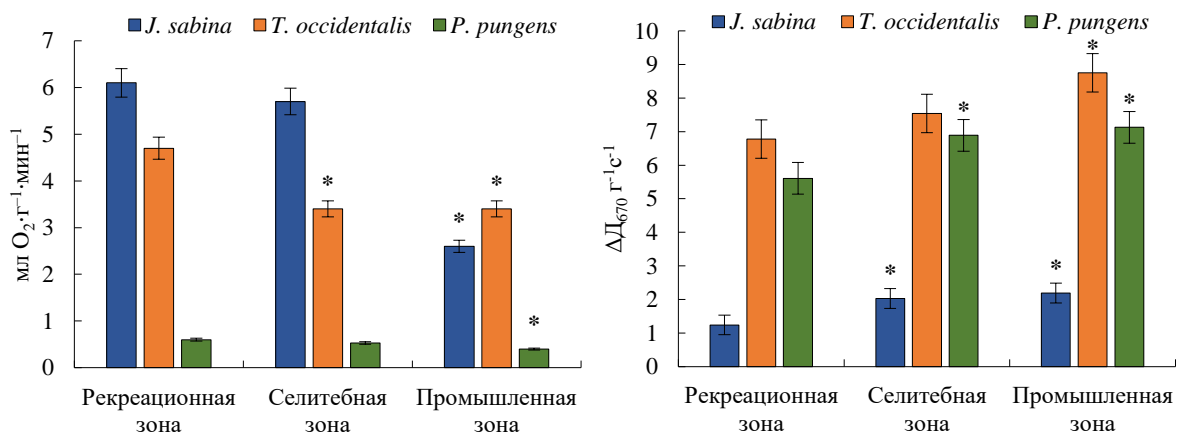
4.4 Анализ активности окислительно-восстановительных ферментов у изучаемых растений

4.4.1 Изменение активности каталазы хвойных растений в городских условиях.

Наибольшей активностью каталазы характеризовались хвойные растения,

произрастающие в рекреационной зоне: *J. sabina* – 6,10 мл $O_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$, *T. occidentalis* – 4,70 мл $O_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$, *P. pungens* – 0,53 мл $O_2 \times \Gamma^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ (рисунок 5а).

По мере увеличения антропогенной нагрузки активность каталазы в хвое у всех трех видов снижалась: *J. sabina* – в 2,3 раза ($p=10^{-6}$), *T. occidentalis* – в 1,4 раза ($p=0,03$), *P. pungens* – в 1,3 раза ($p=0,02$). Активность данного фермента в хвое *J. sabina* была самой высокой из всех изученных видов – в 1,3 раза выше ($p=10^{-6}$), чем в ассимиляционных органах *T. occidentalis*, и в 9,4 раза выше ($p=10^{-6}$), чем в хвое *P. pungens*.



а) активность каталазы (КФ 1.11.1.6)

б) активность пероксидазы (КФ 1.11.1.7)

Рисунок 5 – Активность окислительно-восстановительных ферментов в хвое растений (среднее значение за период 2015–2022 гг.)

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

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_2 ($r_s = -0,68$, $p < 0,05$), NO ($r_s = -0,60$, $p < 0,05$), NO_2 ($r_s = -0,66$, $p < 0,05$); в хвое *T. occidentalis*: SO_2 ($r_s = -0,70$, $p < 0,05$), NO ($r_s = -0,52$, $p < 0,05$); NO_2 ($r_s = -0,65$, $p < 0,05$); в хвое *P. pungens*: SO_2 ($r_s = -0,35$, $p < 0,05$), NO_2 ($r_s = -0,30$, $p < 0,05$). Также установлены отрицательные корреляции активности каталазы с содержанием свинца в хвое *J. sabina* и *T. occidentalis* ($r_s = -0,41$, $p < 0,05$ и $r_s = -0,51$, $p < 0,05$).

4.4.2 Изменение активности пероксидазы хвойных растений в городских условиях. Активность пероксидазы в хвое растений различных функциональных зон города свидетельствует о четкой зависимости от уровня техногенной нагрузки. Минимальная активность пероксидазы была у растений, произрастающих в рекреационной зоне: *J. sabina* – 1,24 $\Delta D_{670} \Gamma^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, *T. occidentalis* – 6,78 $\Delta D_{670} \Gamma^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, *P. pungens* – 5,61 $\Delta D_{670} \Gamma^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ (рисунок 5б). В промышленной зоне активность данного фермента в хвое *J. sabina* была выше в 1,8 раза ($p=10^{-6}$), *T. occidentalis* – в 1,4 раза ($p=10^{-6}$), *P. pungens* – в 1,3 раза ($p=10^{-6}$).

Хвоя *T. occidentalis* характеризовалась наибольшей активностью пероксидазы во всех функциональных зонах. У растений *J. sabina* были достаточно низкие значения активности пероксидазы.

С помощью корреляционного анализа оценивали влияние CO , SO_2 , NO , NO_2 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 SO₂ (r_s= 0,30, p<0,05), а также от NO₂ (r_s= 0,32, p<0,05). На активность пероксидазы в хвое *T. occidentalis* оказывали влияние концентрации SO₂ (r_s= 0,63, p<0,05), NO₂ (r_s= 0,68, p<0,05), NO (r_s= 0,65, p<0,05). Активность пероксидазы в хвое *P. pungens* также зависит от концентрации SO₂ (r_s= 0,66, p<0,05) и NO₂ (r_s= 0,64, p<0,05) в атмосферном воздухе.

По активности оксидоредуктаз хвойные виды, произрастающие в г. Йошкар-Оле, располагаются в следующем убывающем ряду:

- а) по активности каталазы: *J. sabina* > *T. occidentalis* > *P. pungens*;
- б) по активности пероксидазы: *T. occidentalis* > *P. pungens* > *J. sabina*.

Таким образом, комплекс негативных факторов городской среды влияет на ферментативную активность хвойных растений. По мере усиления антропогенного загрязнения среды активность каталазы уменьшалась, а активность пероксидазы, наоборот, увеличивалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Промышленная зона г. Йошкар-Олы характеризовалась наибольшим уровнем техногенного загрязнения: концентрация основных загрязняющих веществ атмосферы (СО, SO₂, NO₂, 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 урбаносреды:

– 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации

1. **Старикова, Е.А.** Изменение пигментного комплекса ели колючей в условиях городской среды / **Е.А. Старикова**, О.Л. Воскресенская, Е.В. Сарбаева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 10 (52). – Часть 4. – С. 46–48. – DOI: 10.18454/IRJ.2016.52.044.

2. **Старикова, Е.А.** Аккумуляция тяжелых металлов в почве и надземных вегетативных органах *Juniperus sabina* L. в условиях г. Йошкар-Олы / **Е.А. Старикова**, О.Л. Воскресенская, Е.А. Алябышева // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. – 2023. – № 2 (46). – С. 129–139. – DOI: 10.32516/2303-9922.2023.46.9.

3. **Старикова, Е.А.** Аккумуляция тяжелых металлов в системе «почва – растение» на территории г. Йошкар-Олы / **Е.А. Старикова**, О.Л. Воскресенская, Е.А. Алябышева // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2023. – Vol. 8 (4). – P. 1–10. – DOI: 10.21685/2500-0578-2023-4-4.

4. **Старикова, Е.А.** Содержание тяжелых металлов в почве и хвое *Picea pungens* Engelm. в условиях городской среды (на примере г. Йошкар-Олы) / **Е.А. Старикова**, О.Л. Воскресенская, Е.А. Алябышева // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. – 2024. – № 1 (49). – С. 180–190. – DOI: 10.32516/2303-9922.2024.49.9.

5. **Старикова, Е.А.** Накопление тяжелых металлов в хвое *Thuja occidentalis* L., произрастающей в разных функциональных зонах г. Йошкар-Олы / **Е.А. Старикова**, О.Л. Воскресенская // Экология урбанизированных территорий. – 2024. – № 1. – С. 12–16. – DOI: 10.24412/1816-1863-2024-1-12-16.

Статьи, опубликованные в других научных изданиях

6. Воскресенская, О.Л. Изменение активности антиоксидантных ферментов у интродуцированных хвойных растений в условиях городской среды / О.Л. Воскресенская, Е.В. Сарбаева, **Е.А. Старикова** // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 2 (30). – С. 56–59. – DOI: 10.18286/1816-4501-2015-2-56-59.

7. **Старикова, Е.А.** Оценка жизненного состояния некоторых хвойных растений в различных функциональных зонах Йошкар-Олы / **Е.А. Старикова**, А.А. Колпашиков, Е.В. Сарбаева // Биосистемы: организация, поведение, управление: Тезисы докладов 69-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых (Н. Новгород, 27–29 апреля 2016 г.). – Н. Новгород, Университет Лобачевского, 2016. – С. 145.

8. **Старикова, Е.А.** Содержание пигментов в хвое можжевельника казацкого, произрастающего в городской среде / **Е.А. Старикова**, О.Л. Воскресенская // Проблемы популяционной биологии: материалы XII Всероссийского популяционного семинара

памяти Николая Васильевича Глотова (1939–2016), Йошкар-Ола, 11–14 апреля 2017 г. – Йошкар-Ола: ООО ИПФ «СТРИНГ», 2017. – С. 213–215.

9. **Старикова, Е.А.** Активность окислительно-восстановительных ферментов у можжевельника казацкого в условиях городской среды / **Е.А. Старикова, Е.В. Сарбаева** // Актуальные проблемы экологии и природопользования в современных условиях: Материалы Международной научно-практической конференции, 5–7 декабря 2017 г. – Часть 2. – Киров: Вятская ГСХА, 2018. – С. 195–197.

10. **Старикова, Е.А.** Исследование морфофизиологических параметров хвойных растений в условиях городской среды / **Е.А. Старикова, О.Л. Воскресенская** // Биосистемы: организация, поведение, управление: Тезисы докладов 71-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых (Н. Новгород, 17–20 апреля 2018 г.). – Н. Новгород, Университет Лобачевского, 2018. – С. 217.

11. **Старикова, Е.А.** Изменение активности каталазы у хвойных растений, произрастающих в условиях городской среды / **Е.А. Старикова, П.С. Садовин, О.Л. Воскресенская** // Принципы и способы сохранения биоразнообразия: материалы VII Международной научной конференции, 18–22 марта 2019 года / Мар. гос. ун-т., отв. ред.: Г.О. Османова, Л.А. Животовский. – Йошкар-Ола: ООО «Вертола», 2019. – С. 225–226.

12. **Старикова, Е.А.** Эколого-физиологические особенности хвойных растений в условиях городской среды / **Е.А. Старикова, О.Л. Воскресенская** // Биосистемы: организация, поведение, управление: Тезисы докладов 72-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых (Н. Новгород, 23–26 апреля 2019 г.). – Н. Новгород, Университет Лобачевского, 2019. – С. 213.

13. **Старикова, Е.А.** Сезонная динамика содержания фотосинтетических пигментов у хвойных растений в условиях городской среды / **Е.А. Старикова, О.Л. Воскресенская** // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2020. – № 2 (30). – С. 32–42. – DOI: 10.21685/2307-9150-2020-2-4.

14. **Старикова, Е.А.** Накопление свинца хвойными растениями в условиях городской среды (на примере г. Йошкар-Олы) / **Е.А. Старикова** // Современные проблемы естественных наук и фармации: сборник статей Всероссийской научной конференции (Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет». – Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т, 2023. – Вып. 12. – С. 288–290.

15. **Старикова, Е.А.** Спектрофотометрическое определение пигментов в хвое туи западной / **Е.А. Старикова** // Современные проблемы естественных наук и фармации: сборник статей Всероссийской научной конференции (Йошкар-Ола, 20–23 мая 2025 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», Институт естественных наук и фармации. – Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т, 2025. – Вып. 14. – С. 212–214.

Подписано в печать 06.04.2026 г.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Объем – 1,0 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ № 29066

Отпечатано в типографии ООО «Принтекс»

424003, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, д. 15А