

На правах рукописи



Уразгильдин Руслан Вилисович

ЛЕСООБРАЗУЮЩИЕ ВИДЫ ПРЕДУРАЛЬЯ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА:  
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА,  
ВИДОСПЕЦИФИЧНОСТЬ, АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ,  
АДАПТИВНЫЕ СТРАТЕГИИ

Специальность 06.03.02 – Лесоведение, лесоводство,  
лесоустройство и лесная таксация (биологические науки)

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени доктора биологических наук

Уфа – 2021

Работа выполнена в Уфимском Институте биологии – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Научный консультант:	доктор биологических наук, профессор Кулагин Алексей Юрьевич
Официальные оппоненты:	Розенберг Геннадий Самуилович, доктор биологических наук, профессор, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал ФГБУН Самарского федерального исследовательского центра РАН, лаборатория моделирования и управления экосистемами, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник;  Бухарина Ирина Леонидовна, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», Институт гражданской защиты, директор, кафедра инженерной защиты окружающей среды, заведующая кафедрой;  Ларионов Максим Викторович, доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Научно-образовательная лаборатория «Перспективных технологий», ведущий научный сотрудник.
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»

Защита состоится «28» декабря 2021 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01. при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, УЛК-1 ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» ([www.usfeu.ru](http://www.usfeu.ru))

Автореферат разослан «4» октября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. с.-х. наук, доцент



Магасумова  
Альфия Гаптрауфовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Загрязнение окружающей среды в масштабах экосистем является значимым результатом производственной деятельности человека. Техногенное загрязнение не только подавляет процессы роста и развития растений на всех структурно-функциональных уровнях их организации, но может вызывать изменения на генетическом уровне. Из растительных организмов древесные растения являются наиболее устойчивыми к действию промышленных выбросов и способны в значительных количествах аккумулировать вредные вещества без заметного вреда для себя, тем самым эффективно способствуя снижению загрязнения окружающей среды.

Своеобразие Предуралья заключается в уникальном сочетании природных и техногенных факторов. Территория является пересечением лесной и лесостепной зон и находится на границе с горнолесной зоной – такое сочетание накладывает своеобразие на видовое разнообразие растительности. Здесь представлено более 20 лиственных и хвойных древесных видов, причем у ряда видов здесь проходят границы их ареалов естественного распространения. Республика Башкортостан – регион, располагающий значительными запасами нефти и других полезных ископаемых, с высокой концентрацией мощных промышленных комплексов. Столь интенсивная промышленная деятельность привела к появлению техногенно нарушенных ландшафтов. Город Уфа является крупным промышленным центром Предуралья, однако, лесопокрытая площадь зеленой зоны города составляет всего около 23% от требуемой по нормативам. Основные площади санитарно-защитных насаждений являются лесными культурами 40-50-х годов и находятся на границе эффективного выполнения санитарно-экологических функций. В северном промышленном узле города сосредоточены производственные предприятия нефтехимического профиля, влияющие на экологическую обстановку города за счет выброса целого комплекса углеводородов в окружающую среду.

Накоплен обширный материал о влиянии различных видов загрязнений на растения. Древесные растения отличаются более сложной структурно-функциональной организацией, вследствие чего реакции на внешние воздействия на всех уровнях носят, как правило, видоспецифический характер и отличаются от «классических» представлений о механизмах «стресс → эффект». Поэтому в обзорных публикациях нередко встречаются упоминания об «отрицательных», «нейтральных» и «положительных» эффектах.

Все это обуславливает уникальность данного промышленного полигона и необходимость изучения состояния насаждений, произрастающих в условиях нефтехимического загрязнения, анализа их адаптивных реакций, адаптивных стратегий и адаптивного потенциала, выявления наиболее устойчивых древесных пород.

**Степень разработанности темы исследования.** Диссертационная работа посвящена оценке адаптивных реакций, адаптивных стратегий и адаптивного потенциала лесообразователей к техногенным факторам. В русле представленных исследований ряд работ в значительной мере способствовали изучению влияния техногенеза на морфологию ассимиляционного аппарата (напр. Бухарина и др., 2007; Тужилкина, Плюсина, 2014; Донцов и др., 2016; Василевская, Сидорчук, 2018; Poorter et al., 2009; Seyyednejad et al., 2013; Jochner et al., 2015; Areington, Sershen, 2017 и др.), водный обмен ассимиляционного аппарата (напр. Неверова и др., 2002; Костюченко, 2005; Сунцова и др., 2011; Сенькина, 2017; Meinzer, 2001; Schreuder et al., 2001; Wang et al., 2011, 2012, 2014; Klamerus-Iwan et al., 2018 и др.), пигментный комплекс ассимиляционного аппарата (напр. Кулагин, 2006; Кавеленова и др., 2008; Колмогорова, 2009; Баландайкин, 2014; Swain et al., 2016; More, Chaubal, 2017; Molnár et al., 2018; Chaudhary, Rathore, 2019 и др.), дендрохронологические параметры (напр. Киселев и др., 2010; Кучеров, Мулдашев, 2011; Чжан и др., 2013; Кладько, Бенькова, 2018; Elling et al., 2009; Stravinskiene et al., 2013; Sensuła et al., 2017; Rutkiewicz, Malik, 2018 и др.), корневые системы древесных растений (напр. Ярмишко, 2002; Зайцев, Кулагин, 2005, 2008; Ахмадуллин, Зайцев, 2013; Puhe,

2003; Lux et al., 2004, 2011; Brunner et al., 2008; Albrechtová et al., 2017 и др.), жизненное состояние древостоев (напр. Гришко и др., 2002; Турмухаметова, 2005; Колмогорова, 2006; Ковылина и др., 2008; Lorenz et al., 2003; Percya, Ferretti, 2004; Vacek et al., 2013; Jakovljević et al., 2019 и др.), аккумуляцию тяжелых металлов и их влияние на растительные организмы (напр. Федорова, 2005; Баимова, 2009; Кулагин и др., 2010; Радостева, 2011; Bing et al., 2015; Lianga et al., 2017; Madejón, et al., 2018; García-Sánchez et al., 2019 и др.). Однако в этих трудах как правило рассматривается один определенный орган (как правило ассимиляционный аппарат вследствие его доступности и тесного контакта с окружающей средой) или ограниченная группа параметров или процессов, а не все древесное растение в целом. Редко оцениваются эффекты в динамике вегетационного периода и в многолетней динамике. Отсутствует оценка сути выявленной адаптивной реакции и ее направленности, а также отсутствует увязка в единую адаптивную схему множества выявленных эффектов.

Фундаментальные основы современных представлений об адаптивных реакциях и стратегиях растений к техногенезу содержатся в ряде работ (напр. Кулагин, 1974, 1980, 1985; Усманов и др., 2001; Жиров и др., 2006; Kozłowsky, Pallardi, 2002; Gostin, 2009; Skirycz, Inzé, 2010; Hodson, 2012; и др.). В значительной части эти исследования охватывают только анализ видоспецифических адаптивных реакций на отдельных уровнях структурно-функциональной организации, в то время как необходим переход к комплексной оценке адаптивных стратегий древесных видов (как единого целого организма) на тот или иной вид техногенного загрязнения, с вовлечением в оценку как можно большего числа иерархических уровней организации (от морфологии и физиологии корневых систем до морфологии и физиологии хвои/листьев).

**Цель работы** – дать эколого-биологическую характеристику основных лесообразователей Предуралья в условиях нефтехимического загрязнения и оценить их адаптивные реакции, стратегии и адаптивный потенциал к техногенным факторам.

В связи с этим решались следующие **задачи**:

1. Оценка воздействия промышленного загрязнения на такие характеристики, как:
  - морфологические параметры хвои/листьев и побегов;
  - физиологические параметры хвои/листьев;
  - характер аккумуляции тяжелых металлов в хвое/листьях и транслокацию металлов из почвы в хвою/листья;
  - дендрохронологические параметры стволовой древесины;
  - корневые системы различных фракций;
  - таксационные, габитуальные параметры древесных растений и комплексные показатели жизненного состояния отдельных деревьев и древостоев в целом;
2. Оценка адаптивных реакций перечисленных параметров.
3. Анализ экологической видоспецифичности древесных видов по отношению к углеводородному загрязнению.
4. Разработка положений об адаптивных стратегиях древесных видов к техногенезу.
5. Оценка адаптивных стратегий и адаптивного потенциала лесообразователей Предуралья к углеводородному загрязнению.

**Научная новизна работы** заключается в выявлении экологической видоспецифичности древесных видов по отношению к углеводородному загрязнению, в уточнении определения адаптивной стратегии древесных видов к техногенезу, в разработке и практической реализации на примере лесообразователей Предуралья в условиях нефтехимического загрязнения классификации адаптивных стратегий и методических подходов к выявлению адаптивных реакций и адаптивных стратегий, а также в выявлении относительной независимости адаптивных реакций на каждом иерархическом структурно-функциональном уровне и относительной независимости адаптивных реакций между иерархическими уровнями.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты исследований вносят вклад в понимание механизмов адаптации древесных растений к техногенным факторам, рас-

крывают особенности экологической видоспецифичности древесных видов по отношению к углеводородному загрязнению. Материалы диссертации могут быть использованы в зеленом строительстве при подборе древесных видов для озеленения промышленных зон с преобладанием тех или иных видов загрязнителей, а также при чтении курсов лекций по «лесоведению» и «экологии».

**Методология и методы исследования.** В работе использованы методы исследований, широко применяемые в экологии, лесоведении, почвоведении, корневедении, дендрохронологии, ботанике, физиологии растений, которые позволяют адекватно сравнить полученные результаты с работами других исследователей.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Дана сравнительная эколого-биологическая характеристика лесообразователей Предуралья в условиях нефтехимического загрязнения, которая согласуется с тезисами об экологической видоспецифичности и популяционной неоднородности видов. Показана экологическая видоспецифичность древесных видов на иерархических структурно-функциональных уровнях организации: морфология хвои/листьев, физиология хвои/листьев, дендрохронология, корневые системы, комплексный показатель жизненного состояния древостоев.

2. Показана относительная независимость адаптивных реакций на каждом иерархическом структурно-функциональном уровне и относительная независимость адаптивных реакций между иерархическими уровнями. Показаны адаптивные стратегии и адаптивный потенциал исследованных древесных видов к углеводородному загрязнению: сосна, лиственница и дуб характеризуются «толерантной» адаптивной стратегией и высоким адаптивным потенциалом, липа характеризуется «стрессовой» адаптивной стратегией и низким адаптивным потенциалом, ель и береза характеризуются «нейтральной» адаптивной стратегией и средним адаптивным потенциалом.

3. Уточнено определение адаптивной стратегии древесных видов к техногенезу. Разработаны и реализованы на примере лесообразователей Предуралья в условиях нефтехимического загрязнения классификация адаптивных реакций и адаптивных стратегий и методические подходы к определению адаптивных реакций и адаптивных стратегий древесных видов к техногенезу.

4. Полученные данные могут стать основой прогнозных оценок дальнейшего выполнения древостоями своих защитных, санитарно-гигиенических и средостабилизирующих функций, а также прогноза успешности лесоразведения, лесовосстановительных и лесорекультивационных работ на нарушенных территориях.

**Степень достоверности работы.** При выполнении исследований использовались современные, апробированные в лесоведении методы. Эксперименты проводились в достаточной повторности. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием в работе комплекса методических подходов: морфологических, физиологических, дендрохронологических, таксационных методов исследования с использованием адекватных методов статистической обработки данных. Выводы обоснованы экспериментальными данными, полностью и в логической последовательности отражают полученные результаты и отражены в печатных работах.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных мероприятиях: Вторая Всеросс. науч.-практ. конф. «Проблемы геоэкологии Южного Урала» (г. Оренбург, 2005 г.), Всеросс. науч. конф. «Устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды» (г. Иркутск, 2007 г.), V Всеросс. науч.-практ. конф. «Организация территории: статика, динамика, управление» (г. Уфа, 2008 г.), III Всеросс. науч. конф. «Принципы и способы сохранения биоразнообразия» (г. Пущино, 2008 г.), Всеросс. науч.-практ. конф. «Неравновесные процессы в природе» (г. Елец, 2010 г.), Междунар. науч. конф. «Антропогенная трансформация природной среды» (г. Пермь, 2010 г.), II (X) Междунар. ботаническая конф. молодых ученых в Санкт-Петербурге (г. Санкт-Петербург, 2012 г.), Меж-

дунар. науч. конф. молодых ученых «Современные проблемы биологии и экологии» (г. Челябинск, 2013 г.), Междунар. конф. молодых ученых «Актуальные проблемы ботаники и экологии» (г. Щёлкино, Украина, 2013 г.), 2-я Междунар. междисциплинар. науч. конф. «Адаптационные стратегии живых систем» (Новый Свет, Крым, 2014 г.), Междунар. науч. конф. «История ботаники в России. К 100-летию Русского ботанического общества» (г. Тольятти, 2015 г.), Третья Междунар. конф. «Инновационные подходы к обеспечению устойчивого развития социо-эколого-экономических систем» (г. Тольятти, 2016 г.), VI Intern. Conf. on Landscape Architecture to Support City Sustainable Development «Megacities 2050: Environmental Consequences of Urbanization» (г. Санкт-Петербург, 2018г.), The fourth Intern. Scient. Conf. on Ecology and Geography of Plants and Plant Communities (г. Екатеринбург, 2018 г.), Всеросс. конф. с международным участием «Экобиотех» (г. Уфа, 2009, 2015, 2017, 2019 гг.).

**Личный вклад автора.** Автором исследования лично разработана идея и методические подходы исследования. Все результаты исследований, представленные в работе, получены при непосредственном участии автора. Автор являлся организатором и непосредственным участником экспедиций по сбору полевого материала. Автором самостоятельно осуществлен весь объем статистического анализа диссертационных материалов и выполнено обобщение полученных результатов.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано более 60 работ, из которых 3 – в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных WOS и SCOPUS, 12 – в изданиях, рекомендованных ВАК для докторов наук по биологическим наукам, 8 – в других рецензируемых журналах перечня ВАК, 5 – монографий и глав в монографиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка литературы. Она изложена на 367 страницах машинописного текста, включает 26 таблиц и 46 рисунков. Список литературы содержит 647 источников, из них 435 отечественных и 212 зарубежных.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проведен детальный анализ отечественной и зарубежной научной литературы о влиянии техногенеза на рост и развитие древесных растений. Дана краткая характеристика углеводородов и источники их поступления в окружающую среду (Геннадиев и др., 2015; Серебрякова и др., 2017; Huang et al., 1993; Wilcke, 2000; Nadal et al., 2004; De Kok et al., 2005; Johnsen, Karlson, 2007; Belis et al., 2011; Desalme et al., 2013 и др.). Рассмотрены механизмы поступления углеводородов: в лесные экосистемы и в почву (Sabbah et al., 2004; Cheng, Wong, 2006; Masih, Taneja, 2006; Mueller, Shann, 2006; Wu et al., 2006; Gao et al., 2007; Nadal et al., 2007; Ni et al., 2008; Tian et al., 2008; He et al., 2009; Zand et al., 2010; Belis et al., 2011; Yu et al., 2011, 2014; Peng et al., 2012; Wu et al., 2012; Shang et al., 2013; Khan, Kathi, 2014; Yang et al., 2014 и др.) и в растения (Gill, Jackson, 2000; Howsam et al., 2000; Fismes et al., 2002; Jouraeva et al., 2002; Lehndorff, Schwark, 2004; Maisto et al., 2004; Capuano et al., 2005; Piccardo et al., 2005; Meudec et al., 2006; Mętrak et al., 2016 и др.). Показано воздействие углеводородов на растения (Неверова, 2001; Васфилов, 2003; Третьякова, Носкова, 2004; Григорьев, 2008; Курило, Григорьев, 2010; Карасев, Карасева, 2013, 2016; Ланкин, 2016; Серебрякова и др., 2017; Li et al., 2008; Jajoo et al., 2014; Tomar, Jajoo, 2013, 2014; Tomar et al., 2015 и др.).

Рассмотрены современные представления о влиянии техногенеза на:

- морфологию ассимиляционного аппарата (Бухарина и др., 2007; Жиров и др., 2007; Тужилкина, Плюснина, 2014; Донцов и др., 2016; Лебедевич, 2016; Легощина, 2016; Василевская, Сидорчук, 2018; Pooerter et al., 2009; Seyyednejad et al., 2013; Jochner et al., 2015; Qadir et al., 2016; Swain et al., 2016; Areington, Sershen, 2017; Rostunov et al., 2017; Chaudhary, Rathore, 2019 и др.);

- водный обмен ассимиляционного аппарата (Демаков, 2002; Неверова и др., 2002;

Неверова, Колмогорова, 2002; Сенькина, 2002; Костюченко, 2005; Васильева, 2011; Сунцова и др., 2011; Цандекова, Колмогорова, 2016; Сенькина, 2017; Meinzer, 2001; Schreuder et al., 2001; Wang et al., 2011, 2012, 2014; Singh et al., 2017; Klamerus-Iwan et al., 2018; Skrynetska et al., 2018 и др.);

– пигментный комплекс ассимиляционного аппарата (Кулагин, 2006; Кавеленова и др., 2008; Кириенко, Терлеева, 2009; Колмогорова, 2009; Васильева, 2011; Ахмадуллин, 2014; Баландайкин, 2014; Gao et al., 2016; Qadira et al., 2016; Swain et al., 2016; Areington et al., 2017; More, Chaubal, 2017; Molnár et al., 2018; Mukherjee, Agrawal, 2018; Chaudhary, Rathore, 2019 и др.);

– дендрохронологические параметры (Киселев и др., 2010; Кучеров, Мулдашев, 2011; Чжан и др., 2013; Кладько, Бенькова, 2018; Ferretti et al., 2002; McLaughlin et al., 2002; Kuang et al., 2008; Elling et al., 2009; Song et al., 2009; Stravinskiene et al., 2013; Duszyński, 2014; Godek et al., 2015; Barniak, Krapiec, 2016; Sensuła et al., 2017; Rutkiewicz, Malik, 2018; Łuszczynska et al., 2018 и др.);

– корневые системы древесных растений (Ярмишко, 2002; Зайцев, Кулагин, 2005, 2008; Васильева и др., 2011; Ахмадуллин, Зайцев, 2013; Mauer, Palátová, 2003; Puhe, 2003; Lux et al., 2004, 2011; Newman, Hart, 2006; Cudlín et al., 2007; Brunner et al., 2008; Albrechtová et al., 2017 и др.);

– жизненное состояние древостоев (Автухович и др., 2000; Гришко и др., 2002; Неверова, Колмогорова, 2002; Яновский, 2002; Курбатова и др., 2004; Рунова и др., 2005; Сарбаева, 2005; Турмухаметова, 2005; Колмогорова, 2006; Бухарина, 2007; Ковылина и др., 2008; Effects..., 2002; Lorenz et al., 2003; Percya, Ferretti, 2004; Vacek et al., 2013; Jakovljević et al., 2019 и др.);

– аккумуляцию тяжелых металлов и их влияние на растительные организмы (Ильин, Сысо, 2001; Клепикова и др., 2002; Мацкунас и др., 2002; Черненкова, 2004; Сухарева, Лукина, 2004; Федорова, 2005; Баимова, 2009; Кулагин и др., 2010; Радостева, 2011; Гиниятуллин, 2012; Mengel, Kirby, 2001; Kosiba, 2008; Sun et al., 2010; Yaylali-Abanuz, 2011; Korzeniowska et al., 2014; Achadul et al., 2015; Bing et al., 2015; Lianga et al., 2017; Madejón, et al., 2018; García-Sánchez et al., 2019 и др.).

Рассмотрены современные представления об адаптивных реакциях и стратегиях растений к техногенезу (Кулагин, 1974, 1980, 1985; Усманов и др., 2001; Жиров и др., 2006; Kozlowsky, Pallardi, 2002; Ramos et al., 2002; Vranova et al., 2002; Zornoza et al., 2002; Lou et al., 2004; Wójcik et al., 2005; Clemens, 2006; Tripathi, Gautam, 2007; Dalcorsio et al., 2008; Guo et al., 2008; Lakshmi et al., 2008; Liu, Ding, 2008; Chen et al., 2009; Gostin, 2009; Joshi, Swami, 2009; Sharma, Dietz, 2009; Xu et al., 2009; Das, Prasad, 2010; Jyothi, Jaya, 2010; Pourkhabbaz et al., 2010; Skiryecz, Inzé, 2010; Hodson, 2012; Hossain et al., 2012; Meerabai et al., 2012; Dalvi, Bhalerao, 2013; Ogunkunle et al., 2013; Das, Roychoudhury, 2014; Singh, Prasad, 2014; Yadav et al., 2014; Kumar et al., 2017; Devi et al., 2017; Zhang et al., 2020 и др.).

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Характеристика района исследований

**Рельеф.** Район исследований находится в пределах Прибельской увалисто-волнистой равнины, в центральной части Бельско-Уфимского междуречья, на западных, северо-западных и юго-западных склонах Бельско-Сутолокской антиклинали. Через Бельско-Уфимское междуречье проходит Черкасско-Стерлибашевский вал, который имеет простираение с северо-востока на юго-запад. Данная структура состоит из значительно приподнятых (от 150 до 370 метров) широких куполовидных складок. В геологическом отношении изучаемый район представлен складчато-кристаллическим фундаментом, перекрытым мощной толщей осадочных пород: песчаников, глин, мергелей, известняков, доломитов, а также легкорастворимых гипсов и ангидритов пермского периода. Водоразделы сложены легкоразмываемыми породами, поэтому изрезаны глубокой овражно-балочной сетью и осложнены карсто-

выми формами рельефа (Физико-географическое..., 1964; Башкортостан..., 1996).

**Климат.** Климат имеет переходный характер от умеренно-континентального к континентальному. Средняя годовая температура воздуха  $+2,5^{\circ}\text{C}$ , средняя температура января  $-14,6^{\circ}\text{C}$ , абсолютный минимум  $-50^{\circ}\text{C}$ , средняя температура июля  $+19,3^{\circ}\text{C}$ , абсолютный максимум  $+40^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков 419 мм. За вегетационный период обычно выпадает до 70% осадков. Устойчивый снежный покров устанавливается с середины ноября до 1 декады апреля. В течение года преобладает юго-западный (повторяемость ветров 26%) и южный перенос воздушных масс (24%), повторяемость штилей – 21% (Алисов, 1947; Немкова, Климанов, 1968; Климат..., 1987).

**Почвы.** Согласно физико-географическому районированию Республики Башкортостан город Уфа и прилегающие территории расположены в Лесостепной зоне, подзоне Северной лесостепи, Правобережно-Прибельском округе, где преобладают серые почвы, сформированные на делювиальных и элювиально-делювиальных отложениях. Морфологически они характеризуются выраженным перегнойно-аккумулятивным горизонтом, который имеет серую окраску, ореховатую структуру. Средняя мощность этого горизонта 24-30 см, содержание гумуса составляет около 5-7%, средние показатели обеспеченности подвижным фосфором находятся на уровне низкой, калием – средней степени. Содержание гидролизуемого азота колеблется от 3,8 до 11 мг на 100 г почвы. Реакция почвенной среды – слабокислая. В почвенно-геохимическом отношении в серых почвах содержится в среднем подвижного бора – 0,283, молибдена – 0,16, кобальта – 3,11, меди – 6,0, цинка – 0,37 и марганца – 141 мг/кг почвы (Гирфанов, Ряховская, 1975; Хазиев и др., 1995).

**Гидрография.** Территория г. Уфы расположена в бассейне рек Белая, Уфа и Дема, которые являются основными водными артериями Республики Башкортостан. Ширина русла р. Белой составляет в среднем 400 м. Средний уклон русла – 6 см на 1 км, глубина 2-5 м. Средняя продолжительность ледового покрытия этих рек 168 дней, толщина льда – 60 см. Весенний ледоход с 18 апреля, замерзание с 19 ноября. Река Уфа – правый приток р. Белой, вторая по величине река Республики Башкортостан. Ширина русла – 300 м, глубина 2-3 м, впадает в р. Белую в южной части г. Уфы. Река Дема имеет ширину 50 м и глубину 1,5-3 м, впадает в р. Белую в южной части г. Уфы. Поймы рек обильны озерами, старицами, болотистыми и сырыми участками. Уровень почвенно-грунтовых вод колеблется в зависимости от размеров паводка (Башкортостан..., 1996).

**Древесная растительность.** Исследуемый район находится в пределах лесостепной зоны. Основными лесообразующими породами являются: хвойные – сосна, лиственница, ель, пихта; лиственные – дуб, липа, береза, клен, тополя и др. Из общей лесопокрываемой площади лесообразующие мягколиственной группы составляют 68,7%, хвойной – 22,1%, твердолиственной – 8,8%. Уфимский промышленный центр (УПЦ) входит в категорию городов с недостаточной обеспеченностью зеленой зоны лесопокрываемыми площадями: на 25-и тысячах гектар зеленой зоны лесистость территории составляет 18%. Леса УПЦ представлены преимущественно широколиственными породами, хвойные леса встречаются преимущественно в искусственных посадках. В целом, природно-климатические условия вполне благоприятны для произрастания хвойных и мягколиственных древесных пород (Попов, 1980; Башкортостан..., 1996; Леса Башкортостана, 2004; Государственный доклад..., 2020).

### **Техногенное загрязнение района исследований и выделение функциональных зон**

Древостой санитарно-защитной зоны УПЦ начиная с 40-х годов прошлого столетия находятся в условиях хронического интенсивного техногенного загрязнения. Ведущие промышленные мощности северного промузла: нефтеперерабатывающая, включающая в себя три нефтеперерабатывающих завода – ОАО «Уфанефтехим», ОАО «Уфимский НПЗ», ОАО «Ново-Уфимский НПЗ»; химическая, крупным представителем которой является ОАО «Уфаоргсинтез»; машиностроение и металлообработка представлены ОАО «Уфим-

ское моторостроительное производственное объединение», и др. На рисунке 1 представлены поля концентрации некоторых загрязняющих веществ. В районе исследования преобладают ветры южного направления, однако выбросы загрязняющих веществ распространяются на значительную часть городской зоны с постепенным уменьшением концентрации (Государственный доклад..., 2020).

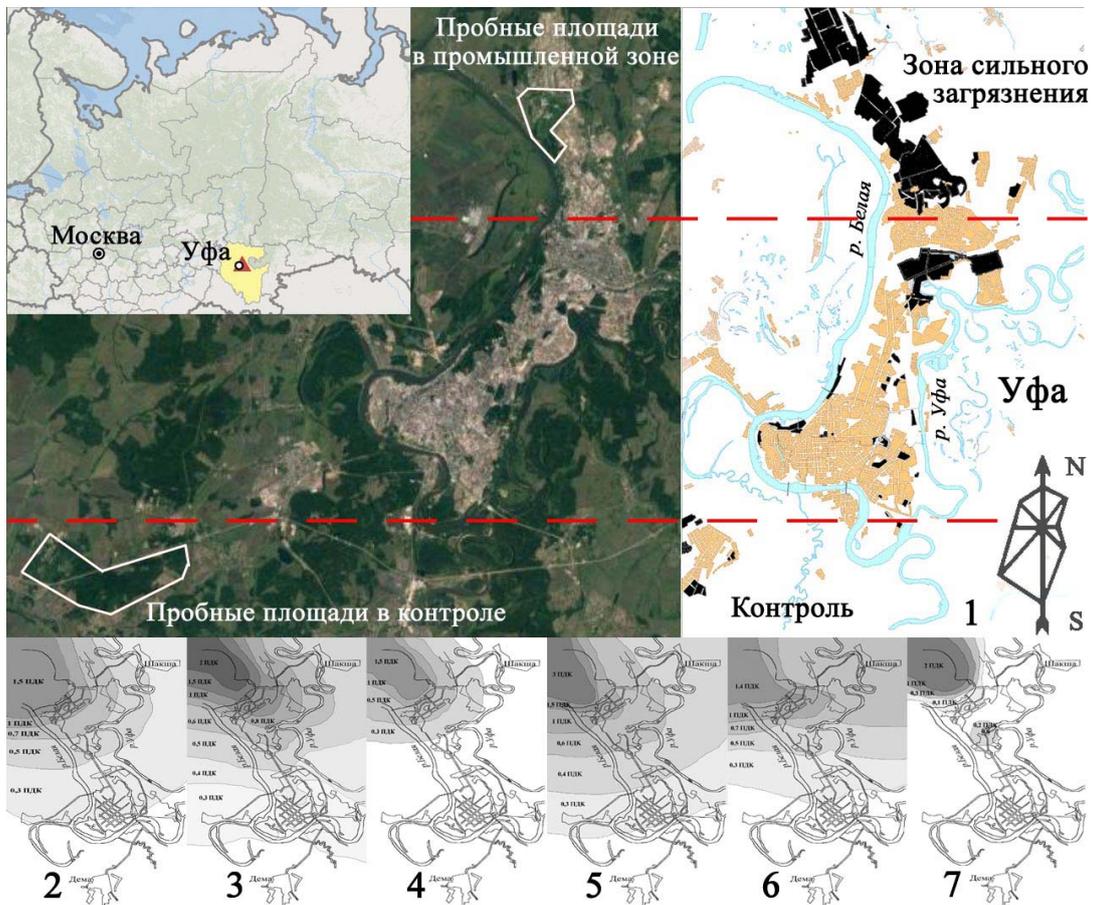


Рисунок 1. Расположение района исследований и схема его разделения на зоны (1) и поля концентраций некоторых загрязняющих веществ на территории УПЦ (2 – углеводороды; 3 – двуокись серы; 4 – кислоты (серная, соляная, азотная); 5 – сероводород; 6 – пятиокись ванадия; 7 – бутанол).

Динамика объемов выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников (Государственный доклад..., 2020) представлена на рисунке 2, из которого видно, что за последние 39 лет наблюдается постепенное, но существенное снижение уровня загрязнения. В начале 1990-х гг. резкое снижение объемов выбросов загрязняющих веществ связано с глубоким финансово-экономическим кризисом и падением объемов производства, в начале 2000-х гг. – с введением в эксплуатацию новых и современных очистных сооружений на предприятиях УПЦ.

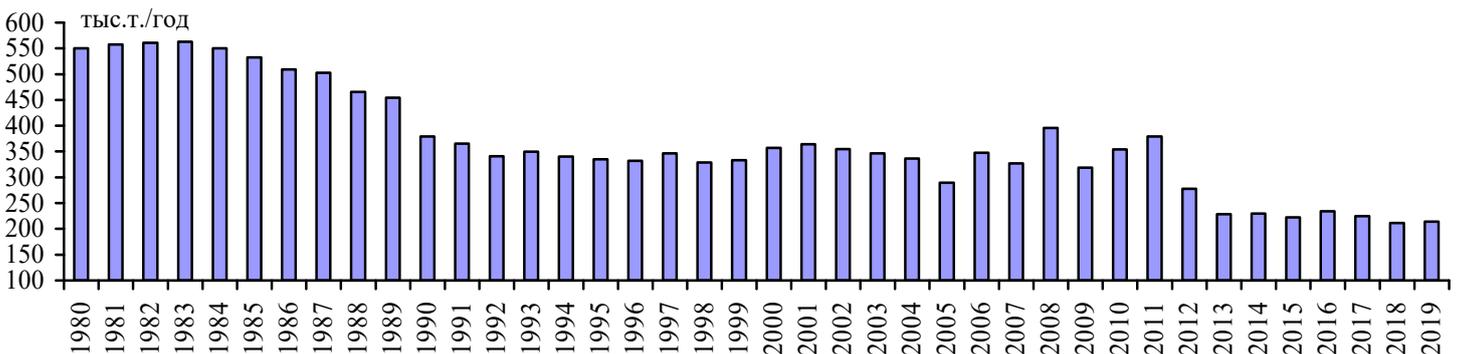


Рисунок. 2. Динамика суммарных объемов выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников в г. Уфа за период 1980-2019 гг., тыс.т.

Основываясь на приведенных выше данных о загрязненности атмосферы, а также в зависимости от удаленности от нефтехимических предприятий и розы ветров, район исследований условно разделен на 2 зоны (рис. 1): зона сильного загрязнения и контроль. Для каждого древесного вида было выделено 2 участка древостоя (по одному в каждой зоне) наиболее близких по возрасту (в пределах класса возраста), условиям произрастания и таксационным показателям, в которых были заложены пробные площади: в зоне сильного техногенного загрязнения в 300 м от нефтеперерабатывающих заводов, контроль – в южной части города, 50 км от нефтеперерабатывающих заводов.

### Объекты исследований

Объекты исследований – лесные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) и естественные древостои дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), березы повислой (*Betula pendula* Roth) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), произрастающие в пределах зеленой зоны г. Уфы. Как видно из таблицы 1, таксационные характеристики древостоев в условиях загрязнения и в контроле очень близки: формула древостоя по главной породе различается только у ели и лиственницы, но не более чем на единицу, различия в возрасте древостоев не превышают класса возраста (что в лесоведении считается допустимым при сравнении разновозрастных древостоев), средний диаметр различается не более чем на одну ступень толщины, различия в высоте колеблются в пределах от 1-7 м, значительные различия в полноте древостоев обнаруживаются только у дуба, где редколесье в условиях промышленной зоны обусловлено холмисто-овражным рельефом. Таким образом, корректность подбора объектов исследований очевидна.

Таблица 1. Краткая таксационная характеристика древостоев на пробных площадях

Древесная порода	Местоположение	Формула древостоя	Средний возраст, лет	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Полнота
Сосна	промзона	10С	57	24	18	0,8
	контроль	10С	74	26	25	0,7
Лиственница	промзона	9Лц 1С	60	30	20	0,8
	контроль	10Лц	73	32	27	0,8
Ель	промзона	9Е 1Лп	46	24	20	1,0
	контроль	10Е	59	24	22	1,0
Дуб	промзона	8Д 1Лп 1Кл+В	61	24	18	0,5
	контроль	8Д2Лп +Б	72	26	19	0,9
Липа	промзона	10Лп +Д	37	16	14	0,7
	контроль	10Лп +Д	37	17	15	0,7
Береза	промзона	10Б	61	20	28	0,8
	контроль	10Б	53	23	35	0,8

### Методы исследований

**Таксация леса.** Закладка пробных площадей проводилась согласно принятым в лесоведении методикам. Определялись следующие таксационные показатели: высота дерева (с помощью эклиметра ЭВ-1 (Россия) с точностью до 0,1 м), диаметр ствола на высоте 1,3 м (с помощью мерной вилки Mantax Precision Blue MA 800 Haglof, Sweden с точностью до 0,5 см), возраст дерева (с помощью возрастного бура Suunto, Finland). Перечет деревьев велся по 2-х сантиметровым ступеням толщины (Сукачев, 1966; Клейн, Клейн, 1974; Методы..., 2002). Определение объемов древесных стволов производилось по стандартным таблицам Справочника лесовода (1959) «Объемы стволов в коре в м<sup>3</sup>...».

**Морфология хвои/листьев и побегов.** Хвоя и листья собирались с нижней части кроны южной экспозиции деревьев в течение вегетационного периода (май, июнь, июль, август) с

последующей гербаризацией. У 20 рандомизированных образцов из каждой партии измерялись параметры: длина хвои/листа (мм), ширина хвои/листа (мм), площадь хвои (мм<sup>2</sup>) / листа (см<sup>2</sup>), масса 100 абсолютно сухих хвойных метамеров / абсолютно сухого листа (мг). Длину побегов текущего года генерации (см) измеряли на меченных побегах растущих деревьях в полевых условиях, повторность 20 побегов. Длину хвои/листа, ширину хвои/листа и длину побегов определяли штангенциркулем с точностью 0,01 мм. Для вычисления площади поверхности хвоинки сосны, лиственницы и ели использованы формулы Л.А. Иванова (Базилевич и др., 1978; Жидкова, Феклисов, 2001).

**Водный обмен хвои/листьев.** Исследования проводились в полевых условиях на только что срезанных листьях/метамерах. Выбирались дни без осадков с приблизительно равномерной облачностью и температурой воздуха в течение дня. Повторность 20 листьев, метамеров ели, укороченных побегов с двумя хвоинками сосны, укороченных побегов с пучком хвоинок лиственницы текущего года генерации из нижней части кроны южной экспозиции. В последнюю декаду каждого месяца измеряли: интенсивность транспирации (ИТ), относительное содержание воды (ОСВ), дефицит водного насыщения (ДВН) утром – с 8:00 до 10:00 ч, в полдень – с 12:00 до 14:00 ч, вечером – с 16:00 до 18:00 ч. Использован метод быстрого взвешивания образцов на торсионных весах (Techniprot Pruszkov) с последующим экспонированием на рассеянном свете: для ИТ – в течение 3 минут и повторным взвешиванием, для ОСВ и ДВН – в эксикаторе с погруженными в воду образцами в течение 3 часов и повторным взвешиванием. Вес абсолютно сухих образцов определяли после двух недель сушки в термосушильном шкафу при температуре +60°C (Иванов, 1950; Бейдеман, 1956; Бендер и др., 2009).

**Пигментный комплекс хвои/листьев.** Отбиралась хвоя и листья текущего года генерации из нижней части кроны с 20 модельных деревьев пробной площади в последнюю декаду каждого месяца вегетационного периода с 11:00 – 14:00 ч. Хвоя и листья измельчались и тщательно перемешивались для получения усредненных данных для всей пробной площади. Навески массой 0,1 г заливали 10 мл 96%-го этилового спирта и выдерживали 12 часов в темноте. Концентрацию пигмента в вытяжке определяли при помощи спектрофотометра КФК – 5М (Россия), а его содержание в хвое (в мг/г сырой массы хвои) рассчитывали с учетом объема вытяжки и массы пробы (Бажанова, Сапожников, 1964; Методы..., 1978; Чупахина, 2000). Также были рассчитаны соотношения «Хл а / Хл b» и «(Хл а + Хл b) / Каротиноиды».

**Тяжелые металлы (ТМ) в хвое/листьях и почве.** Отбор почвенных образцов проводили до глубины 1 м почвенного разреза по 10 см слоям. Листья и хвоя текущего года генерации отбирались из нижней части кроны с южной экспозиции в конце августа рандомизированно. В контрольно-аналитической лаборатории определяли содержание в пробах Cu, Cd, Zn, Fe, Pb методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии (атомно-абсорбционный спектрофотометр ААС-3, CarlZeissJena). Повторность – 10 проб. (Брицке, 1982). При оценке транслокации металлов из почвы в хвою/листья древесные виды разделены на «аккумуляторы» (содержание металла в хвое/листьях в несколько раз превышает его содержание в почве) «индикаторы» (содержание металла в хвое/листьях соответствует его содержанию в почве) и «исключатели» (низкая концентрация металла в хвое/листьях относительно его содержания в почве) (Титов и др., 2011).

**Дендрохронологические исследования.** Модельные деревья выбирались по среднему диаметру, на высоте до 0,5 м с помощью возрастного бура Suunto (Finland) отбиралось по одному керну с южной экспозиции ствола, выборка – 20 модельных деревьев на каждой пробной площади. Для измерения ширины годичных колец использовали микроскоп-бинокляр МБС-1 с точностью измерений 0,05 мм. Датировка годичных колец – методом перекрестной датировки. Оценивались параметры: достоверность различий между приростами по критерию Стьюдента (t); корреляция рядов радиального прироста с суммой летних положительных температур (r<sub>t</sub>), суммой летних осадков (r<sub>ос</sub>), числами Вольфа (r<sub>W</sub>), динамикой ежегодного плодородия (r<sub>пл</sub>) и суммарными годовыми объемами выбросов загрязняющих веществ от стаци-

онарных и передвижных источников ( $r_3$ ); коэффициент чувствительности (К) (Комин, 1970; Ваганов, Терсков, 1978; Ловелиус, 1979; Антанайтис, Загреев, 1981; Фильрозе, 1987; Веретенников, 1992; Матвеев и др., 2009; Табакова и др., 2011; Тишин, 2011). Для оценки тесноты корреляционных отношений использовалась шкала: 0,01-0,3 – «очень слабая», 0,31-0,5 – «слабая», 0,51-0,7 – «средняя», 0,71-0,9 – «сильная», 0,91-1 – «очень сильная». Для выявления специфики накопления стволовой биомассы ряды радиального прироста преобразовывали в ряды прироста по площади поперечного сечения ствола ( $\text{см}^2$ ). Логарифмирование площади поперечного сечения прироста выделяет на кривой участки с одинаковой скоростью роста, аппроксимируемые уравнениями прямых (условные онтогенетические периоды), а также переходы между ними, когда скорость роста резко изменяется (границы периодов). Изломы в пределах онтогенетических периодов указывают на стрессовое воздействие внешних факторов (Николаева, Савчук, 2009).

**Исследования корневых систем.** Использован метод монолитов (Красильников, 1950; Рахтеенко, 1952; Тарановская, 1957; Шалыт, 1960; Ильин, 1961; Орлов, 1967; Рахтеенко, Якушев, 1968; Колесников, 1972). На расстоянии 70 см от модельных деревьев закладывались почвенные шурфы длиной 2,5 м и глубиной 1 м. От стенки шурфа, обращенной к стволу дерева, отбирались 10 почвенных столбов-монолитов до глубины 1 м, разделенных на блоки по 10-ти см слоям размером 20x20 см. После отмывки корни разделяли на фракции: до 1 мм – поглощающие, 1-3 мм – проводящие, более 3 мм – скелетные. Воздушно-сухой вес корней определяли на электронных весах ВЛТЭ-150 с точностью 0,001 г (Госметр, Россия). Корненасыщенность почвы определяли на единицу площади горизонтальной поверхности ( $\text{г}/\text{м}^2$ ).

**Оценка относительного жизненного состояния (ОЖС) древостоев.** За основу взята методика В.А. Алексеева (1990). При проведении перечета деревьев на пробной площади одновременно отмечались результаты визуальной оценки диагностических признаков жизненного состояния деревьев: густота кроны (в % от нормальной густоты), наличие на стволе мертвых сучьев (в % от общего количества сучьев на стволе), степень повреждения листьев (средняя площадь некрозов, пятнистостей и объеданий в % от площади листа). При вычислении объема стволов деревьев определялась принадлежность деревьев к категории жизненного состояния: здоровое, ослабленное, сильно ослабленное, усыхающее, сухое. Различные повреждения (морозобойные трещины, раковые течи камеди, суховершинность, энтомопоражения (кладки яиц, стволовые заселения и т.д.), фитопатологические повреждения (образование на стволе плодовых тел грибов) и т.д.) снижают категорию жизненного состояния дерева. Категория жизненного состояния всего древостоя определяется по соотношению запасов деревьев всех категорий жизненного состояния.

**Определение адаптивных реакций и адаптивных стратегий древесных видов к загрязнению.** Анализ совокупности современных подходов к определению и выявлению адаптивных стратегий к техногенному фактору позволили разработать авторский подход к данному вопросу. Предлагается рассматривать адаптивную стратегию древесного вида к техногенному фактору как степень согласованности относительно независимых (разнонаправленных) адаптивных реакций (биохимических, физиологических, анатомических, морфологических, габитуальных и т.д.), совокупно проявляющихся на всех иерархических структурно-функциональных уровнях организации древесных растений популяции. Предлагается различать следующие адаптивные реакции:

**Стрессовые** – при низком адаптивном потенциале адаптивные реакции направлены на активное ограничение влияния стрессового фактора, затрачивая значительные энергетические ресурсы;

**Умеренно-стрессовые** – незначительное или недостоверное проявление адаптивных реакций, направленных на ограничение влияния стрессового фактора;

**Нейтральные** – отсутствие реакций при влиянии стрессового фактора;

**Умеренно-толерантные** – возрастающий адаптивный потенциал позволяет незначи-

тельно или недостоверно усиливать процессы роста и развития, несмотря на давление стрессового фактора;

**Толерантные** – высокий адаптивный потенциал позволяет быть не восприимчивым к стрессовому фактору, не расходовать энергию на ограничение его влияния и без вреда усиливать процессы роста и развития.

Отнесение того или иного параметра к конкретной адаптивной реакции принимается на основе степени и достоверности его изменения под действием стрессирующего фактора. Адаптивная стратегия вида определяется как Стрессовая, Умеренно-стрессовая, Нейтральная, Умеренно-толерантная или Толерантная и выделяется как мода совокупности всех адаптивных реакций на всех иерархических уровнях организации. Количественную оценку степени согласованности адаптивных реакций проводили с использованием коэффициентов меры разнообразия: сигма, индекс Шеннона, индекс Симпсона, коэффициент равномерности.

Статистическая обработка данных проводилась методами дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов с применением современных статистических методов и пакетов прикладных программ Microsoft Excel 2010, Statistica 6.0.

## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Морфология хвои/листьев и побегов

Углеродородное загрязнение способствует проявлению видоспецифических реакций, вызывая усиление ксероморфности одних параметров и ослабление других.

У всех хвойных видов и дуба промышленное загрязнение стимулирует значительное и достоверное увеличение длины побегов, у липы и березы наблюдается значительное и достоверное уменьшение их длины (рис. 3). В течение вегетации адаптивные реакции длины побегов не меняются на противоположные.

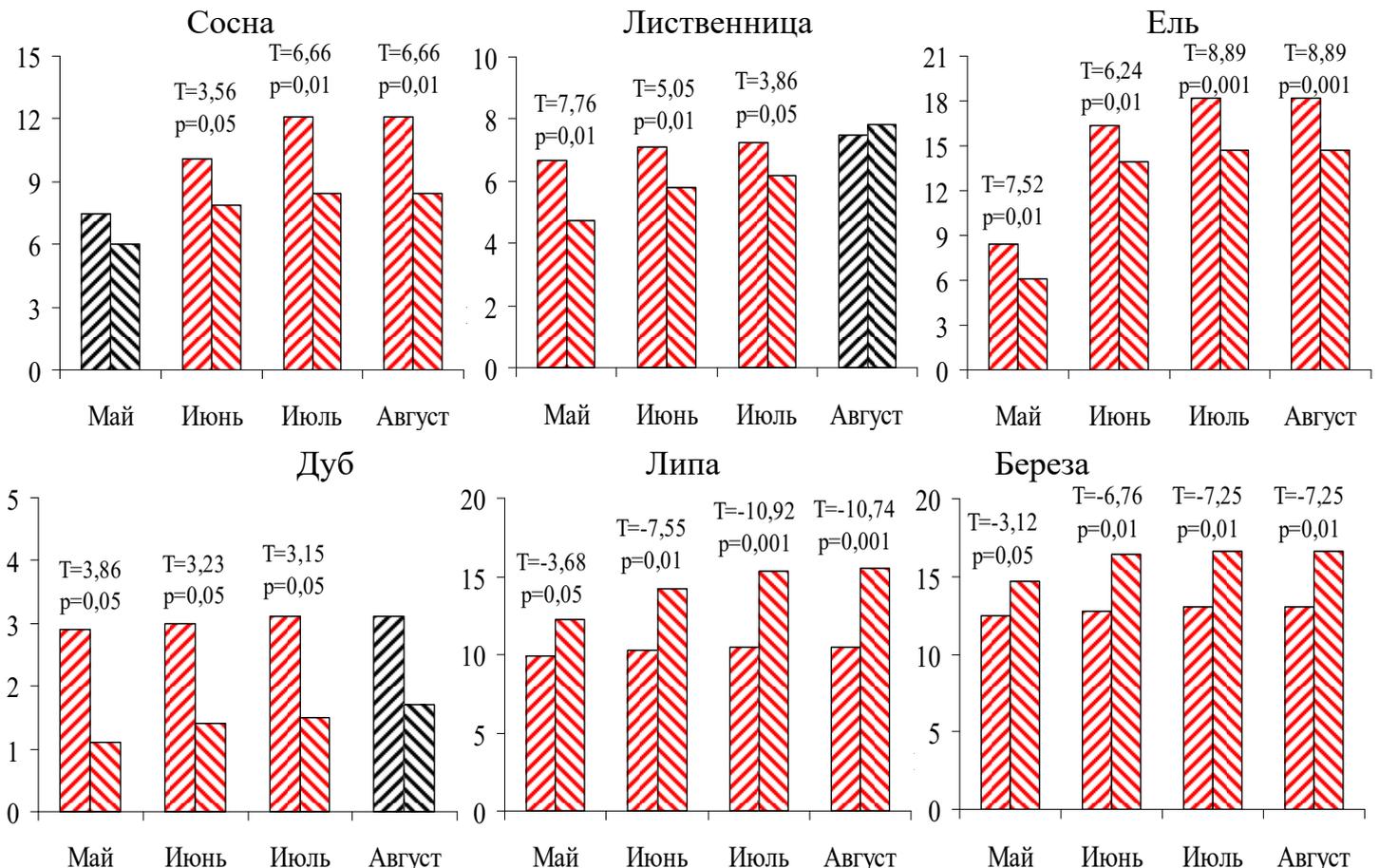


Рисунок 3. Длина побегов (см) древесных видов УПЦ в течение вегетации. Условные обозначения: // промышленная зона, \\\ контрольный участок, // значения, достоверно различающиеся по критерию Стьюдента, T – критерий Стьюдента, p – уровень значимости.

Сосна: при значительном увеличении ширины хвои и незначительном увеличении ее длины и площади наблюдается незначительное уменьшение ее массы. Во второй половине вегетации адаптивные реакции длины и ширины хвои изменяются на противоположные (рис. 4).

Лиственница: при значительном уменьшении длины и площади хвои ее ширина остается неизменной, масса значительно увеличивается. Во второй половине вегетации адаптивные реакции массы метамеров изменяются на противоположные (рис. 4).

Ель: при значительном увеличении ширины и массы хвои и незначительном увеличении ее площади наблюдается значительное уменьшение ее длины. В середине вегетации адаптивные реакции площади хвои изменяются на противоположные (рис. 4).

Дуб: при значительном уменьшении площади и длины листа наблюдается значительное увеличение его ширины и незначительное его массы. В первой половине вегетации адаптивные реакции площади листа изменяются на противоположные (рис. 5).

Липа: при значительном уменьшении площади и ширины листа наблюдается значительное увеличение его длины и массы. Во второй половине вегетации адаптивные реакции длины и массы листа изменяются на противоположные (рис. 5).

Береза: наблюдается значительное уменьшение всех морфологических параметров. В течение вегетации отсутствуют изменения адаптивных реакций всех морфологических параметров (рис. 5).

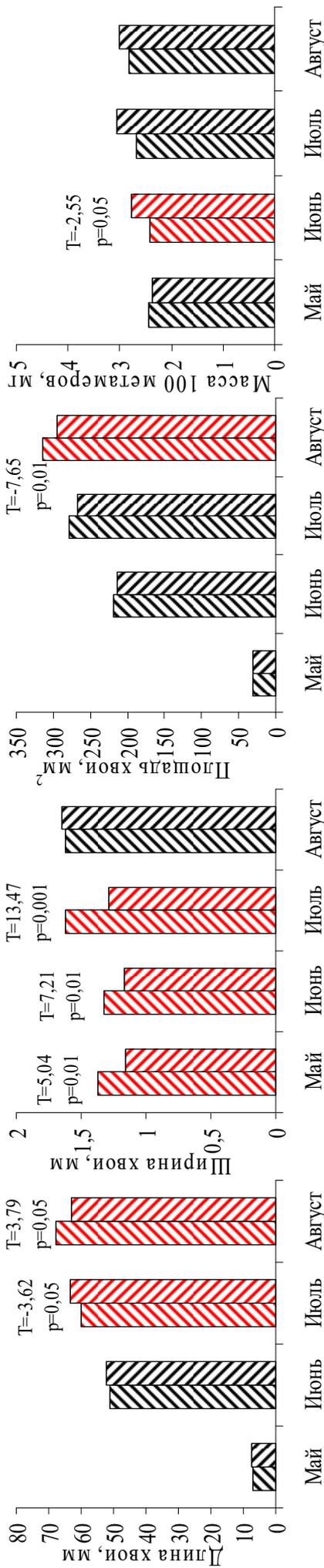
Адаптивные реакции морфологических параметров носят разнонаправленный характер, и в некоторых случаях единая четкая тенденция не просматривается (табл. 2). Выделены следующие характерные адаптивные реакции:

Таблица 2. Адаптивные реакции морфологических параметров хвои, листьев и побегов древесных видов УПЦ по отношению к углеводородному загрязнению

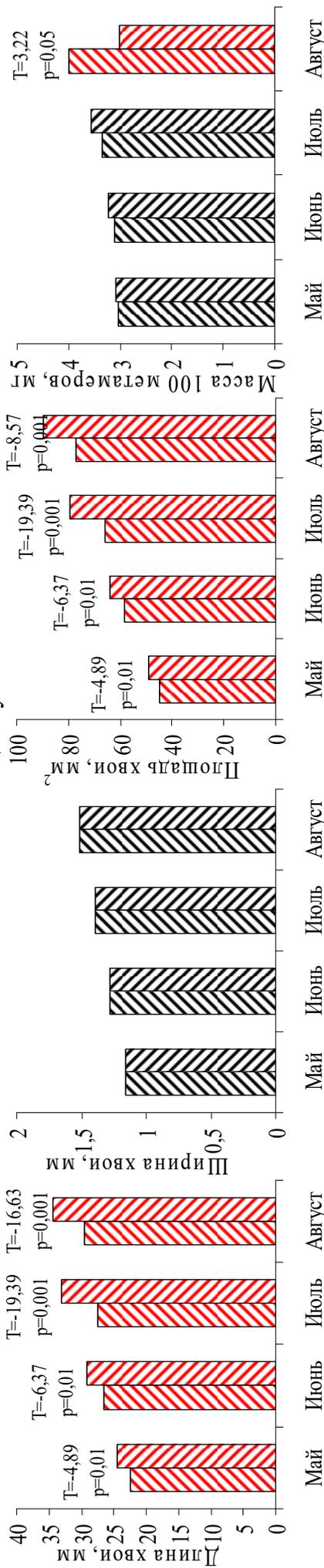
Месяц	Длина хвои	Ширина хвои	Площадь хвои	Масса хвои	Длина побегов	Длина листа	Ширина листа	Площадь листа	Масса листа	Длина побегов
					Сосна			Дуб		
май	(-)	↑↑	(-)	(-)	↑	↓↓	↑↑	↓↓	↑	↑↑
июнь	(-)	↑↑	(-)	↓	↑↑	↓↓	↑↑	↑	(-)	↑↑
июль	↓	↑↑	↑	↓	↑↑	↓↓	↑↑	↓	↑	↑↑
август	↑	(-)	↑	↓	↑↑	↓↓	↑	↓↓	↑	↑↑
					Лиственница			Липа		
май	↓	(-)	↓	(-)	↑↑	↑	↓	(-)	↑↑	↓
июнь	↓	(-)	↓	(-)	↑↑	↑	↓	(-)	↑↑	↓↓
июль	↓↓	(-)	↓↓	↓	↑	(-)	↓	↓	(-)	↓↓
август	↓↓	(-)	↓↓	↑↑	(-)	(-)	↓	↓↓	(-)	↓↓
					Ель			Береза		
май	↓	↑	(-)	↑	↑↑	(-)	↓↓	↓↓	↓	↓
июнь	↓	↑	(-)	↑↑	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓↓
июль	↓	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↓↓	↓	↓	↓↓	↓↓
август	(-)	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↓↓	(-)	(-)	↓↓	↓↓

- длина хвои/листа: «стрессовая» (лиственница, дуб, береза) – «умеренно-стрессовая» (ель,) – «нейтральная» (липа) – «умеренно-толерантная» (сосна);
- ширина хвои/листа: «умеренно-стрессовая» (липа, береза) – «нейтральная» (лиственница) – «толерантная» (сосна, ель, дуб);
- площадь хвои/листа: стрессовая – лиственница, дуб, липа; умеренно-стрессовая – береза; умеренно-толерантная – сосна, ель;
- масса хвои/листа: стрессовая – береза; умеренно-стрессовая – сосна; нейтральная – липа; умеренно-толерантная – дуб; толерантная – лиственница, ель;
- длина побегов: стрессовая – липа, береза; умеренно-толерантная – лиственница; толерантная – сосна, ель, дуб.

**Хвоя сосны обыкновенной**



**Хвоя лиственницы Сукачева**



**Хвоя ели сибирской**

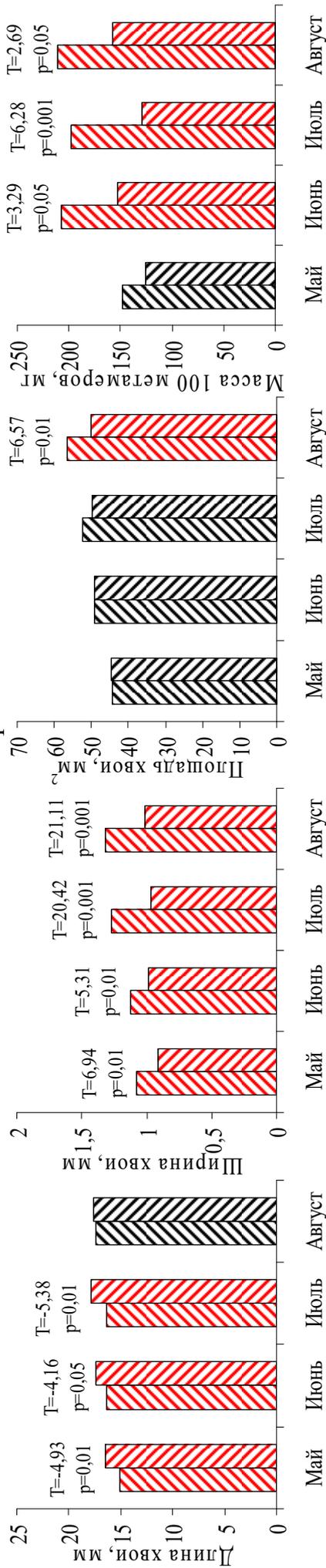
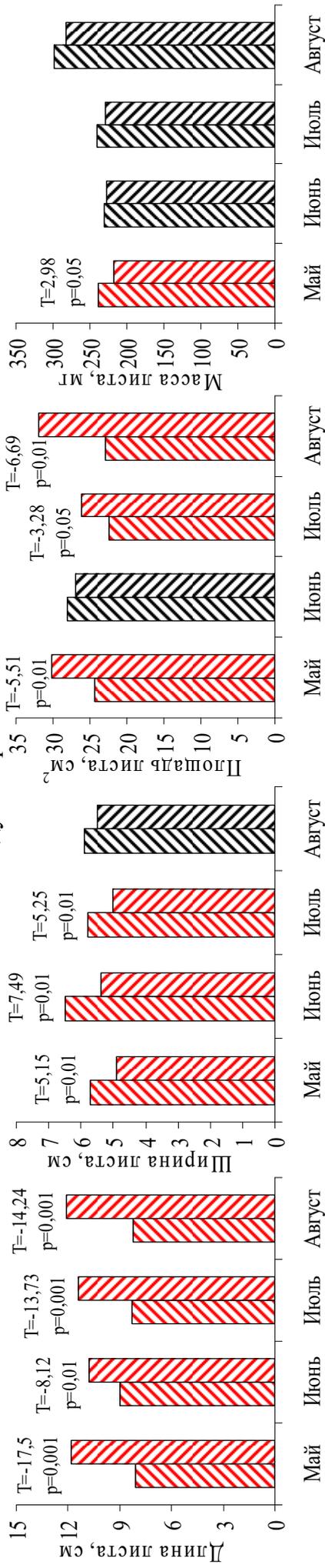
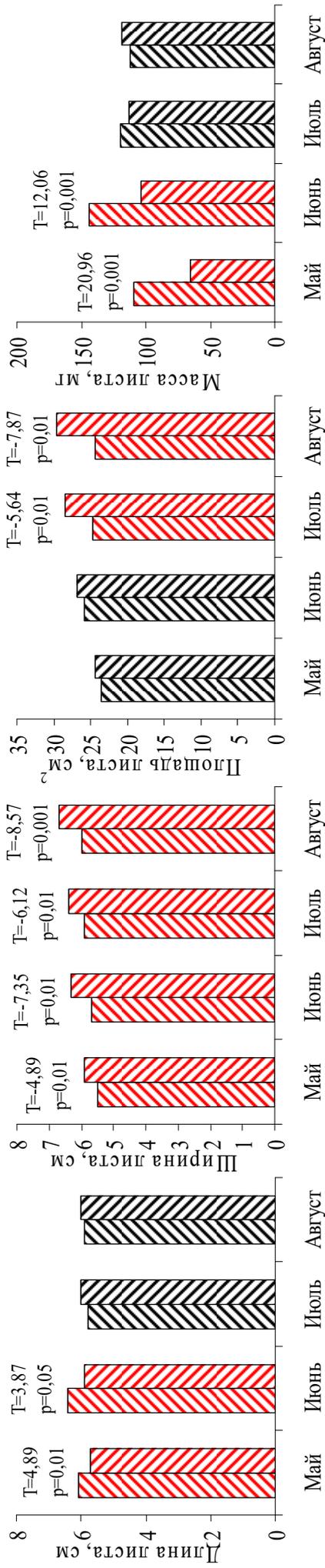


Рисунок 4. Морфология хвои лесобразователей УПЦ в динамике вегетации. Условные обозначения смотри на рис. 3.

### Листья дуба черешчатого



### Листья липы мелколистной



### Листья березы повислой

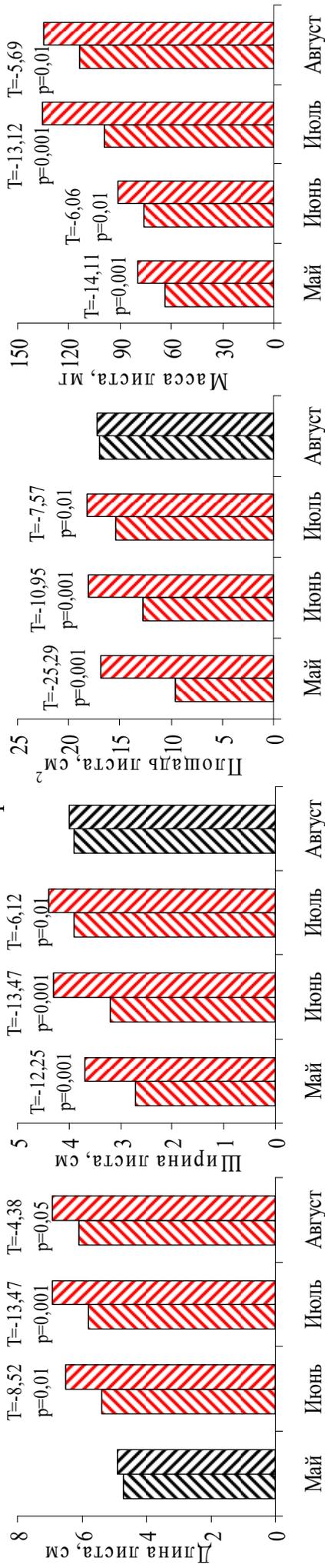


Рисунок 5. Морфология листьев лесобразователей УЩ в динамике вегетации. Условные обозначения смотри на рис. 3.

Для каждого вида показана относительная независимость адаптивных реакций морфологических параметров, проявляющаяся в течение всей вегетации. Из всех видов только береза характеризуется стрессовой адаптивной реакцией всех морфологических параметров, остальные виды проявляют поливариантность, но с определенной долей условности лиственница и липа тяготеют к нейтральной адаптивной реакции, а сосна, ель и дуб – к толерантной.

### 3.2. Водный обмен хвои/листьев

Хвоя и листья всех видов характеризуются высоким относительным содержанием воды (ОСВ) и низким дефицитом водного насыщения (ДВН), значения которых далеки от критических границ иссушения (рис. 6-11). Интенсивность транспирации (ИТ) более подвержена изменениям в условиях загрязнения. В нормальных условиях произрастания у растений наблюдается увеличение ИТ и ДВН к полудню и уменьшение к вечеру, что сопровождается снижением ОСВ к полудню и восстановлением к вечеру. В динамике вегетации по мере роста хвои и листа показатели ИТ и ОСВ увеличиваются, а по мере старения снижаются, у ДВН наблюдается обратная картина. Однако, нефтехимическое загрязнение вызывает ряд видоспецифических адаптивных реакций водного обмена хвои и листьев относительно контроля.

У сосны в первой половине вегетации снижается ОСВ и увеличивается ДВН, во второй половине вегетации, напротив, увеличивается ОСВ и снижается ДВН; при этом значительно увеличивается ИТ на протяжении всей вегетации. Нарушена суточная динамика ОСВ ДВН и ИТ. Нарушена вегетационная динамика ИТ, но наблюдается естественный ход вегетационной динамики ОСВ и ДВН. В течение дня и в динамике вегетации адаптивные реакции ОСВ ДВН и ИТ меняются на противоположные (рис. 6).

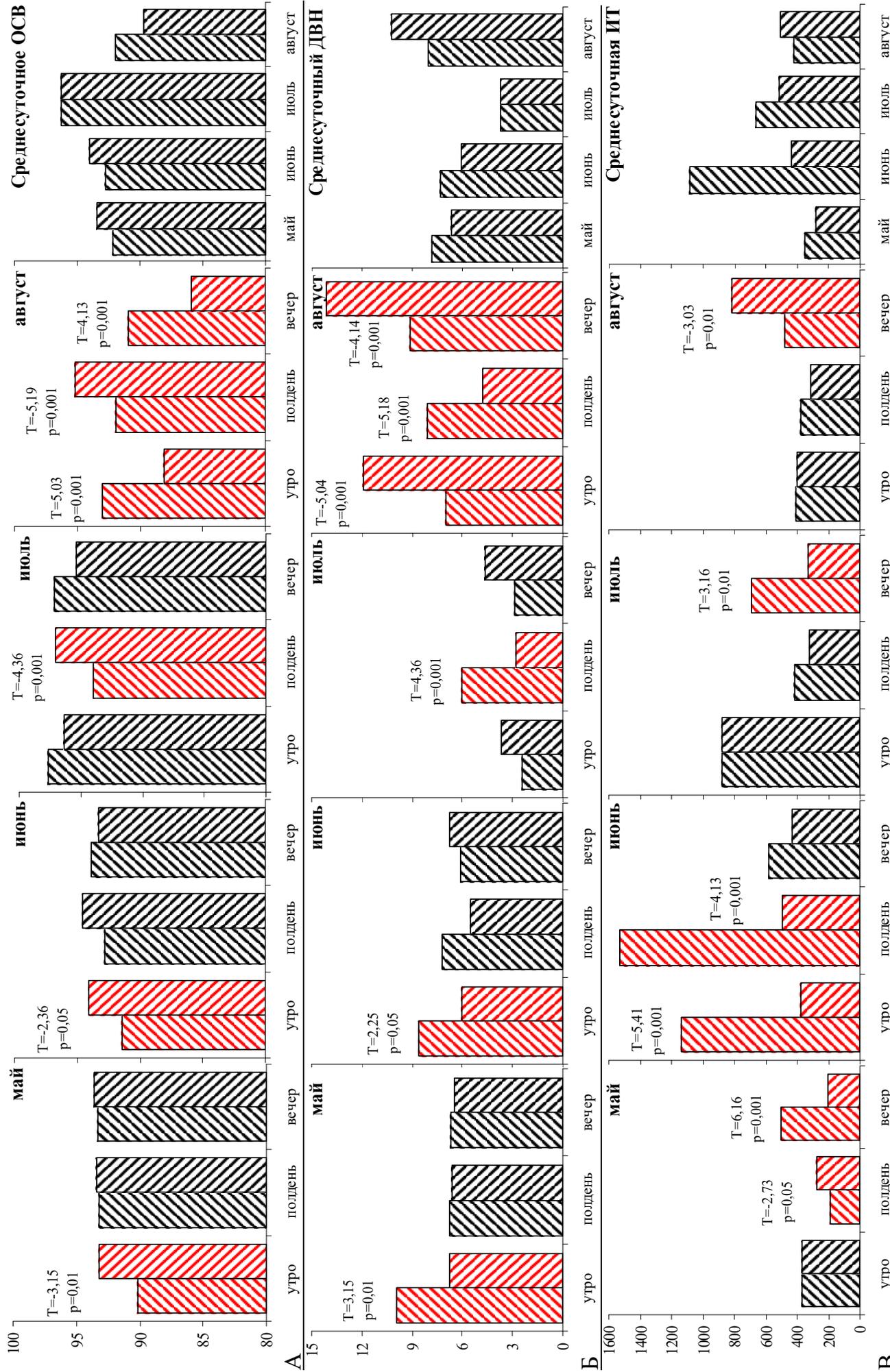
У лиственницы нет четких тенденций, с некоторой условностью можно отметить увеличение ИТ и ДВН и снижение ОСВ. Нарушена суточная динамика ОСВ ДВН и ИТ. Нарушена вегетационная динамика ИТ, но наблюдается естественный ход вегетационной динамики ОСВ и ДВН. В течение дня адаптивные реакции ОСВ и ДВН меняются на противоположные при стабильности реакций ИТ. В динамике вегетации адаптивные реакции ОСВ ДВН и ИТ меняются на противоположные (рис. 7).

У ели нет четких тенденций, с некоторой условностью можно отметить увеличение ОСВ и снижение ДВН и ИТ. Нарушена суточная и вегетационная динамика ОСВ ДВН и ИТ. В течение дня адаптивные реакции ОСВ ДВН и ИТ меняются на противоположные, а в течение вегетации только адаптивные реакции ИТ меняются на противоположные при стабильности реакций ОСВ и ДВН (рис. 8).

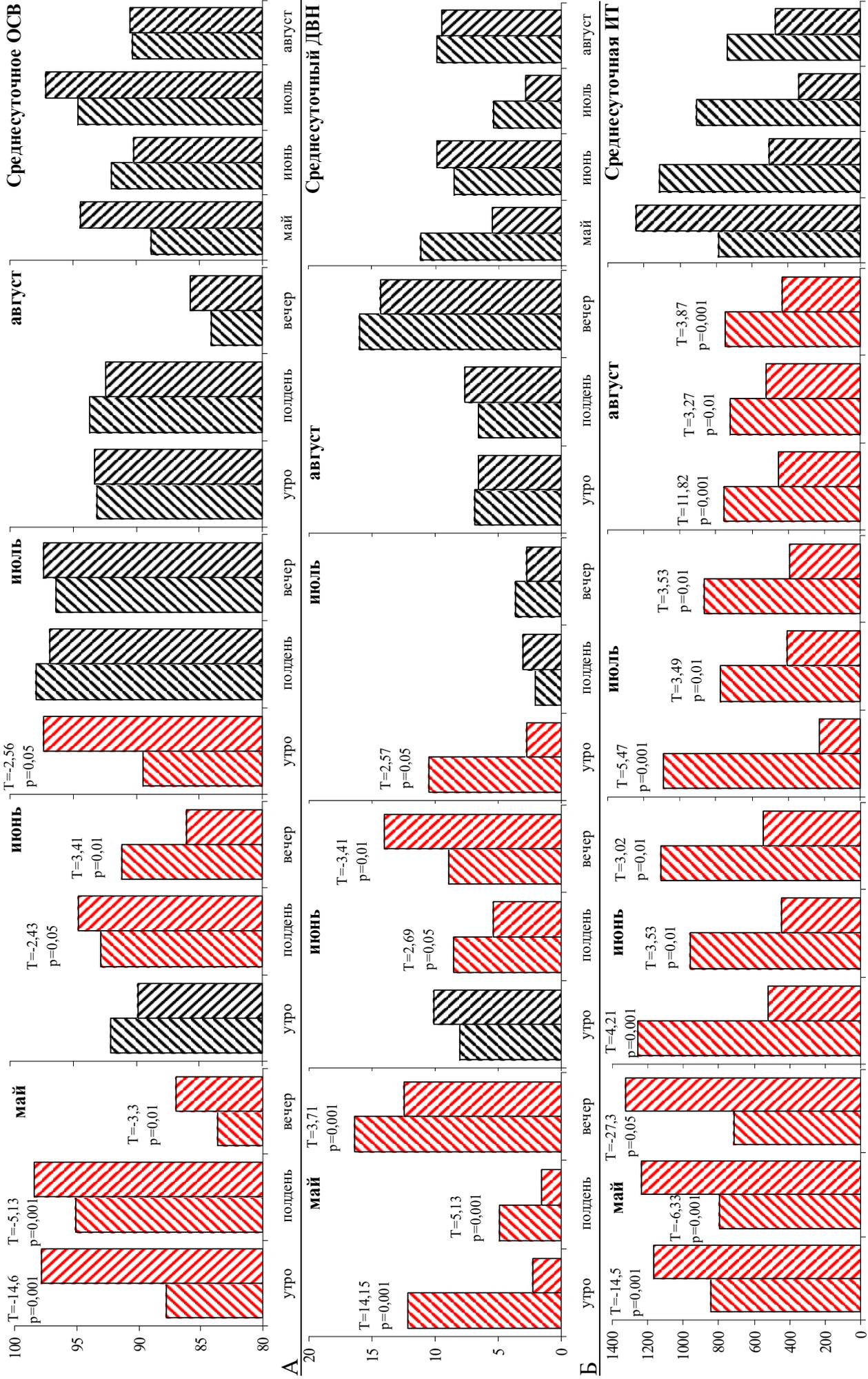
У дуба наблюдается подавление утреннего ОСВ с повышением ДВН и стимуляция полуденного и вечернего ОСВ с подавлением ДВН. При этом наблюдается значительное увеличение ИТ. В целом, с некоторой условностью можно отметить увеличение ИТ и ОСВ и снижение ДВН. Нарушена суточная и вегетационная динамика ОСВ ДВН и ИТ. В течение дня и в динамике вегетации адаптивные реакции ОСВ ДВН и ИТ меняются на противоположные (рис. 9).

У липы прослеживается четкая тенденция – значительное увеличение ОСВ и значительное снижение ДВН и ИТ. Нарушена суточная и вегетационная динамика ОСВ ДВН и ИТ. Только в августе адаптивные реакции ОСВ и ИТ в течение дня меняются на противоположные при стабильности реакций ДВН. В динамике вегетации у ОСВ ДВН и ИТ наблюдается стабильность адаптивных реакций (рис. 10).

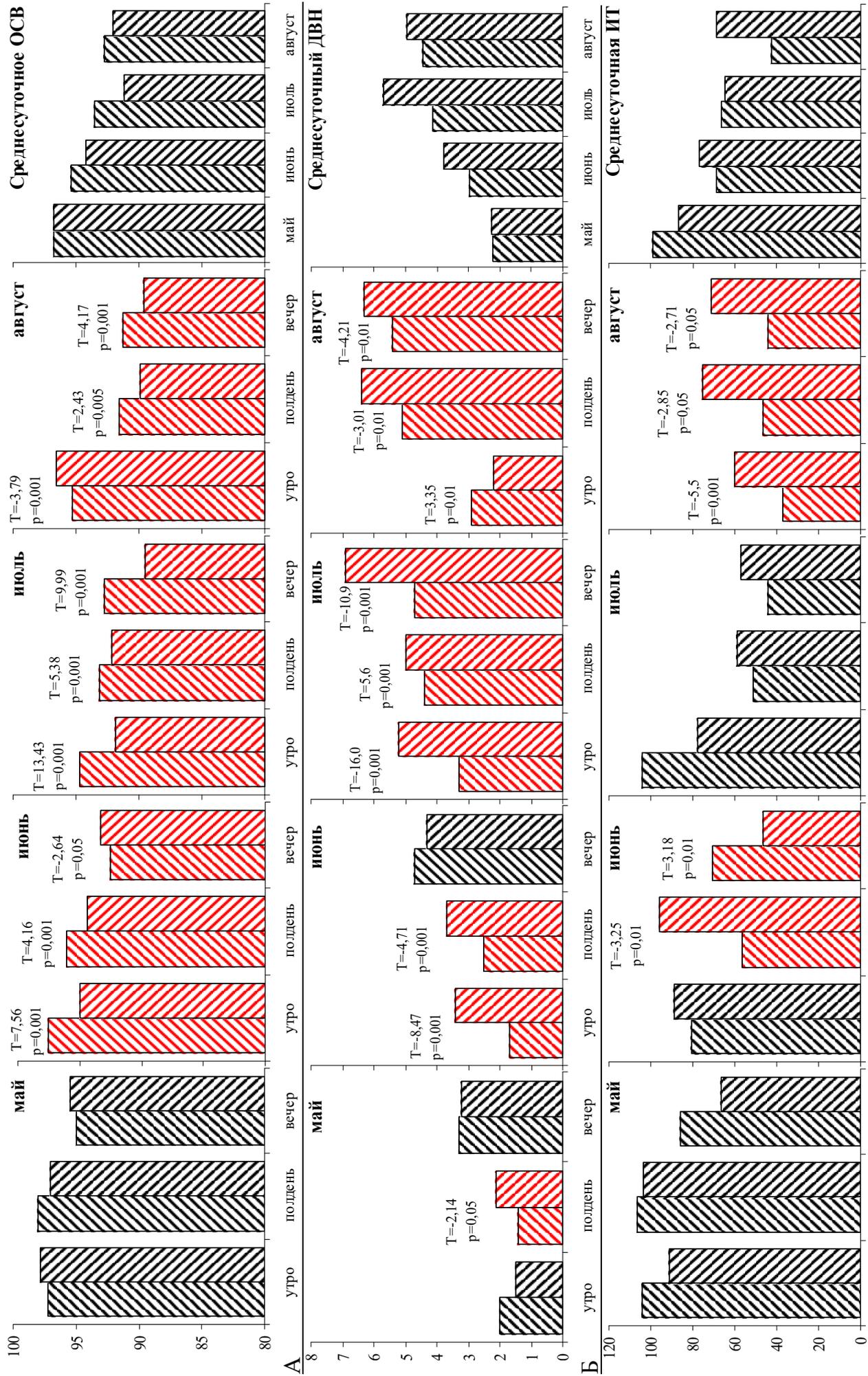
У березы прослеживается четкая тенденция – значительное увеличение ОСВ и снижение ДВН, однако отсутствуют четкие тенденции у ИТ, с некоторой условностью можно отметить ее увеличение. Нарушена суточная и вегетационная динамика ОСВ ДВН и ИТ. В мае адаптивные реакции ОСВ и ДВН в течение дня меняются на противоположные, у ИТ – в июне-июле. В течение вегетации только адаптивные реакции ОСВ и ИТ меняются на противоположные при стабильности реакций ДВН (рис. 11).



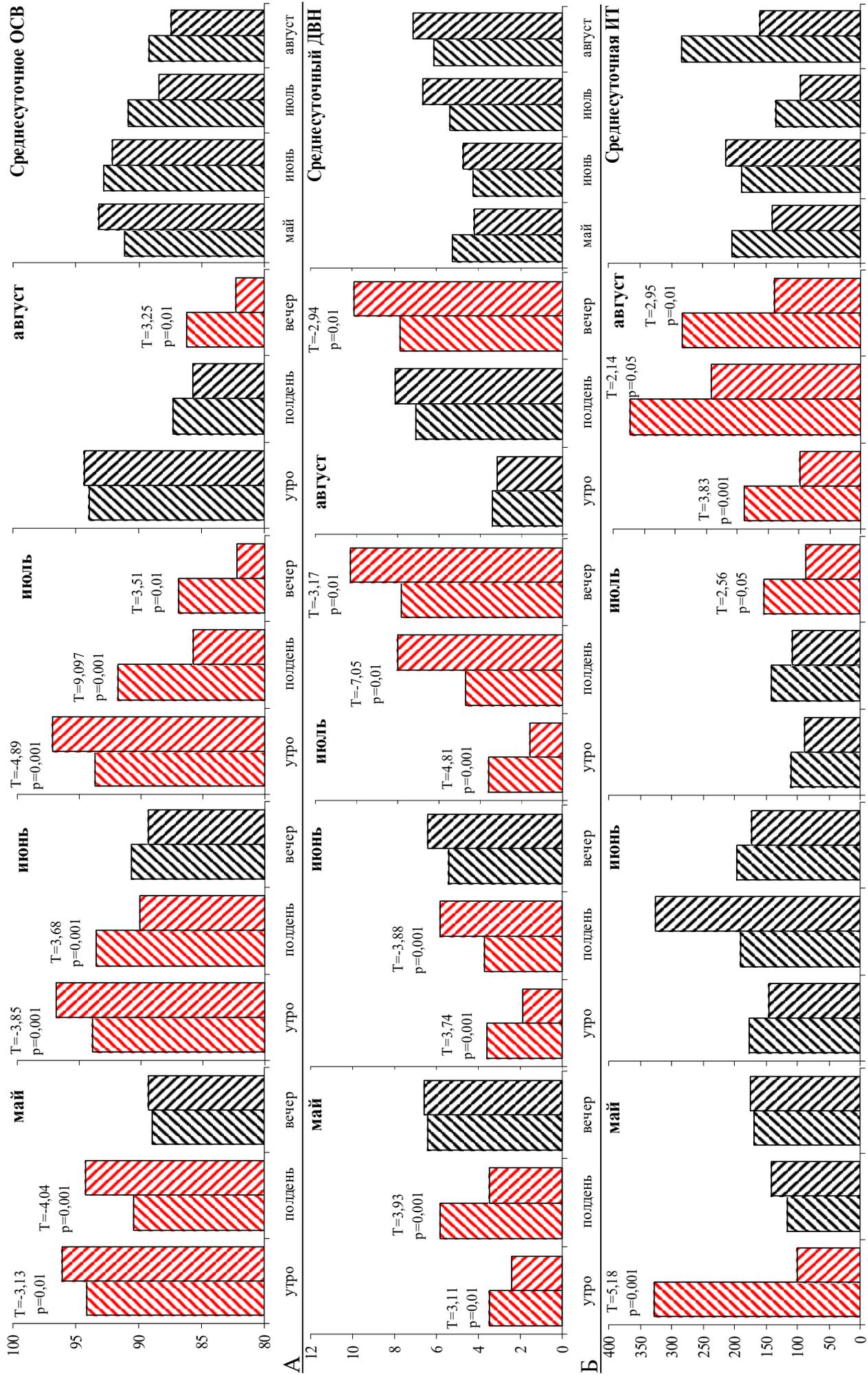
**В** Рисунок 6. Изменение (А) относительного содержания воды (%), (Б) дефицита водного насыщения (%), (В) интенсивности транспирации (мг/г·час), хвои сосны в течение суток и вегетации в условиях УПЦ. Условные обозначения смотри на рис. 3.



**В** Рисунок 7. Изменение (А) относительного содержания воды (%), (Б) дефицита водного насыщения (%), (В) интенсивности транспирации (мг/г·час), хвои лиственницы в течение суток и вегетации в условиях УПЦ. Условные обозначения смогри на рис. 3.



**В** Рисунок 8. Изменение (А) относительного содержания воды (%), (Б) дефицита водного насыщения (%), (В) интенсивности транспирации (мг/г·час), хвои ели в течение суток и вегетации в условиях УПЦ. Условные обозначения смотри на рис. 3.



**В** Рисунок 9. Изменение (А) относительного содержания воды (%), (Б) дефицита водного насыщения (%), (В) интенсивности транспирации (мг/г·час), листьев дуба в течение суток и вегетации в условиях УПЦ. Условные обозначения смотри на рис. 3.

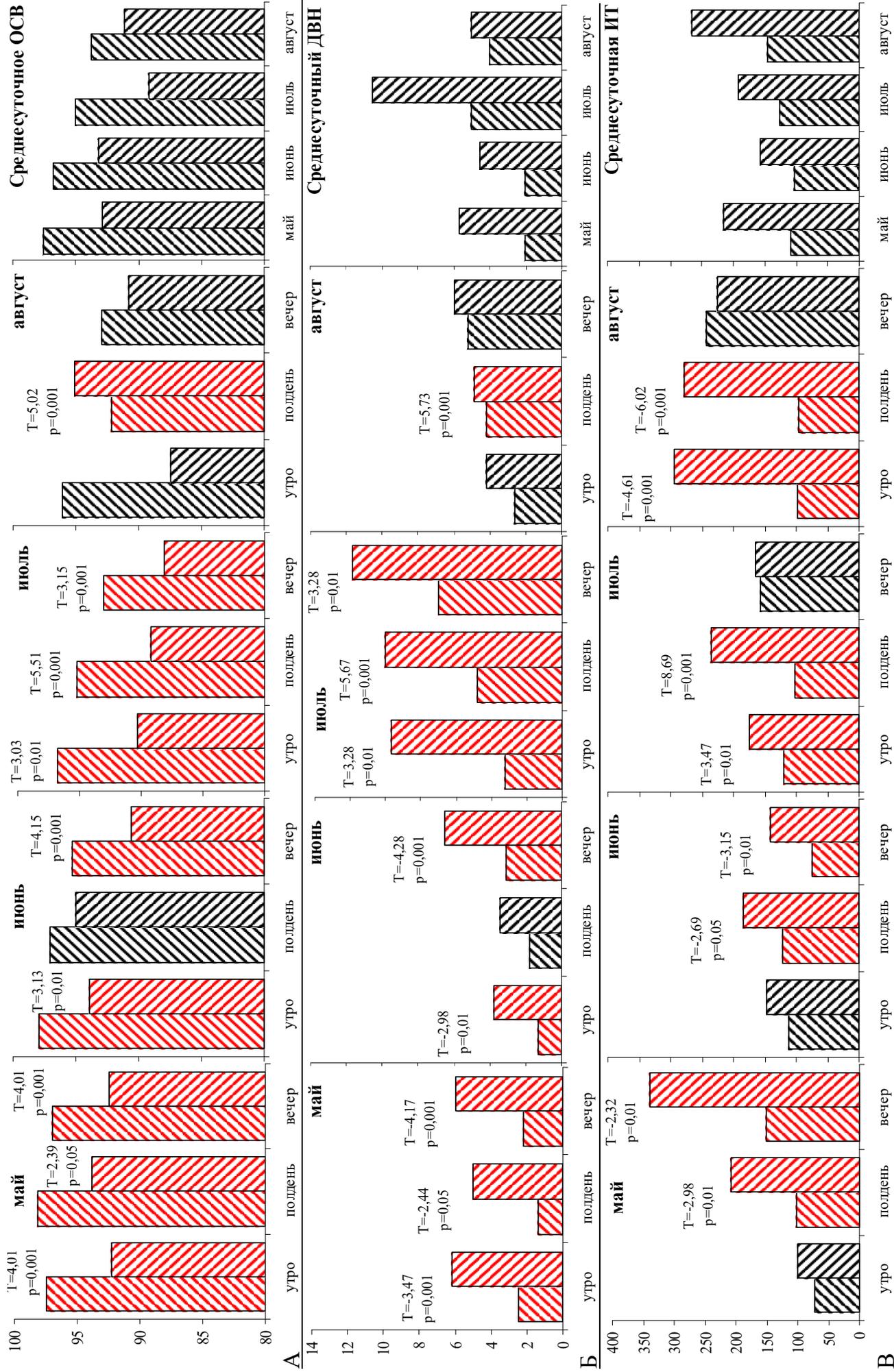
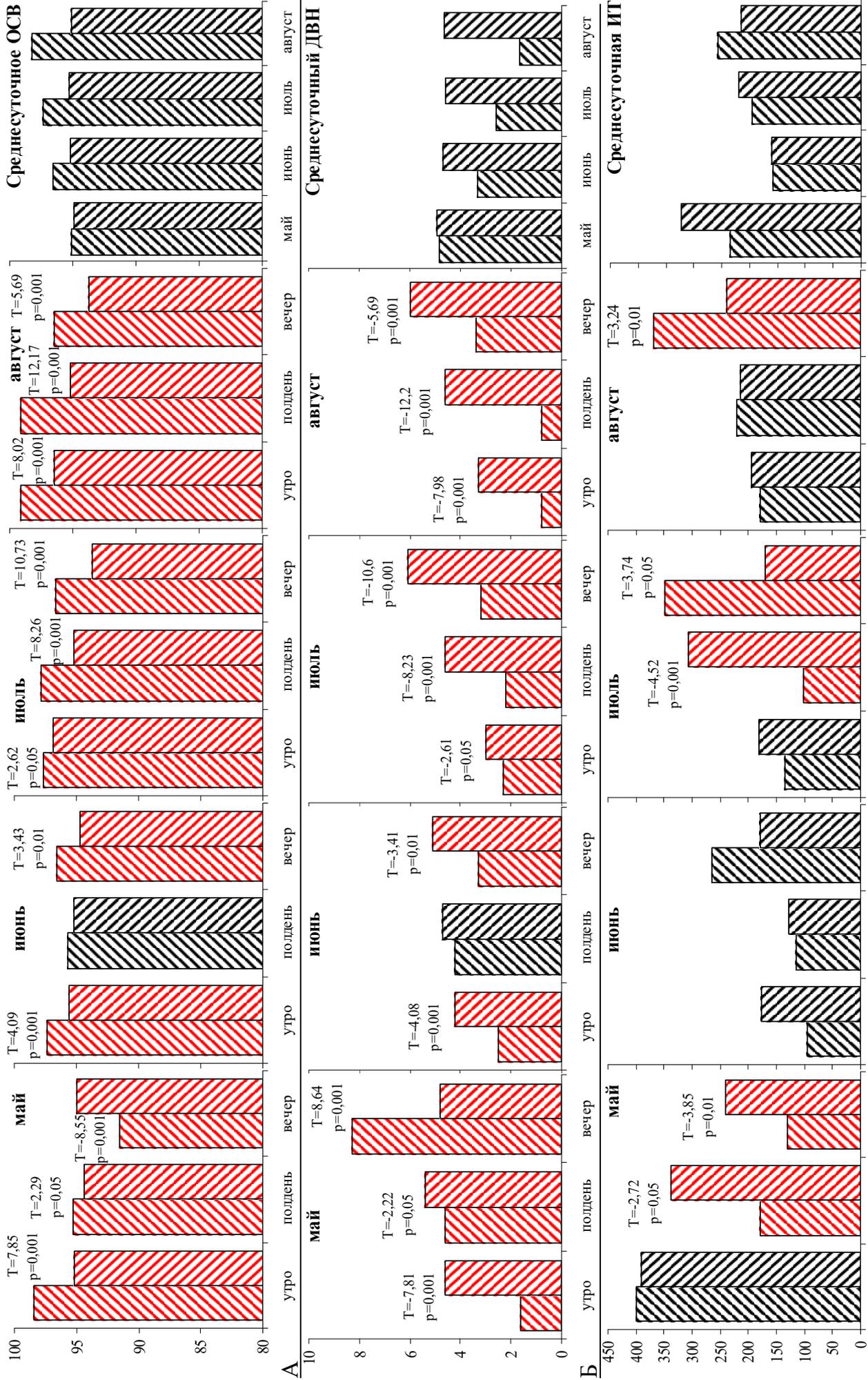


Рисунок 10. Изменение (А) относительного содержания воды (%), (Б) дефицита водного насыщения (%), (В) интенсивности транспирации (мг/г·час), листьев липы в течение суток и вегетации в условиях УЩ. Условные обозначения смогри на рис. 3.



**В** Рисунок 11. Изменение (А) относительного содержания воды (%), (Б) дефицита водного насыщения (%), (В) интенсивности транспирации (мг/г·час), листьев березы в течение суток и вегетации в условиях УПЦ. Условные обозначения смогри на рис. 3.

Анализ адаптивных реакций (табл. 3) показывает, что в условиях загрязнения относительно контроля показатели водного обмена в течение дня и в течение вегетации постоянно меняются, за редким исключением (ИТ у лиственницы, ИТ и ОСВ у липы) большинство реакций являются однонаправленными. Выделены наиболее общие адаптивные реакции:

ОСВ: стрессовая – сосна, дуб, липа; умеренно-стрессовая – ель, береза; умеренно-толерантная – лиственница;

ДВН: стрессовая – сосна, дуб, липа, береза; умеренно-стрессовая – ель; умеренно-толерантная – лиственница;

ИТ: стрессовая – ель, липа; толерантная – сосна, лиственница, дуб, береза;

В целом по водному обмену: стрессовая (подавление ИТ → повышение ОСВ → снижение ДВН) – ель, липа; стрессовая (разнонаправленные реакции: усиление ИТ – повышение ОСВ – снижение ДВН) – сосна, дуб, береза; толерантная (усиление ИТ → снижение ОСВ → повышение ДВН) – лиственница.

Таблица 3. Адаптивные реакции водного обмена хвои и листьев лесобразователей УПЦ на углеводородное загрязнение

	Май			Июнь			Июль			Август			Май			Июнь			Июль			Август		
	Утро	Полдень	Вечер	Утро	Полдень	Вечер	Утро	Полдень	Вечер	Утро	Полдень	Вечер	Утро	Полдень	Вечер	Утро	Полдень	Вечер	Утро	Полдень	Вечер	Утро	Полдень	Вечер
	Сосна												Дуб											
ОСВ	↓↓	(-)	(-)	↓↓	↓	↑	↑	↓↓	↑	↑↑	↓↓	↑↑	↓	↓↓	(-)	↓↓	↑↑	↑	↓↓	↑↑	↑↑	(-)	↑	↑↑
ДВН	↑↑	(-)	(-)	↑↑	↑	↓	↓	↑↑	↓	↓↓	↑↑	↓↓	↑	↑↑	(-)	↑↑	↓↓	↓	↑↑	↓↓	↓↓	(-)	↓	↓↓
ИТ	(-)	↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑	(-)	↑	↑↑	(-)	↑	↓↓	↑↑	↓	(-)	↑	↓↓	↑	↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
	Лиственница												Липа											
ОСВ	↓↓	↓↓	↓↓	↑	↓	↑↑	↓↓	↑	↓	(-)	↑	↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
ДВН	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↑	↓↓	↑↑	↓	↑	(-)	↓	↑	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓
ИТ	↓↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	(-)	↓↓	↓↓
	Ель												Береза											
ОСВ	(-)	(-)	(-)	↑	↑	(-)	↑↑	(-)	↑↑	↓	↑	↑	↑↑	(-)	↓↓	↑	(-)	↑	(-)	↑	↑	↑	↑↑	↑
ДВН	(-)	(-)	(-)	↓↓	↓	(-)	↓↓	(-)	↓↓	↑	↓	↓	↓↓	(-)	↑↑	↓	(-)	↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓
ИТ	↑	(-)	↑↑	↓	↓↓	↑↑	↑↑	↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓	(-)	↓↓	↓↓	↓	(-)	↑	↓	↓↓	↑↑	(-)	(-)	↑↑

Для каждого вида показана относительная независимость адаптивных реакций параметров водного обмена, проявляющаяся в динамике всего вегетационного периода.

### 3.3. Пигментный комплекс хвои/листьев

Нефтехимическое загрязнение вызывает ряд видоспецифических адаптивных реакций пигментного комплекса хвои и листьев относительно контроля:

В хвое сосны в условиях загрязнения выявлен существенный и достоверный рост содержания хлорофиллов *a* и *b* до июля, в августе отмечается противоположная картина; в течение вегетации наблюдается существенное и достоверное снижение каротиноидов. В вегетационной динамике выявлено значительное уменьшение содержания хлорофиллов и каротиноидов до июля и рост в августе. Во второй половине вегетации адаптивные реакции хлорофиллов меняются на противоположные при стабильности реакций каротиноидов (рис. 12).

У лиственницы в отношении хлорофиллов *a* и *b* не обнаруживается четких тенденций, с некоторой условностью можно говорить об уменьшении их содержания в условиях загрязнения, при этом содержание каротиноидов уменьшается. В вегетационной динамике выявлено значительное уменьшение содержания хлорофиллов и каротиноидов до июля и рост в августе. В течение вегетации адаптивные реакции всех пигментов меняются на противоположные.

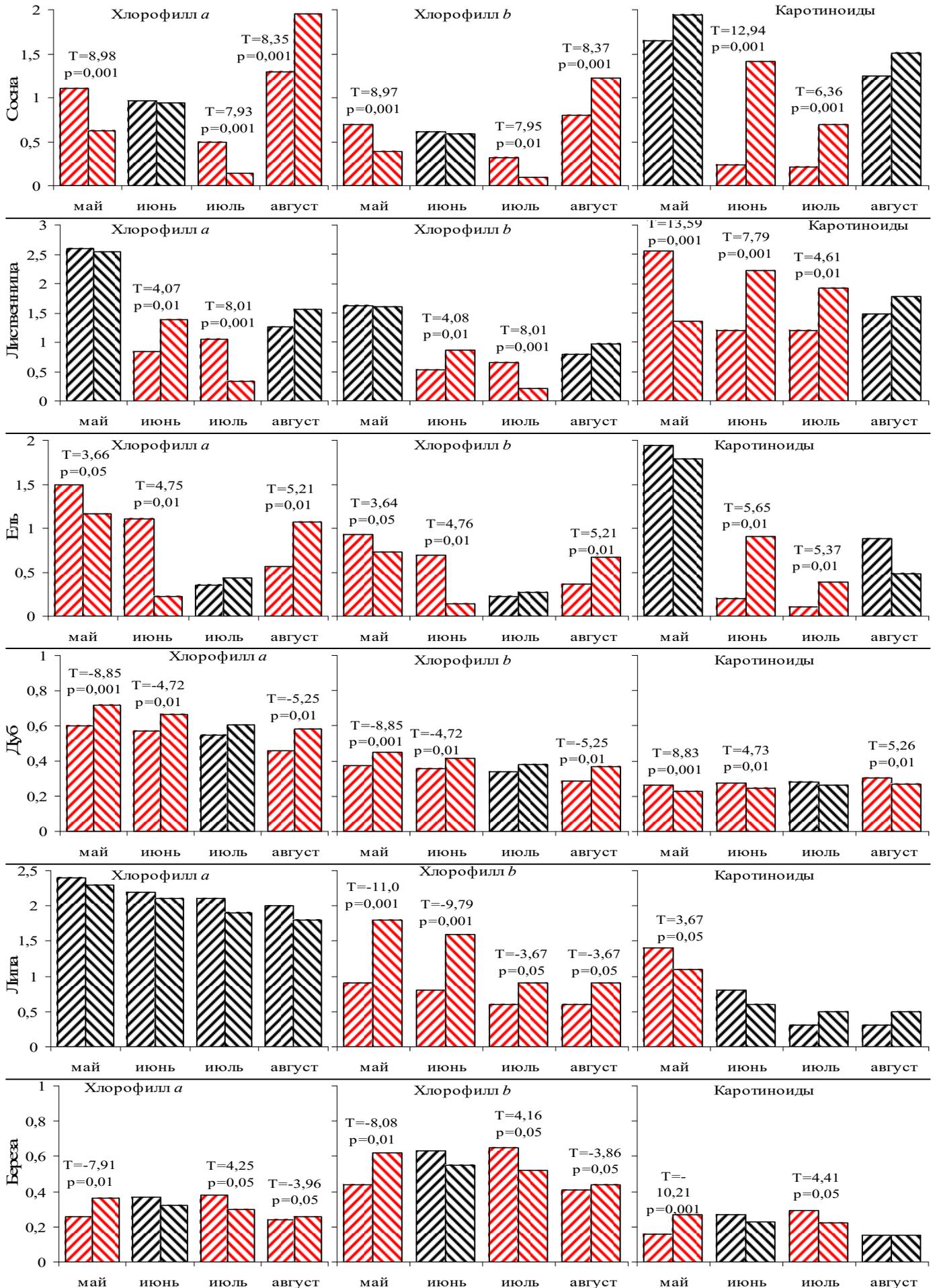


Рисунок 12. Содержание пигментов (в мг/г сырой массы) в хвое/листьях древесных видов УПЦ в динамике вегетации. Условные обозначения смотри на рис. 3.

В хвое ели в условиях загрязнения до июня выявлен существенный и достоверный рост содержания хлорофиллов  $a$  и  $b$ , с июля – противоположная картина; изменения в содержании каротиноидов не обнаруживают четких тенденций, с некоторой условностью можно говорить об их увеличении. В вегетационной динамике выявлено значительное уменьшение содержания хлорофиллов и каротиноидов до июля и рост в августе. В течение вегетации адаптивные реакции всех пигментов меняются на противоположные.

В листьях дуба в условиях загрязнения выявлено несущественное но достоверное уменьшение содержания хлорофиллов  $a$  и  $b$  и несущественное увеличение каротиноидов. В вегетационной динамике выявлено значительное уменьшение содержания хлорофиллов и существенное возрастание концентрации каротиноидов. В течение вегетации отсутствуют изменения адаптивных реакции у всех пигментов.

У липы в условиях загрязнения выявлен существенный но недостоверный рост содержания хлорофилла  $a$  и существенное достоверное снижение хлорофилла  $b$ ; в первой половине вегетации наблюдается значительное увеличение каротиноидов, во второй половине – значительное уменьшение. В вегетационной динамике выявлено значительное уменьшение содержания хлорофиллов и каротиноидов. В середине вегетации адаптивные реакции каротиноидов меняются на противоположные при стабильности реакций хлорофиллов  $a$  и  $b$ .

Для пигментного комплекса листьев березы в условиях загрязнения характерно несущественное но достоверное снижение концентрации хлорофиллов  $a$  и  $b$  и каротиноидов в начале вегетационного периода, увеличение в середине, и уменьшение в конце. В вегетационной динамике выявлено значительное уменьшение содержания хлорофиллов и каротиноидов. В течение вегетации адаптивные реакции всех пигментов меняются на противоположные.

У липы в условиях загрязнения резко возрастает доля хлорофилла  $a$  в соотношении «Хл  $a$  / Хл  $b$ » (табл. 4), остальные виды в промзоне и в контроле характеризуются стабильностью пигментного состава на протяжении всей вегетации (у березы в отличие от других видов доля хлорофилла  $b$  превышает долю хлорофилла  $a$ ). Соотношение «(Хл  $a$  + Хл  $b$ ) / Каротиноиды» более подвержено влиянию стрессовых факторов: у хвойных видов в условиях загрязнения относительно контроля увеличивается доля хлорофиллов на фоне уменьшения доли каротиноидов, а у лиственных видов, напротив, увеличивается доля каротиноидов на фоне уменьшения долей хлорофиллов.

Таблица 4. Соотношение пигментов хвои и листьев лесобразователей УПЦ

Соотношение пигментов	Местопо- ложение	Май	Июнь	Июль	Август	Май	Июнь	Июль	Август	Май	Июнь	Июль	Август
		Сосна				Лиственница				Ель			
Хл $a$ / Хл $b$	Промзона	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
	Контроль	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
(Хл $a$ + Хл $b$ )	Промзона	1,1	6,9	3,9	1,7	1,6	1,2	1,4	1,4	1,2	9,0	5,2	1,1
Кар	Контроль	0,5	1,1	0,3	2,1	3,1	1,0	0,3	1,4	1,1	0,4	1,8	3,6
		Дуб				Липа				Береза			
Хл $a$ / Хл $b$	Промзона	1,6	1,6	1,6	1,6	2,7	2,8	3,5	3,3	0,6	0,6	0,6	0,6
	Контроль	1,6	1,6	1,6	1,6	1,3	1,3	2,1	2	0,6	0,6	0,6	0,6
(Хл $a$ + Хл $b$ )	Промзона	3,7	3,4	3,2	2,4	2,4	3,8	9,0	8,7	4,4	3,7	3,6	4,3
Кар	Контроль	5,1	4,5	3,8	3,5	3,7	6,2	5,6	5,4	3,6	3,8	3,7	4,7

В пределах каждого вида адаптивные реакции многообразны, и в некоторых случаях нет возможности выявить единую четкую тенденцию в течение вегетации (табл. 5). Так, у сосны, лиственницы, ели и березы хлорофиллы и каротиноиды не проявляют в вегетационной динамике единой адаптивной реакции. С некоторой долей условности у дуба и липы можно выделить следующие адаптивные реакции:

– Хл  $a$ : умеренно-стрессовые – дуб; толерантные – липа;

– Хл *b*: умеренно-стрессовые – дуб, липа;

– Каротиноиды: умеренно-стрессовые – липа; нейтральные – дуб.

Однако, соотношения пигментов довольно стабильны, особенно «Хл *a* / Хл *b*», и позволяют определить общие тенденции в течение вегетации:

– «Хл *a* / Хл *b*»: нейтральные – сосна, лиственница, ель, дуб, береза; умеренно-толерантные – липа;

– «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды»: стрессовые – сосна, ель, липа; умеренно-стрессовые – лиственница; нейтральные – береза, умеренно-толерантные – дуб.

Таблица 5. Адаптивные реакции пигментного комплекса хвои и листьев древесных видов УПЦ на углеводородное загрязнение

Пигменты и соотношения	Сосна				Лиственница				Ель			
	май	июнь	июль	август	май	июнь	июль	август	май	июнь	июль	август
Хл <i>a</i>	↑↑	(-)	↑	↓↓	(-)	↓↓	↑↑	↓	↑	↑↑	(-)	↓↓
Хл <i>b</i>	↑	(-)	↑	↓↓	(-)	↓	↑↑	↓	↑	↑↑	(-)	↓
Каротиноиды	↓	↓↓	↓	↓	↑↑	↓↓	↓↓	↓	↑	↓↓	↓	↑
Хл <i>a</i> / Хл <i>b</i>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
(Хл <sub><i>a</i></sub> +Хл <sub><i>b</i></sub> )/Кар.	↑	↑↑	↑↑	↓	↓↓	↑	↑	(-)	(-)	↑↑	↑↑	↓↓
	Дуб				Липа				Береза			
Хл <i>a</i>	↓	↓	(-)	↓	↑	↑	↑↑	↑↑	↓	(-)	↑	(-)
Хл <i>b</i>	↓	↓	(-)	↓	↓↓	↓↓	↓	↓	↓	↑	↑	(-)
Каротиноиды	(-)	(-)	(-)	(-)	↑↑	↑	↓	↓	↓	(-)	(-)	(-)
Хл <i>a</i> / Хл <i>b</i>	(-)	(-)	(-)	(-)	↑	↑	↑	↑	(-)	(-)	(-)	(-)
(Хл <sub><i>a</i></sub> +Хл <sub><i>b</i></sub> )/Кар.	↓↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑↑	↑↑	↑	(-)	(-)	↓

Таким образом, для каждого вида показана относительная независимость адаптивных реакций параметров пигментного комплекса, проявляющаяся в течение всей вегетации. В целом сосна и липа отнесены к видам со стрессовой адаптивной реакцией пигментного комплекса, лиственница – умеренно-стрессовой, дуб и береза – нейтральной, ель – умеренно-толерантной. Количественное содержание пигментов у лиственницы и липы существенно превышает их содержание у сосны, ели, дуба и березы, однако их пигментный комплекс более чувствителен к промышленному загрязнению.

#### 3.4. Аккумуляция тяжелых металлов в хвое/листьях и в почве

Интерес и актуальность изучения аккумуляции тяжелых металлов (ТМ) в условиях нефтехимического загрязнения УПЦ определяется длительным производством и использованием в районе исследования этилированного бензина, мазута, дизельного топлива, лакокрасочных материалов, пластика, а также функционированием трех ТЭЦ.

Содержание ТМ в почвах (рис. 13) находится в концентрациях, не достигающих фитотоксичности (ПДК валового содержания для почв: Fe более 1000 мг/кг; Cu более 55 мг/кг; Cd более 1,5 мг/кг; Zn более 100 мг/кг; Pb более 32 мг/кг). Отмечено значительное уменьшение средней концентрации Fe (в 2 раза), Cu (в 2,7 раз) и Zn (в 2,5 раза) в загрязненных условиях относительно контроля, однако для Cd и Pb выявлено увеличение их концентрации в 2 раза.

У всех видов накопление Fe в хвое и листьях меньше области избыточных концентраций (для растений более 750 мг/кг), однако у ели, липы и дуба его содержание находится на пороге: 746, 734, 682 мг/кг соответственно. В условиях загрязнения только у ели выявлено значительное снижение содержания Fe относительно контроля, у лиственницы, дуба, липы отмечено его значительное увеличение, у сосны, березы – незначительное. Транслокация Fe из почвы в хвою/листья показывает, что все виды в промзоне и контроле являются «исключателями» этого металла.

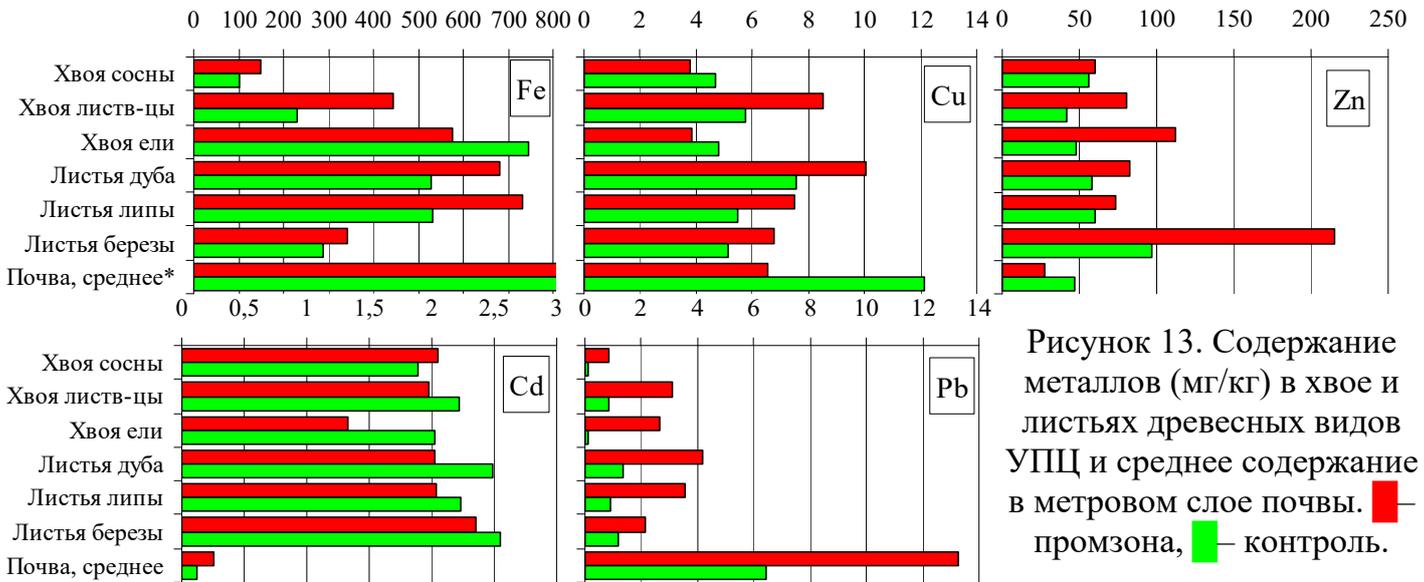


Рисунок 13. Содержание металлов (мг/кг) в хвое и листьях древесных видов УПЦ и среднее содержание в метровом слое почвы. ■ — промзона, ■ — контроль.

\*Среднее содержание Fe в почве в промзоне – 12842 мг/кг, в контроле – 26516 мг/кг.

В хвое и листьях всех видов накопление Cu находится далеко от области избыточных концентраций (для растений более 30 мг/кг). В промзоне относительно контроля наблюдается незначительное уменьшение содержания Cu у сосны и ели и значительное увеличение содержания у остальных видов. Транслокация Cu из почвы в хвою/листья показывает: в промзоне сосна и ель отнесены к «исключателям», липа и береза – к «индикаторам», лиственница и дуб – к «аккумуляторам»; в контроле все виды отнесены к «исключателям» этого металла.

Все виды накапливают в хвое и листьях Cd в значительных концентрациях, иногда в 2 раза превышающих область избыточных (для растений более 1,0 мг/кг). За исключением сосны у всех видов в промзоне отмечено снижение содержания Cd относительно контроля, значительное у ели и незначительное у остальных пород. По отношению к транслокации Cd из почвы в хвою/листья все древесные виды в промзоне и в контроле являются «аккумуляторами» этого металла.

За исключением березы у всех видов содержание Zn находится близко к границе дефицита – от 56,0 до 112,5 мг/кг (норма содержания для растений до 300 мг/кг). У всех видов отмечается увеличение содержания Zn в промзоне относительно контроля, значительное у березы и ели, незначительное у остальных видов. По отношению к транслокации Zn из почвы в хвою/листья в промзоне все виды относятся к «аккумуляторам», в контроле только береза относится к «аккумуляторам», остальные виды – к «индикаторам» этого металла.

В хвое и листьях всех видов содержание Pb не достигает избыточных концентраций (для растений более 10 мг/кг). В промзоне прослеживается тенденция значительного увеличения содержания Pb у всех видов относительно контроля. По отношению к транслокации Pb из почвы в хвою/листья все виды в промзоне и в контроле являются «исключателями» этого металла.

Несмотря на значительное снижение содержания Cu и Zn в почве в промзоне относительно контроля, их концентрация в хвое/листьях возрастает, что вероятно связано с их привлечением как элементов, необходимых для повышения устойчивости против болезней и неблагоприятных условий (табл. 6). Несмотря на увеличение содержания Fe и Cd в почве, их содержание в хвое/листьях снижается у всех видов, что говорит о хорошей барьерной функции корней к этим металлам. Значительное увеличение содержания Pb в почве сопровождается значительным его повышением в хвое/листьях у всех видов, что говорит о слабой барьерной функции корней к металлу. Выявлены адаптивные реакции по отношению к изменению содержания ТМ в хвое и листьях в условиях загрязнения относительно контроля:

– Fe: стрессовая – ель; умеренно-толерантная – сосна, береза; толерантная – лиственница, дуб, липа;

- Cu: умеренно-стрессовая – сосна, ель; толерантная – лиственница, дуб, липа, береза;
- Zn: умеренно-толерантная – сосна, лиственница, дуб, липа; толерантная – ель, береза;
- Cd: стрессовая – ель, дуб; умеренно-стрессовая – лиственница, липа, береза; умеренно-толерантная – сосна;
- Pb: умеренно-толерантная – сосна, береза; толерантная – лиственница, ель, дуб, липа.

Таблица 6. Адаптивные реакции лесообразователей УПЦ по отношению к ТМ

Древесные виды	Изменение содержания в условиях загрязнения относительно контроля					Транслокация из почвы в хвою и листья в промзоне				
	Cu	Fe	Cd	Zn	Pb	Cu	Fe	Cd	Zn	Pb
Сосна	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓↓	↑↑	↑	↓↓
Лиственница	↑↑	↑↑	↓	↑	↑↑	↑	↓↓	↑↑	↑	↓↓
Ель	↓	↓↓	↓↓	↑↑	↑↑	↓	↓↓	↑↑	↑	↓↓
Дуб	↑↑	↑↑	↓↓	↑	↑↑	↑↑	↓↓	↑↑	↑	↓↓
Липа	↑↑	↑↑	↓	↑	↑↑	(-)	↓↓	↑↑	↑	↓↓
Береза	↑↑	↑	↓	↑↑	↑	(-)	↓↓	↑↑	↑↑	↓↓
Почва среднее	↓↓	↓↓	↑	↓↓	↑↑					

Выявлены адаптивные реакции по отношению к транслокации ТМ из почвы в хвою и листья в условиях загрязнения:

- Fe и Pb: стрессовая у всех пород;
- Cu: умеренно-стрессовая – сосна, ель; нейтральная – липа, береза; умеренно-толерантная – лиственница; толерантная – дуб;
- Zn: умеренно-толерантная – сосна, лиственница, ель, дуб, липа; толерантная – береза.
- Cd: толерантная у всех пород.

Для каждого вида показана относительная независимость адаптивных реакций по отношению к содержанию ТМ в почвах и по отношению к транслокации ТМ из почвы в хвою и листья. В целом, ель характеризуется стрессовой адаптивной реакцией к накоплению ТМ, сосна – умеренно-толерантной, лиственница, дуб, липа, береза – толерантной.

### 3.5. Дендрохронологические исследования

На фоне нефтехимического загрязнения приросты всех видов мало подвержены воздействию климатических факторов (табл. 7). Корреляции с суммой летних температур «слабые» и «очень слабые» (от 0,06 до 0,4), только у дуба в промзоне отмечена «средняя» теснота (-0,5); корреляции с суммой летних осадков «слабые» и «очень слабые» (от 0,02 до 0,35), только у ели в промзоне отмечена «средняя» теснота (0,49); тесноты корреляционных связей с числами Вольфа у всех видов «слабые» и «очень слабые» (от 0,01 до 0,34); коэффициент чувствительности у всех видов «низкий» и «очень низкий» (не превышает 0,24). Корреляции с плодоношением также «слабые» и «очень слабые» (от 0,12 до 0,44), только у ели в контроле отмечена «средняя» теснота (0,51).

Таблица 7. Корреляция приростов древесных видов УПЦ с суммой летних температур (r t), суммой летних осадков (r ОС), числами Вольфа (r W), плодоношением (r ПЛ), суммарными годовыми объемами выбросов (r З) и коэффициент чувствительности (K S)

Древ. виды	Местопол-е	r t	r ОС	r W	r ПЛ	r З	K S	Древ. виды	r t	r ОС	r W	r ПЛ	r З	K S
Сосна	промзона	-0,40	-0,02	-0,01	0,13	0,64	0,17	Дуб	-0,50	0,23	0,06	-0,12	0,46	0,13
	контроль	-0,06	-0,07	0,15	0,13		0,08		-0,13	0,28	0,03	-0,18		0,16
Лиственница	промзона	-0,35	-0,03	0,20	-0,18	0,78	0,09	Липа	-0,32	-0,03	0,16	–	0,54	0,1
	контроль	-0,09	-0,06	0,13	0,14		0,14		-0,30	-0,06	0,11	–		0,07
Ель	промзона	-0,09	0,49	0,16	0,44	0,01	0,24	Береза	-0,12	0,10	0,16	–	0,15	0,12
	контроль	-0,37	0,35	0,34	0,51		0,17		-0,22	0,07	-0,04	–		0,18

Напротив, промышленное загрязнение оказывает значительное влияние на радиальный прирост:

У сосны прирост в промзоне значительно выше, чем в контроле, что может быть связано с влиянием углеводородного загрязнения в качестве «внекорневой подкормки» (рис. 14А). О значительной чувствительности прироста к промышленному загрязнению свидетельствуют «сильная» корреляция (0,64) между ними (табл. 7), смещение в промзоне периода наибольшего накопления древесины (рис. 14Б) к ранним срокам (ускорение начала старения древостоев), усиление реакции прироста (рис. 14В) на внешние стрессовые факторы (особенно в « $v_g$ -g») и сокращение продолжительность онтогенетических периодов (особенно «g» – на 12 лет).

Прирост лиственницы в контроле до конца «v» периода значительно больше, чем в промзоне (рис. 14А), но далее ситуация меняется на противоположную («внекорневая подкормка» стимулирует прирост только у зрелых деревьев). В промзоне «сильная» корреляция (0,78) между приростом и выбросами (табл. 7), смещение периода наибольшего накопления древесины (рис. 14Б) к поздним срокам (отдаление начала старения древостоев), усиление реакции прироста (рис. 14В) на внешние стрессовые факторы (особенно в « $g_2$ »), увеличение продолжительности онтогенетических периодов (особенно «g» – на 8 лет) указывают на значительную чувствительность прироста к загрязнению.

До середины «v» периода прирост ели в контроле значительно больше, чем в промзоне (рис. 15А), но далее ситуация меняется на противоположную («внекорневая подкормка» стимулирует прирост только у зрелых деревьев). «Очень слабая» корреляция (0,01) между приростом и выбросами (табл. 7) указывают на его низкую чувствительность к загрязнению, при этом в промзоне наблюдается смещение периода наибольшего накопления древесины (рис. 15Б) к поздним срокам (отдаление начала старения древостоев), усиление реакции прироста (рис. 15В) на внешние стрессовые факторы (особенно в «v»), но продолжительность онтогенетических периодов не меняется.

Загрязнение незначительно подавляет прирост дуба относительно контроля, достоверные различия наблюдаются только в « $v_2$ » (рис. 15А). О чувствительности прироста к загрязнению свидетельствуют «сильная» корреляция (0,64) между приростом и выбросами (табл. 7), при этом в промзоне отсутствуют смещения в периодах накопления биомассы древесины (рис. 15Б), усиливается реакция прироста (рис. 15В) на внешние стрессовые факторы (особенно в « $v_3$ » и « $g_2$ ») и сокращается продолжительность онтогенетических периодов (« $v_1$ » на 6 лет, « $v_2$ » на 4 года). Следует отметить, что прирост подвержен значительным депрессиям в точках перехода между периодами онтогенеза.

Загрязнение незначительно подавляет прирост липы относительно контроля, достоверные различия наблюдаются только в «g» периоде (рис. 16А). «Средняя» (0,54) корреляция между приростом и выбросами (табл. 7) свидетельствуют о его значительной чувствительности к загрязнению, при этом в промзоне отсутствуют смещения в периодах накопления биомассы древесины (рис. 16Б), усиливается реакция прироста (рис. 16В) на внешние стрессовые факторы (особенно в « $v_2$ »), но продолжительность онтогенетических периодов не меняется.

У березы до конца « $v_3$ » периода прирост в промзоне значительно больше, чем в контроле (рис. 16А), начиная с « $g_1$ » различия в величине прироста практически исчезают и достоверность различий падает («внекорневая подкормка» стимулирует прирост только у молодых деревьев). «Очень слабая» корреляция (0,15) между приростом и выбросами (табл. 7) указывает на небольшую его чувствительность к загрязнению, при этом в промзоне отсутствуют смещения в периодах накопления биомассы древесины (рис. 16Б), усиливается реакция прироста (рис. 16В) на внешние стрессовые факторы (особенно в « $v_2$ » и « $v_3$ »), а продолжительность онтогенетических периодов увеличивается («v» на 7 лет, « $g_1$ » на 3 года). Граница перехода между периодами « $v_2$ » и « $v_3$ » не выражена.

Выявлены видоспецифические адаптивные реакции дендрохронологических характеристик древесных видов на нефтехимическое загрязнение (табл. 8):



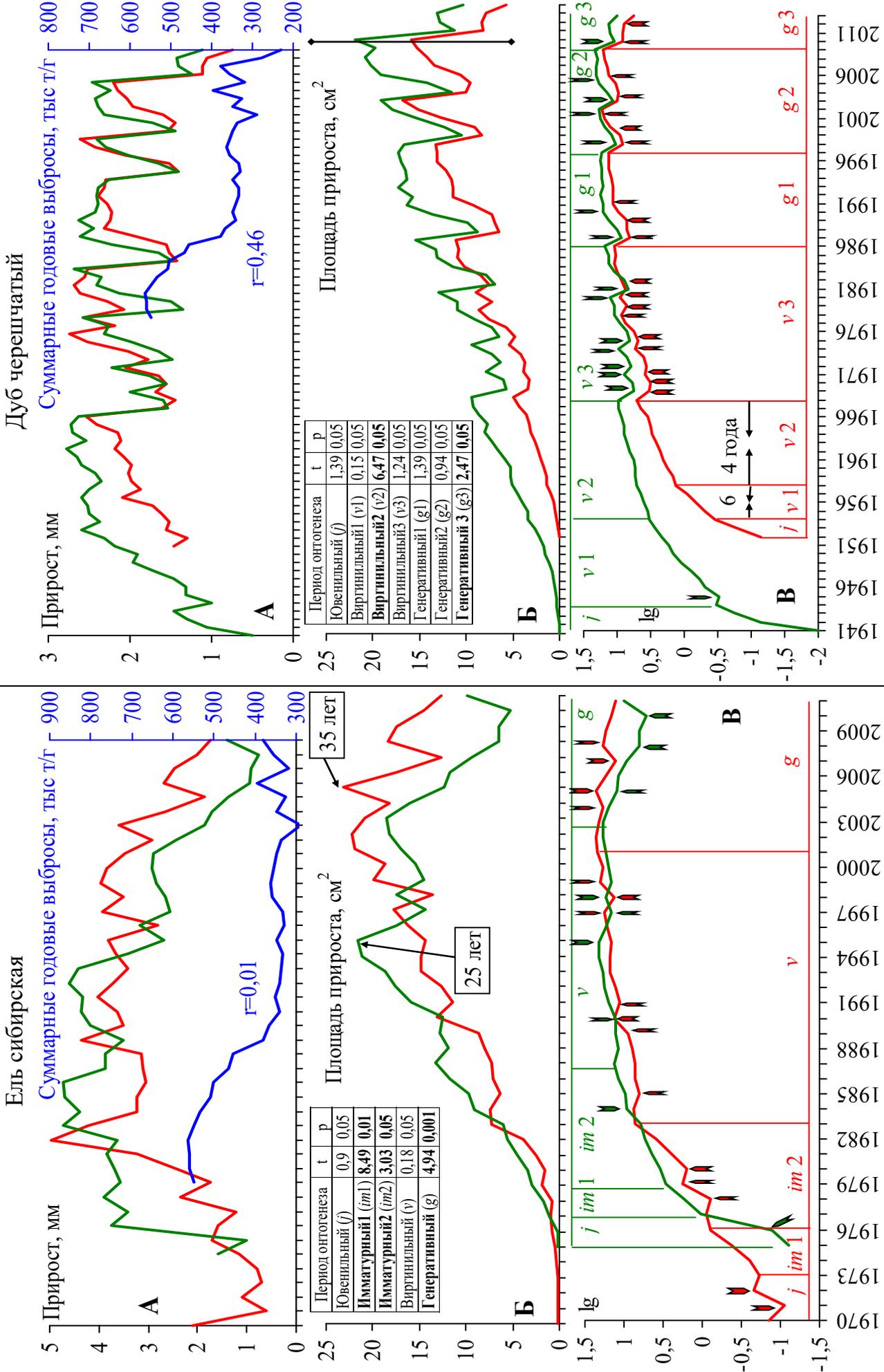
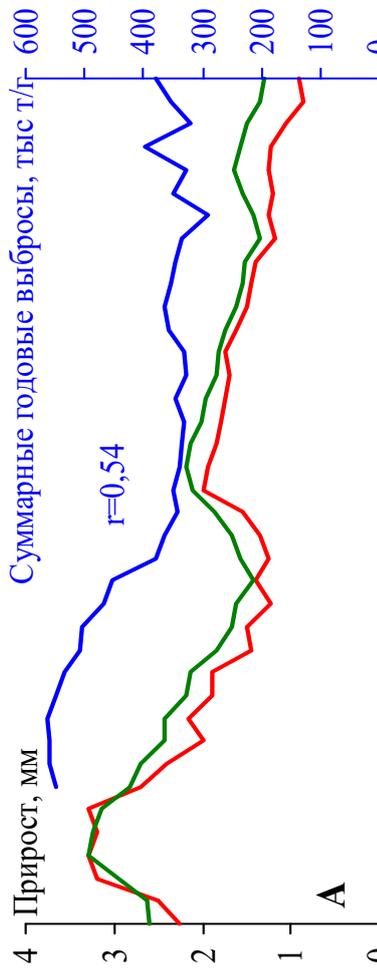


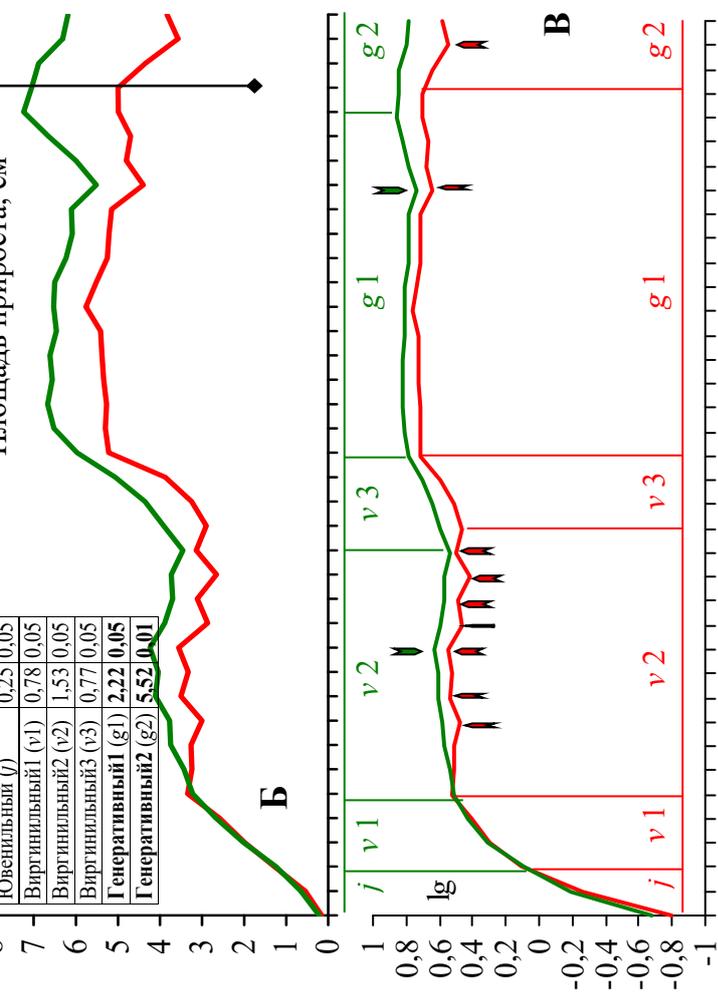
Рисунок 15. Влияние нефтехимического загрязнения на радиальный прирост (А), площадь прироста (Б) и онтогенетические периоды (В) лесобозообразователей в условиях УПЦ. Условные обозначения смотри на рис.14.

Липа мелколистная

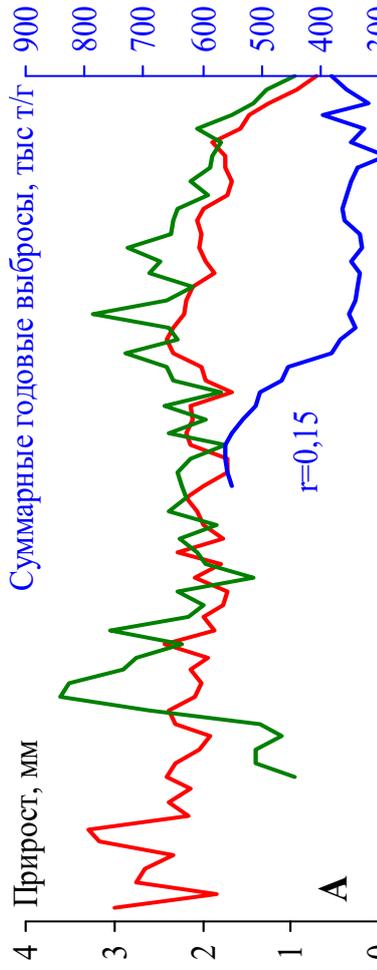


Период онтогенеза	t	p
Ювенильный (j)	0,25	0,05
Виргинильный1 (v1)	0,78	0,05
Виргинильный2 (v2)	1,53	0,05
Виргинильный3 (v3)	0,77	0,05
Генеративный1 (g1)	2,22	0,05
Генеративный2 (g2)	5,52	0,01

Площадь прироста, см<sup>2</sup>



Береза повислая



Период онтогенеза	t	p
Ювенильный (j)	3,38	0,05
Виргинильный1 (v)	1,12	0,05
Виргинильный2+3 (v2+v3)	3,09	0,01
Генеративный1 (g1)	2,49	0,05
Генеративный2 (g2)	1,17	0,05

Площадь прироста, см<sup>2</sup>

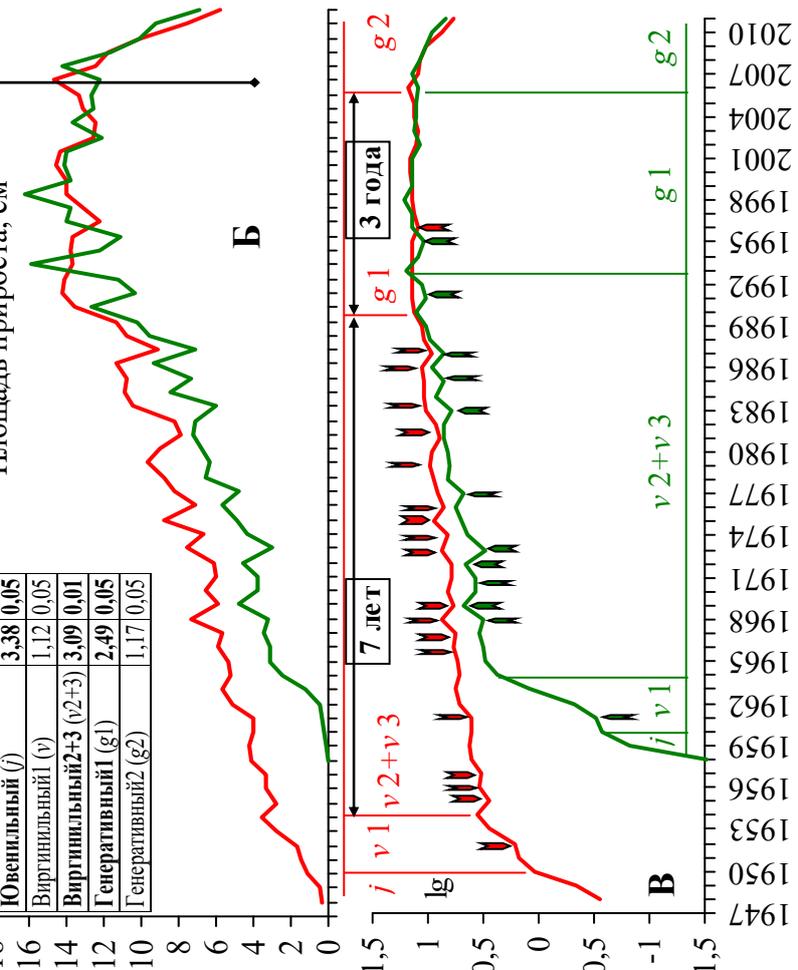


Рисунок 16. Влияние нефтехимического загрязнения на радиальный прирост (А), площадь прироста (Б) и онтогенетические периоды (В) лесообразователей в условиях УПЦ. Условные обозначения смотри на рис.14.

- величина прироста: стрессовые – липа; умеренно-стрессовые – дуб, береза; умеренно-толерантные – лиственница, ель; толерантные – сосна;
- длительность онтогенетических периодов: стрессовые – сосна, дуб; нейтральные – ель, липа; толерантные – лиственница, береза;
- смещение периодов накопления древесины: стрессовые – сосна; нейтральные – дуб, липа, береза; толерантные – лиственница, ель;
- сила корреляционной связи прироста с загрязнением: умеренно-стрессовые – лиственница; нейтральные – сосна, липа; умеренно-толерантные – дуб; толерантные – ель, береза.

Таблица 8. Адаптивные реакции дендрохронологических характеристик древесных видов УПЦ на нефтехимическое загрязнение

Влияние нефтехимического загрязнения на:	Сосна	Лиственница	Ель	Дуб	Липа	Береза
величину прироста	↑↑	↑	↑	↓	↓↓	↓
длительность онтогенетических периодов	↓↓	↑↑	(-)	↓↓	(-)	↑↑
периоды максимального накопления древесины	↓↓	↑↑	↑↑	(-)	(-)	(-)
силу корреляционной связи с приростом	(-)	↑	↓↓	↓	(-)	↓↓

Таким образом, для каждого вида показана относительная независимость адаптивных реакций прироста по отношению к загрязнению. С определенной долей условности дендрохронологические характеристики сосны тяготеют к стрессовым адаптивным реакциям, липы – к нейтральным, дуба – к умеренно-толерантным, лиственницы, ели и березы – к толерантным.

### 3.6. Корневые системы

В промзоне общая насыщенность почвы поглощающими корнями значительно и достоверно превышает контроль у лиственницы и ели – по всему почвенному профилю, а у липы и березы – только в слоях 10-20 и 10-40 см соответственно (рис. 17-18). У сосны распределение поглощающих корней по почвенному профилю не равномерное: до глубины 60 см в промзоне превышает контроль (значительно и достоверно в слоях 10-40 см), а с 60 до 100 см напротив в контроле выше (значительно и достоверно в слоях 70-100 см). У дуба в промзоне общая насыщенность почвы поглощающими корнями значительно меньше, чем в контроле (достоверно в слое 0-10 см).

Общая насыщенность почвы проводящими корнями в промзоне значительно и достоверным превышает контроль у лиственницы – по всему почвенному профилю, у дуба и липы – только в верхних слоях до глубины 50 и 40 см соответственно, у сосны – только в слое 20-70 см, а у ели – незначительно по всему почвенному профилю (рис. 17-18). У березы общая насыщенность почвы проводящими корнями в промзоне и в контроле фактически не различается, но распределение по почвенному профилю не равномерное: до глубины 20 см в промзоне превышает контроль (значительное и достоверное в слое 0-10 см), на глубине 20-60 см напротив в контроле выше (значительно и достоверно в слое 20-30 см), далее различия между зонами исчезают.

Для скелетных корней характерно значительное и достоверное увеличение общей насыщенности почвы в промзоне относительно контроля: для сосны – в слое 20-30 см, лиственницы – в слое 0-20 см, дуба – в слое 10-30 см, липы – в слоях 30-60 см; для ели характерно незначительное увеличение общей корненасыщенности, достоверное в слое 0-10 см (рис. 17-18). У березы, напротив, характерно значительное снижение общей корненасыщенности в промзоне относительно контроля по всему почвенному профилю.

Корненасыщенность почвы проанализирована во взаимосвязи с содержанием в почвенном профиле ТМ (рис. 19, табл. 9). «Сильные» корреляционные связи между концентрацией ТМ и корненасыщенностью фракции встречаются довольно редко, выявить определенную строгую тенденцию для всех древесных видов невозможно. В целом, сосну и березу можно отнести к видам, корневые системы которых характеризуются наличием «сильных» корреляционных связей, а лиственницу, ель, дуб и липу – «средних» корреляционных связей.

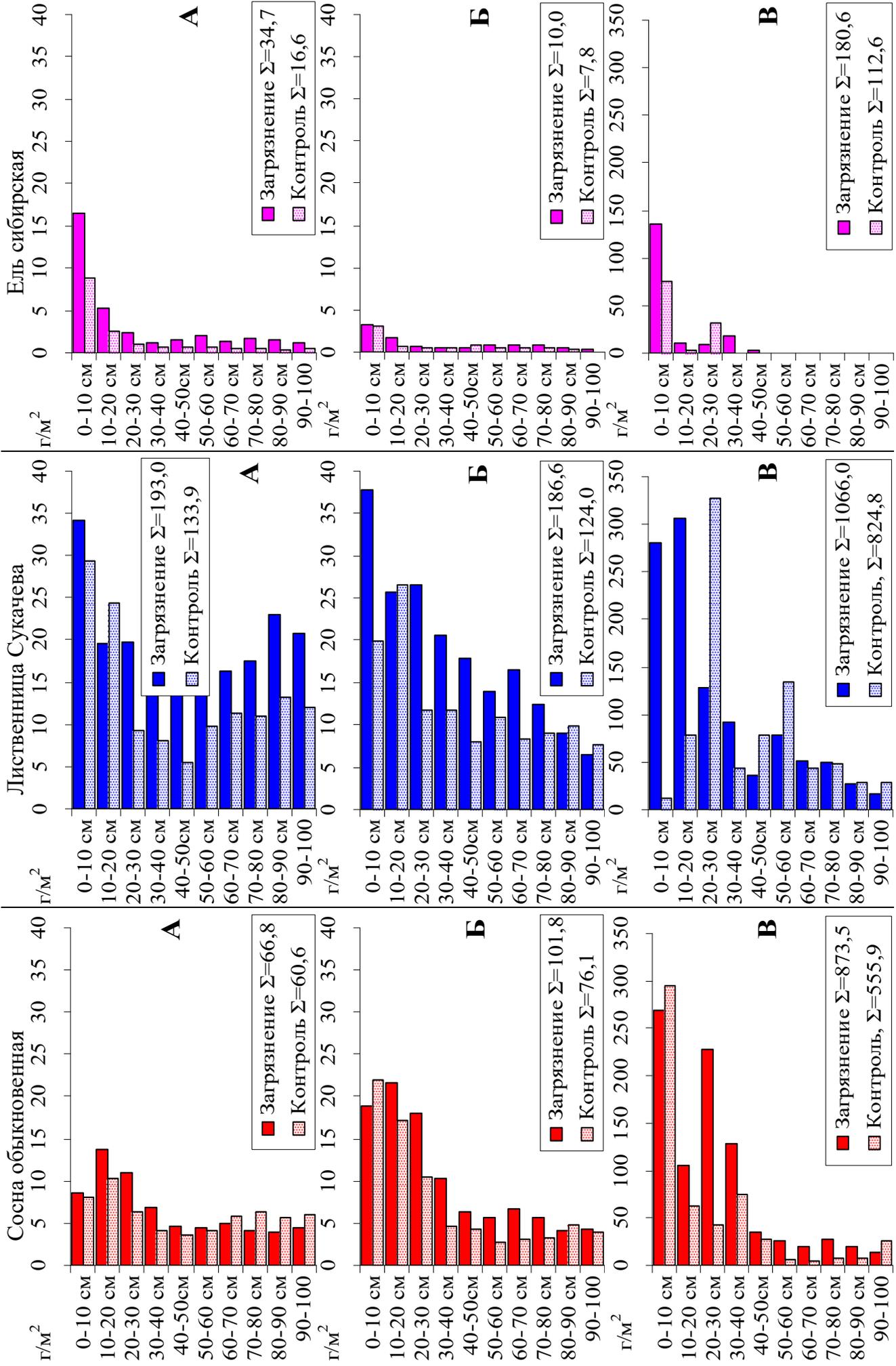


Рисунок 17. Корненасыщенность почвы (г/м<sup>2</sup>) в древостоях УПЦ. Условные обозначения: А – корни диаметром до 1 мм (поглощающие); Б – корни диаметром 1-3 мм (проводящие или полускелетные); В – корни диаметром более 3 мм (скелетные).

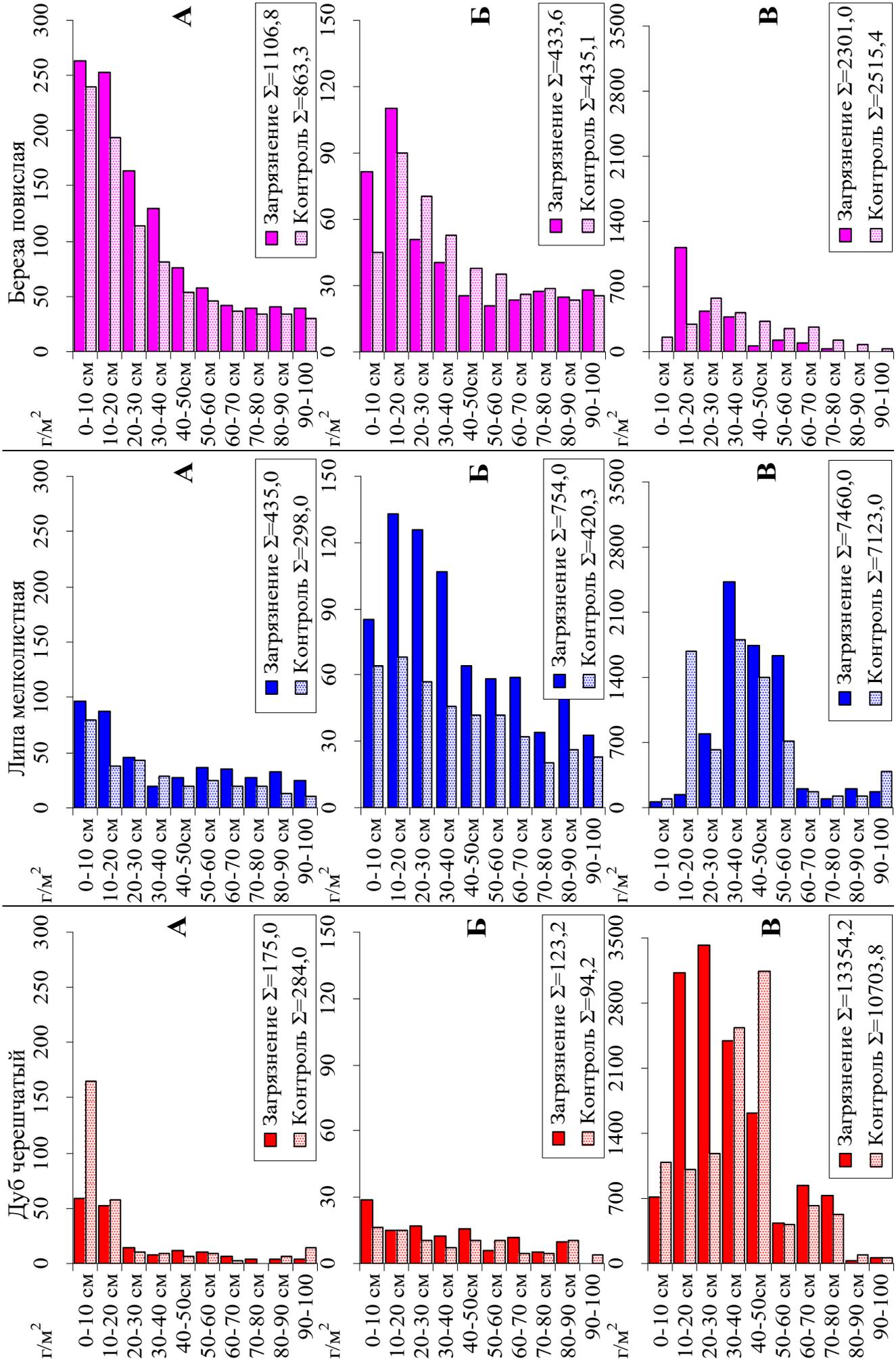


Рисунок 18. Корненасыщенность почвы (г/м<sup>2</sup>) в древостоях УПЦ. Условные обозначения: А – корни диаметром до 1 мм (поглощающие); Б – корни диаметром 1-3 мм (проводящие или полускелетные); В – корни диаметром более 3 мм (скелетные).

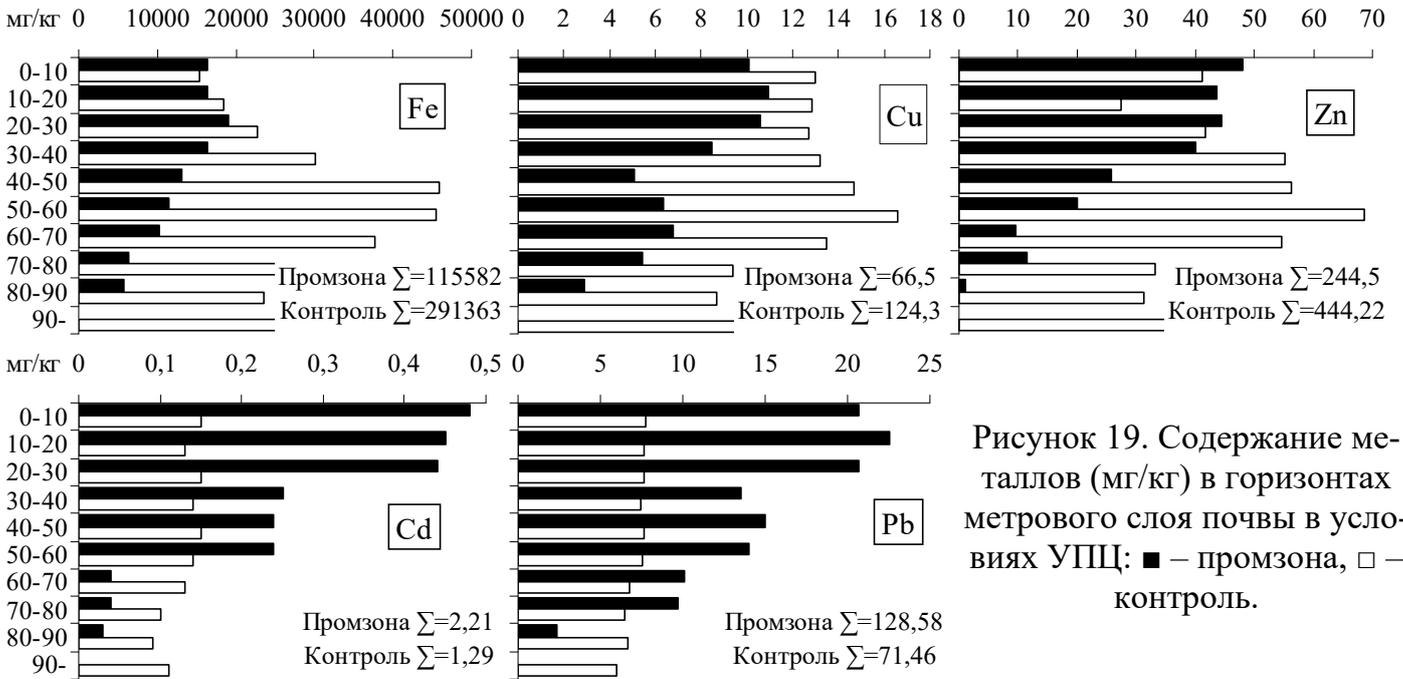


Таблица 9. Корреляция между концентраций ТМ в почве и массой корневых систем в условиях УПЦ в градиенте «контроль→загрязнение» (■ сильная, ■ средняя, □ слабая и очень слабая тесноты корреляционных связей)

Фракция	Cu	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	Fe	Zn	Cd	Pb	Cu	Fe	Zn	Cd	Pb
	Сосна					Лиственница					Ель				
< 1 мм	0,47	0,53	0,64	0,80	0,77	-0,37	-0,35	-0,46	-0,45	-0,53	0,43	0,62	0,56	0,61	0,49
1-3 мм	0,23	0,05	0,13	0,20	0,36	0,33	0,37	0,34	0,53	0,58	0,49	0,41	0,39	0,30	0,37
> 3 мм	0,45	0,36	0,36	0,39	0,41	0,37	0,48	0,49	0,37	0,31	0,21	0,39	0,33	0,36	0,27
	Дуб					Липа					Береза				
< 1 мм	-0,30	-0,53	-0,45	-0,47	-0,31	0,22	0,27	0,30	0,24	0,20	0,59	0,66	0,77	0,79	0,73
1-3 мм	0,48	0,48	0,42	0,43	0,51	0,66	0,62	0,65	0,60	0,58	0,40	0,56	0,51	0,33	0,21
> 3 мм	0,65	0,60	0,57	0,45	0,43	-0,50	-0,51	-0,60	-0,27	-0,25	0,44	0,46	0,56	0,39	0,34

Корневые фракции распределились на следующие группы адаптивных реакций по отношению к усилению углеводородного загрязнения (табл. 10):

- поглощающие корни: стрессовые – дуб; нейтральные – сосна; умеренно-толерантные – ель; толерантные – лиственница, липа, береза;
- проводящие корни: нейтральные – ель, береза; умеренно-толерантные – сосна, лиственница, дуб; толерантные – липа;
- скелетные корни: умеренно-стрессовые – береза; умеренно-толерантные – сосна, лиственница, ель; толерантные – дуб, липа.

Таблица 10. Адаптивные реакции корневых систем древесных видов УПЦ на углеводородное загрязнение и на содержание в почве ТМ

Факторы	Корневые фракции, мм																	
	< 1	1-3	> 3	< 1	1-3	> 3	< 1	1-3	> 3	< 1	1-3	> 3	< 1	1-3	> 3			
	Сосна			Лиственница			Ель			Дуб			Липа			Береза		
Пром. загрязнение	(-)	↑	↑	↑↑	↑	↑	↑	(-)	↑	↓↓	↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	(-)	↓
Cu	↓	↓↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓↓	↓↓	↓	(-)	↓↓	(-)	(-)	(-)	(-)	↓
Fe	(-)	↓↓	↓	↓	↓	↓	(-)	↓	↓	(-)	↓	(-)	↓↓	(-)	(-)	(-)	(-)	↓
Zn	(-)	↓↓	↓	↓	↓	↓	(-)	↓	↓	↓	↓	(-)	↓↓	(-)	(-)	↑	(-)	(-)
Cd	↑	↓↓	↓	↓	(-)	↓	(-)	↓↓	↓	↓	↓	↓	↓↓	(-)	↓↓	↑	↓	↓
Pb	↑	↓	↓	(-)	(-)	↓	↓	↓	↓↓	↓	(-)	↓	↓↓	(-)	↓↓	↑	↓↓	↓

Среди адаптивных реакций корневых систем на содержание в почве ТМ невозможно выделить одинаковых тенденций, с некоторой долей условности можно выделить:

- поглощающие корни: умеренно-стрессовые – береза; нейтральные – сосна, ель; умеренно-толерантные – лиственница, дуб; толерантные – липа;
- проводящие корни: нейтральные – липа; умеренно-толерантные – лиственница, ель, дуб, береза; толерантные – сосна;
- скелетные корни: нейтральные – дуб, липа; умеренно-толерантные – сосна, лиственница, ель, береза.

Для каждого вида показана относительная независимость адаптивных реакций корневых систем, проявляющаяся у всех корневых фракций. По отношению к нефтехимическому загрязнению у корневых систем наиболее типичными являются умеренно-толерантные и толерантные адаптивные реакции, а по отношению к ТМ – умеренно-толерантные.

### 3.7. Относительное жизненное состояние древостоев

В промзоне к категории «сильно ослабленные» относятся древостои сосны ( $L_v=44,8\%$ ), лиственницы ( $L_v=48,1\%$ ) и дуба ( $L_v=48,8\%$ ), основную долю запаса древостоя, определяющую их жизненное состояние, составляют «сильно ослабленные» деревья (рис. 20). К категории «ослабленные» относятся древостои ели ( $L_v=67,1\%$ ), липы ( $L_v=54,2\%$ ) и березы ( $L_v=79,0\%$ ), основные доли запаса древостоя составляют «здоровые» и «ослабленные» деревья. По степени ухудшения жизненного состояния виды образуют ряд: береза>ель>липа>лиственница> дуб>сосна. В контроле все древостои относятся к категории «здоровые», диагностические признаки ухудшения состояния незначительны, основная доля запаса древостоя относится к категории «здоровые», незначительная к «ослабленным».

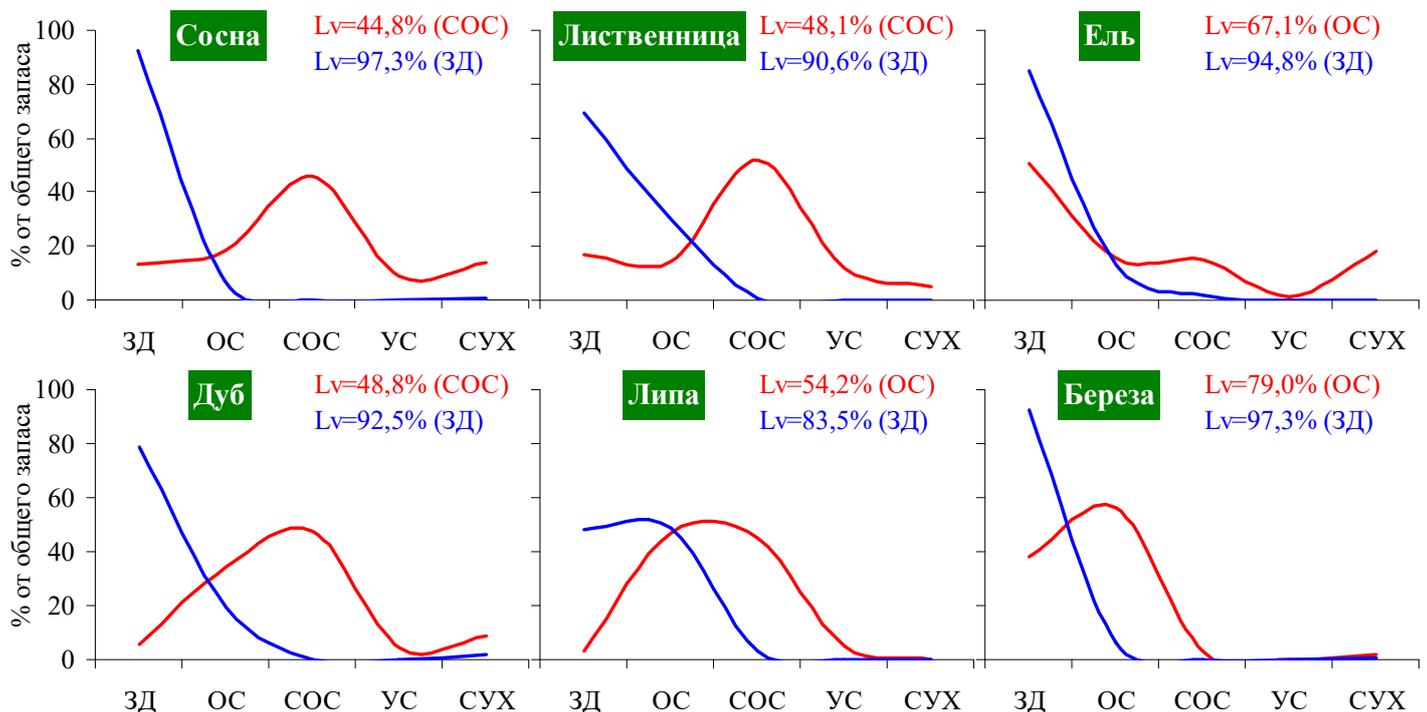


Рисунок 20. Распределение запаса древостоев лесообразователей УПЦ по категориям жизненного состояния. Условные обозначения: — промзона, — контроль, ЗД – здоровые, ОС – ослабленные, СОС – сильно ослабленные, УС – усыхающие деревья, СУХ – сухостой,  $L_v$  – коэффициент жизненного состояния, %.

Для лиственницы, ели и березы основным диагностическим признаком, ухудшающим жизненное состояние, является снижение густоты кроны, остальные имеют менее значимую роль (табл. 11). Для сосны, дуба и липы все диагностические признаки являются почти равнозначными, при этом снижение густоты кроны первично для липы, наличие в кроне мертвых сучьев – для дуба, повреждение хвои – для сосны.

Все диагностические признаки жизненного состояния у дуба и липы характеризуются умеренно-стрессовой адаптивной реакцией на углеводородное загрязнение, у ели – нейтральной, сосна, лиственница и береза характеризуются вариабельностью в адаптивных реакциях (табл. 12). Относительное жизненное состояние характеризуется стрессовой адаптивной реакцией у сосны, лиственницы и дуба, а у ели, липы и березы – умеренно-стрессовой.

Таблица 11. Диагностические признаки жизненного состояния древостоев УЩ

Диагностические признаки	Сосна	Лиственница	Ель	Дуб	Липа	Береза
Снижение густоты кроны	до 50%	до 60%	до 70%	до 50%	до 50%	до 60%
Наличие в кроне мертвых сучьев	до 40%	до 40%	до 20%	до 55%	до 40%	до 5%
Повреждение хвои/листьев	до 60%	до 10%	до 20%	до 40%	до 40%	до 20%

Таблица 12. Адаптивные реакции диагностических признаков жизненного состояния древесных видов УЩ на углеводородное загрязнение

Диагностические признаки	Сосна	Лиственница	Ель	Дуб	Липа	Береза
Снижение густоты кроны	↓	↓	(-)	↓	↓	↓
Степень повреждения хвои/листьев	↓↓	(-)	(-)	↓	↓	(-)
Наличие в кроне мертвых сучьев	↓	↓	(-)	↓	↓	(-)
Относительное жизненное состояние	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓

Таким образом, для каждого вида показана относительная независимость адаптивных реакций параметров жизненного состояния на промышленное загрязнение, проявляющаяся как для отдельных деревьев древостоя, так и для древостоев в целом.

### 3.8. Адаптивные стратегии древесных видов к углеводородному загрязнению

Для каждого вида показана поливариантность и относительная независимость адаптивных реакций на всех структурно-функциональных уровнях (рис. 21-23):

У сосны преобладающей стрессовой адаптивной реакцией характеризуются радиальный прирост, нейтральной – пигментный комплекс, умеренно-толерантной – корневые системы, толерантной – водный обмен и аккумуляция ТМ. Показатели жизненного состояния в равной степени проявляют стрессовые и умеренно-стрессовые, а морфологические параметры – нейтральные и толерантные адаптивные реакции.

У лиственницы преобладающей умеренно-стрессовой адаптивной реакцией характеризуются показатели жизненного состояния, нейтральной – морфологические параметры и пигментный комплекс, умеренно-толерантной – корневые системы, толерантной – водный обмен, аккумуляция ТМ и радиальный прирост.

У ели преобладающей стрессовой адаптивной реакцией характеризуется аккумуляция ТМ, нейтральной – водный обмен, пигментный комплекс и показатели жизненного состояния, умеренно-толерантной – корневые системы, толерантной – морфологические параметры и радиальный прирост.

У дуба преобладающей умеренно-стрессовой адаптивной реакцией характеризуются показатели жизненного состояния, нейтральной – пигментный комплекс, умеренно-толерантной – корневые системы, толерантной – аккумуляция ТМ. Морфологические параметры и водный обмен в равной степени проявляют стрессовые и толерантные адаптивные реакции, а радиальный прирост – от стрессовых до умеренно-толерантных.

У липы преобладающей стрессовой адаптивной реакцией характеризуется водный обмен, умеренно-стрессовой – показатели жизненного состояния, нейтральной – радиальный прирост, умеренно-толерантной – пигментный комплекс, «толерантной» – аккумуляция ТМ. Морфологические параметры в равной степени проявляют умеренно-стрессовые и нейтральные, а корневые системы – нейтральные и умеренно-толерантные адаптивные реакции.

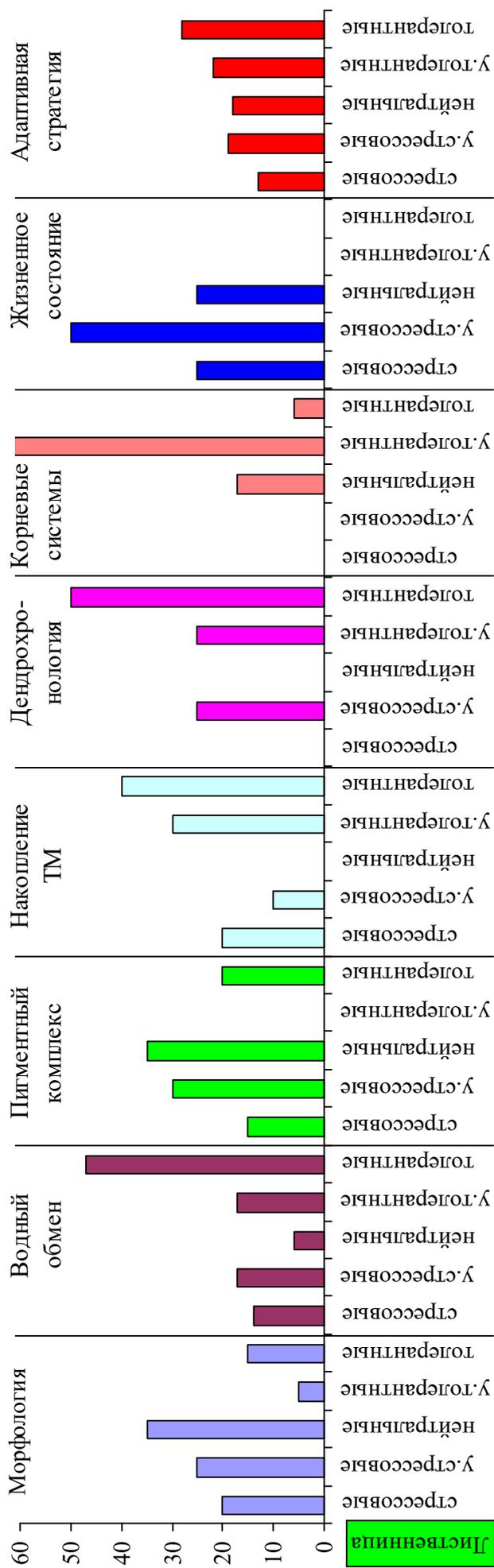
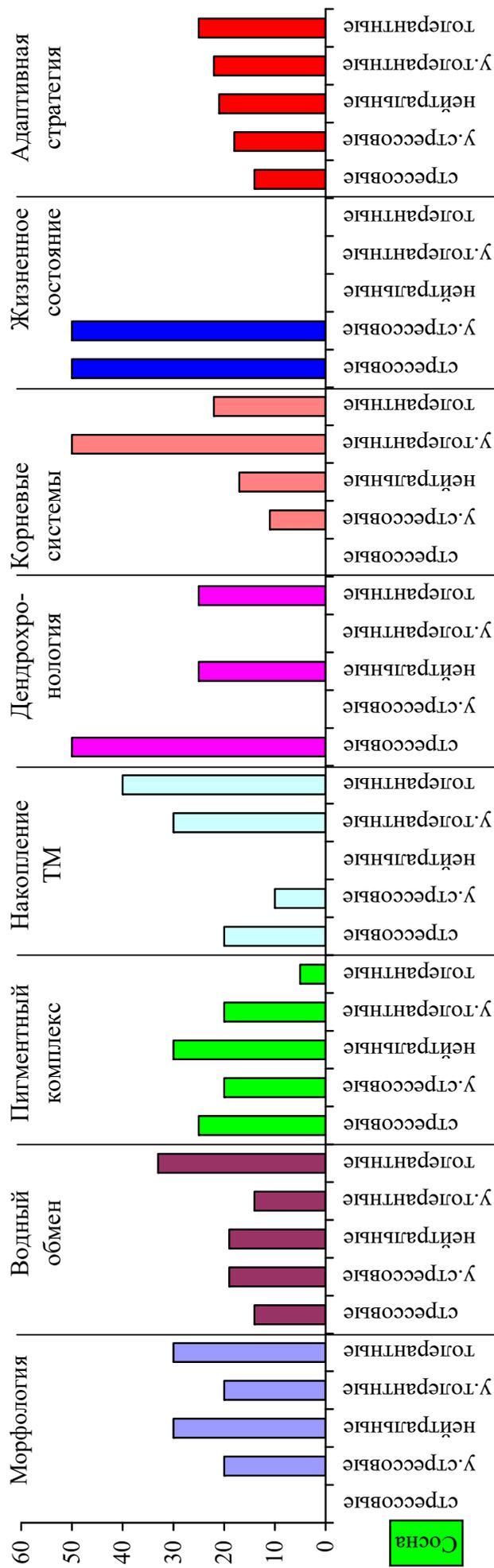


Рисунок 21. Адаптивные реакции сосны и лиственницы на различных структурно-функциональных уровнях организации и результирующие адаптивные стратегии на уровне всего организма в условиях УЩС (в долях от 100%). Условные обозначения: у.стрессовые – умеренно-стрессовые адаптивные реакции, у.толерантные – умеренно-толерантные адаптивные реакции.

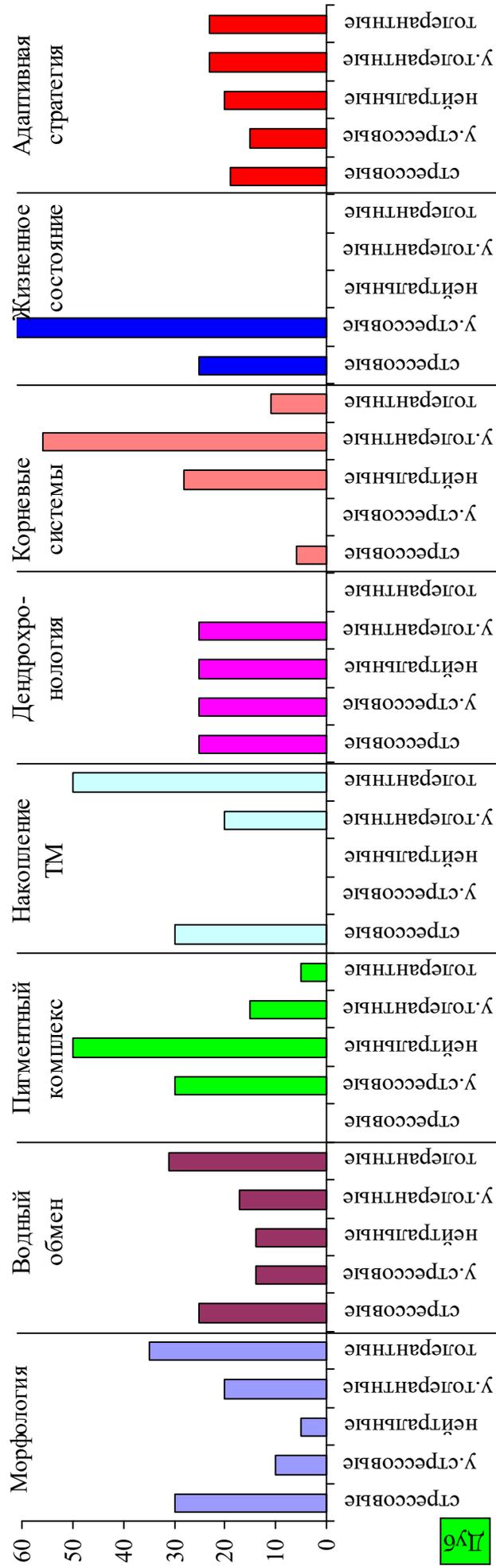
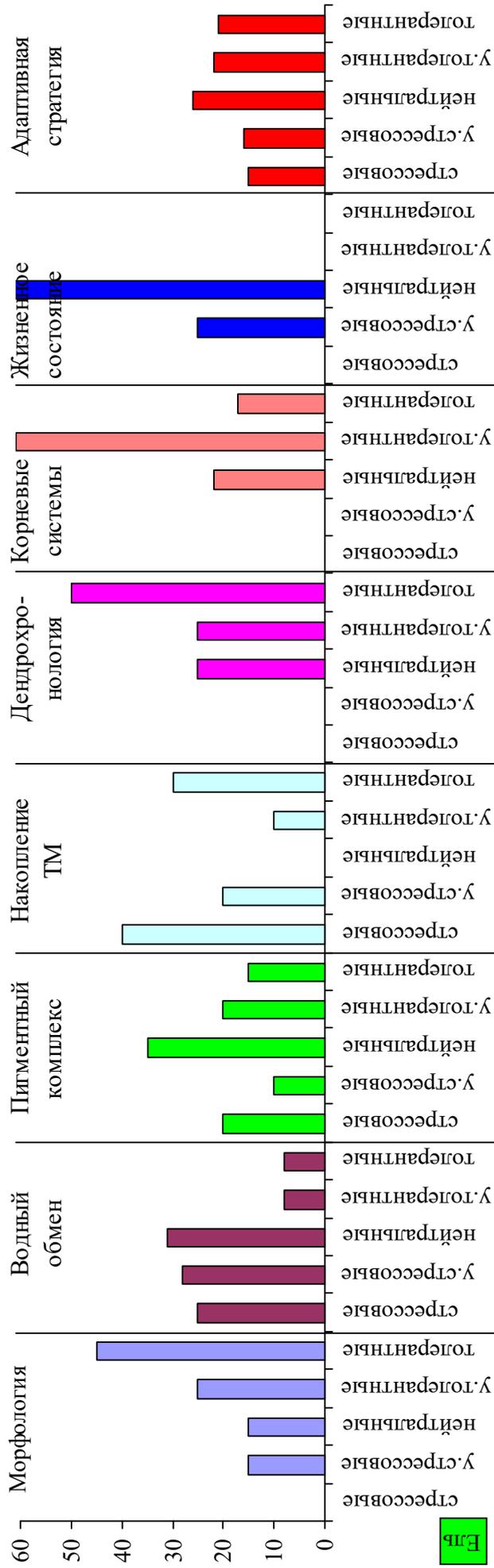


Рисунок 22. Адаптивные реакции ели и дуба на различных структурно-функциональных уровнях организации и результирующие адаптивные стратегии на уровне всего организма в условиях УЩС (в долях от 100%). Условные обозначения: у.стрессовые – умеренно-стрессовые адаптивные реакции, у.толерантные – умеренно-толерантные адаптивные реакции.

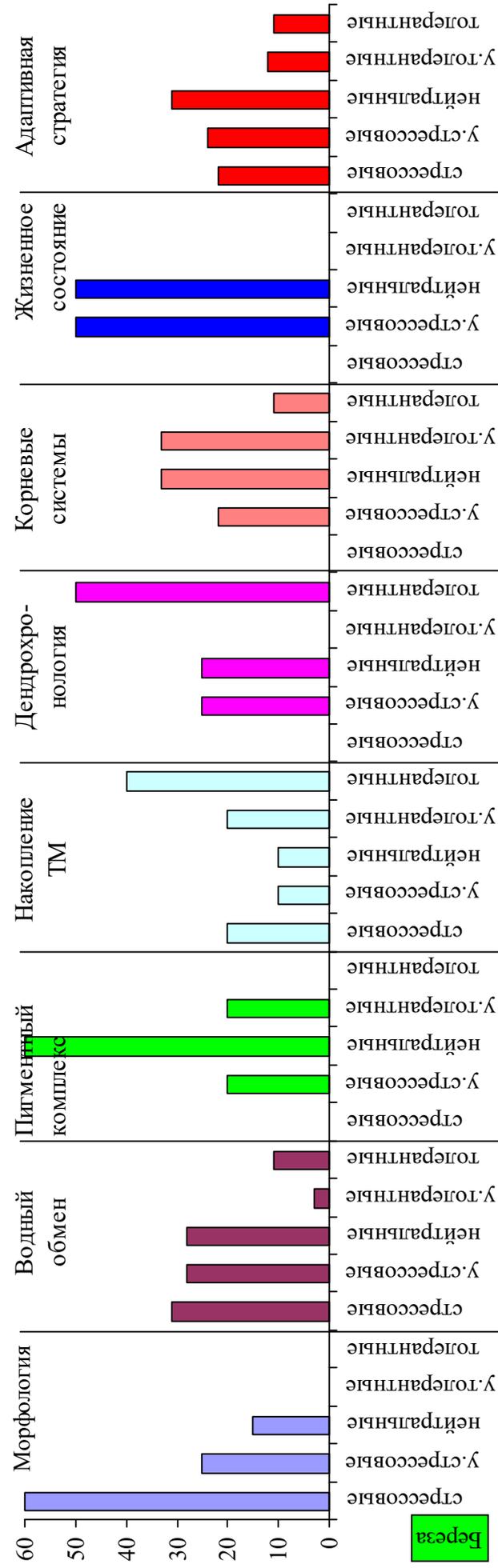
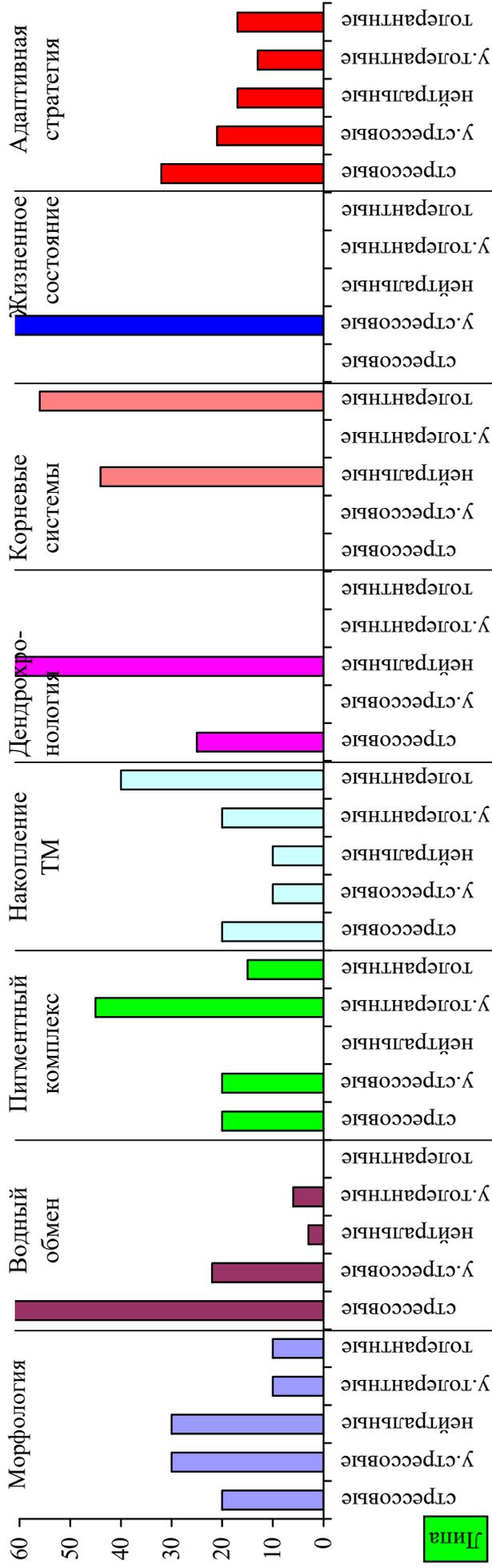


Рисунок 23. Адаптивные реакции липы и березы на различных структурно-функциональных уровнях организации и результирующие адаптивные стратегии на уровне всего организма в условиях УПЦ (в долях от 100%). Условные обозначения у.стрессовые – умеренно-стрессовые адаптивные реакции, у.толерантные – умеренно-толерантные адаптивные реакции.

У березы преобладающей стрессовой адаптивной реакцией характеризуются морфологические параметры, нейтральной – пигментный комплекс, толерантной – аккумуляция ТМ и радиальный прирост. Водный обмен в равной степени проявляет стрессовые, умеренно-стрессовые и нейтральные, показатели жизненного состояния – умеренно-стрессовые и нейтральные, корневые системы – нейтральные и умеренно-толерантные адаптивные реакции.

Несмотря на контрастное проявление относительной независимости адаптивных реакций на иерархических уровнях, результирующая адаптивная стратегия всегда четко выделяется преобладающей модой: у сосны, лиственницы и дуба – толерантные, у ели и березы – нейтральные, у липы – стрессовая адаптивные стратегии. Следовательно, в условиях углеводородного загрязнения сосна, лиственница и дуб характеризуются высоким адаптивным потенциалом, липа – низким, ель и береза – средним.

Для описания степени согласованности адаптивных реакций в пределах иерархических уровней лучше всего подходит коэффициент равномерности, а между иерархическими уровнями – среднеквадратическое отклонение (табл. 13). Наибольшей степенью согласованности адаптивных реакций в пределах иерархических уровней характеризуются показатели жизненного состояния древостоев и корневые системы, наименьшей – параметры водного обмена хвои/листьев. По степени согласованности адаптивных реакций между иерархическими структурно-функциональными уровнями древесные виды образуют ряд уменьшения: береза>липа>лиственница>ель>сосна>дуб.

Таблица 13. Степень согласованности адаптивных реакций древесных видов УПЦ на промышленное загрязнение в пределах иерархических уровней и между ними (цветом выделены коэффициенты, наилучшим образом описывающие распределения)

Коэффициенты	МФ	ВО	ПК	ТМ	ДХ	КС	ЖС	АС	МФ	ВО	ПК	ТМ	ДХ	КС	ЖС	АС
	Сосна								Дуб							
<b>Равномерности</b>	<b>10,0</b>	<b>7,6</b>	<b>10,0</b>	<b>13,3</b>	<b>12,5</b>	<b>22,2</b>	<b>0</b>	<b>2,7</b>	<b>13,8</b>	<b>6,9</b>	<b>21,7</b>	<b>20,0</b>	<b>0</b>	<b>26,4</b>	<b>50,0</b>	<b>2,9</b>
<b>Сигма (б)</b>	5,0	7,1	8,4	11,2	11,8	15,0	0	<b>3,7</b>	11,4	6,7	17,0	12,5	0	19,4	25,0	<b>3,0</b>
Шенона	2,0	2,2	2,2	1,9	1,5	1,8	1,0	2,3	2,1	2,2	1,7	1,5	2,0	1,6	0,8	2,3
Симпсона	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	0,6	0,2
	Лиственница								Липа							
<b>Равномерности</b>	<b>13,8</b>	<b>13,9</b>	<b>11,7</b>	<b>13,3</b>	<b>12,5</b>	<b>66,7</b>	<b>25,0</b>	<b>4,0</b>	<b>7,5</b>	<b>23,2</b>	<b>18,3</b>	<b>10,0</b>	<b>50,0</b>	<b>11,1</b>	<b>100</b>	<b>5,9</b>
<b>Сигма (б)</b>	10,0	14,2	7,9	10,0	11,8	31,8	11,8	<b>4,8</b>	8,9	26,7	11,7	11,0	25,0	5,6	70,7	<b>6,5</b>
Шенона	2,1	2,0	1,9	1,9	1,5	0,9	1,5	2,3	2,2	1,2	1,9	2,1	0,8	1,0	0	2,3
Симпсона	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3	0,3	0,6	0,5	1,0	0,2
	Ель								Береза							
<b>Равномерности</b>	<b>10,0</b>	<b>6,9</b>	<b>13,8</b>	<b>16,7</b>	<b>12,5</b>	<b>41,7</b>	<b>50,0</b>	<b>4,0</b>	<b>22,5</b>	<b>9,0</b>	<b>40,0</b>	<b>10,0</b>	<b>12,5</b>	<b>11,1</b>	<b>0,0</b>	<b>7,4</b>
<b>Сигма (б)</b>	12,3	9,7	8,4	11,2	11,8	19,8	25,0	<b>4,0</b>	19,3	11,0	18,9	11,0	11,8	9,2	0	<b>7,8</b>
Шенона	1,8	2,1	2,2	1,9	1,5	1,4	0,8	2,3	1,4	2,1	1,4	2,1	1,5	1,9	1,0	2,2
Симпсона	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,5	0,2

Условные обозначения: МФ – морфология, ВО – водный обмен, ПК – пигментный комплекс, ТМ – тяжелые металлы, ДХ – дендрохронология, КС – корневые системы, ЖС – жизненное состояние, АС – адаптивные стратегии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями установлена экологическая видоспецифичность хвойных и лиственных лесообразователей по отношению к углеводородному загрязнению в условиях Предуралья. Полученные результаты согласуются с тезисами об экологической видоспецифичности и популяционной неоднородности видов, что необходимо учитывать при оценке состояния древостоев и прогнозировании их устойчивости и продуктивности в условиях промышленного загрязнения.

Углеродное загрязнение способствует проявлению видоспецифических реакций, вызывая усиление ксероморфности одних морфологических параметров ассимиляционного аппарата и ослабление других. По степени усиления ксероморфности виды образуют ряд: ель < сосна < дуб < лиственница < липа < береза. В целом лиственными видам характерна большая степень ксероморфности, чем хвойным. Из всех видов только береза характеризуется стрессовой адаптивной реакцией всех морфологических параметров, остальные виды проявляют поливариантность: лиственница и липа тяготеют к нейтральной адаптивной реакции, а сосна, ель и дуб – к толерантной.

Хвоя и листья древесных видов характеризуются высоким ОСВ и низким ДВН, что свидетельствует об их устойчивости к действию техногенных факторов, однако ИТ является более чувствительным параметром. Показана поливариантность и относительная независимость адаптивных реакций водного обмена. У всех видов нарушена суточная и вегетационная динамика ОСВ, ДВН и ИТ. Выявлены адаптивные реакции водного обмена хвои и листьев в ответ на углеродное загрязнение: стрессовая – сосна, ель, дуб, липа, береза; толерантная – лиственница.

Выделены общие адаптивные реакции пигментов фотосинтеза на воздействие промышленного загрязнения: увеличение содержания всех пигментов – береза; уменьшение содержания всех пигментов – лиственница; увеличение содержания хлорофиллов и уменьшение содержания каротиноидов – сосна, липа; уменьшение содержания хлорофиллов и увеличение содержания каротиноидов – ель, дуб. За исключением липы, хвоя и листья лесобразователей характеризуются стабильностью соотношения «Хл *a* / Хл *b*». По соотношению «(Хл *a* + Хл *b*) / Каротиноиды» у хвойных видов в промзоне относительно контроля увеличивается доля хлорофиллов на фоне уменьшения доли каротиноидов, а у лиственных наоборот. Сосна и липа отнесены к видам со стрессовой адаптивной реакцией пигментного комплекса, лиственница – умеренно-стрессовой, дуб и береза – нейтральной, ель – умеренно-толерантной. Лиственница и липа характеризуются большей фотосинтетической активностью, однако их пигментный комплекс более чувствителен к промышленному загрязнению.

В хвое и листьях древесных видов только Cd накапливается в концентрациях, иногда в 2 раза превышающих пороговые, содержание Fe, Cu, Zn, Pb находится в норме, причем избыточное накопление Cd подавляет поступление Zn, находящегося близко к границе дефицита. Оценка транслокации ТМ из почвы в хвою/листья показала, что все древесные виды являются «исключателями» Fe и Pb и «аккумуляторами» Cd и Zn, а в отношении Cu лиственница и дуб – «аккумуляторы», липа и береза – «индикаторы», сосна и ель – «исключатели». Лиственные виды накапливают ТМ гораздо больше, чем хвойные, что позволяет рекомендовать их для озеленения вокруг промышленных центров с высоким уровнем загрязнения ТМ. Ель отнесена к видам со стрессовой адаптивной реакцией к накоплению ТМ, сосна – умеренно-толерантной, лиственница, дуб, липа и береза – толерантной.

Углеродное загрязнение стимулирует увеличение радиального прироста у хвойных видов, но подавляет прирост лиственных видов. При этом у сосны и дуба сокращается длительность онтогенетических периодов, у ели и липы не изменяется, а у лиственницы и березы увеличивается. У сосны в условиях загрязнения ускоряется период наступления снижения продуктивности древесины, у ели и лиственницы отдалается, у лиственных видов смещений не наблюдается. У всех видов в промзоне повышается чувствительность прироста к действию стрессовых факторов. Дендрохронологические характеристики сосны тяготеют к стрессовым адаптивным реакциям, липы – к нейтральным, дуба – к умеренно-толерантным, лиственницы, ели и березы – к толерантным.

У всех хвойных видов в промзоне увеличивается корненасыщенность почвенного профиля всеми фракциями корней, однако у лиственных видов нет возможности выделить единую тенденцию. Корневые системы сосны, липы и березы характеризуются тесными корреляционными связями с содержанием металлов в почве, а лиственницы, ели и дуба – средней

теснотой. По отношению к промышленному загрязнению у корневых систем древесных видов наиболее типичными являются умеренно-толерантная и толерантная адаптивные реакции, а по отношению к ТМ – умеренно-толерантная.

Промышленное загрязнение вызывает снижение жизненного состояния древостоев, значительное у сосны, лиственницы, дуба, и менее значительное у ели, липы и березы. По степени ухудшения жизненного состояния древесные виды образуют ряд снижения: береза>ель>липа>лиственница>дуб>сосна. Адаптивные реакции диагностических признаков жизненного состояния у сосны, лиственницы и дуба оцениваются как стрессовые, у ели, липы и березы – умеренно-стрессовые.

Для каждого древесного вида показана относительная независимость адаптивных реакций на промышленное загрязнение, проявляющаяся на всех иерархических уровнях структурно-функциональной организации древесного растения и между иерархическими уровнями. Сосна, лиственница и дуб характеризуются толерантной адаптивной стратегией к нефтехимическому загрязнению и высоким адаптивным потенциалом, липа – стрессовой адаптивной стратегией и низким адаптивным потенциалом, ель и береза – нейтральной адаптивной стратегией и средним адаптивным потенциалом. Наибольшей степенью согласованности адаптивных реакций в пределах иерархических уровней характеризуются показатели жизненного состояния древостоев и корневые системы, наименьшей – параметры водного обмена хвои/листьев. По степени согласованности адаптивных реакций между иерархическими структурно-функциональными уровнями древесные виды образуют ряд уменьшения: береза>липа>лиственница>ель>сосна>дуб.

### Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

#### *Публикации в журналах, материалах научных мероприятий, сборниках WOS и SCOPUS*

Suleymanov R., **Urazgildin R.**, Amineva K., Suleymanov A., Abakumov E. Ecogeochemical Assessment of Soil Cover of the Ufa City, Bashkortostan // *Megacities 2050: Environmental Consequences of Urbanization: Proceedings of the VI International Conference on Landscape Architecture to Support City Sustainable Development* – Springer Geography, 2018 – P 57-61. – DOI. 10.1007/978-3-319-70557-6\_8

**Urazgil'din R.V.**, Amineva K.Z., Zaitsev G.A., Kulagin A.Yu. Comparative Characteristics of Pine, Spruce and Larch Pigmental Complex Seasonal Variability in Industrial Pollution Conditions // *Ecology and Geography of Plants and Plant Communities. The fourth International Scientific Conference on Ecology and Geography of Plants and Plant Communities.* – Volume 2018. – P 232-242. – DOI 10.18502/cls.v4i7.3244

Zaitsev G., Davydychev A., Kulagin A., Giniyatullin R., Suleymanov R., Kulagin A., Egorova N., Komissarov M., **Urazgildin R.**, Tagirova O. Suppressed Undergrowth of Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in Early Ontogeny: One-Way Ticket or Survival Strategy? // *Forests.* – 2021, Vol. 12. – Article number 851. <https://doi.org/10.3390/f12070851>

#### *Публикации в журналах перечня ВАК*

Бойко А.А., **Уразгильдин Р.В.** Особенности водного режима ассимиляционного аппарата древесных растений в условиях техногенного загрязнения // *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник.* – 2004. – № 5 (36). – С. 118-121.

Кулагин А.А., Габбасова И.М., Мигранов М.Г., Зайцев Г.А., **Уразгильдин Р.В.**, Давыдычев А.Н., Денисова А.В., Хисамов Р.Р., Ситдииков Р.Н., Гареев Т.Г., Гильманова Г.Р., Сатаров В.Н., Кужлева Н.Г., Кулагин Ар.А. Ландшафтно-экологическая оценка состояния территории горнолыжного центра «Металлург-Магнитогорск» // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2006. – Т. 8, № 2. – С. 580-587.

Сейдафаров Р.А., **Уразгильдин Р.В.** Характеристика морфологических параметров листьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях промышленного загрязнения воздуха // *Вестник Оренбургского государственного университета.* – 2007. – Специальный выпуск № 75. – С. 309-311.

**Уразгильдин Р.В.**, Сейдафаров Р.А. Водный режим листьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях промышленного загрязнения окружающей среды // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – Специальный выпуск № 75. – С. 369-372.

Аралбаева Л.С., **Уразгильдин Р.В.**, Кулагин А.Ю. Оценка относительного жизненного состояния и стабильности развития березы повислой (*Betula pendula* Roth.) города Салават // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6 (100). – С. 39-42.

Хатмуллин Р.З., Кулагин А.Ю., **Уразгильдин Р.В.** Оценка естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в естественных и антропогенно-нарушенных ландшафтах Южного Урала // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6 (100). – С. 412-414.

Яшин Д.А., Зайцев Г.А., Зиятдинова К.З., **Уразгильдин Р.В.** Особенности строения корневых систем березы повислой в условиях нефтехимического загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 1 (6). – С. 1581-1583.

Зиятдинова К.З., **Уразгильдин Р.В.**, Денисова А.В. Морфология листьев и побегов дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях загрязнения окружающей среды (на примере Уфимского промышленного центра) // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 1 (6). – С. 1466-1469.

Аmineва К.З., **Уразгильдин Р.В.**, Сулейманов Р.Р. Эколого-геохимические особенности почв дубовых древостоев и аккумуляция тяжелых металлов в листьях дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях нефтехимического загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16, № 5. – С. 58-65.

Аmineва К.З., **Уразгильдин Р.В.**, Кулагин А.Ю. Прирост стволовой древесины дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в условиях техногенного загрязнения // Биосфера. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 30-41.

**Уразгильдин Р.В.**, Кулагин А.Ю. Развитие классификации адаптивных стратегий растительности применительно к древесным видам и техногенезу и оценка на ее основе лесообразователей Предуралья // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2017. – № 4 (1). – С. 126-130.

Зайцев Г.А., Кулагин А.Ю., **Уразгильдин Р.В.**, Дубровина О.А., Логвинов К.В., Афанасов Н.А., Чабан А.Н., Шайнуров Р.И., Тагирова О.В., Аmineва К.З. Относительное жизненное состояние древесных насаждений в условиях промышленного загрязнения // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. – 2017. – № 2. – С. 63-68.

**Уразгильдин Р.В.**, Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // Биосфера. – 2021. – Т. 13. DOI 10.24855/biosfera.v13i3.578.

**Уразгильдин Р.В.**, Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 2. Влияние на физиологические функции // Биосфера. – 2021. – Т. 13. DOI 10.24855/biosfera.v13i3.579.

**Уразгильдин Р.В.**, Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 3. Влияние на радиальный прирост и корневые системы // Биосфера. – 2021. – Т. 13. DOI 10.24855/biosfera.v13i3.580.

**Уразгильдин Р.В.**, Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 4. Влияние на жизненное состояние и выработку адаптивных стратегий древостоев // Биосфера. – 2021. – Т. 13. DOI 10.24855/biosfera.v13i3.581.

Отзывы на автореферат просим направить в 3 экземплярах по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.281.01 Магасумовой А.Г. E-mail: [dissovet.usfeu@mail.ru](mailto:dissovet.usfeu@mail.ru)

Подписано в печать 27.09.2021 г. Формат 60×84 1/16. Объем 2,0 авт. л. Заказ № 1834. Тираж 150. Отпечатано в ООО "Издательство "ЗауралИнформ", 453839, Республика Башкортостан, г. Сибай, ул. Маяковского, д. 27. Тел. (34775)2-32-92