

УДК 574.24

## АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ ПИГМЕНТНОГО КОМПЛЕКСА ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

© 2025 г. А. А. Уразбахтин, Р. В. Уразгильдин\*

Уфимский Институт биологии — обособленное структурное подразделение  
Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

\*e-mail: urazbaxtin1998@mail.ru, urv@anrb.ru

Поступила в редакцию 06.12.2024 г.

После доработки 19.12.2024 г.

Принята в печать 20.12.2024 г.

Дана качественная оценка адаптивных реакций пигментного комплекса хвои сосны обыкновенной при произрастании в условиях различных типов промышленного загрязнения Южно-Уральского региона: Стерлитамакский промышленный центр (СПЦ, аэротехногенное полиметаллическое загрязнение), Карабашский медеплавильный комбинат (КМК, аэротехногенное полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом), Учалинский горно-обогатительный комбинат (УГОК, полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности), Кумертауский буроугольный разрез (КБР, полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород буроугольного разреза), Уфимский промышленный центр (УПЦ, аэротехногенное нефтехимическое загрязнение). Показана согласованность между адаптивными реакциями пигментов и соотношений пигментов при произрастании в условиях УГОК и отсутствие согласованности в СПЦ, КМК, КБР и УПЦ. Несмотря на отсутствие согласованности, в каждом промышленном центре четко выделяется общая адаптивная реакция: в СПЦ и КМК пигментный комплекс характеризуется “нейтральной” адаптивной реакцией, в КБР — “умеренно-толерантной”, в УПЦ — “толерантной”, в УГОК — “умеренно-стрессовой”. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе промышленные центры образуют ряд возрастания: СПЦ и УПЦ → КМК → КБР. За исключением УГОК, во всех промышленных центрах соотношение  $\text{Хл } a/\text{Хл } b$  демонстрирует отсутствие различий между загрязнением и контролем, что характеризует устойчивый баланс хлорофиллов, но в условиях медно-колчеданных отвалов наблюдается снижение доли  $\text{Хл } a$  при повышении доли  $\text{Хл } b$ , что выделяет этот тип загрязнения как более значимый для сосны стрессовый фактор. Соотношение  $(\text{Хл } a + \text{Хл } b)/\text{Каротиноиды}$  характеризуется отсутствием баланса во всех типах загрязнения, при этом загрязнения в УГОК и СПЦ выделяются как более значимые стрессовые факторы для сосны.

**Ключевые слова:** Южно-Уральский регион, промышленное загрязнение, пигментный комплекс хвои сосны обыкновенной, адаптивные реакции, сравнительная характеристика

**DOI:** 10.31857/S0042132425010077, **EDN:** DMBHKZ

### ВВЕДЕНИЕ

Богатство Южно-Уральского региона полезными ископаемыми стало причиной разработки большого количества месторождений и образования на их месте промышленных центров. Специфика добычи и переработки того или иного ископаемого определяет разнородный

состав загрязнителей в выбросах производственных предприятий. Древесные растения буферных зон промышленных центров, с одной стороны, поглощают значительное количество загрязнителей, выполняя роль фитофильтров, но с другой стороны, поглощенные комплексы загрязнителей влияют на состояние деревьев, в том числе и на пигментный комплекс, вызывая

неоднозначные (специфические и неспецифические) реакции. На поверхности листьев древесных растений не только осаждается промышленная пыль, но и поглощенные в процессе водного обмена токсиканты вовлекаются в физиологические процессы. Это в свою очередь оказывает значительное влияние на фотосинтез растений, который очень чувствителен к внешним стрессовым факторам (Шлык и др., 1975), поэтому оценка адаптивных реакций пигментного комплекса растений в ответ на воздействие факторов внешней среды дает возможность прогнозировать продуктивность древесных видов и перспективность их использования для создания буферных зон.

Анализ публикаций за последние 20 лет, посвященных исследованиям пигментного комплекса древесных растений в условиях техногенеза, позволяет констатировать крайнюю малочисленность исследований в условиях отвалов горнорудной промышленности, однако в них показана та или иная степень подавления содержания всех пигментов в условиях загрязнения (Цандекова, 2016; Загурская, 2017) либо их увеличения (Елисеева, 2022). Влияние промышленных предприятий и автотранспорта на пигментный комплекс древесных растений в отечественных и зарубежных публикациях освещено довольно широко, и здесь следует выделить два основных направления толкования полученных результатов исследований — негативное влияние промцентров (Маракеев и др., 2006; Титова, 2013; Сергейчик, 2015; Уразгильдин и др., 2016; Калугина и др., 2018; Шаркаева, Федюшкина, 2018; Афанасьева и др., 2022; Gowin, Goral, 1977; Mikhailova et al., 2017; Rostunov et al., 2017) и автотранспорта (Цандекова, Неверова, 2010; Баландайкин, 2014; Донцов и др., 2016; Ангальт, Калякина, 2017; Соколова, 2020; Белова и др., 2023; Prusty et al., 2005; Prajapati, Tripathi, 2008) на пигментный комплекс и положительное воздействие промцентров (Майдебур, 2006; Тужилкина, 2009; Тужилкина, 2021; Стасова и др., 2023; Seyyednejad et al., 2009; Areington et al., 2017) и автотранспорта (Бухарина, Пашкова, 2015; Афанасьева, 2018; Суслина и др., 2021). В редких случаях авторы заявляют об отсутствии строгих закономерностей в выявленных реакциях пигментного комплекса (Тарханов, Бирюков, 2014; Бухарина, Пашкова, 2015; Николайчук, Вашкевич, 2019; Mukherjee, Agrawal, 2018). Однако, тщательный анализ данных показывает, что практически во всех публикациях наряду со стрессовыми показаны толерантные реакции, и наоборот, хотя авторы декларируют только негативное или только положительное влияние загрязнения на исследованные объекты. Во всех

случаях авторы делают заключение, что выявленные ими реакции являются адаптивными, однако на основе полученных количественных изменений качественная оценка адаптивных реакций в публикациях отсутствует. Следует отметить отсутствие комплексных работ по сравнительной оценке воздействия на пигментный комплекс древесных видов разных типов промышленного загрязнения. Это обуславливает актуальность и новизну наших исследований.

Цель работы — качественная оценка адаптивных реакций пигментного комплекса хвои сосны обыкновенной в условиях пяти промышленных центров Южно-Уральского региона с разными типами загрязнения и их сравнительная оценка. Поставлены задачи: 1. На основе данных о ежегодных объемах выбросов подбор промышленных центров в пределах Южно-Уральского региона, характеризующихся разными типами загрязнения; 2. С учетом годовой розы ветров подбор древостоев в условиях загрязнения и контроля; 3. Сбор и фиксация в полевых условиях образцов хвои; 4. Лабораторный анализ полевых материалов; 5. Статистическая обработка и анализ полученных данных.

#### РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве полигонов для исследования выбраны пять промцентров (Реферат..., 2022; Государственный..., 2023):

Стерлитамакский промышленный центр (СПЦ) — аэротехногенное полиметаллическое загрязнение. Основные загрязнители: полиметаллическая пыль в составе взвешенных веществ, диоксид серы, диоксид азота, оксид азота, оксид углерода, бензапирен и др. Основные предприятия, влияющие на экологическую ситуацию в промышленном центре, — химические и нефтехимические (АО “Башкирская содовая компания”, ОАО “Синтез-Каучук”) предприятия электроэнергетики (Стерлитамакская ТЭЦ и Ново-Стерлитамакская ТЭЦ), а также филиал ООО “ХайдельбергЦементРус”, ООО “Газпром газораспределение Уфа”.

Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) — аэротехногенное полиметаллическое загрязнение в сочетании с сернистым ангидридом. Основные загрязнители — полиметаллическая аэрозоль, сернистый ангидрид, оксид азота, оксид углерода, оксид меди, оксид цинка, соединения железа и др. Основной загрязнитель атмосферы города АО “Карабашмедь”.

Уфимский промышленный центр (УПЦ) — аэротехногенное нефтехимическое загрязнение.

Основными загрязнителями являются оксид углерода, бензапирен, оксид и диоксид азота, оксид и диоксид серы, взвешенные вещества и др. Основные предприятия, влияющие на экологическую ситуацию в промышленном центре, — нефтеперерабатывающие (“Башнефть-Уфанефтехим”, “Башнефть-Уфимский НПЗ”, “Башнефть-Новыйл”), химическая (ПАО “Уфаоргсинтез”), нефтедобывающая (ООО “Башнефть-добыча”), машиностроение и металлообработка (ОАО “Уфимское моторостроительное производственное объединение”), и др.

Учалинский горно-обогатительный комбинат (УГОК) — полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород медноколчеданной горнорудной промышленности. Основными загрязнителями являются газоаэрозольные и пылевые выбросы, в составе которых присутствуют тяжелые металлы (Cu, Zn, Hg, Fe, Mn и др.), сульфаты. Основное предприятие, относящееся к цветной металлургии, влияющее на экологическую ситуацию в промышленном центре, — АО “Учалинский горно-обогатительный комбинат”. К другим предприятиям, имеющим стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха, относятся: ООО “Завод Техноплекс”, ООО “Завод Николь-Пак”, МУП “Учалыводоканал”, ОАО “Учалинские тепловые сети”, филиал ООО “Газпром газораспределение Уфа”.

Кумертауский буроугольный разрез (КБР) — полиметаллическое загрязнение в условиях отвалов вскрышных пород буроугольного разреза. Основными загрязнителями являются пылевые выбросы, в составе которых присутствуют тяжелые металлы (Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Ca, Mn и др.), формальдегид, оксид углерода, диоксид азота, аммиак. Кроме отвалов вскрышных пород

горнорудной промышленности, предприятия АО “Свердловская энергогазовая компания” и Кумертауская ТЭЦ также влияют на экологическую ситуацию в промышленном центре.

На рис. 1 показаны схемы районов исследования и точки закладки пробных площадей в импактной зоне и в контроле, выделенные на основе годовой розы ветров.

В качестве объекта исследования выбрана сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) по следующим основаниям:

1. Район исследования входит в ареал естественного распространения сосны;

2. Сосна присутствует во всех промцентрах в условиях загрязнения и в контроле, включая отвалы горнорудной промышленности, где она образует как естественные, так и искусственные древостои;

3. Эколого-биологические свойства сосны выделяют ее как неприхотливый к климату и плодородию почвы вид, который быстро формирует сомкнутые древостои на непокрытых лесом площадях благодаря высокой энергии роста (Флора..., 1934; Тахтаджян, 1956). Эти свойства позволяют сосне успешно заселять отвалы горно-рудной промышленности после окончания отсыпки грунтов.

4. Хвоя сосны является удобным тест-объектом поскольку в течение нескольких лет жизни испытывает на себе стрессовые техногенные факторы круглый год.

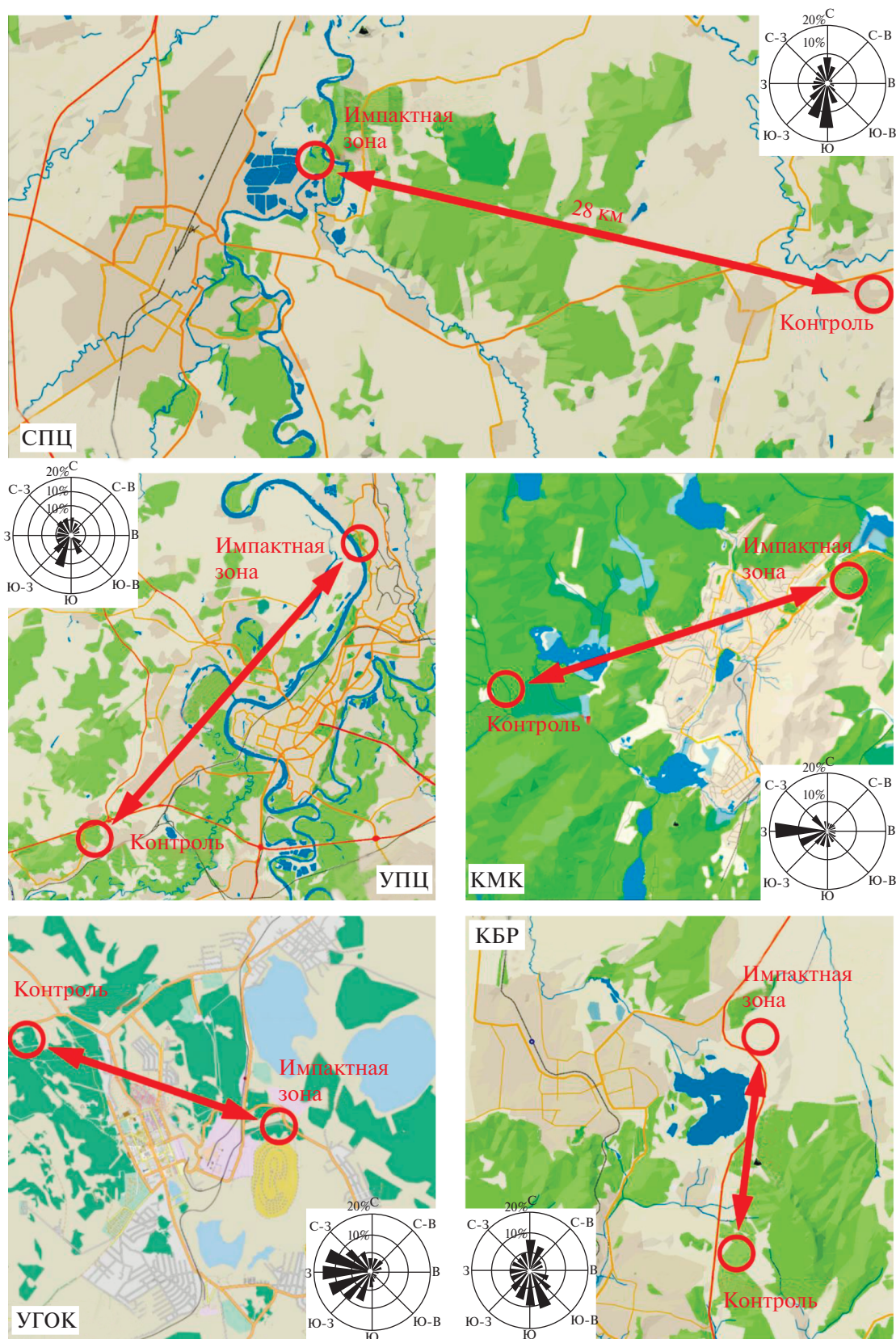
В табл. 1 отражены таксационные показатели древостоев на пробных площадях, из которых следует, что значительные различия по среднему возрасту, полноте и запасу древостоя, диаметру и высоте дерева между импактной зоной и контролем наблюдаются только в условиях отвалов

**Таблица 1.** Характеристика древостоев сосны обыкновенной в условиях загрязнения и контроля

Пром. центр	Местоположение, формула древостоя, ТУМ	А ср, лет	Д ср, см	Н ср, м	Полнота	Густота, шт/га	Запас, м <sup>3</sup> /га
КМК	Загрязнение, 9С1Б, С2	78	24	23	0.9	848	465.488
	Контроль, 8С2Б, С2	71	22	25	0.8	1008	573.296
УПЦ	Загрязнение, 7С3Кл ед.В, С2	63	22	26	0.8	1280	547.808
	Контроль, 8С2Кл ед.В, С2	76	22	25	0.8	1360	670.64
СПЦ	Загрязнение, 10С, В2	62	20	30	0.7	1296	589.36
	Контроль, 10С, В2	38	20	25	0.9	1248	466.304
УГОК	Загрязнение, 5С5Б, А2	35	12	14	0.6	1328	369.76
	Контроль, 10С+Б, D2	55	24	28	0.9	1253	826.3
КБР	Загрязнение, 7С3Б, А2	28	14	18	0.8	1440	247.78
	Контроль, 10С, D2	47	20	25	0.7	1056	529.888

Примечание: ТУМ — тип условия местопроизрастания, А ср, Д ср, Н ср — средние возраст, диаметр и высота древостоя.





**Рис. 1.** Схема районов исследования с выделением пробных площадей в импактной зоне и в контроле (использованы yandex-карты) с учетом годовой розы ветров (<https://ru.meteocast.in>).



УГОК и КБР. Данные различия в УГОК обусловлены окончанием отсыпки грунтов на отвалах в конце прошлого столетия, что определяет значительную разницу между началом естественного зарастания отвалов и посадкой лесных культур в контроле. В КБР экспериментальные посадки сосны на отвалах относятся к 1982–1986 гг., что также значительно позже посадок лесных культур в контроле. В КМК, УПЦ и СПЦ древостои близки по таксационным характеристикам, однако следует отметить, что запас древостоя в условиях загрязнения во всех пяти промцентрах снижается относительно контроля практически на 100 м<sup>3</sup>/га.

Метод исследования — спектрофотометрический (Методы..., 1978; Чупахина, 2000). Образцы хвои текущего года генерации отбирались в конце июля (полностью закончившая формирование хвоя, испытывавшая на себе все стрессовые условия за вегетационный период) непосредственно в полевых условиях с нижней части кроны 10 модельных деревьев в период времени с 11:00 до 12:00 (пиковое содержание пигментов). Для получения усредненного образца из центральной части хвои отбирались высечки, которые затем измельчались и тщательно перемешивались. Из усредненного образца отбиралось десять навесок по 0.1 г с использованием высокоточных электронных весов Diamond (точность 0.001 г). Эти навески заливали 10 мл 96%-го этилового спирта и помещали в полное затемнение на 12 ч экстракции для исключения разрушения пигментов. С использованием спектрофотометра КФК-5М (Россия) определялось содержание хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов. Содержание пигментов в хвое рассчитывали в два этапа по формулам:

I этап — расчет концентрации пигментов хвои в спиртовом растворе (мг/л):

$$C_{\text{Хл } a} = 13.7 \times D_{665} - 5.76 \times D_{649};$$

$$C_{\text{Хл } b} = 25.8 \times D_{649} - 7.6 \times D_{665};$$

$\text{Скар} = 4.6957 \times D_{440.5} - 0.268 \times (C_{\text{Хл } a} + C_{\text{Хл } b})$ ; где  $C_{\text{Хл } a}$ ,  $C_{\text{Хл } b}$ ,  $\text{Скар}$  — концентрация хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов;

$D_{665}$ ,  $D_{649}$  и  $D_{440.5}$  — показатели оптической плотности спиртового раствора при соответствующих длинах волн (665, 649 и 440.5 нм).

II этап — расчет количества пигментов в хвое (мг/г сырой массы):

$$A = \frac{V \cdot C}{P \cdot 1000}$$

где  $V$  — объем спиртовой вытяжки (10 мл);

$C$  — концентрация пигментов в спиртовом растворе (мг/л);

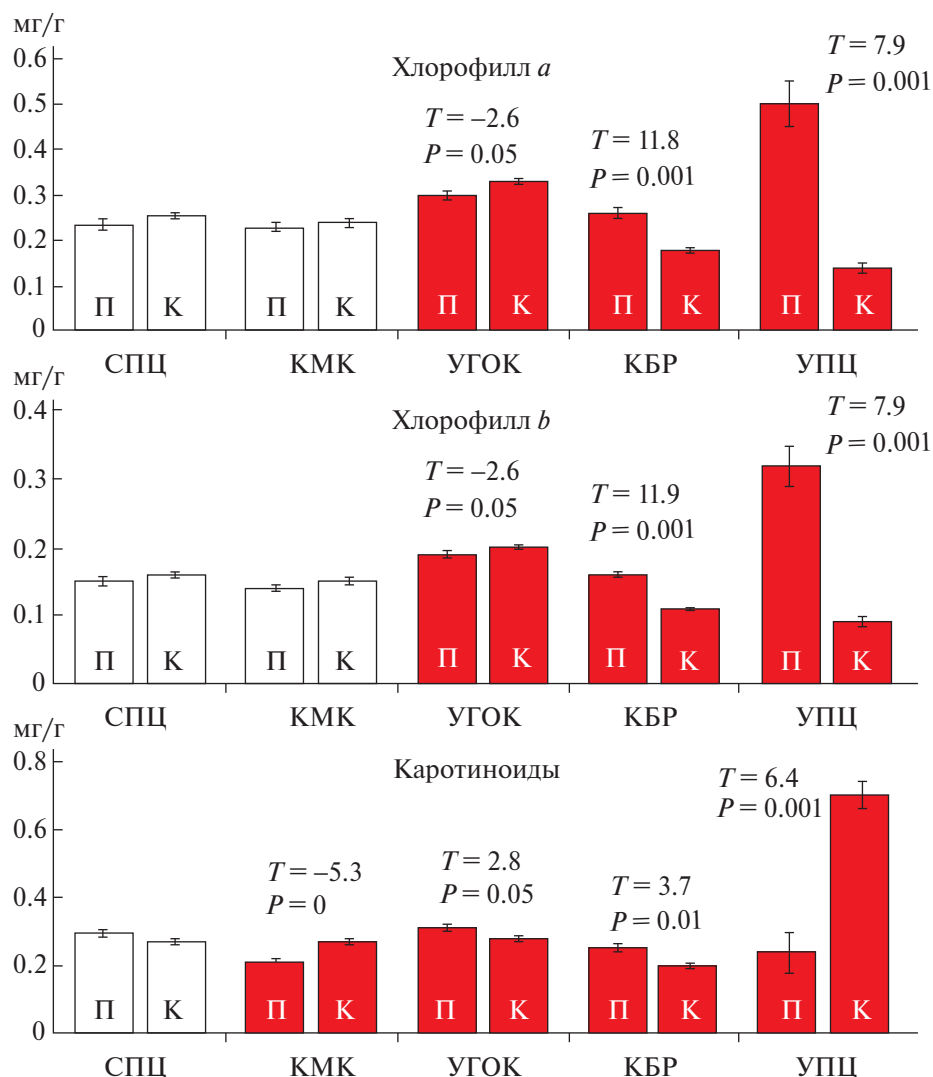
$P$  — навеска растительного материала (0.1 г).

На основании полученных данных по пигментам вычислены соотношения  $\text{Хл } a/\text{Хл } b$  и  $(\text{Хл } a + \text{Хл } b)/\text{Каротиноиды}$ . Для определения достоверности различий между загрязнением и контролем проведен  $t$ -тест Стьюдента. При определении адаптивных реакций использована классификация и методика, предложенная Р.В. Уразгильдиным (Уразгильдин, 2021). В дендрэкологических исследованиях к стрессовым адаптивным реакциям пигментного комплекса растений в условиях техногенного загрязнения относятся уменьшение содержания  $\text{Хл } a$  и  $\text{Хл } b$  и компенсаторное увеличение содержания каротиноидов, а также уменьшение соотношений  $\text{Хл } a/\text{Хл } b$  (компенсаторное увеличение доли  $\text{Хл } b$  на фоне снижения доли  $\text{Хл } a$ ) и  $(\text{Хл } a + \text{Хл } b)/\text{Каротиноиды}$  (компенсаторное увеличение доли каротиноидов на фоне снижения доли суммы хлорофиллов). Такие адаптивные реакции, значительные и статистически достоверные, определяли как “стрессовые”, противоположные — как “толерантные”, а выраженные незначительно или статистически недостоверно — как “умеренно-стрессовые” и “умеренно-толерантные”. При отсутствии изменений адаптивные реакции определяли как “нейтральные”. Статистическая обработка полученных данных проводилась общепринятыми в биологических науках методами с применением пакетов прикладных программ Microsoft Excel 2010, Statistica 6.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования выявили следующие закономерности (рис. 2).

Оценка изменения содержания  $\text{Хл } a$  и  $\text{Хл } b$  выявила одинаковые адаптивные реакции для зеленых пигментов во всех исследованных промышленных центрах: в условиях загрязнения отмечается значительное и достоверное увеличение их содержания в УПЦ и незначительное, но достоверное КБР; в условиях УГОК наблюдается обратная реакция — незначительное, но достоверное снижение их содержания относительно контроля. В СПЦ и КМК различия между загрязнением и контролем отсутствуют. Адаптивные реакции каротиноидов отличаются от хлорофиллов: при сравнении с контролем показано незначительное, но достоверное увеличение их содержания в УГОК и КБР, однако в УПЦ и КМК выявлена противоположная реакция — снижение их содержания, значительное и достоверное в первом случае и незначительное, но достоверное во втором. В СПЦ различия между загрязнением и контролем отсутствуют.



**Рис. 2.** Пигментный комплекс хвои сосны обыкновенной в условиях промышленной зоны и контроля пяти промышленных центров. Условные обозначения: К — контроль, П — промышленный центр, ■ — значения, достоверно различающиеся по критерию Стьюдента, *T* — критерий Стьюдента, *p* — уровень значимости.

Анализ соотношения пигментов Хл *a*/Хл *b* и (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды показал следующие результаты (табл. 2).

Касательно соотношения Хл *a*/Хл *b* в СПЦ, КМК, КБР и УПЦ по отношению к контролю изменений не наблюдается, что свидетельствует о стабильности хлорофиллового комплекса и тесной взаимосвязи между этими пигментами, но в УГОК наблюдается незначительное снижение этого показателя относительно контроля. Во всех промцентрах содержание Хл *a* незначительно превалирует над содержанием Хл *b*, что свидетельствует о его устойчивости к разрушению во всех типах загрязнения. Что касается соотношения (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды строгие закономерности отсутствуют — наблюдается

увеличение этого показателя относительно контроля в УПЦ, КМК и КБР (значительно в первом случае и незначительно во втором и третьем) и незначительное уменьшение в СПЦ и УГОК. Следовательно, полиметаллическое аэротехногенное загрязнение и полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных отвалов создают негативные стрессовые условия для пигментного комплекса хвои сосны, так как наблюдается снижение доли хлорофиллового комплекса на фоне компенсаторного увеличения доли каротиноидов, в то время как в условиях нефтехимического загрязнения, полиметаллического загрязнения с примесью сернистого ангидрида и полиметаллического загрязнения в условиях бурогоугольных отвалов

**Таблица 2.** Соотношения пигментов в хвое сосны обыкновенной в условиях импактной зоны и контроля пяти промышленных центров

Промцентр	Хл <i>a</i> /Хл <i>b</i>		(Хл <i>a</i> + Хл <i>b</i> )/Каротиноиды	
	промзона	контроль	промзона	контроль
СПЦ	1.57	1.59	1.33	1.54
КМК	1.64	1.6	1.76	1.44
УГОК	1.58	1.65	1.58	1.89
КБР	1.63	1.64	1.68	1.45
УПЦ	1.56	1.56	3.42	0.33

доля хлорофиллового комплекса, напротив, возрастает над долей каротиноидов. Оценка различий между типами загрязнения показывает, что в УПЦ доля хлорофиллового комплекса в 1.9–2.5 раза завышена по сравнению с другими промцентрами за счет высокого содержания Хл *a* и низкого содержания каротиноидов.

На основании полученных результатов и принятых методических подходов определены адаптивные реакции пигментов, их соотношений и всего комплекса в целом (табл. 3):

– в СПЦ изменения в содержании всех пигментов и в соотношении Хл *a*/Хл *b* отсутствуют, что определяется “нейтральной” адаптивной реакцией на полиметаллическое аэротехногенное загрязнение. Соотношение (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды незначительно снижается, что определяется “умеренно-стрессовой” адаптивной реакцией. В целом адаптивная реакция пигментного комплекса характеризуется как “нейтральная”;

– в КМК изменения в содержании Хл *a* и Хл *b* и в соотношении Хл *a*/Хл *b* отсутствуют, что определяется “нейтральной” адаптивной реакцией на полиметаллическое загрязнение с примесью сернистого ангидрида. Содержание каротиноидов незначительно уменьшается, а соотношение (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды незначительно увеличивается, что определяется “умеренно-толерантной” адаптивной реакцией. В целом адаптивная реакция пигментного комплекса характеризуется как “нейтральная”;

– в УГОК проявляется “умеренно-стрессовая” адаптивная реакция на полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных отвалов по всем параметрам пигментного комплекса: незначительное увеличение содержания каротиноидов и незначительное уменьшение содержания Хл *a* и Хл *b* и соотношений Хл *a*/Хл *b* и (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды;

– в КБР изменения в соотношении Хл *a*/Хл *b* отсутствуют, что определяется “нейтральной” адаптивной реакцией на полиметаллическое загрязнение в условиях бурогольных отвалов.

Содержание каротиноидов, Хл *a* и Хл *b* и соотношение (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды незначительно увеличиваются, что определяется “умеренно-стрессовой” адаптивной реакцией для каротиноидов, но “умеренно-толерантной” адаптивной реакцией для остальных перечисленных параметров. В целом адаптивная реакция пигментного комплекса характеризуется как “умеренно-толерантная”;

– в УПЦ изменения в соотношении Хл *a*/Хл *b* отсутствуют, что определяется “нейтральной” адаптивной реакцией на нефтехимическое загрязнение. Содержание Хл *a* и Хл *b* и соотношения (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды значительно увеличиваются, а содержание каротиноидов значительно снижается, что определяется “толерантной” адаптивной реакцией по всем перечисленным параметрам. В целом адаптивная реакция пигментного комплекса характеризуется как “толерантная”.

Таким образом, за исключением УГОК, в остальных промышленных центрах у сосны наблюдается дисбаланс пигментного комплекса хвои, который выражается в отсутствии согласованности между адаптивными реакциями пигментов и соотношений пигментов и проявляется в разной степени. Несмотря на дисбаланс, в каждом промышленном центре четко выделяется общая адаптивная реакция для всего пигментного комплекса: в СПЦ и КМК – “нейтральная”, в КБР – “умеренно-толерантная”, в УПЦ – “толерантная”. В УГОК все адаптивные реакции являются “умеренно-стрессовыми”, соответственно и общая адаптивная реакция для всего пигментного комплекса “умеренно-стрессовая”. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе промышленные центры образуют ряд возрастания: СПЦ и УПЦ → КМК → КБР.

За исключением УГОК, во всех промышленных центрах, как в условиях загрязнения, так и в контроле, пигментный комплекс хвои сосны характеризуется стабильностью в соотношении хлорофиллов, причем Хл *a* всегда превалирует над Хл *b*, а в УГОК наблюдается незначительное



Таблица 3. Адаптивные реакции пигментов и их соотношений в промцентрах относительно контроля

Промцентр	Хл <i>a</i>	Хл <i>b</i>	Каротиноиды	Хл <i>a</i> /Хл <i>b</i>	(Хл <i>a</i> +Хл <i>b</i> )/Кар.
СПЦ	(-) Н	(-) Н	(-) Н	(-) Н	↓ УС
КМК	(-) Н	(-) Н	↓ УТ	(-) Н	↑ УТ
УГОК	↓ УС	↓ УС	↑ УС	↓ УС	↓ УС
КБР	↑ УТ	↑ УТ	↑ УС	(-) Н	↑ УТ
УПЦ	↑↑ Т	↑↑ Т	↓↓ Т	(-) Н	↑↑ Т

Примечание: ↑↑ — значительное и достоверное увеличение, ↑ — незначительное или недостоверное увеличение, (–) — изменения отсутствуют, ↓ — незначительное или недостоверное уменьшение, ↓↓ — значительное и достоверное уменьшение, С — стрессовая адаптивная реакция, УС — умеренно-стрессовая, Н — нейтральная, УТ — умеренно-толерантная, Т — толерантная.

снижение доли Хл *a* при повышении доли Хл *b* относительно контроля. Данное соотношение выделяет загрязнение в условиях медно-колчеданных отвалов как более значимый стрессовый фактор для сосны по сравнению с остальными типами загрязнения. Соотношение хлорофиллов с каротиноидами показывает отсутствие стабильности во всех промышленных центрах: при сравнении с контролем в СПЦ и УГОК выявлено уменьшение доли суммы хлорофиллов на фоне увеличения доли каротиноидов, а в КМК, КБР и УПЦ наблюдается обратная картина. Данное соотношение выделяет полиметаллическое аэротехногенное загрязнение и полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных отвалов как более значимые стрессовые факторы для сосны по сравнению с остальными типами загрязнения.

Анализ публикаций за последние 20 лет, посвященных исследованиям пигментного комплекса древесных растений в условиях техногенеза, позволяет сделать несколько обобщений. Во-первых, крайне малочисленны исследования в условиях отвалов горнорудной промышленности. В условиях Кедровского угольного разреза показано значительное подавление содержания хлорофиллов в листьях березы повислой, растущей на породном отвале “Южный”, по сравнению с контролем, но снижение концентрации каротиноидов было менее значимым. На самом породном отвале выявлена специфическая особенность: значительное ингибирование хлорофилла *b* относительно хлорофилла *a* (в 3 раза) и значительное ингибирование каротиноидов (в 2.5 раза) относительно хлорофиллов (Цандекова, 2016). В этих же условиях аналогичные результаты получены по тополю дрожащему: выявлено ингибирование содержания хлорофилла *b* (значительное) и хлорофилла *a* и каротиноидов (незначительное), увеличение Хл *a*/Хл *b* и снижение (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды (Загурская, 2017). В условиях техногенного загрязнения

алмазодобывающей промышленности (месторождение им. М.В. Ломоносова) Архангельской обл. в хвое сосны обыкновенной выявлено незначительное превышение относительно контрольных значений в содержании хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов (Елисеева, 2022). Результаты наших исследований в условиях КБР хорошо соотносятся с реакциями в условиях загрязнения отходами алмазодобывающей промышленности, но значительно разнятся с приведенными данными на породном отвале “Южный”, некоторое сходство можно наблюдать в отношении подавления содержания хлорофиллов в УГОК и подавления содержания каротиноидов в КБР, однако следует учитывать значительные различия в составе загрязненных почвогрунтов, которые, в отличие от УГОК и КБР, на отвале “Южный” сложены аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Некоторой аналогией локального загрязнения корневых систем можно считать исследование пигментного комплекса растений в условиях загрязнения р. Митхи в г. Мумбаи (Индия). Здесь растения, у которых наблюдается значительное снижение концентрации всех пигментов при усилении загрязнения воды, отнесены к индикаторным видам (клещевина, альтернантера, фикус щетинистоволосистый), а виды с противоположной реакцией — к толерантным растениям (авиценния, sida). Кроме того, выявлены виды растений, у которых четких тенденций при усилении загрязнения воды не обнаружено (тамаринд, сальвадора, фикус кистевидный) (More, Chaubal, 2017). Исходя из этой классификации, в наших исследованиях в условиях УГОК сосна относится к индикаторным, в КБР и УПЦ — к толерантным видам, а в СПЦ и КМК четкие тенденции отсутствуют, однако, необходимо отметить, что в указанной публикации авторы рассматривают подавление всех пигментов как стрессовую реакцию, а возрастание содержания всех пигментов — как толерантную, в то время как качественная оценка

реакции хлорофиллового комплекса отличается от каротиноидов, также как и качественная оценка реакций между хлорофиллами.

Во-вторых, авторы фактически делятся на два лагеря. Одни утверждают, что техногенное загрязнение оказывает только негативное воздействие на пигментный комплекс ассимиляционного аппарата древесных растений. К примеру, Новополоцким нефтеперерабатывающим комбинатом Республики Беларусь ежегодно выбрасывается в атмосферу до 150 тыс. т загрязняющих веществ ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , CO и летучие органические соединения), что приводит к подавлению на 11% хлорофилла *b*, на 19% хлорофилла *a* и на 24% каротиноидов в хвое сосны обыкновенной. Соотношение хлорофиллов указывает на значительное подавление доли Хл *a* при росте доли Хл *b*, а соотношение хлорофиллов с каротиноидами отражает подавление доли каротиноидов при росте доли хлорофиллов (Сергейчик, 2015). В условиях промышленного г. Ярославль установлено, что усиление атмосферного загрязнения снижает в листьях березы повислой, липы сердцевидной и тополя черного содержание хлорофиллов, но увеличивает содержание каротиноидов (Маракаев и др., 2006). Техногенное загрязнение атмосферы в г. Арзамас обуславливает ингибирование хлорофиллов у липы, тополя и ивы, причем Хл *a* подавляется значительно больше, чем Хл *b*, в то время как содержание каротиноидов, напротив, возрастает (Rostunov et al., 2017). В городских насаждениях г. Саранск отмечено снижение содержания хлорофилла *a* на 21% (ТЭЦ 2) и на 38% (молочный комбинат) в листьях клена остролистного относительно контроля, каротиноидов на 34% и 69% соответственно, а хлорофилла *b* на 77% на обоих участках (Шаркаева, Федюшкина, 2018). В районе воздействия Уфимского промышленного центра выявлено, что у березы повислой нефтехимическое загрязнение стимулирует увеличение концентрации всех пигментов, а у других видов наблюдаются видоспецифические реакции: у липы мелколистной — возрастание хлорофиллов, но снижение каротиноидов; у дуба черешчатого — снижение хлорофиллов, но возрастание каротиноидов. У дуба и березы соотношение Хл *a*/Хл *b* показывает отсутствие различий между загрязнением и контролем в течение всего вегетационного периода, в то время как у липы в промзоне наблюдается значительное подавление доли Хл *b* при росте доли Хл *a*. Выявлено снижение доли хлорофиллов при росте доли каротиноидов у всех трех видов (Уразгильдин и др., 2016). Загрязнение от предприятий нефтехимии, металлургии и теплоэнергетики Иркутско-Черемховской промзоны вызывает нарушения в пигментном

комплексе хвои сосны (подавление концентрации всех пигментов) и перестройку в долевом составе пигментов — возрастание соотношений Хл *a*/Хл *b* и (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды относительно контрольных значений (Mikhailova et al., 2017). Исследования сосны обыкновенной, проведенные на территории промышленных центров Байкальского региона, (Иркутский с преобладанием диоксида серы, аэрозоли свинца и других тяжелых металлов; Шелеховский с высоким содержанием фторидов и полициклических ароматических углеводородов; Усольско-Ангарский с выбросами диоксида серы и соединений ртути) показали ингибирование в хвое Хл *a* на 11–23%, Хл *b* на 27–40%, каротиноидов на 33–42% и перераспределение долей пигментов — увеличение соотношения хлорофиллов на 35% и соотношения зеленых пигментов к желтым на 40% (Калугина и др., 2018). Вблизи Иркутского алюминиевого завода в хвое лиственницы сибирской наблюдается повышение содержания F в 2.1 раза, S в 1.9 раз, легких металлов, тяжелых металлов и металлоидов, биогенных макроэлементов в 2.4–5.3 раза относительно контроля, что приводит к существенному подавлению хлорофиллов *a* (на 26%), *b* (на 36%) и каротиноидов (на 25%) и нарушению работы фотосистемы II. Показана перестройка долевого участия пигментов — возрастание Хл *a*/Хл *b* и снижение (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды. Между выявленными нарушениями и содержанием в хвое S, F и некоторых тяжелых металлов обнаружены сильные корреляционные связи. (Афанасьева и др., 2022). В г. Уссурийск оценка состояния пигментного комплекса хвои сосны обыкновенной относительно контроля в условиях слабой (пригород), средней (промышленные предприятия) и сильной (основная транспортная магистраль города) зон загрязнения показала ступенчатое снижение содержания всех пигментов, в большей степени Хл *b* (в 1.8 раз), в меньшей — Хл *a* (в 1.3 раз) и каротиноидов (в 1.2 раза), а также неоднозначное изменение долевого участия пигментов — возрастание Хл *a*/Хл *b* с 2.09 до 2.75 и снижение Хл *a* + Хл *b*/Каротиноиды с 4.86 до 3.81 (Титова, 2013). Техногенное загрязнение в промышленной зоне Паневник (Польша) подавляет содержание хлорофиллов в однолетней хвое сосны веймутовой и сосны черной, но у псевдотсуги и сосны обыкновенной, напротив, стимулирует их увеличение, а в двухлетней хвое выявлено увеличение содержания всех пигментов у всех четырех исследованных видов (Gowin, Goral, 1977).

Большой объем публикаций содержит сведения об отрицательном воздействии автотранспорта на пигменты древесных растений. Так, выбросы городского автотранспорта

г. Барыш снижают содержание пигментов у березы относительно контроля, причем Хл *b* и сумма хлорофиллов снижаются гораздо больше, чем Хл *a* и каротиноиды (Баландакин, 2014). Показано (Ангальт, Калякина, 2017) значительное снижение суммы хлорофиллов в хвое сосны в придорожных посадках г. Оренбург относительно контроля. Автотранспортное загрязнение г. Красноярск снижает содержание Хл *a* до 3 раз, Хл *b* до 3.5 раз, каротиноидов до 3.6 раз в хвое ели по сравнению с контролем, причем в условиях загрязнения содержание Хл *a* значительно превалирует над Хл *b* (Донцов и др., 2016). На наиболее загрязненном участке выбросами городского автотранспорта г. Кемерово при отсутствии изменений в содержании каротиноидов относительно контроля наблюдается значительное подавление содержания Хл *b* (на 20–30%) и менее значимое – Хл *a* (до 10%) в листьях рябины сибирской и березы повислой, однако на менее загрязненном участке наблюдается не только большее подавление хлорофиллов относительно контроля (до 25–40% и до 15% соответственно), но и снижение содержания каротиноидов (на 5–10%) (Цандекова, Неверова, 2010). В г. Курск по мере приближения к автодороге в листьях березы повислой выявлено значительное и поступательное уменьшение содержания Хл *a* (в 3 раза) и каротиноидов (в 2.5 раза). В отношении Хл *b* четкие закономерности отсутствуют: по мере отдаления от дороги его содержание меняется скачкообразно и различия между участками с сильным и слабым загрязнением не существенны. Однако в непосредственной близости от дороги содержание Хл *b* в 5 раз превышает содержание Хл *a* (Белова и др., 2023). В г. Барнаул автотранспортное загрязнение существенно угнетает пигментный комплекс в листьях березы относительно контроля: содержание Хл *a* достоверно ниже на 58–64%, Хл *b* – на 22–36%, каротиноидов – на 38–48%, а соотношение Хл *a*/Хл *b* – на 38–55%, что свидетельствует о значительно большем снижении доли Хл *a* (Соколова, 2020). В г. Самбалпур (Индия) выявлено высокое загрязнение твердыми пылевыми частицами от автотранспорта и находящихся вблизи автостреды двух заводов по переработке риса, которое (загрязнение) характеризуется “сильными” корреляционными отношениями с изменениями концентраций пигментов в листьях придорожных растений. Показано, что у всех растений содержание Хл *b* и каротиноидов более чем в два раза снижено по сравнению с Хл *a* (Prusty et al., 2005). Такие же закономерности выявлены для придорожных деревьев в условиях высокого автотранспортного

загрязнения в г. Варанаси (Индия) (Prajapati, Tripathi, 2008).

Следует подчеркнуть, что из рассмотренных выше публикаций, отмечающих отрицательное воздействие промышленности и автотранспорта на пигменты древесных растений, только в пяти (Маракаев и др., 2006; Ангальт, Калякина, 2017; Соколова, 2020; Белова и др., 2023; Rostunov et al., 2017) приводятся примеры строго стрессовых адаптивных реакций пигментного комплекса на промышленное и автотранспортное загрязнение, а в остальных наряду со стрессовыми показаны толерантные реакции, хотя авторы декларируют только негативное влияние загрязнения на исследованные объекты.

Другие авторы приводят результаты, в которых показывают, что есть и положительное влияние промышленного загрязнения на пигментный комплекс. К примеру, в г. Калининград в листьях рябины, липы, клена и ели выявлена обратная зависимость между хлорофиллами и каротиноидами, а усиление загрязнения атмосферы сопровождается значительным увеличением концентраций хлорофиллов, антоцианов и каротиноидов (Майдебур, 2006). В условиях загрязнения лесопромышленного комплекса (г. Сыктывкар) показано увеличение содержания хлорофиллов и соотношения Хл *a*/Хл *b* в хвое сосны и ели. Различия между сосной и елью проявляются в отношении каротиноидов (их содержание возрастает в хвое сосны, но снижается у ели) и соотношения (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды (у сосны снижается, а у ели возрастает). На примере сосны показано, что снижение объемов выбросов через 25 лет значительно усиливает наблюдаемые эффекты (Тужилкина, 2009, 2021). В условиях техногенного загрязнения г. Красноярск отмечен рост содержания всех пигментов в листьях березы повислой. В загрязненных условиях концентрация каротиноидов и хлорофилла *b* поддерживается приблизительно на одинаковом уровне, в то время как содержание хлорофилла *a* выше их в три раза (Стасова и др., 2023). Нефтехимическое загрязнение промышленного центра г. Махшахр (Иран) стимулирует значительное возрастание в листьях каллистемона содержания всех пигментов (Seyyednejad et al., 2009). Показана тесная корреляция между ростом концентрации диоксида серы в промышленной зоне Южного Дурбанского бассейна (Южная Африка) и увеличением содержания хлорофилла в листьях брахилена (Areington et al., 2017).

Также приводятся результаты положительного влияния автотранспортного загрязнения на пигментный комплекс. В г. Ижевск (Удмуртская Республика) в примагистральных посадках



центральной городской автодороги у ели колючей относительно контроля выявлено увеличение содержания Хл *a* в 1.2–1.5 раза и каротиноидов в 1.1–1.6 раза при отсутствии изменений в содержании Хл *b* (Бухарина, Пашкова, 2015). В магистральных посадках г. Красноярск в хвое елей сибирской и колючей выявлен рост содержания хлорофилла *a* и каротиноидов у обоих видов, но снижение концентрации хлорофилла *b*. Отношение хлорофиллов (*a/b*) повышается за счет снижения концентрации хлорофилла *b*, а снижение соотношения Хл (*a+b*)/Каротиноиды происходит за счет усиления синтеза каротиноидов (Суслина и др., 2021). В транспортной зоне г. Улан-Удэ (Республика Бурятия) выявлено повышенное содержание S (в 1.3–2.0 раза) и тяжелых металлов (Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co, Cd – в 1.4–7.7 раза) в хвое лиственницы сибирской, что сопровождается существенным ростом суммы пигментов (в 1.2–1.7 раза), из которой (суммы) доля Хл *a* подвержена значительно меньшим изменениям по сравнению с Хл *b* и каротиноидами, концентрации которых увеличиваются в 2.0–2.2 раза (Афанасьева, 2018).

Из рассмотренных публикаций положительного воздействия промышленности и автотранспорта на пигменты древесных растений только в двух (Стасова и др., 2023; Areington et al., 2017) приводятся примеры строго толерантных адаптивных реакций пигментного комплекса на промышленное загрязнение, а в остальных наряду с толерантными показаны стрессовые реакции, хотя авторы декларируют только положительное влияние загрязнения на исследованные объекты.

Крайне малочисленны исследования, в которых авторы заявляют об отсутствии строгих закономерностей в выявленных реакциях пигментного комплекса. Так, показано отсутствие строгих закономерностей в пигментном комплексе березы повислой, клена остролистного, липы мелколистной, дуба черешчатого и сосны обыкновенной в условиях загрязнения твердыми и газообразными ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) веществами в районе Красносельского цементного завода (Республика Беларусь): по мере удаления от источника загрязнения наблюдаются перепады в содержании пигментов и соотношений пигментов, не имеющие единого четкого направления (Николайчук, Вашкевич, 2019). Выбросы кислотообразующих соединений серы от целлюлозно-бумажных комбинатов и теплоэлектроцентралей в низовье бассейна Северной Двины (г. Архангельск) не выявили существенных отклонений в содержании хлорофиллов и каротиноидов в хвое текущего года генерации в сосняках сфагновых и в сосняках

и ельниках черничных свежих, однако у подроста ели установлено существенное увеличение содержания хлорофилла *b* (Тарханов, Бирюков, 2014). В г. Ижевск (Удмуртская Республика) в примастральных посадках центральной городской автодороги у ели европейской отсутствуют четко выраженные закономерности при сравнении с контролем – в течение вегетации содержание пигментов либо возрастает относительно контроля, либо снижается без явных тенденций, равно как отсутствуют поступательные изменения в вегетационной динамике (Бухарина, Пашкова, 2015). Оценка влияния взвешенных твердых частиц и озона в условиях транспортного и промышленного загрязнений г. Варанаси (Индия) показала отсутствие каких-либо закономерностей в изменении содержания хлорофиллов, общего хлорофилла и каротиноидов, а также в соотношениях Хл *a*/Хл *b* и (Хл *a* + Хл *b*)/Каротиноиды у тринадцати видов древесных растений (Mukherjee, Agrawal, 2018).

Во всех случаях авторы делают заключение, что выявленные ими реакции являются адаптивными, однако их качественная оценка, т.е. в какую сторону направлена адаптация, остается ими не раскрытой. Также следует отметить, что подавляющее большинство исследователей изучают только один источник промышленного загрязнения, равно как отсутствуют работы, выполненные на одном древесном виде по одной и той же стандартной методике, но в условиях, характеризующихся разными комплексами загрязнителей.

Таким образом, во всех рассмотренных публикациях показана та или иная степень и направленность отклонений в пигментном комплексе хвои и листьев древесных видов (либо отсутствие отклонений) вне зависимости от типа промышленного загрязнения. Результаты наших исследований согласуются с этими выводами и показывают, что за исключением УГОК все изученные типы загрязнения вызывают дисбаланс пигментного комплекса хвои сосны, который выражается в отсутствии согласованности между адаптивными реакциями пигментов и соотношений пигментов, причем в КБР адаптивные реакции имеют противоположные направления – наблюдаются одновременно неспецифические и специфические реакции. Все наблюдаемые примеры относительно независимости адаптивных реакций свидетельствуют о пластичности пигментного комплекса сосны к техногенным стрессовым факторам. Оценка адаптивных реакций показала, что загрязнения в УГОК и СПЦ являются более значимыми стрессовым фактором для пигментного комплекса хвои сосны

по сравнению с остальными типами загрязнения. Это позволяет рекомендовать воздержаться от использования сосны обыкновенной для создания защитных насаждений в тех условиях загрязнения, где у нее проявляются стрессовые адаптивные реакции, и наоборот, стоит рассматривать данную породу для создания буферных зон в условиях, где проявляются толерантные адаптивные реакции.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые дана качественная оценка адаптивных реакций пигментного комплекса хвои сосны обыкновенной при произрастании в условиях загрязнения пяти промышленных центров Южно-Уральского региона и их сравнительная характеристика. Показана согласованность между адаптивными реакциями пигментов и соотношений пигментов при произрастании в условиях УГОК и отсутствие согласованности в СПЦ, КМК, КБР и УПЦ. Несмотря на дисбаланс в каждом промышленном центре четко выделяется общая адаптивная реакция для всего пигментного комплекса: при аэротехногенном полиметаллическом загрязнении и при аэротехногенном полиметаллическом загрязнении в сочетании с сернистым ангидридом пигментный комплекс характеризуется “нейтральной” адаптивной реакцией, в условиях отвалов вскрышных пород бурого угольной горнорудной промышленности — “умеренно-толерантной”, при нефтехимическом загрязнении — “толерантной”, в условиях отвалов вскрышных пород медно-колчеданной горнорудной промышленности — “умеренно-стрессовой”. По степени увеличения дисбаланса в пигментном комплексе промышленные центры образуют ряд возрастания: СПЦ и УПЦ → КМК → КБР. За исключением УГОК, во всех промышленных центрах соотношение  $Xл\ a/Xл\ b$  демонстрирует отсутствие различий между загрязнением и контролем, что характеризует устойчивый баланс хлорофиллов, но в условиях медно-колчеданных отвалов наблюдается снижение доли  $Xл\ a$  при повышении доли  $Xл\ b$ , что выделяет этот тип загрязнения как более значимый для сосны стрессовый фактор. Соотношение  $(Xл\ a + Xл\ b)/Каротиноиды$  характеризуется отсутствием баланса во всех типах загрязнения, при этом полиметаллическое аэротехногенное загрязнение и полиметаллическое загрязнение в условиях медно-колчеданных отвалов выделяются как более значимые стрессовые факторы для сосны.

Пигментный комплекс является одной из важных составляющих в системе адаптаций растений наряду с другими иерархическими

уровнями их организации, особенно у древесных растений вследствие большего количества иерархических уровней по сравнению с травянистыми и кустарниковыми растениями. Поэтому результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать использование сосны для создания защитных насаждений в тех условиях загрязнения, где у нее проявляются толерантные адаптивные реакции и высокий адаптивный потенциал и отказаться от ее использования в условиях, где проявляются стрессовые адаптивные реакции и низкий адаптивный потенциал. Качественная оценка адаптивных реакций лесообразователей в техногенных условиях в других регионах позволит определить реализацию адаптивного потенциала того или иного древесного вида в зависимости от вида загрязнения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использована приборная база Центра коллективного пользования “Агидель” УФИЦ РАН.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00570-24-01 по теме № 123020700152-5 “Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов”.

### FUNDING

The work was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00570-24-01 on the topic No. 123020700152-5 “Sustainability of forest-forming tree species and ecological and biological adaptation, taking into account the anthropogenic transformation of landscape and natural complexes”.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ангальт Е.М., Калякина Р.Г. Анализ состояния сосны обыкновенной в условиях придорожных полос

- г. Оренбурга // Изв. Оренбургского гос. аграрн. ун-та. 2017. № 4 (66). С. 105–108.
- Афанасьева Л.В. Физиолого-биохимическая адаптация лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb. к условиям городской среды // Сиб. лесн. журн. 2018. № 3. С. 21–29.  
<https://doi.org/10.15372/SJFS20180303>
- Афанасьева Л.В., Калугина О.В., Оскорбина М.В., Харнухаева Т.М. Особенности элементного состава и пигментного комплекса хвои лиственницы сибирской при воздействии выбросов Иркутского алюминиевого завода // Сиб. лесн. журн. 2022. № 1. С. 20–32.  
<https://doi.org/10.15372/SJFS20220102>
- Баландайкин М.Э. Динамика и различия в концентрации основных фотосинтетических пигментов листьев березы, произрастающей в неоднородных условиях // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 159–64.  
<https://doi.org/10.14258/jcprtm.1401159>
- Белова Т.А., Гончарова Е.Е., Протасова М.В. Оценка пигментного состава березы повислой под влиянием антропогенной нагрузки // Auditorium. Электронный науч. журн. Курского ГУ. 2023. № 1 (37).
- Бухарина И.Л., Пашкова А.С. Особенности динамики фотосинтетических пигментов у хвойных растений в насаждениях города // Вестн. Ижевской гос. сельскохозяйственной академии. 2015. № 1 (42). С. 27–33.
- Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2022 году. Уфа: Самрау, 2023. 319 с.
- Донцов А.С., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. 37 (5–6). С. 246–250.
- Елисеева И.С. Оценка состояния соснового древостоя в зоне хозяйственной деятельности алмазодобывающей промышленности // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых высшей школы естественных наук и технологий САФУ / Сб. мат. конф., Архангельск, 01–30 апреля 2021 г. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2022. С. 36–41.
- Загурская Ю.В. Сезонная динамика содержания фотосинтетических пигментов в листьях осины *Populus tremula* L. на зарастающем отвале угольного карьера // Сиб. лесн. журн. 2017. № 1. С. 105–113.  
<https://doi.org/10.15372/SJFS20170111>
- Калугина О.В., Михайлова Т.А., Шергина О.В. Биохимическая адаптация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) к техногенному загрязнению // Сиб. экол. журн. 2018. № 1. С. 98–110.  
<https://doi.org/10.15372/SEJ20180109>
- Майдебурга И.С. Влияние загрязнения воздушного бассейна города Калининграда на анатомофизиологические особенности и биохимические показатели древесных растений: Дис. ... канд. биол. наук. Калининград: Рос. гос. ун-т им. Иммануила Канта, 2006. 146 с.
- Маракаев О.А., Смирнова Н.С., Загоскина Н.В. Техногенный стресс и его влияние на листовые древесные растения (на примере парков г. Ярославля) // Экология. 2006. № 6. С. 410–414.  
<https://doi.org/10.1134/S1067413606060026>
- Методы биохимического анализа растений: учеб. пособие / Ред. В.В. Полевой, Г.Б. Максимова. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 192 с.
- Николайчук А.М., Вашкевич М.Н. Влияние выбросов предприятий цементной промышленности на содержание пигментов и каротиноидов в листьях и хвое древесных растений // Веснік МДПУ імя І.П. Шамякіна. 2019. № 2 (54). С. 49–54.
- Реферат по итогам оказания услуг по осуществлению регулярных наблюдений химического загрязнения атмосферного воздуха на территории города Карабаша, где нет государственной наблюдательной сети. Челябинск: Филиал ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Челябинской области, 2022. 6 с.
- Сергейчик С.А. Эколого-физиологический мониторинг устойчивости сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в техногенной среде // Биосфера. 2015. Т. 7 (4). С. 384–391.
- Соколова Г.Г. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях города Барнаула // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. Т. 19 (1). С. 223–228.  
<https://doi.org/10.14258/pbssm.2020044>
- Стасова В.В., Скрипальщикова Л.Н., Астраханцева Н.В., Барченков А.П. Фотосинтетические пигменты в листьях березы повислой при техногенном воздействии // Изв. высш. уч. заведений. Лесн. журн. 2023. № 3. С. 35–47.  
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-35-47>
- Суслина М.А., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Анализ состояния пигментного комплекса *Picea obovata* и *Picea pungens* в условиях техногенной среды города Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 34 (4). С. 263–267.
- Тарханов С.Н., Бирюков С.Ю. Влияние атмосферного загрязнения на фотосинтезирующий аппарат *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) Karst. в северной тайге бассейна Северной Двины // Изв. высш. уч. заведений. Лесн. журн. 2014. № 1. С. 20–26.
- Таштадзян А.А. Высшие растения. Т. 1. М.–Л.: АН СССР, 1956. 488 с.
- Титова М.С. Реакция пигментной системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на загрязнение окружающей среды // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 10. С. 122–126.
- Тужилкина В.В. Влияние аэротехногенного загрязнения целлюлозно-бумажного производства на пигментный комплекс сосны обыкновенной // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 90–96.  
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-090-096>
- Тужилкина В.В. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение // Экология. 2009. № 4. С. 243–248.
- Уразгильдин Р.В. Лесообразующие виды Предуралья в условиях техногенеза: сравнительная эколого-биологическая характеристика, видоспецифичность,



- адаптивные реакции, адаптивные стратегии: Дис. ... докт. биол. наук. Уфа: УИБ УФИЦ РАН, 2021. 367 с.
- Уразгильдин Р.В., Аминев К.З., Зайцев Г.А. и др. Сравнительная характеристика формирования пигментного комплекса дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения // Карельский науч. журн. 2016. Т. 5. № 1 (14). С. 90–94.
- Флора СССР. Т. 1 / Ред. М.М. Ильин. Л.: АН СССР, 1934. 300 с.
- Цандекова О.Л. Динамика накопления пигментов в листьях *Betula pendula* Roth. в условиях породного отвала угледобывающей промышленности // Вестн. Алтайского гос. аграрн. ун-та. 2016. № 6 (140). С. 60–64.
- Цандекова О.Л., Неверова О.А. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев древесных растений // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2010. Т. 12. № 1 (3). С. 853–856.
- Чупахина Г.Н. Физиологические и биохимические методы анализа растений: Практикум. Калининград: Калининградский ГУ, 2000. 59 с.
- Шаркаева Э.Ш., Федюшкина К.В. Пигментный состав и параметры флуоресценции хлорофилла в листьях клена остролистного в условиях урбоэкосистемы // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем / Мат. XVI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Киров, 03–05 декабря 2018 г. Т. 2. Киров: Вятский ГУ, 2018. С. 103–106.
- Шлык А.А., Прудникова И.В., Парамонова Т.К. Биосинтез и состояние хлорофиллов в растении. Минск: Наука и техника, 1975. С. 42–57.
- Areington C.A., Varghese B., Serphen N. The utility of biochemical, physiological and morphological biomarkers of leaf sulfate levels in establishing *Brachylaena discolor* leaves as a bioindicator of SO<sub>2</sub> pollution // Plant Physiol. Biochem. 2017. V. 118. P. 295–305.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.06.025>
- Gowin T., Goral I. Chlorophyll and pheophytin content in needles of different age of trees growing under conditions of chronic industrial pollution // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 1977. V. 46 (1). P. 151–159.  
<https://doi.org/10.5586/asbp.1977.012>
- Mikhailova T.A., Afanasieva L.V., Kalugina O.V. et al. Changes in nutrition and pigment complex in pine (*Pinus sylvestris* L.) needles under technogenic pollution in Irkutsk region, Russia // J. Forest Res. 2017. V. 22 (6). P. 386–392.  
<https://doi.org/10.1080/13416979.2017.1386020>
- More R.S., Chaubal S.S. Determination of stress and comparison by estimation of chlorophyll – a, b and carotenoid contents among plants growing along Mithi River, Mumbai // Int. J. Sci. Engin. Res. 2017. V. 8 (1). P. 1–8.
- Mukherjee A., Agrawal M. Use of GLM approach to assess the responses of tropical trees to urban air pollution in relation to leaf functional traits and tree characteristics // Ecotoxicol. Environ. Safety. 2018. V. 152 (4). P. 2–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.038>
- Prajapati S.K., Tripathi B.D. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution // J. Environ. Quality. 2008. V. 37 (3). P. 865–870.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2006.0511>
- Prusty B.A.K., Mishra P.C., Azeez P.A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India // Ecotoxicol. Environ. Safety. 2005. V. 60. P. 228–235.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.12.013>
- Rostunov A., Konchina T., Zhestkova E. et al. The dependence of morphological and physiological indicators of the leaves of woody plants on the degree of technogenic pollution // Technology. Resources: Proc. of the 11th internat. scientific and practical conference. V. 1. Rezekne, Latvia, 15–17 June 2017. Latvia: Rezekne Academy of Technologies, 2017. P. 235–239.  
<https://doi.org/10.17770/etr2017vol1.2516>
- Seyyednejad S.M., Niknejad M., Yusefi M. Study of air pollution effects on some physiology and morphology factors of *Albizia lebbeck* in high temperature condition in Khuzestan // J. Plant Sci. 2009. V. 4 (4). P. 122–126.  
<https://doi.org/10.3923/jps.2009.122.126>

## **Adaptive Reactions of Pigment Complex of Pine Needles in Conditions of Various Types of Pollution of the South Ural Region**

**A. A. Urazbahtin, R. V. Urazgil'din\***

*Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia*

*\*e-mail: urazbaxtin1998@mail.ru, urv@anrb.ru*

A qualitative assessment of the adaptive reactions of the pine needles pigment complex under conditions of various types of industrial pollution of the South Ural region is given. The study area: Sterlitamak Industrial Center (SIC, aerotechnogenic polymetallic pollution), Karabash Copper Smelting Plant (KCSP, aerotechnogenic polymetallic pollution combined with sulfur dioxide), Uchaly Mining and Processing Plant (UMPP, polymetallic pollution in the conditions of dumps of copper-pyrite mining industry), Kumertau brown coal mine (KBCM, polymetallic pollution in the conditions of dumps of brown coal industry), Ufa Industrial Center (UIC, aerotechnogenic petrochemical pollution). It shown the pigment complex balance under UMPP conditions and imbalance under SIC, KCSP, KBCM and UIC conditions, which is expressed in the lack of coherence between the adaptive reactions of pigments and pigment ratios. The consistency between adaptive reactions of pigments and pigment ratios under UMPP conditions and the lack of consistency under SIC, KCSP, KBCM and UIC conditions is shown. Despite the lack of consistency, a common adaptive reaction is clearly distinguished for each industrial center: in the SIC and KCSP the pigment complex is characterized by a “neutral” adaptive reaction, in the KBCM – by a “moderately-tolerant”, in the UIC – by a “tolerant”, in the UMPP – by a “moderately-stressful”. According to the degree of increase in imbalance in the pigment complex the industrial centers form a series of increases: SIC and UIC → KCSP → KBCM. With the exception of UMPP, in all industrial centers, the ratio Chl *a*/Chl *b* demonstrates the absence of differences between pollution and control, which characterizes the stable balance of chlorophylls, but in conditions of copper-pyrite dumps there is a decrease in the share of Chl *a* with an increase in the share of Chl *b* is observed, which defines this type of pollution as a more significant stress factor for pine. The ratio (Chl *a* + Chl *b*)/Carotenoids is characterized by a lack of balance in all types of pollution, and pollution in the UMPP and SIC are defines as more significant stress factors for pine.

**Keywords:** South Ural region, industrial pollution, pine needles pigment complex, adaptive reactions, comparative characteristics