

Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П.

АНАТОМО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ *PINUS SYLVESTRIS* L. НА ОТВАЛАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАЛЬК-МАГНЕЗИТА

N.V. Chukina, N.V. Lukina, E.I. Filimonova, M.A. Glazyrina, A.P. Uchaev

ANATOMICAL, MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF *PINUS SYLVESTRIS* L. ON THE TALC-MAGNEZITE DEPOSIT DUMPS

Аннотация. Целью исследований было изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик *Pinus sylvestris* L., произрастающей на отвалах Шабровского месторождения тальк-магнезита и в естественном местообитании (Средний Урал) и выявление влияния на них свойств субстрата. Анатомо-морфологические параметры хвои изучали на поперечных срезах с использованием системы обработки изображений «SIAMS Mesoplant». Содержание низкомолекулярных антиоксидантов, а также уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) в хвое исследовали стандартными спектрофотометрическими методами. Показано, что у *P. sylvestris* в техногенных условиях происходило уменьшение высоты, годового прироста, диаметра ствола деревьев, а также длины хвои. В хвое *P. sylvestris* отмечено уменьшение площади поперечного сечения, центрального цилиндра, мезофилла, числа смоляных ходов. Выявлено, что в хвое *P. sylvestris* в условиях отвалов происходило усиление накопления продуктов ПОЛ, свободного пролина, фенольных соединений и в том числе флавоноидов, а также уменьшение накопления азота и фосфора по сравнению с контрольными растениями из естественного лесного фитоценоза. Показано, что на анатомо-морфологические параметры *P. sylvestris* большое влияние оказывали такие свойства субстратов, как содержание углерода, гигроулаги и рН. Увеличение синтеза в хвое пролина, фенолов, флавоноидов и продуктов ПОЛ было связано с пониженными значениями гигроскопической влаги в субстратах отвалов.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; анатомо-морфологическое строение; адаптивные реакции; антиоксиданты; промышленные отвалы.

Сведения об авторах: Чукина Надежда Владимировна, ORCID: 0000-0001-5517-0240, канд. биол. наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Abstract. The aim of the research was to study the anatomical, morphological and biochemical characteristics of *Pinus sylvestris* L. growing on the dumps of the Shabrovsky talc-magnesite deposit and in its natural habitat (Middle Urals) and to identify the substrate influence on plants features. The anatomical and morphological parameters of the needles were studied on cross sections using the «SIAMS Mesoplant» image processing system. The content of low-molecular antioxidants, as well as the level of lipid peroxidation (POL) in the needles were studied using standard spectrophotometric methods. Under technogenic conditions a reduction of height, annual growth of shoots and the tree trunk diameter, as well as the length of the needles were shown. In the needles of *P. sylvestris*, a decrease in the cross-sectional area, central cylinder, mesophyll, and the number of resin ducts also was noted. It was revealed that in needles of trees under waste dump conditions there were an increase POL level, at the same time, the synthesis of low-molecular antioxidants (proline, phenolic compounds, including flavonoids) has been activated, the total phosphorus and nitrogen content in the needles were significantly lower compared to the control plants from the natural forest phytocoenosis. It was shown that the anatomical and morphological parameters of *P. sylvestris* were greatly influenced by such substrates properties as the total carbon content, hygroscopic moisture, and pH. The increase of the synthesis of proline, phenols, including flavonoids, and POL products in the needles were associated with reduced values of hygroscopic moisture in the waste dump substrates.

Key words: Scots pine; anatomical and morphological structure; adaptive reactions; antioxidants; industrial waste dumps.

About the authors: Nadezhda V. Chukina, ORCID: 0000-0001-5517-0240, Candidate of Biological Sciences; Ural Federal University

Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия, nady_dicusar@mail.ru; Лукина Наталия Валентиновна, ORCID: 0000-0001-6425-6214, канд. биол. наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия, natalia.lukina@urfu.ru; Филимонова Елена Ивановна, ORCID: 0000-0001-6937-0139, канд. биол. наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия, Elena.Filimonova@urfu.ru; Глазырина Маргарита Александровна, ORCID: 0000-0001-8258-270X, канд. биол. наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Россия, г. Екатеринбург, Margarita.Glazyrina@urfu.ru; Учаев Антон Павлович, ORCID: 0000-0002-7670-0084, канд. биол. наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия, Anton.Uchaev@urfu.ru.

named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia, nady_dicusar@mail.ru; Natalia V. Lukina, ORCID: 0000-0001-6425-6214, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia, natalia.lukina@urfu.ru; Elena I. Filimonova, ORCID: 0000-0001-6937-0139, Candidate of Biological Sciences; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia, Elena.Filimonova@urfu.ru; Margarita A. Glazyrina, ORCID: 0000-0001-8258-270X, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia, Margarita.Glazyrina@urfu.ru; Anton P. Uchaev, ORCID: 0000-0002-7670-0084, Candidate of Biological Sciences; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia, Anton.Uchaev@urfu.ru.

Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П. Анатомо-морфологические и биохимические характеристики *Pinus sylvestris* L. на отвалах месторождения тальк-магнезита // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 46-55. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/04>

Chukina, N.V., Lukina, N.V., Filimonova, E.I., Glazyrina, M.A., & Uchaev, A.P. (2025). Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Pinus Sylvestris* L. on the Talc-Magnetite Deposit Dumps. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 46-55. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/04>

Введение. Добыча полезных ископаемых приводит к катастрофическим изменениям экосистем и сопровождается разрушением литологической основы, уничтожением почвенного и растительного покровов [15]. Глубинные горные породы, вынесенные на дневную поверхность, имеют низкий актуальный уровень плодородия, что связано с незначительным содержанием в них элементов минерального питания, особенно азота [21], неблагоприятные значения pH (избыточная щелочность или кислотность), наличие засоления, высокое количество доступных для растений форм тяжёлых металлов, чрезмерную плотность укладки пород и низкую влагоемкость [4]. Восстановление подобных территорий происходит крайне медленно. Однако некоторые виды растений способны заселять нарушенные местообитания и успешно адаптироваться к условиям произрастания.

Одним из таких видов является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L., семейство *Pinaceae* Lindl.) – основная лесообразующая порода на Урале. Как вид-пионер, требовательный к свету, он может колонизировать нарушенные участки [8].

Техногенное загрязнение окружающей среды несомненно негативно влияет на состояние растений и вынуждает их «включать» различные защитно-адаптационные механизмы для выживания в стрессовых условиях. Изучению механизмов устойчивости *P. sylvestris* к неблагоприятным условиям техногенных местообитаний посвящено много работ [12; 13; и др.]. Известно, что хвойные растения очень чувствительны к условиям произрастания, поэтому структурно-функциональные характеристики *P. sylvestris* могут служить информативными показателями, отражающими состояние растений в условиях загрязнения и степень адаптации к ним. Однако работы, включающие комплексную оценку анатомо-морфологических и биохимических параметров *P. sylvestris* на промышленных отвалах, немногочисленны [7; 19].

Цель работы – изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик *Pinus sylvestris* L. в естественных и трансформированных местообитаниях Среднего Урала (отвалы после добычи тальк-магнезита) и оценка влияния свойств субстрата на морфофизиологические параметры.

Объекты и методы исследования. Исследования проводились в июле 2022 и 2023 гг. Объектами исследования являлись насаждения *P. sylvestris* на отвалах Шабровского месторождения тальк-магнезита, расположенного в 27 км к югу от г. Екатеринбурга в подзоне южной тайги (56° 37' 45" с.ш. 60° 35' 59" в.д.).

Климат района континентальный. Лето тёплое, среднемесячная температура воздуха в июле +17°C. Зима холодная, длится с ноября по март, среднемесячная температура воздуха в январе -15,9°C. Среднегодовая температура воздуха +1°C. Среднегодовое количество осадков 577 мм (по данным метеостанции г. Сысерти) [18].

Отвалы платообразные террасированные, высотой до 30 м и площадью около 1 км² сложены пустыми и вскрышными породами, оставшимися после разработки месторождения открытым карьерным способом. Возраст отвалов варьирует от 55 до 70 лет.

Породы, складываемые в отвалах, сильнокаменистые (каменистость 50–90%), обеспеченность азотом и доступными фосфатами очень низкая, обменным калием – средняя и высокая. В породах повышенное содержание Mn, Cr, Cu, Mo, Co, Ni, Pb и др. [9].

Исследования показали, что на отвалах Шабровского тальк-магнезитового месторождения формируются лесные фитоценозы с доминированием *P. sylvestris* и *Betula pendula* Roth. В подлеске встречались *Salix caprea* L., *Salix myrsinifolia* Salisb., *Sorbus aucuparia* L., общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса от 1 до 50% [17].

Модельные деревья *P. sylvestris* отбирали на 4-х опытных площадках (далее – ОП), размерами 10x10 м каждая. Три из них (ОП1 – ОП3) заложены на участках отвалов с разной степенью каменистости, одна (ОП4) – на борту карьера «Старая линза». Контрольная

площадка (далее – КП) была заложена в естественном лесном фитоценозе, расположенном рядом с пос. Белоречка в 65 км от Екатеринбурга (57°20'14.50" с.ш. 60°1'51.21" в.д.).

Для исследования на каждой ОП и КП у 10 модельных деревьев (возраст 18–20 лет) измеряли высоту, годичный прирост ствола (длину годичных побегов), диаметр (толщину) ствола на высоте 1,3 м, а также собирали полностью сформированную двухлетнюю хвою с южной стороны кроны. Для изучения анатомических показателей хвою фиксировали в 70% растворе этилового спирта. На замораживающем микротоме МЗ-2 изготавливали поперечные срезы хвои и помещали их в глицерин. Измерения анатомических параметров хвои (площадь поперечного сечения, центрального цилиндра и мезофилла, толщина эпидермы и гиподермы, число и диаметр смоляных ходов) ($n=30$) проводили с использованием светового микроскопа и специализированной системы анализа изображений «SIAMS Mesoplant» («СИАМС», г. Екатеринбург).

Для изучения биохимических показателей использовали свежесобранную хвою. Определение интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) проводили по реакции с тиобарбитуровой кислотой согласно методике [29], свободного пролина – по реакции водной вытяжки хвои с ациднингидриновым реактивом после кипячения [3]. Для анализа содержания фенольных соединений и флавоноидов использовали этанольный экстракт хвои (200 мг в 10 мл 70% этилового спирта, 24 часа экстракция при комнатной температуре, в темноте). Содержание фенолов в хвое определяли по реакции с реактивом Фолина-Чокальтеу, расчёт производили по галловой кислоте, содержание флавоноидов – по реакции с $AlCl_3$, в пересчете на рутин, согласно методикам [23; 27].

Содержание общего азота определяли с использованием реактива Несслера, общего фосфора – с молибдатом аммония в серной кислоте спектрофотометрическим методом [2] после мокрого озоления навески сухой измельченной хвои смесью концентрированных кислот H_2SO_4 и $HClO_4$ (в соотношении 10:1).

Определение биохимических параметров проводили в 4-кратной биологической и 5 аналитических повторностях. Результаты представлены в расчете на сухой вес (с.в.) хвои.

На каждой ОП и в контроле для исследований отбирали образцы грунта с глубины 0–20 см. Общий органический углерод (С) определяли по методу Тюрина, рН анализировали потенциометрически. Обменный Са и Mg устанавливали титрованием [1]. Значения удельной электропроводности, общее содержание солей измеряли в водной суспензии «субстрат:вода» (1:2,5; вес/объем) с помощью портативного многопараметрического анализатора HI98129 Combo (Hanna Instruments GmbH, Австрия).

Обработку полученных данных проводили с использованием стандартного пакета программ Microsoft Excel 2019 и STATISTICA 10. Достоверность различий оценивали с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение. Исследования показали, что субстраты отвалов Шабровского месторождения тальк-магнезита (ОП1 – ОП4) характеризовались

нейтральной и слабокислой реакцией среды, более низким содержанием элементов минерального питания растений и гигроскопической влаги по сравнению с КП (табл. 1).

Таблица 1

Агрохимические показатели субстратов исследуемых участков на отвалах Шабровского тальк-магнезитового месторождения и в контрольном местообитании

№ ОП	рН H ₂ O	Общий органический углерод, %	Гигро-влаги, %	Содержание, г/100 г субстрата		Электропроводность, мСм/см	Общее содержание солей, мг/л
				Са	Mg		
ОП1	6,8–7,0	0,68	0,75	0,068	0,031	0,203	102
ОП2	6,8–7,0	2,39	1,94	0,052	0,022	0,325	162
ОП3	6,7–7,1	1,45	1,15	0,078	0,048	0,150	75
ОП4	6,3–6,8	2,78	3,11	0,104	0,066	0,223	101
КП	6,2–6,3	4,3	11,40	0,429	0,034	0,163	81

По показателю удельной электропроводности (значения менее 2 мСм/см) и общему содержанию солей все исследованные субстраты можно отнести к слабозасоленным [10].

Сравнение морфологических параметров *P. sylvestris*, произрастающей на отвалах и в естественном лесу показало, что высота 18–20-летних особей на всех ОП варьировала от 1,73 до 4,25 м, а на КП – в среднем составляла 5,60 м (табл. 2).

Таблица 2

Анатомо-морфологические показатели *P. sylvestris*, произрастающей на отвалах Шабровского тальк-магнезитового месторождения и в контрольном местообитании

Параметры	ОП1	ОП2	ОП3	ОП4	КП
Морфологические показатели					
Высота ствола, м	3,20±0,24b	1,73±0,35a	1,96±0,18a	4,25±0,21c	5,60±0,13d
Диаметр ствола, см	1,80±0,25c	0,90±0,10a	1,32±0,15b	9,0±0,25d	12,87±0,51e
Прирост ствола, см	13,60±0,70a	8,43±2,36a	9,78±0,56a	17,10±1,10b	28,01±0,95c
Длина хвои, см	3,74±0,04a	4,73±0,11b	4,40±0,06b	5,54±0,04c	6,59±0,058d
Анатомические показатели хвои					
Площадь поперечного сечения хвои, мм ²	0,49±0,01a	0,41±0,01b	0,60±0,02c	0,89±0,02d	1,10±0,013e
Площадь центрального цилиндра, мм ²	0,12±0,003b	0,10±0,003a	0,15±0,001c	0,24±0,001d	0,27±0,002e
S _{ц.ц} /S _{п.сеч} , %	25,54±0,34a	25,10±0,39a	25,67±0,48a	27,20±0,30b	25,77±0,28a
Площадь мезофилла, мм ²	0,28±0,01a	0,25±0,01b	0,36±0,01c	0,55±0,01d	0,74±0,01e
Толщина эпидермы, мкм	16,05±0,25b	13,49±0,28a	15,84±0,34bc	15,25±0,25c	19,32±0,24d
Толщина гиподермы, мкм	10,41±0,14b	9,71±0,11a	10,77±0,20b	10,42±0,18b	12,56±0,21c
Число смоляных ходов, шт.	6,48±0,19b	3,68±0,21a	6,19±0,21b	7,1±0,18c	9,9±0,17d
Диаметр смоляных ходов, мкм	41,82±0,60b	35,52±0,83a	46,84±0,64c	44,93±0,75c	47,19±0,69c

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 30). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при p < 0,05.



Исследования показали, что в условиях отвалов происходило статистически значимое снижение морфометрических параметров: уменьшение годового прироста (в 1,6–3,3 раза), диаметра ствола деревьев (в 1,4–14,3 раза), а также длины хвои (в 1,2–1,5 раза) по сравнению с деревьями из естественного лесного фитоценоза, что является ответной реакцией растений на стресс [5] (табл. 2).

Корреляционный анализ выявил высокое влияние агрохимического состава субстратов, а именно: содержания С, гигровлаги и рН на высоту ствола ($r = 0,69$; $r = 0,83$; $r = -0,85$ соответственно), его диаметр ($r = 0,85$; $r = 0,88$; $r = -0,93$), прирост ($r = 0,85$; $r = 0,88$; $r = -0,89$) и на длину хвои ($r = 0,98$; $r = 0,91$; $r = -0,84$).

Известно, что структура листа в целом, и отдельных его тканей очень пластична и обнаруживает большую зависимость от экологических условий и в наибольшей степени – от уровня водоснабжения и освещения [14].

Анализ анатомического строения хвои *P. sylvestris* показал, что на ОП по сравнению с КП наблюдалось статистически значимое уменьшение таких показателей, как площадь поперечного сечения хвои, центрального цилиндра, ассимиляционных тканей (мезофилла), толщины эпидермы и гиподермы. Число смоляных ходов в хвое с отвала было меньше, чем в контроле, но статистически значимых различий диаметра смоляных ходов не было выявлено (табл. 2). Самым стабильным из изученных анатомических характеристик хвои являлся показатель отношения площади центрального цилиндра к площади поперечного среза ($S_{ц.ц}/S_{п.сеч.}$). На всех исследованных участках данный показатель варьировал незначительно, в пределах от 25,1% до 27,2%. Это свидетельствует об оптимальном соотношении между проводящей системой хвои *P. sylvestris* и ассимиляционными тканями.

Полученные результаты согласуются с литературными данными. Многие авторы также отмечают уменьшение анатомо-морфологических характеристик хвои *P. sylvestris* в неблагоприятных условиях среды [7; 24].

Корреляционный анализ показал высокое влияние агрохимического состава субстратов, а именно: содержания С, гигровлаги и рН на площадь поперечного сечения хвои ($r = 0,81$; $r = 0,93$; $r = -0,97$), центрального цилиндра ($r = 0,79$; $r = 0,88$; $r = -0,81$) и мезофилла ($r = 0,84$; $r = 0,89$; $r = -0,95$).

Воздействие стрессовых факторов на растения нередко приводит к увеличению содержания в клетках продукта ПОЛ – малонового диальдегида (МДА), в связи с чем концентрация данного метаболита может служить индикатором уровня окислительного стресса, который испытывают растения в условиях техногенного загрязнения [26].

Согласно полученным результатам, на всех ОП в хвое исследованных особей *P. sylvestris* было зарегистрировано увеличение содержания МДА по сравнению с КП, что свидетельствует о наличии окислительного стресса, и отмечается в работах многих авторов [11; 16]. Для борьбы с негативными последствиями окислительного стресса, развивающегося в условиях высоких техногенных нагрузок, в растениях функционирует система антиоксидантной защиты, одним из важных звеньев которой являются

низкомолекулярные антиоксиданты, такие как фенолы, в том числе флавоноиды, пролин и др. Данные соединения имеют различные механизмы действия и могут как непосредственно препятствовать развитию окислительного стресса, инактивируя образующиеся активные формы кислорода, так и участвовать в устранении его последствий, например, способствуя репарации поврежденных макромолекул [22].

Установлено, что в хвое растений *P. sylvestris*, произрастающих на ОП наблюдалось значительное (в среднем в 2,4 раза) увеличение содержания свободного пролина по сравнению с растениями с КП (табл. 3). При воздействии неблагоприятных факторов, таких, например, как высокие концентрации тяжёлых металлов в субстрате, обычно наблюдается увеличение содержания свободного пролина, что можно рассматривать как защитно-приспособительную реакцию к условиям среды [6; 25].

Общее содержание фенольных соединений в хвое *P. sylvestris*, произрастающей на участках отвала Шабровского месторождения, также увеличивалось по сравнению с контролем в 1,5 раза (табл. 3). Отмечено существенное (в 2,1–2,8 раза) увеличение концентрации флавоноидов в хвое деревьев, произрастающих на отвалах.

Таблица 3

Биохимические показатели хвои *P. sylvestris*, произрастающей на отвалах Шабровского тальк-магнетитового месторождения и в контрольном местообитании

Показатели	ОП1	ОП2	ОП3	ОП4	КП
ПОЛ, нМ МДА /г с.в.	285,37±5,13с	368,41±5,95е	320,76±4,04d	248,46±0,95b	135,49±4,79а
Пролин, мг/г с.в.	347,31±11,18с	480,82±11,30d	375,85±7,12с	168,66±6,16b	144,08±2,42а
Фенолы, мг/г с.в.	16,48±0,37b	19,06±0,32с	18,63±0,25с	23,37±0,37d	12,80±0,37а
Флавоноиды, мг/г с.в.	5,09±0,12b	5,29±0,18b	6,16±0,30с	6,67±0,53с	2,38±0,14а
Азот, %	0,97±0,02b	1,09±0,01с	0,93±0,01а	1,27±0,05d	1,60±0,03е
Фосфор, %	0,04±0,001а	0,05±0,002b	0,05±0,001b	0,04±0,003а	0,19±0,01с

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 20). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при p < 0,05.

Известно, что на содержание азота в хвое *P. sylvestris* большое влияние оказывает обеспеченность почвы доступными формами элементов минерального питания, а также климатические условия и степень освещенности [20; 28].

Исследования показали, что в хвое особей *P. sylvestris*, произрастающих в условиях отвалов, происходило уменьшение содержания общего азота и фосфора по сравнению с растениями из ненарушенного местообитания: в 1,4 и 4,2 раза соответственно (табл. 3).

Корреляционный анализ выявил статистически значимое влияние содержания С, Са, гигровлаги, и величины рН на количество N (r = 0,94; r = 0,90; r = 0,95; r = -0,98) и P (r = 0,80; r = 0,99; r = 0,97; r = -0,92) в хвое *P. sylvestris*, а также продемонстрировал зависимость

содержания в хвое пролина, фенолов, флавоноидов и продуктов ПОЛ от количества гигровлаги в субстрате ($r = -0,70$; $r = -0,62$; $r = -0,85$; $r = -0,88$).

Дискриминантный анализ, проведённый с использованием таких биохимических параметров хвои, как уровень ПОЛ, содержание общего азота и фосфора, а также общих фенольных соединений, флавоноидов и пролина, отделил КП от ОП1–ОП4 по дискриминантным функциям 1 и 2 (рис. 1). Корректность отнесения в группы составляла: КП – 100%, ОП1 – 67%, ОП2 – 78%, ОП3 – 100%, ОП4 – 58%.

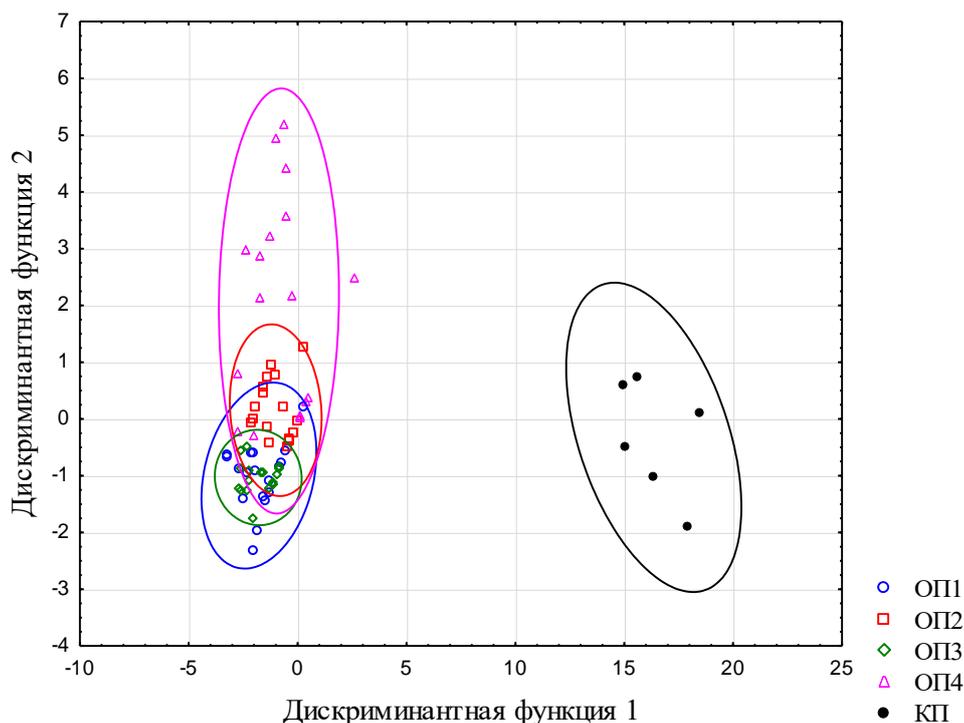


Рис. 1. Дискриминантный анализ изученных ценопопуляций *P. sylvestris* по биохимическим показателям хвои (Wilks' Lambda = 0,0096275, F=27,260, при $p < 0,0000$)

Заключение. Неблагоприятные условия промышленных отвалов, связанные прежде всего с низким уровнем плодородия и влагоемкости субстратов, а также высокой каменистостью и повышенными концентрациями ряда тяжёлых металлов, вызывали у *Pinus sylvestris* существенное снижение показателей высоты и диаметра ствола деревьев, величины годичного прироста и длины хвои. Ответная реакция ассимиляционного аппарата *P. sylvestris* на стрессовые условия заключалась в уменьшении таких анатомо-морфологических показателей хвои, как площадь поперечного сечения, центрального цилиндра и мезофилла, число смоляных ходов. В условиях высоких техногенных нагрузок в хвое *P. sylvestris* происходило уменьшение накопления азота и фосфора по сравнению с контрольными растениями из естественного лесного сообщества. Отмечено также усиление накопления в хвое продуктов перекисного окисления липидов, что вызывало активацию системы антиоксидантной защиты, а именно усиление накопления свободного пролина, фенольных соединений и в том числе флавоноидов. Показано, что на анатомо-

морфологические параметры *P. sylvestris* большое влияние оказывали такие свойства субстратов, как содержание общего органического углерода, гигровлаги и pH. Содержание в хвое низкомолекулярных антиоксидантов зависело от количества гигровлаги в субстрате отвалов. Выявленные анатомо-морфологические и биохимические изменения *P. sylvestris* являются защитно-приспособительной реакцией на стресс и способствуют адаптации вида к антропогенно нарушенным местообитаниям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания УрФУ FEUZ-2023-0019.

Литература

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
2. Борисова Г.Г., Чукина Н.В., Киселева И.С., Малева М.Г. Биохимия. Практикум: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 116 с.
3. Калинин Л.Г., Назаренко Л.В., Гордеева Е.Е. Модифицированный метод выделения свободных аминокислот для определения на аминокислотном анализаторе // Физиология растений. 1990. Т. 37, № 3. С. 617-621.
4. Капелькина Л.П. Самозарастание и рекультивация нарушенных земель на месторождениях севера России // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием, 2014. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. С. 17-21.
5. Колясникова Н.Л., Карнажицкая Т.Д., Паршакова К.А. Влияние аэротехногенного загрязнения на морфологические и эмбриологические признаки сосны обыкновенной // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2011. № 2. С. 31-35.
6. Кузнецова Н.Ф., Клушевская Е.С. Смена жизненного состояния как способ выживания *Pinus sylvestris* L. на техногенно загрязненной территории // Принципы экологии: научный электронный журнал. 2020. № 2. С. 40-47.
7. Лукина Н.В., Чукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П., Борисова Г.Г. Морфофизиологические особенности *Pinus sylvestris* L. в искусственных насаждениях на дражном отвале после золотодобычи // Лесохозяйственная информация. 2022. № 3. С. 145-157. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13>.
8. Мамаев С.А. Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. Свердловск: Уральский Научный Центр АН СССР, 1983. 109 с.
9. Махонина Г.И. Экологические аспекты почвообразования в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. 355 с.
10. Поздняков А.И. Электрические параметры почв и почвообразование // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1188-1197.
11. Самусик Е.А., Марчик Т.П., Головатый С.Е. Интенсивность окислительных процессов и активность антиоксидантной системы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения // Социально-экологические технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 418-438. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2022-12-4-418-438>.

12. Стасова В.В., Скрипальщикова Л.Н., Астраханцева Н.В., Барченков А.П. Морфолого-анатомические характеристики и пигментный состав хвои сосны обыкновенной в зеленых насаждениях г. Красноярска // Сибирский лесной журнал. 2022. № 2. С. 3-10. <https://doi.org/10.15372/SJFS20220201>.
13. 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>.
14. Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Ч 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // Биосфера. 2021. Т. 13, № 3. С. 86–100.
15. Федотов В.И. Техногенные ландшафты – теория, региональные структуры, практика. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1985. 186 с.
16. Цандекова О.Л. Оценка состояния *Pinus sylvestris* (Pinaceae) и *Betula pendula* (Betulaceae) по некоторым биохимическим показателям в условиях породного отвала угледобывающей промышленности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 2(148). С. 70-76.
17. Чукина Н.В., Глазырина М.А., Лукина Н.В. Анатомио-морфологические особенности строения листа *Chimaphila umbellata* на промышленных отвалах (Средний Урал) // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 49-60. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/05>.
18. Шакиров А.В. Физико-географическое районирование Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 617 с.
19. Шаяхметова Р.И. Сосна обыкновенная как биоиндикатор в условиях ХМАО // Культура, наука, образование, проблемы и перспективы: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (Нижневартовск, 12–13 февраля 2015 г.). Нижневартовск: Нижневартовский гос. ун-т, 2015. С. 69-71.
20. Якимов Н.И., Соколовский И.В., Цай В.В. Содержание элементов питания в сеянцах сосны с закрытой корневой системой в зависимости от дозы и сроков внесения минеральных удобрений // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 1. Лесное хозяйство. 2005. № 13. С. 113-115.
21. Яковченко М.А., Баумгартэн М.И., Дремова М.С., Кондратенко Е.П., Филипович Л.А. Воспроизводство плодородия почв: исследование физико-химических параметров субстратов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 4. С. 48-50.
22. Ahmad P., Jaleel C.A., Salem M.A., Nabi G., Sharma S. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress // Critical Reviews in Biotechnology. 2010. V. 30, № 3. P. 161-175. <https://doi.org/10.3109/07388550903524243>.
23. Chang C., Yang M., Wen H., Chern J. Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods // Journal of Food Drug Analysis. 2002. V. 10. P. 178-182.
24. Kalugina O.V., Afanasyeva L.V., Mikhailova T.A. Anatomical and morphological changes in *Pinus sylvestris* and *Larix sibirica* needles under impact of emissions from a large aluminum enterprise // Ecotoxicology. 2024. V. 33. P. 66-84. <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02723-x>.

25. Kandziora-Ciupa M., Ciepał R., Nadgórska-Socha A., Barczyk G. Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites // *Ecotoxicology*. 2016. V. 25. P. 970-981.

26. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends Plant Sci*. 2002. V. 7(9). P. 405-410. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9).

27. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventós R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent // *Methods in enzymology*. 1999. V. 299. P. 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1).

28. Pietrzykowski M., Woś B., Haus N. Scots pine needles macronutrient (N, P, K, CA, MG, and S) supply at different reclaimed mine soil substrates – as an indicator of the stability of developed forest ecosystems // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013. V. 185. P. 7445-7457. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3111-9>.

29. Uchiyama M., Mihara M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test // *Anal. Biochem*. 1978. V. 86, 1. P. 287-297. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(78\)90342-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(78)90342-1).

References

1. Arinushkina, E.V. (1970). *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv*. Moskva: Izd-vo MGU (in Russ.).

2. Borisova, G.G., Chukina, N.V., Kiseleva, I.S., & Maleva, M.G. (2017). *Biohimiya. Praktikum: ucheb.-metod. posobie*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta (in Russ.).

3. Kalinkina, L.G., Nazarenko, L.V., & Gordeeva, E.E. (1990). Modificirovanny metod vydeleniya svobodnyh aminokislot dlya opredeleniya na aminokislotnom analizatore. *Fiziologiya rasteniy*, (37, 3), 617-621. (in Russ.).

4. Kapelkina, L.P. (2014). Samozarastanie i rekultivaciya narushennyh zemel na mestorojdeniyah severa Rossii. In *E'kologicheskie problemy severnyh regionov i puti ih resheniya: Materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferencii s mejdunarodnym uchastiem* (ss. 17-21). Apatity: KNC RAN. (in Russ.).

5. Kolyasnikova, N.L., Karnajczkaya, T.D., & Parshakova, K.A. (2011). Vliyanie ae'rotehnogennoho zagryazneniya na morfologicheskie i e'mbriologicheskie priznaki sosny obyknovennoy. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Biologiya. Nauki o Zemle»*, (2), 31-35. (in Russ.).

6. Kuznecova, N.F., & Klushevskaya, E.S. (2020). Smena jiznennogo sostoyaniya kak sposob vyjivaniya *Pinus sylvestris* L. na tehnogenno zagryaznennoy territorii. *Principy e'kologii: nauchnyy e'lektronnyy jurnal*, (2), 40-47. (in Russ.).

7. Lukina, N.V., Chukina, N.V., Filimonova, E.I., Glazyrina, M.A., Uchaev, A.P., & Borisova, G.G. (2022). Morfofiziologicheskie osobennosti *Pinus sylvestris* L. v iskusstvennyh nasajdeniyah na drajnem otvale posle zolotodobychi. *Lesohozyaystvennaya informaciya*, (3), 145-157. (in Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13>.

8. Mamaev, S.A. (1983). *Vidy hvoynyh na Urale i ih ispolzovanie v ozelenenii*. Sverdlovsk: Uralskiy Nauchnyy Centr AN SSSR (in Russ.).

9. Mahonina, G.I. (2003). *E'kologicheskie aspekty pochvoobrazovaniya v tehnogennyh ekosistemah Urala*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta (in Russ.).

10. Pozdnyakov, A.I. (2008). E'lektricheskie parametry pochv i pochvoobrazovanie. *Pochvovedenie*, (10), 1188-1197. (in Russ.).
11. Samusik, E.A., Marchik, T.P., & Golovaty, S.E. (2022). Intensivnost oksiditelnykh processov i aktivnost antioksidantnoy sistemy v listyakh drevesnykh rasteniy, proizrastayushchikh v usloviyakh tehnogennoy zagryazneniya. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii*, (12, 4), 418-438. (in Russ.).
12. Stasova, V.V., Skripalschikova, L.N., Astrahanceva, N.V., & Barchenkov, A.P. (2022). Morfoloogo-anatomicheskie harakteristiki i pigmentnyy sostav hvoi sosny obyknovennoy v zelenykh nasajdeniyah g. Krasnoyarska. *Sibirskiy lesnoy jurnal*, (2), 3-10. (in Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20220201>.
13. Tujilkina, V.V. (2021). Vliyanie aerotehnogennoy zagryazneniya cellulozno-bumajnoy proizvodstva na pigmentnyy kompleks sosny obyknovennoy. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, (1), 90-96. (in Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-090-096>.
14. Urazgildin, R.V., & Kulagin, A.Yu. (2021). Tehnogenez i strukturno-funktsionalnye reakcii drevesnykh vidov: povrezhdeniya, adaptatsii, strategii. Vliyanie na makro- i mikromorfologiyu assimilyatsionnogo apparata (Ch. 1). *Biosfera*, 13(3), 86-100. (in Russ.).
15. Fedotov, V.I. (1985). *Tehnogennyye landshafty – teoriya, regionalnyye struktury, praktika*. Voronej: Izd-vo Voronejskogo gos. un-ta (in Russ.).
16. Candekova, O.L. (2017). Ocenka sostoyaniya *Pinus sylvestris* (Pinaceae) i *Betula pendula* (Betulaceae) po nekotorym biokhimicheskim pokazatelyam v usloviyakh porodnogo otvala ugledobyvauschey promyshlennosti. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, (2; 148), 70-76. (in Russ.).
17. Chukina, N.V., Glazyrina, M.A., & Lukina, N.V. Anato-morfologicheskie osobennosti stroeniya lista *Chimaphila umbellata* na promyshlennykh otvalah (Sredniy Ural). *Vestnik Nijnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta*, (2 (66)), 49-60. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/05>.
18. Shakirov, A.V. (2011). *Fiziko-geograficheskoye rajonirovaniye Urala*. Ekaterinburg: UrO RAN. (in Russ.).
19. Shayahmetova, R.I. (2015). Sosna obyknovennaya kak bioindikator v usloviyakh HMAO. In *Kultura, nauka, obrazovanie, problemy i perspektivy: Materialy VI Vserossiyskoy nauchnoy6prakticheskoy konferentsii (Nijnevartovsk, 12–13 fevralya 2015 g.)* (ss. 69-71). Nijnevartovsk: Nijnevartovskiy gos. un-t. (in Russ.).
20. Yakimov, N.I., Sokolovskiy, I.V., & Cay, V.V. (2005). Soderzhanie elementov pitaniya v seyanchakh sosny s zakrytoy kornevoy sistemoy v zavisimosti ot dozy i srokov vneseniya mineralnykh udobreniy. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 1. Lesnoye hozyaystvo*, (13), 113-115. (in Russ.).
21. Yakovchenko, M.A., Baumgarte'n, M.I., Dremova, M.S., Kondratenko, E.P., & Filipovich, L.A. (2011). Vosproizvodstvo plodorodiya pochv: issledovanie fiziko-himicheskikh parametrov substratov. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (4), 48-50. (in Russ.).
22. Ahmad, P., Jaleel, C.A., Salem, M.A., Nabi, G., & Sharma, S. (2010). Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Critical Reviews in Biotechnology*, (30, 3), 161-175. <https://doi.org/10.3109/07388550903524243>.

23. Chang, C., Yang, M., Wen, H., & Chern, J. (2002). Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods. *Journal of Food Drug Analysis*, (10), 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>.

24. Kalugina, O.V., Afanasyeva, L.V., & Mikhailova, T.A. (2024). Anatomical and morphological changes in *Pinus sylvestris* and *Larix sibirica* needles under impact of emissions from a large aluminum enterprise. *Ecotoxicology*, (33), 66-84. <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02723-x>.

25. Kandziora-Ciupa, M., Ciepał, R., Nadgórska-Socha, A., & Barczyk, G. (2016). Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites. *Ecotoxicology*, (25), 970-981.

26. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Sci.*, (7, 9), 405-410. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9).

27. Singleton, V.L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, (299), 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1).

28. Pietrzykowski, M., Woś, B., & Haus, N. (2013). Scots pine needles macronutrient (N, P, K, CA, MG, and S) supply at different reclaimed mine soil substrates – as an indicator of the stability of developed forest ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, (185), 7445-7457. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3111-9>.

29. Uchiyama, M., Mihara, M. (1978). Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. *Anal. Biochem*, (86, 1), 287-297. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(78\)90342-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(78)90342-1).

дата поступления: 21.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

© Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П., 2025