

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17>

УДК 630*631.531:504.064.2

Анатомо-морфологические и биохимические показатели *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал)

Надежда В. Чукина¹✉, nady_dicusar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5517-0240>

Наталья В. Лукина¹, natalia.lukina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6425-6214>

Елена И. Филимонова¹, Elena.Filimonova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6937-0139>

Маргарита А. Глазырина¹, Margarita.Glazyrina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8258-270X>

¹ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина», ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620062, Российская Федерация

В условиях интенсивного антропогенного воздействия на природные экосистемы особое значение приобретает изучение адаптационных возможностей древесных растений, используемых при рекультивации промышленных отвалов. Целью исследований было изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик 22-летних лесных культур *Picea obovata* Ledeb. в искусственных насаждениях на отвале месторождения россыпного золота в Свердловской области. В полевых условиях измеряли морфологические показатели деревьев. Анатомические параметры хвои изучали на поперечных срезах с использованием системы обработки изображений «SIAMS MesoPlant». Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) и содержание в хвое низкомолекулярных антиоксидантов (пролин, аскорбиновая кислота, фенольные соединения) анализировали стандартными спектрофотометрическими методами. На дражном отвале месторождения россыпного золота у *P. obovata* без проведения мероприятий по улучшению свойств субстрата происходило уменьшение высоты деревьев и диаметра ствола у корневой шейки, прироста ветвей и длины хвои. Ответная реакция ассимиляционного аппарата на стресс заключалась в увеличении площади поперечного сечения хвои, центрального цилиндра, общей площади смолоносной системы, утолщении покровных тканей, а также в усилении процессов перекисного окисления липидов, что сопровождалось накоплением в ней пролина и аскорбиновой кислоты. Корреляционный анализ показал, что на уменьшение морфологических показателей деревьев и на увеличение исследованных анатомических показателей хвои статистически значимое влияние оказывало недостаточное содержание в субстрате: общего органического углерода, Са, Mg, фосфора и гигровлаги. Низкий уровень гигровлаги и фосфора в субстрате активизировали синтез пролина и аскорбиновой кислоты в хвое. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при оценке состояния древесных растений и при проведении лесовосстановительных работ на нарушенных промышленностью землях.

Ключевые слова: ель сибирская, анатомо-морфологическое строение, адаптивные реакции, антиоксиданты, промышленные отвалы

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема Государственного задания FEUZ-2023-0019.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Анатомо-морфологические и биохимические показатели *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал) // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 294-309. – Библиогр.: с. 304-308 (33 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17>.

Поступила 02.10.2025. Пересмотрена 10.11.2025. Принята 12.12.2025. Опубликована онлайн 26.12.2025.

Article

**Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics
of *Picea obovata* Ledeb. in Plantings on a Dredge Dump After Gold Mining
(Middle Urals)**

Nadezhda V. Chukina¹✉, nady_dicusar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5517-0240>

Natalia V. Lukina¹, natalia.lukina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6425-6214>

Elena I. Filimonova¹, Elena.Filimonova@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6937-0139>

Margarita A. Glazyrina¹, Margarita.Glazyrina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8258-270X>

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira str., 19, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation

Abstract

Due to of intensive anthropogenic impact on natural ecosystems, the study of the adaptive capabilities of woody plants used in the reclamation of industrial waste dumps is of particular importance. The aim of the research was to study the anatomical, morphological, and biochemical characteristics of 22-year-old *Picea obovata* Ledeb. on the waste heap after gold mining in the Sverdlovsk region. Morphological parameters were measured in the field conditions. Anatomical parameters were magnified in cross-sections using the SIAMS MesoPlant image processing system. Lipid peroxidation levels and the content of low-molecular-weight antioxidants (proline, ascorbic acid, and phenolic compounds) in the needles were analyzed using standard spectrophotometric methods. On the waste heap after gold mining without measures to improve the substrate properties, *P. obovata* Ledeb. trees experienced a decrease in height, trunk diameter at the root collar, branch growth, and needle length. The photosynthetic apparatus responses to stress by the increasing of needle cross-section area, central cylinder area, and the resin duct total area, the thickening of the epidermal tissue. In adverse condition of dump the increased level of lipid peroxidation, accompanied by the accumulation of proline and ascorbic acid in needle have been shown. Correlation analysis revealed that the decrease in tree morphological parameters and the increase in studied anatomical parameters of needles were significantly affected by the insufficient content of total organic carbon, Ca, Mg, phosphorus, and moisture in the substrate. The increases in proline and ascorbic acid content in needles occurred with decreased of hygromoisture and phosphorus content in the substrate. These experimental data can be used to assess the condition of woody plants and during reforestation of industrial disturbed areas.

Keywords: *Picea obovata*, anatomical and morphological structure, adaptive reactions, antioxidants, industrial waste

Funding: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the topic of the State Assignment FEUZ-2023-0019.

Acknowledgments: authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

For citation: Chukina N.V., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. (2025). Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of *Picea obovata* Ledeb. in Plantings on a Dredge Dump After Gold Mining (Middle Urals). Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 294-309 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/17>.

Received 02.10.2025. *Revised* 10.11.2025. *Accepted* 12.12.2025. *Published online* 26.12.2025.

Введение

Интенсивное освоение месторождений золота приводит к резкому увеличению площадей открытых разработок, которые находятся в основном в долинных ландшафтах, выполняющих важные средорегулирующие функции. Для разработки россыпей золота чаще всего используют дражный и гидравлический способы, приводящие к образованию отвалов, сложенных галечно-валунно-глыбовым, песчано-гравийно-галечным или песчано-глинистым материалом, полностью лишенным растительности, и по сути своей представляющих промышленные пустыни [1].

Для ускорения восстановления продуктивности нарушенных земель, а также в целях оптимизации ландшафта на Урале часто рекомендуется лесохозяйственное направление биологической рекультивации [2–4]. Примеры лесовосстановления на таких территориях имеются и за рубежом [5].

Искусственное лесовосстановление требует тщательного подбора устойчивых видов, способных адаптироваться к экстремальным условиям среды [3, 6]. Одним из таких видов является ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb., Pinaceae Lindl.) – ключевой вид бореальной зоны [7–9]. Вид широко распространен на Урале [10], встречается преимущественно в разреженных кустарничково-зеленомошных лесах, типичных для северной и средней частей северной тайги [7]. *P. obovata* представляет значительный интерес для рекультивации благодаря своей экологической пластичности, относительной нетребовательности к условиям внешней среды и способности формировать устойчивые насаждения [11, 12].

Неблагоприятные условия среды техногенно нарушенных территорий, такие как дефицит минерального питания и органического вещества в субстрате, низкая влагоёмкость, а также высокий уровень инсоляции вызывают у растений стресс [13–16], приводящий к изменению их анатомо-морфологической структуры и биохимических процессов.

Маркерной реакцией растений на стресс является усиление процессов перекисного

окисления липидов и, как следствие, активация антиоксидантной системы [17, 18]. Адаптивной реакцией растений на стрессовые условия является накопление защитных соединений, таких как низкомолекулярные антиоксиданты. Например, такие метаболиты растений, как фенольные соединения, аскорбиновая кислота и пролин, играют важную роль в защите растений от окислительного стресса [19, 20]. Как показывают исследования, виды растений, колонизирующие нарушенные местообитания, обладают высоким антиоксидантным статусом, что позволяет им выживать в неблагоприятных условиях среды [21].

Однако биохимические и морфофизиологические особенности *P. obovata* в условиях дражных отвалов остаются недостаточно изученными, что затрудняет прогнозирование успешности использования данного вида в рекультивационных мероприятиях. Изучение влияния экологических условий на рост и сохранность насаждений *P. obovata* на отвалах, а также на анатомо-морфологические и биохимические показатели деревьев, имеет важное значение для разработки научных основ лесохозяйственной рекультивации. Однако комплексных исследований реакции растений *P. obovata*, произрастающих на нарушенных территориях не проводилось, что и определило актуальность данной работы.

Цель работы – анализ морфологических характеристик *Picea obovata* Ledeb. в посадках на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал), выявление влияния свойств субстрата на анатомо-морфологические и биохимические параметры хвои.

Материалы и методы

Объекты и методы исследования

Сроки и объект исследований. Исследования проводились в июне 2024 года. Объектом изучения послужили опытные лесные культуры *Picea obovata* Ledeb., созданные в 2003 году на территории дражного отвала после проведения золотодобычных работ.

Район работ. Участок расположен на месте бывшего месторождения Увальное, которое находится в 4 км на северо-восток от г. Невьянска Свердловской области (57°31'31" с. ш.; 60°16'01" в. д.).

Характеристика района исследований. Район относится к таежной зоне, подзоне южной тайги, и расположен в пределах низкогорной полосы Среднего Урала. Климат континентальный, с продолжительной холодной зимой (5–6 месяцев) и коротким относительно теплым летом (3 месяца). Анализ современных климатических тенденций показал, что за пятилетний период с 2019 по 2023 гг. сумма эффективных температур увеличилась с 1832,9 °С до 2449,4 °С. Одновременно с этим зафиксировано сокращение суммы годовых осадков с 504 мм до 367 мм, а также суммы осадков за теплое время года с 341 мм до 184 мм [22]. В почвенном покрове распространены подзолистые и дерново-подзолистые почвы, характеризующиеся невысоким содержанием азота, фосфора и кальция.

В ходе обследования отвала было установлено, что в процессе технического этапа рекультивации, связанного с планировкой поверхности, на дневную поверхность был поднят грунт, характеризующийся неоднородным гранулометрическим составом. Представленный материал варьирует от лёгкого до тяжёлого суглинка с включениями щебня и гальки [23].

Методика закладки эксперимента

Посадочным материалом послужили 2-летние сеянцы *P. obovata*, высаженные на выровненную поверхность отвала и склоны дамбы рядовым способом без применения мелиорантов. Схема посадки предусматривала расстояние между сеянцами в ряду 0,5–0,7 м и между рядами 2,0–2,3 м. Общая площадь созданных лесных культур составила 3,8 га.

Для детального изучения морфофизиологических особенностей *P. obovata* в различных условиях местообитания была заложена система пробных площадок. В пределах отвала были заложены три опытные площадки (ОП1–ОП3) площадью 100 м² каждая. Дополнительно одна площадка (ОП4) была организована на дамбе

отвала, сложенной вскрышными породами, и одна контрольная площадка (КП) – на слабонарушенной территории, прилегающей к дамбе. Отбор площадок осуществлен с целью охвата разнообразия состояния древостоя и физико-химических характеристик субстратов.

Сбор данных

Для исследования на каждой ОП и КП у 10 модельных деревьев *P. obovata* (возраст 22 года) измеряли следующие показатели: высоту дерева, годичный линейный прирост ствола и ветвей, диаметр ствола (у корневой шейки). Измерения высоты и линейных приростов проводили с помощью металлической измерительной рулетки, диаметр измеряли с помощью мерной вилки. С каждого дерева отбирали полностью сформированную двухлетнюю хвою для дальнейшего анализа. Длину хвои измеряли на свежесобранном материале, для чего хвоинки (по 30 шт. с каждой ОП) выкладывали на миллиметровую бумагу и фотографировали.

Измерение линейных параметров хвои с точностью до 0.01 мм выполняли по цифровым фотографиям с использованием системы анализа изображений SIAMS MesoPlant («СИАМС», г. Екатеринбург).

Анатомические исследования проводили на образцах хвои, фиксированных в 70% этиловом спирте. С помощью замораживающего микротомы МЗ-2 изготавливали серию поперечных срезов, которые анализировали под световым микроскопом Livenhuk с цифровой фотонасадкой.

На полученных микропрепаратах измеряли следующие параметры:

- площадь поперечного сечения хвои;
- площадь центрального цилиндра;
- толщину покровных тканей (эпидермиса и гиподермы);
- количество и диаметр смоляных ходов.

Все анатомические измерения выполняли с 30-кратной повторностью с использованием системы анализа изображений SIAMS Mesoplant («СИАМС», г. Екатеринбург).

Навески свежей хвои (0,2 г) замораживали в жидком азоте для последующего определения

биохимических параметров. Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали по реакции малонового диальдегида (МДА) с тиобарбитуровой кислотой (ТБК), используя грубый экстракт хвои в растворе ТБК в 10% трихлоруксусной кислоте. Для определения общего содержания фенольных соединений навеску мелкоизмельченной хвои выдержали в растворе 70%-ного этанола в течение 24 часов, в темноте. Общее содержание фенолов определяли с помощью реактива Фолина–Чокалтеу. Содержание аскорбиновой кислоты определяли, измеряя экстракт хвои после растирания в 2% растворе метафосфорной кислоты при длине волны 265 нм. Содержание в хвое пролина определяли с использованием ациднингидринового реактива в водном экстракте. Анализ содержания МДА и низкомолекулярных антиоксидантов проводили с использованием спектрофотометра PD-303 UV (Arel, Япония). Подробное описание методик представлено в статье [21].

Биохимические параметры определяли в 4-х биологических повторностях и 5–10 аналитических повторностях. Все показатели представлены в расчете на сухой вес (с.в.) хвои.

Отбор проб субстрата проводили на каждой ОП и КП с глубины 0–20 см. Основные физико-химические характеристики субстратов определяли общепринятыми методами [24]. Содержание общего органического углерода – по Тюрину; pH – потенциометрически в водном растворе (1:2,5 по массе/объему). Обменные ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} определяли титрометрическим методом; содержание подвижного фосфора (P_2O_5) – спектрофотометрическим методом; гигроскопическую влажность – методом высушивания, при 105 °C в сушильном шкафу.

Анализ данных

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2019 и STATISTICA 10. Для оценки достоверности межгрупповых различий применяли непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Анализ агрохимических показателей субстратов с исследованных участков дражного отвала (ОП1–ОП4) и контрольного участка (КП) показал, что по величине pH субстраты были слабокислые или нейтральные.

Субстраты с отвала (ОП1–ОП3) характеризовались низким содержанием органического углерода, гирволаги, кальция, магния и подвижных форм фосфатов по сравнению с КП. В них также отмечено более низкое содержание гирволаги по сравнению с контрольным участком. Агрохимические показатели субстрата с дамбы отвала (ОП4) занимали промежуточное положение между образцами с отвала и контролем (табл. 1).

Анализ морфологических параметров *P. obovata*, произрастающей в условиях дражного отвала, выявил статистически значимые различия между контрольными и опытными образцами по ряду признаков, таких как: высота дерева, диаметр ствола (у корневой шейки), линейный годичный прирост ствола и ветвей, длина хвои (рис. 1).

Согласно данным С.А. Мамаева (1983) [10], на дерново-подзолистых почвах южной тайги рост *P. obovata* до 10–15 лет происходит относительно медленно, и высота деревьев к концу этого периода составляет 210–280 см. Затем наблюдается ускорение темпов роста. В возрасте около 25 лет средняя высота деревьев достигает 700–900 см.

Агрохимические показатели субстратов опытных и контрольных площадок

Table 1

Agrochemical indicators of the substrates in experimental and control sites

Площадка Experimental site	pH _{H2O}	Общий органический углерод, % Total organic carbon, %	Гигровлага, % Hygroscopic moisture, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P ₂ O ₅ мг/100 г P ₂ O ₅ mg/100 g
				мг-экв/ 100 г mg-eq/100 g		
ОП1 ES1	7,04	0,07	1,81	2,7	1,5	0,80
ОП2 ES2	6,92	0,07	1,68	2,6	1,1	0,36
ОП3 ES3	6,54	0,37	3,39	5,7	2,2	0,49
ОП4 ES4	6,31	0,60	3,43	6,3	2,6	2,35
КП CS	6,42	1,45	5,48	14,2	4,8	19,14

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations.

Анализ высотных показателей 22-летних особей *P. obovata* выявил существенную вариабельность в зависимости от условий местообитания. На территории дражного отвала средняя высота растений варьировала от 53,1±3,1 см на пробной площадке ОП1 до 119,1±16,0 см на площадке ОП3. На дамбе отвала (ОП4) данный показатель был значимо выше и составлял 300,0±23,0 см.

Наибольшие значения высоты отмечены на контрольной площадке (КП), где средний показатель достигал 450,0±31,0 см. Таким образом, в условиях контроля высота древостоя в среднем в 3,5 раза превышала аналогичный параметр у растений, произрастающих непосредственно на отвале.

В условиях отвала (ОП1–ОП3) *P. obovata*, относится к Va классу бонитета, а на ОП4 и КП – к IV классу бонитета.

Средний диаметр ствола деревьев у корневой шейки на ОП1–ОП4 варьировал в пределах от 2,2 до 4,0 см, а на КП достигал 11,0 см при средних значения 7,0 см (рис. 1).

На ОП1–ОП3 было выявлено статистически значимое (p<0,05) снижение средних показателей линейного годовичного прироста как ствола, так и ветвей деревьев, по сравнению с деревьями на ОП4 и КП. Прирост ветвей изменялся в пределах от 1,9±0,1 см (ОП1) до 2,9±0,2 см (ОП3), на дамбе и КП он составлял 13,4±1,4 см и 13,7±0,4 см соответственно. Линейный прирост ствола варьировал от 0,9±0,1 см (ОП1) до 3,1±0,3 см (ОП3), а в контроле – 22,5±2,5 см (рис. 1).

В условиях отвала (ОП1–ОП3) выявлено статистически значимое (p<0,05) снижение длины хвои в 1,2–1,8 раза по сравнению с контролем. На ОП4 и КП длина хвои не отличалась между собой, составляя 11,7±0,2 мм и 11,8±0,2 мм соответственно (табл. 2). Полученные значения соответствуют литературным данным [10].

Многие авторы отмечают, что в стрессовых условиях реакция растений направлена на выживание и выход из-под действия стрессового фактора: уменьшение расходов органического вещества на рост и снижение площади листьев [11, 25].

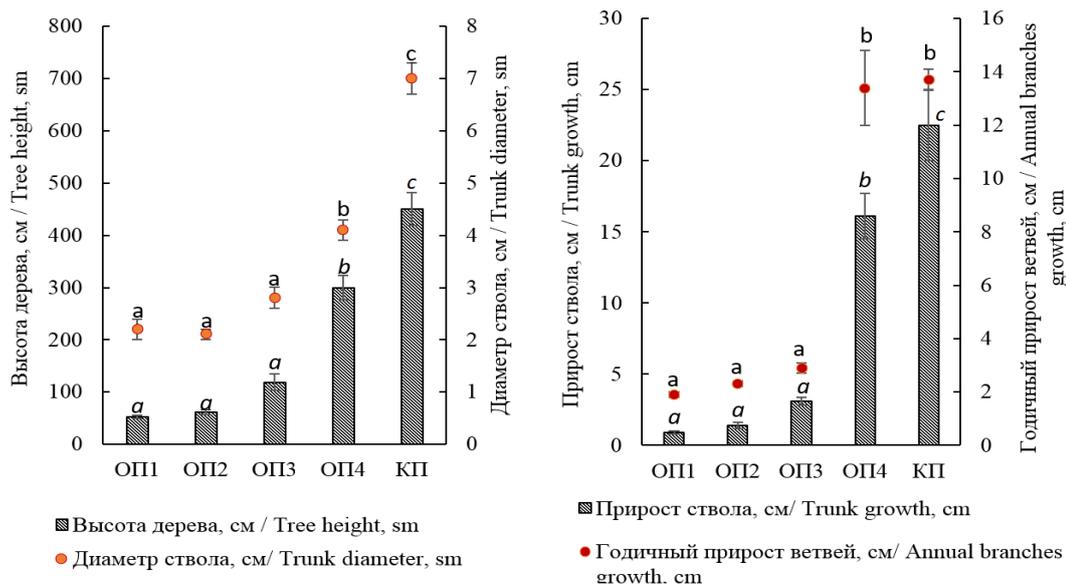


Рисунок 1. Морфологические характеристики посадок *Picea obovata* Ledeb. на отвале после золотодобычи месторождения Увальное (ОП) и в контроле (КП): a, b, c, d – разные буквы указывают на достоверные различия изученных параметров между исследованными участками при уровне значимости $p < 0,05$.

Figure 1. Morphological characteristics of *Picea obovata* Ledeb. plantings on the waste heap after gold mining at Uvalnoye deposit (ES) and in the control (CS): a, b, c, d – different letters indicate significant differences in the studied parameters between the investigated areas at a significance level of $p < 0,05$.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов.

Source: own experimental data.

Непараметрический корреляционный анализ Спирмена продемонстрировал достоверное ($p < 0,05$) влияние агрохимического состава субстратов: содержания гигровлаги, общего органического углерода, кальция, магния, фосфора на изученные морфологические показатели *P. obovata*: высоту особей ($r = 0,88$; $r = 0,81$; $r = 0,88$; $r = 0,88$; $r = 0,83$ соответственно), диаметр ствола ($r = 0,83$; $r = 0,93$; $r = 0,83$; $r = 0,83$; $r = 0,88$), длину хвои ($r = 0,97$; $r = 0,97$; $r = 0,97$; $r = 0,97$). Выявлена также статистически значимая отрицательная связь между значениями pH субстрата, длиной хвои ($r = -0,93$), и приростом ветвей ($r = -0,94$).

Известно, что хвоя отличается от плоских листьев лиственных деревьев не только внешней формой, но и рядом особенностей внутреннего строения. Изменение параметров фотосинтетического аппарата хвойных под воздействием ряда экологических факторов может являться индикатором состояния растений и

нередко используется в целях фитоиндикации и биомониторинга окружающей среды [26, 27].

По результатам анализа анатомического строения хвои *P. obovata* установлено, что на участках отвала ОП1–ОП3 по сравнению с КП наблюдалось статистически значимое увеличение площади поперечного сечения, центрального цилиндра, мезофилла, а также толщины покровных тканей: эпидермы и гиподермы (табл. 2).

Как установлено в предыдущих исследованиях, смолоносная система хвои голосеменных растений выполняет важную защитную функцию. Для хвои *P. obovata* в норме характерно развитие двух смоляных ходов, однако в условиях затенения может наблюдаться редукция данной системы до одного хода или его полного отсутствия [10]. Помимо светового режима, модификация количества смоляных ходов отмечается при значительном загрязнении атмосферы [13].

Проведенный анализ показал, что в условиях дражного отвала также происходит значимая трансформация смолы выделяющей системы. В отличие от нормы, у исследуемых растений зафиксировано статистически достоверное увеличение как количества, так и суммарной

площади поперечного сечения смоляных ходов. Полученные данные позволяют предположить, что данный морфофизиологический ответ является адаптивной реакцией на комплексный стрессовый фактор среды обитания (табл. 2).

Таблица 2

Анатомические характеристики хвои *P. obovata* Ledeb. в посадках на отвале Увального месторождения россыпного золота (ОП) и в контроле (КП)

Table 2

Anatomical characteristics of *P. obovata* Ledeb. needles on the waste heap after gold mining at Uvalnoye deposit (ES) and in the control (CS)

Параметр Parameter	ОП1 ES1	ОП2 ES2	ОП3 ES3	ОП4 ES4	КП CS
Длина хвои, см Needle length, sm	0,72±0,04a	0,68±0,04a	0,95±0,07b	1,17±0,03c	1,18 ±0,02c
Площадь поперечного сечения хвои, мм ² Needle cross-section area, mm ²	0,485±0,029cd	0,498±0,021d	0,444±0,012c	0,333±0,012a	0,382±0,014b
Площадь центрального цилиндра, мм ² Central cylinder area, mm ²	0,040±0,003c	0,042±0,002c	0,039±0,002bc	0,029±0,001a	0,036±0,002b
Площадь мезофилла, мм ² Mesophyll area, mm ²	0,350±0,023cd	0,340±0,026c	0,324±0,009c	0,239±0,009a	0,274±0,010b
Площадь смоляного хода, мм ² Resin duct area, mm ²	0,013±0,001b	0,016±0,001c	0,007±0,001a	0,005±0,001a	0,007±0,001a
Число смоляных ходов, шт. Number of resin duct	1,3±0,2b	0,9±0,2b	1,1±0,3b	0,4±0,1a	0,4±0,1a
Площадь смолоносной системы, мм ² Resin duct total area, mm ²	0,019±0,003bc	0,028±0,003c	0,011±0,002b	0,005±0,001a	0,007±0,001a
Т эпидермы, мкм Epidermis thickness, μm	12,4±0,3a	14,1±0,3c	13,1±0,4b	12,3±0,2a	11,9±0,2a
Т гиподермы, мкм Hypodermis thickness, μm	16,4±0,4c	16,5±0,4c	15,4±0,6b	14,1±0,3a	14,0±0,3a

Примечание: Разные буквы (a, b, c, d) указывают на достоверные различия изученных параметров между исследованными участками при уровне значимости p<0,05.

Note: Different letters (a, b, c, d) indicate significant differences in the studied parameters between the investigated areas at a significance level of p<0,05.

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: own calculations.

Среди изученных анатомических параметров хвои *P. obovata* наибольшей стабильностью характеризовались относительные показатели: отношение площади центрального цилиндра к общей площади поперечного сечения хвои и отношение площади мезофилла к общей площади поперечного сечения. Средние значения данных

показателей для растений на опытных (ОП) и контрольной (КП) площадках составили 8,7% и 71,3% соответственно, не выявив статистически значимых межгрупповых различий.

Полученные результаты свидетельствуют о консервативном характере соотношения проводящих и ассимиляционных тканей в структуре

хвои *P. obovata*. Стабильность данных соотношений, сохраняющаяся в различных условиях произрастания, подчеркивает их важную роль в поддержании базовых физиологических функций хвои.

Согласно имеющимся в литературе данным, в стрессовых условиях среды у растений активизируются процессы перекисного окисления липидов, что приводит к увеличению в тканях одного из продуктов этой реакции – малонового альдегида [28]. Нередко у растений в условиях высоких техногенных нагрузок регистрируется повышение ПОЛ и это рассматривается как индикаторная реакция растений [23, 29].

Результаты исследований показали, что на всех опытных участках отвала (за исключением ОП4) в хвое растений *P. obovata* уровень ПОЛ был достоверно выше (в среднем в 1,7 раза), чем в

контроле. При этом максимальное содержание малонового альдегида было выявлено в хвое растений с ОП1, что указывает на наименее благоприятные условия на данном участке. В хвое растений с КП, напротив, обнаружен минимальный уровень ПОЛ (рис. 2).

Было установлено, что усиление процессов ПОЛ в хвое *P. obovata* сопровождалось синтезом низкомолекулярных антиоксидантов, таких как пролин, аскорбиновая кислота и фенольные соединения. Данные метаболиты имеют различные механизмы антиоксидантного действия и могут как непосредственно препятствовать развитию окислительного стресса, инактивируя образующиеся активные формы кислорода, так и участвовать в устранении его последствий [16, 30].

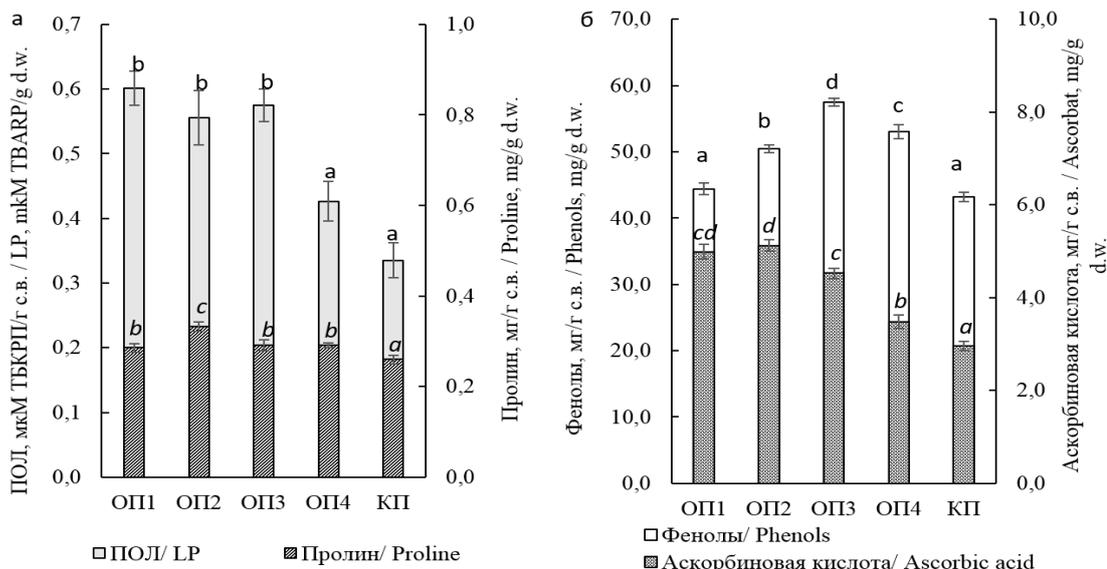


Рисунок 2. Уровень ПОЛ и содержание пролина (а), общих фенольных соединений и аскорбиновой кислоты (б) в хвое посадок *Picea obovata* Ledeb. на отвале после золотодобычи месторождения Увальное (ОП) и в контроле (КП): а, b, c, d – разные буквы указывают на достоверные различия изученных параметров между исследованными участками при уровне значимости $p < 0,05$.

Figure 2. The level of LPO and the content of proline (a), total phenolic compounds and ascorbic acid (b) in the needles of *Picea obovata* Ledeb. plantings on the waste heap after gold mining at Uvalnoye deposit (ES) and in the control (CS): a, b, c, d – different letters indicate significant differences in the studied parameters between the investigated areas at a significance level of $p < 0,05$.

Источник: собственные экспериментальные данные авторов.

Source: own experimental data.

Проведенные исследования выявили достоверное повышение содержания ключевых метаболитов стрессовой защиты в хвое *P. obovata*, произрастающей на отвальных участках (ОП1–ОП4), по сравнению с контрольными растениями (КП). У опытных образцов зафиксировано увеличение концентрации свободного пролина, аскорбиновой кислоты и общих фенольных соединений (рис. 2).

Полученные данные согласуются с результатами наших предыдущих исследований, которые демонстрируют активацию синтеза антиоксидантов у растений в условиях техногенного стресса [21, 23]. Наблюдаемый биохимический ответ представляет собой универсальную защитно-приспособительную реакцию, что подтверждается также исследованиями других авторов [15, 31-33]. Усиление антиоксидантной защиты, по-видимому, является важным физиологическим механизмом, обеспечивающим выживание и рост *P. obovata* в нарушенных промышленных ландшафтах.

Корреляционный анализ выявил статистически значимые ($p < 0,05$) обратные зависимости между анатомическими параметрами хвои *P. obovata* и агрохимическими характеристиками субстрата. Установлены сильные отрицательные корреляции между содержанием в субстрате общего углерода и площадью поперечного сечения хвои ($r = -0,87$), площадью центрального цилиндра ($r = -0,87$), площадью мезофилла ($r = -0,87$), а также общей площадью смоловыделяющей системы ($r = -0,82$).

Аналогичная зависимость наблюдалась между изученными анатомическими показателями и содержанием гигроскопической влаги ($r = -0,90$; $-0,90$; $-0,80$; $-0,90$ соответственно), кальция ($r = -0,90$; $-0,90$; $-0,80$; $-0,90$) и магния ($r = -0,90$; $-0,90$; $-0,80$; $-0,90$).

Также выявлена отрицательная корреляция между содержанием в субстрате общего углерода, кальция, магния, гигровлаги и толщиной эпидермы ($r = -0,82$; $r = -0,90$; $r = -0,90$; $r = -0,90$ соответственно) и гиподермы ($r = -0,97$; $r = -0,99$; $r = -0,99$; $r = -0,99$).

Анализ корреляционной связи между агрохимическими показателями субстратов и параметрами антиоксидантной системы хвои изученных растений *P. obovata* выявил влияние недостатка фосфора в субстрате отвала на содержание пролина ($r = -0,90$) и аскорбиновой кислоты ($r = -0,90$) в хвое, а также влияние недостатка гигровлаги на накопление аскорбиновой кислоты ($r = -0,97$).

Заключение

Проведенные исследования морфофизиологических особенностей *Picea obovata* Ledeb. на дражном отвале после золотодобычи (Средний Урал) показали, что свойства субстрата (слабая влагоудерживающая способность, низкое содержание органического вещества, недостаток кальция, магния и фосфора) оказывали существенное влияние на рост деревьев и формирование их ассимиляционного аппарата. Без улучшения свойств субстрата в условиях отвала происходило уменьшение высоты деревьев, годовичного линейного прироста ствола и ветвей, диаметра ствола. У растений *P. obovata* на участках отвала наблюдалось уменьшение длины и площади поперечного сечения хвои. В условиях отвала в хвое происходило также увеличение площади ассимиляционных тканей, общей площади смолоносной системы, утолщение покровных тканей, что является защитной адаптивной реакцией вида к стрессовым факторам среды. Неблагоприятные характеристики субстратов привели к увеличению процессов перекисного окисления липидов в хвое *P. obovata*, что сопровождалось накоплением пролина, флавоноидов и аскорбиновой кислоты. Активация системы антиоксидантной защиты позволяет адаптироваться данному виду к техногенным условиям среды. Результаты работы могут быть использованы при оценке состояния древесных растений и при проведении лесовосстановительных работ на промышленных отвалах.

Список литературы

1. Петров А.И., Котова В.С., Осипенко Р.А., Залесов С.В. Лесохозяйственное направление рекультивации полигонов добычи рассыпного золота // Леса России и хозяйство в них. – 2023. – № 2(85). – С. 16-23. – DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.37.61.002>
2. Залесов С.В., Зарипов Ю.В., Залесова Е.С. Естественная рекультивация отвала вскрышных пород и отходов обогащения асбестовой руды // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 3(157). – С. 35-38. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29220511>
3. Трещевская Э.И., Панков Я.В., Трещевская С.В., Тихонова Е.Н. Культуры сосны обыкновенной на деградированных и техногенно нарушенных землях ЦЧР. – Воронеж: Изд-во ВГЛТУ, 2017. – 31 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29307651>
4. Лантинова А.В., Марина Н.В., Агапитов Е.М., Рогачев В.Е., Фомин В.В. Влияние аморфного кремнезема на рост семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивируемом гранитном карьере // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 4(56). – С. 38-49. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-962/2024.4/3>
5. Mena-Quintana F.N., Álvarez W., Franco W., Moncayo L., Tipán M., Ayala J. Land Degraded by Gold Mining in the Ecuadorian Amazon: A Proposal for Boosting Ecosystem Restoration Through Induced Revegetation. *Forests*. 2025; 16: 372. – DOI: 10.3390/f16020372
6. Suárez-Muñoz M., Bonet-García F.J., Navarro-Cerrillo R., Herrero J., Mina M. Forest management scenarios drive future dynamics of Mediterranean planted pine forests under climate change. *Landscape Ecology*. 2023; 38: 2069-2084. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01678-y>
7. Orlova L., Gussarova G., Glazkova E., Egorov A., Potokin A., Ivanov S. Systematics and distribution of spruce species in the North-West of Russia. *Dendrobiology*. 2020; 84: 12-29. – DOI: 10.12.657/denbio.084.002
8. Leites L., Garzón M. B. Forest tree species adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. *Glob. Change Biol*. 2023; 29(17): 4711-4730. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16711>
9. Zhou Q., Karunarathne P., Andersson-Li L., Chen C., Opgenoorth L., Heer K., Piotti A., Vendramin G.G., Nakvasina E., Lascoux M., Milesi P. Recurrent hybridization and gene flow shaped Norway and Siberian spruce evolutionary history over multiple glacial cycles. *Molecular Ecology*. 2024; 33(17): e17495. – DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.17495>
10. Мамаев С.А. Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 112 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26807083>
11. Демина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменчивость показателей ассимиляционного аппарата климатипов ели в географических культурах Республики Коми // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 42-50. – DOI: <https://doi.org/10.17238/issn.2227-6572.2016.2.42>
12. Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European north of Russia. *Central European Forestry Journal*. – 2019. – V. 65, N 2. – P. 121-128. – DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0012>
13. Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // Биосфера. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 86–100. – DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i3.578>
14. Gupta R., Verma N., Tewari R.K. Micronutrient deficiency-induced oxidative stress in plants. *Plant Cell Rep*. 2024; 43(9): 213. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03297-6>
15. Spormann S., Nadais P., Sousa F., Pinto M., Martins M., Sousa B., Fidalgo F., Soares C. Accumulation of Proline in Plants under Contaminated Soils—Are We on the Same Page? *Antioxidants*. 2023; 12(3): 666. – DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12030666>

16. Rao M.J., Duan M., Zhou C., Jiao J., Cheng P., Yang L., Wei W., Shen Q., Ji P., Yang Y., Conteh O., Yan D., Yuan H., Rauf A., Ai J., Zheng B. Antioxidant Defense System in Plants: Reactive Oxygen Species Production, Signaling, and Scavenging During Abiotic Stress-Induced Oxidative Damage. *Horticulturae*. 2025; 11(5): 477. – DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050477>
17. Liang X., Qian R., Wang D., Liu L., Sun C., Lin X. Lipid-Derived Aldehydes: New Key Mediators of Plant Growth and Stress Responses. *Biology*. 2022; 11(11): 1590. – DOI: <https://doi.org/10.3390/biology11111590>
18. Chakraborty N., Mitra R., Dasgupta D., Ganguly R., Acharya K., Minkina T., Popova V., Churyukina E., Keswani C. Unraveling lipid peroxidation-mediated regulation of redox homeostasis for sustaining plant health. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2024; 206: 108272. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108272>.
19. Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Front. Plant Sci.* 2023; 14: 1110622. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622>
20. Fathi A., Shiade S.R.G., Saleem A., Shohani F., Fazeli A., Riaz A., Zulfiqar U., Shabaan M., Ahmed I., Rahimi M. Reactive Oxygen Species (ROS) and Antioxidant Systems in Enhancing Plant Resilience Against Abiotic Stress. *International Journal of Agronomy*. 2025; 8834883. – DOI: <https://doi.org/10.1155/iaoa/8834883>
21. Maleva M., Borisova G., Filimonova E., Lukina N., Chukina N., Ermoshin A., Tugbaeva A., Voropaeva O. Adaptive Redox Reactions Promote Naturalization of Rare Orchid *Epipactis atrorubens* on Serpentine Dumps Post Asbestos Mining. *Horticulturae*. 2022; 8(7): 603. – DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070603>
22. Погода и климат. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/28344.htm> (дата обращения: 20.10.2024).
23. 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. – Текст: электронный // Лесохозяйственная информация. – 2022. – № 3. – С. 145-157. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13>
24. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – Москва: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.
25. Вернигора Е.Г., Бурундукова О.Л. Мезоструктура фотосинтетического аппарата в стрессовых условиях роста // Тихоокеанский медицинский журнал. – 2015. – № 2. – С. 24-26.
26. Amirmohammadi M., Khademi H., Shamsollah A., Faz A. Pine needles as bioindicator and biomagnetic indicator of selected metals in the street dust, a case study from southeastern Iran. *Chemosphere*. 2024; 352: 141281. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141281>
27. Al Sayegh Petkovsek S., Batic F., Ribaric Lasnik C. Norway spruce needles as bioindicator of air pollution in the area of influence of the Sostanj Thermal Power Plant, Slovenia. *Environ Pollut.* 2008; 151(2): 287-291. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.036>.
28. Anjum N.A., Sofo A., Scopa A., Roychoudhury A., Gill S.S., Iqbal M., Lukatkin A.S., Pereira E., Duarte A.C., Ahmad I. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015; 22: 4099-4121. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>
29. Неверова О.А., Легощина О.М., Быков А.А. Оценка интенсивности окислительных процессов у древесных растений в зоне действия промышленных выбросов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1(3). – С. 776-779. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15624737>
30. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling and Behavior*. 2012; 7(11): 1456-1466. – DOI: <https://doi.org/10.4161/psb.21949>
31. Зарипова Р.С., Кузьмин П.А. Влияние антропогенного стресса на динамику аскорбиновой кислоты в растениях // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2015. – Т. 2, № 5. – С. 24-26. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23484817>

32. Афанасьева Л.В., Кашин В.К. Химический состав и продуктивность *Vaccinium myrtillus* L. в условиях техногенного воздействия // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 333-346. – DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2015-8-3-333-346>

33. Pasqualini V., Robles C., Garzino S., Greff S., Bousquet-Melou A., Bonin G. Phenolic compounds content in *Pinus halepensis* Mill. needles: a bioindicator of air pollution. *Chemosphere*. 2003; 52(1): 239-248. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00268-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00268-6)

34. References

1. Petrov A.I., Kotova V.S., Osipenko R.A., Zalesov S.V. *Lesoxozyajstvennoe napravlenie rekul'tivacii poligonov doby`chi rassy`pno go zolota* [Forestry direction in reclamation of alluvial gold mining sites]. *Les Rossii i xozyajstvo v nix = Forest of Russia and economy in them*. 2023; 2(85): 16-23. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.37.61.002>

2. Zalesov S.V., Zaripov Ju.V., Zalesova E.S. *Estestvennaya rekul'tivaciya otvala vskry`shny`x porod i otxodov obogasheniya asbestovoj rudy`* [Natural recultivation of overburden grounds dump and rock refuse of asbestos ore]. *Agrarny`j vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2017; 3(157): 35-38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29220511>

3. Treshchevskaya E.I., Pankov Ya.V., Treshchevskaya S.V., Tikhonova E.N. *Kul`tury` sosny` oby`knovennoj na degradirovanny`x i texnogenno narushenny`x zemlyax CzChR* [Cultures of Scots Pine on Degraded and Technologically Disturbed Lands of the Central Black Earth Region]. Voronezh. VGLTU Publishing House. 2017. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29307651>

4. Lantinova A.V., Marina N.V., Agapitov E.M., Rogachev V.E., Fomin V.V. *Vliyanie amorfnogo kremnezema na rost seyancev sosny` oby`knovennoj (Pinus sylvestris L.) i eli sibirskoj (Picea obovata Ledeb.) na rekul'tiviruемом granitnom kar`ere* [Effect of amorphous silica on the growth of seedlings (*Pinus sylvestris* L.) and (*Picea obovata* Ledeb.) in a reclaimed granite quarry]. *Lesotexnicheskij zhurnal = Forestry Engineering journal*. 2024; 14(4 (56)): 38-49. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/3>

5. Mena-Quintana F.N., Álvarez W., Franco W., Moncayo L., Tipán M., Ayala J. Land Degraded by Gold Mining in the Ecuadorian Amazon: A Proposal for Boosting Ecosystem Restoration Through Induced Revegetation. *Forests*. 2025; 16: 372. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16020372>

6. Suárez-Muñoz M., Bonet-García F.J., Navarro-Cerrillo R., Herrero J., Mina M. Forest management scenarios drive future dynamics of Mediterranean planted pine forests under climate change. *Landscape Ecology*. 2023; 38: 2069-2084. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-023-01678-y>

7. Orlova L., Gussarova G., Glazkova E., Egorov A., Potokin A., Ivanov S. Systematics and distribution of spruce species in the North-West of Russia. *Dendrobiology*. 2020; 84: 12-29. – DOI: <https://doi.org/10.12.657/denbio.084.002>

8. Leites L., Garzón M. B. Forest tree species adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. *Glob. Change Biol*. 2023; 29(17): 4711-4730. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16711>

9. Zhou Q., Karunarathne P., Andersson-Li L., Chen C., Opgenoorth L., Heer K., Piotti A., Vendramin G.G., Nakvasina E., Lascoux M., Milesi P. Recurrent hybridization and gene flow shaped Norway and Siberian spruce evolutionary history over multiple glacial cycles. *Molecular Ecology*. 2024; 33(17): e17495. DOI: <https://doi.org/10.1111/mec.17495>

10. Mamaev S.A. *Vidy` xvojny`x na Urale i ix ispol'zovanie v ozelenenii* [Species of Conifers in the Urals and Their Use in Landscaping]. Sverdlovsk. Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences. 1983. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26807083>

11. Demina N.A., Nakvasina E.N. *Izmenchivost` pokazatelej assimilacionnogo apparata klimatipov eli v geograficheskix kul'turax Respubliki Komi* [Variability of assimilation apparatus indicators of spruce climatypes of the provenance trial plantations in the Komi Republic]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya:*

Estestvenny`e nauki = Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural Sciences. 2016; 2: 42-50. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.17238/issn 2227-6572.2016.2.42>

12. Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of phenotypic plasticity of spruce species *Picea abies* (L.) karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on provenances tests in European north of Russia. Central European Forestry Journal. 2019; 65(2): 121-128. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0012>

13. Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. *Texnogenез i strukturno-funkcional`ny`e reakcii drevesny`x vidov: povrezhdeniya, adaptacii, strategii. Chast` I. vliyanie na makro- i mikromorfologiyu assimilyacionnogo apparata* [Structural and functional responses of woody plantsto anthropogenic environmental changes: damage, adaptations and strategies. Part 1. Effects on the macro- and micromorphology of the assimilation apparatus]. Biosfera = Biosfera. 2021; 13(3): 86–100. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i3.578>

14. Gupta R., Verma N., Tewari R.K. Micronutrient deficiency-induced oxidative stress in plants. Plant Cell Rep. 2024; 43(9): 213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03297-6>

15. Spormann S., Nadais P., Sousa F., Pinto M., Martins M., Sousa B., Fidalgo F., Soares C. Accumulation of Proline in Plants under Contaminated Soils–Are We on the Same Page? Antioxidants. 2023; 12(3): 666. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12030666>

16. Rao M.J., Duan M., Zhou C., Jiao J., Cheng P., Yang L., Wei W., Shen Q., Ji P., Yang Y., Conteh O., Yan D., Yuan H., Rauf A., Ai J., Zheng B. Antioxidant Defense System in Plants: Reactive Oxygen Species Production, Signaling, and Scavenging During Abiotic Stress-Induced Oxidative Damage. Horticulturae. 2025; 11(5): 477. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050477>

17. Liang X., Qian R., Wang D., Liu L., Sun C., Lin X. Lipid-Derived Aldehydes: New Key Mediators of Plant Growth and Stress Responses. Biology. 2022; 11(11): 1590. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology11111590>

18. Chakraborty N., Mitra R., Dasgupta D., Ganguly R., Acharya K., Minkina T., Popova V., Churyukina E., Keswani C. Unraveling lipid peroxidation-mediated regulation of redox homeostasis for sustaining plant health. Plant Physiology and Biochemistry. 2024; 206: 108272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108272>

19. Mishra N., Jiang C., Chen L., Paul A., Chatterjee A., Shen G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. Front. Plant Sci. 2023; 14: 1110622. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622>

20. Fathi A., Shiade S.R.G., Saleem A., Shohani F., Fazeli A., Riaz A., Zulfiqar U., Shabaan M., Ahmed I., Rahimi M. Reactive Oxygen Species (ROS) and Antioxidant Systems in Enhancing Plant Resilience Against Abiotic Stress. International Journal of Agronomy. 2025; 8834883. DOI: <https://doi.org/10.1155/ioa/8834883>

21. Maleva M., Borisova G., Filimonova E., Lukina N., Chukina N., Ermoshin A., Tugbaeva A., Voropaeva O. Adaptive Redox Reactions Promote Naturalization of Rare Orchid *Epipactis atrorubens* on Serpentine Dumps Post Asbestos Mining. Horticulturae. 2022; 8(7): 603. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070603>

22. Pogoda i klimat [Weather and Climate] (In Russ.). URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/28344.htm> (date of access: 20.10.2024).

23. Lukina N.V., Chukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A., Uchaev A.P., Borisova G.G. *Morfofiziologicheskie osobennosti Pinus sylvestris L. v iskusstvenny`x nasazhdeniyax na drazhnom otvale po-sle zolotodoby`chi* [Morphophysiological Features of *Pinus sylvestris* L. in Artificial Plants on Dredge Dump after Gold Mining. – Text: electronic]. Lesoxozyajstvennaya informaciya = Forestry information. 2022; 3: 145-157. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13>

24. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Guide in chemical analysis of soils]. Moscow. Izdatelstvo MGU. 1970. (In Russ.).

25. Vernigora E.G., Burundukova O.L. *Mezostruktura fotosinteticheskogo apparata v stressovy`x usloviyax rosta* [Mesostructure of photosynthetic mechanism of firs in the context of stressful growth]. Tixooeanskij medicinskij zhurnal = Pacific Medical Journal. 2015; 2: 24-26. (In Russ.).

26. Amirmohammadi M., Khademi H., Shamsollah A., Faz A. Pine needles as bioindicator and biomagnetic indicator of selected metals in the street dust, a case study from southeastern Iran. *Chemosphere*. 2024; 352: 141281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141281>
27. Al Sayegh Petkovsek S., Batic F., Ribaric Lasnik C. Norway spruce needles as bioindicator of air pollution in the area of influence of the Sostanj Thermal Power Plant, Slovenia. *Environ Pollut*. 2008; 151(2): 287-291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.036>.
28. Anjum N.A., Sofu A., Scopa A., Roychoudhury A., Gill S.S., Iqbal M., Lukatkin A.S., Pereira E., Duarte A.C., Ahmad I. Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015; 22: 4099-4121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>.
29. Neverova O.A., Legoshchina O.M., Bykov A.A. *Ocenka intensivnosti oksislitel'nykh processov u drevesnykh rastenij v zone dejstviya promyshlennykh vybrosov* [Estimation of oxidative processes intensity at wood plants in the operative range of industrial emissions]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010; 12(1(3)): 776-779. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15624737>
30. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signaling and Behavior*. 2012; 7(11): 1456-1466. DOI: <https://doi.org/10.4161/psb.21949>.
31. Zaripova R.S., Kuzmin P.A. *Vliyanie antropogennogo stressa na dinamiku askorbinovoj kisloty v rasteniyax* [The Influence of Anthropogenic Stress on the Dynamics of Ascorbic Acid in Plants]. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal "Innovacionnaya nauka" = International Scientific Journal "Innovative Science"*. 2015; 2(5): 24-26. (In Russ.). URL: DOI: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23484817>
32. Afanasyeva L.V., Kashin V.K. *Ximicheskij sostav i produktivnost' Vaccinium myrtillus L. v usloviyax texnogennogo vozdejstviya* [The Chemical Composition and Productivity of *Vaccinium myrtillus* L. under Influence of Industrial Pollution]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya = Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2015; 8(3): 333-346. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2015-8-3-333-346>
33. Pasqualini V., Robles C., Garzino S., Greff S., Bousquet-Melou A., Bonin G. Phenolic compounds content in *Pinus halepensis* Mill. needles: a bioindicator of air pollution. *Chemosphere*. 2003; 52(1): 239-248. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00268-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00268-6)

Сведения об авторах

✉ Чукина Надежда Владимировна – доцент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологии Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук; г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5517-0240>, e-mail: nady_dicusar@mail.ru

Лукина Наталия Валентиновна – старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук, доцент по специальности «Экология», г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6425-6214>, natalia.lukina@urfu.ru

Филимонова Елена Ивановна – старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6937-0139>, Elena.Filimonova@urfu.ru

Глазырина Маргарита Александровна – старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, канд. биол. наук, доцент по специальности «Экология», г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620062, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8258-270X>, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

Information about authors

✉ *Nadezhda V. Chukina* – Associate Professor of the Department of Experimental Biology and Biotechnology of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5517-0240>, e-mail: nady_dicusar@mail.ru

Natalia V. Lukina – Senior Researcher at the Laboratory "Anthropogenic Ecosystem Dynamics" of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Associate professor in the specialty «Ecology», Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6425-6214>, natalia.lukina@urfu.ru

Elena I. Filimonova – Senior Researcher at the Laboratory "Anthropogenic Ecosystem Dynamics" of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6937-0139>, Elena.Filimonova@urfu.ru

Margarita A. Glazyrina – Senior Researcher at the Laboratory "Anthropogenic Ecosystem Dynamics" of Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Cand. Sci. (boil.), Associate professor in the specialty «Ecology», Yekaterinburg, Mira str., 19, 620062, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8258-270X>, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

✉ Для контактов | Corresponding author