

ЭКОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ / PLANT ECOLOGY

УДК 631.531:504.064.2

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/01>

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

АНАТОМО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗНОВОЗРАСТНОЙ ХВОИ *PINUS SIBIRICA* DU TOUR (СРЕДНИЙ УРАЛ)

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

ANATOMICAL, MORPHOLOGICAL, AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DIFFERENT-AGED NEEDLES OF *PINUS SIBIRICA* DU TOUR (MIDDLE URALS)

Аннотация. Целью исследований было изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик разновозрастной хвои *Pinus sibirica* Du Tour, произрастающей в естественном местообитании в таежной зоне (Средний Урал). Анатомо-морфологические параметры хвои изучали на поперечных срезах с использованием системы обработки изображений «SIAMS MesoPlant». Содержание низкомолекулярных антиоксидантов, таких как пролин, аскорбиновая кислота, фенольные соединения, в том числе и флавоноиды, уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) в хвои исследовали стандартными спектрофотометрическими методами. Показано, что с увеличением возраста хвои *P. sibirica* наблюдалось уменьшение таких анатомо-морфологических показателей, как площадь поперечного сечения хвои, площадь мезофилла и центрального цилиндра. Толщина покровных тканей хвои (эпидермы и гиподермы) в процессе возрастного развития достоверно не изменялась. Выявлено, что с увеличением возраста хвои, происходило уменьшение концентрации зеленых пигментов за счет достоверного снижения содержания хлорофилла *a*, также уменьшение соотношения хлорофилла *a* к антенным пигментам. Содержание в хвои каротиноидов и хлорофилла *b* достоверно не изменялось, что указывает на относительную стабильность пула антенных пигментов. В 4-летней хвои увеличивалась интенсивность ПОЛ и, как следствие, активизировалась система антиоксидантной защиты, что проявлялось в увеличении содержания фенольных соединений и свободного пролина. С увеличением возраста хвои происходило снижение накопления аскорбиновой кислоты.

Ключевые слова: *Pinus sibirica*; анатомия хвои; фотосинтетические пигменты; перекисное окисление липидов; низкомолекулярные антиоксиданты.

Abstract: The aim of the present study was to investigate the anatomical, morphological, and biochemical characteristics of *Pinus sibirica* Du Tour needles of different ages, growing in their natural habitat in the taiga zone (Middle Urals). Anatomical and morphological parameters of the needles were analyzed in cross-sections using the «SIAMS MesoPlant» image processing system. The content of low-molecular antioxidants, such as proline, ascorbic acid, phenolic compounds, including flavonoids, and the level of lipid peroxidation (LPO) in the needles were analyzed using standard spectrophotometric methods. It was shown that with the needle aging a decrease in anatomical and morphological parameters such as cross-sectional area, mesophyll area, and central cylinder was observed. The thickness of the covering tissues (epidermis and hypodermis) did not change significantly with the needle aging. It was found the decrease of green pigments concentration in needles due to a significant reduction in chlorophyll *a*, as well as a decrease in the ratio of chlorophyll *a* to antenna pigments with the needle aging. The content of carotenoids and chlorophyll *b* in the needles did not change significantly, indicating the stability of antenna pigments pool. A significant increase in lipid peroxidation was observed in 4-year-old needles, as a result, the antioxidant defense system was activated, manifested by an increase in the phenolic compounds and free proline content. The accumulation of ascorbic acid decreased with the needle aging.

Key words: *Pinus sibirica*; needles anatomy; photosynthetic pigments; lipid peroxidation; low-molecular antioxidants.

About the authors: Nadezhda V. Chukina, ORCID: 0000-0001-5517-0240, Candidate of



Сведения об авторах: Чукина Надежда Владимировна, ORCID: 0000-0001-5517-0240, канд. биол. наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Россия, Екатеринбург, nady_dicusar@mail.ru; Лукина Наталья Валентиновна, ORCID: 0000-0001-6425-6214, канд. биол. наук, доцент; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; Россия, Екатеринбург, 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; Россия, Екатеринбург, 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, Екатеринбург, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

Biological Sciences; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Russia, Yekaterinburg, 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; Russia, Yekaterinburg, 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; Russia, Yekaterinburg, 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; Russia, Yekaterinburg, Margarita.Glazyrina@urfu.ru

Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Анатомо-морфологические и биохимические показатели разновозрастной хвои *Pinus sibirica* Du Tour (Средний Урал) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 4(72). С. 4-15. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/01>

Chukina, N.V., Lukina, N.V., Filimonova, E.I., & Glazyrina, M.A. (2025). Anatomical, Morphological, and Biochemical Characteristics of Different-Aged Needles of *Pinus sibirica* Du Tour (Middle Urals). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(72), 4-15. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/01>

Введение. Сосна кедровая сибирская или кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour, *Pinaceae* Lindl.) – является одним из наиболее характерных деревьев центральной части хвойной зоны в Западно-Сибирской низменности [17], широко распространена на территории Урала, Алтайского края и северо-востока европейской части Российской Федерации [6], а также на территории Казахстана и Монголии. В других местах земного шара это растение в естественном состоянии не произрастает [1; 16]. В пределах Урала и прилегающих равнинных областей нижняя граница ареала *P. sibirica* проходит немного севернее г. Екатеринбурга, а южная на Приполярном Урале [12].

P. sibirica – редкий пример сочетания в одном древесном растении устойчивости к условиям среды и долговечности, декоративных и оздоровительных свойств, вследствие чего имеет большое хозяйственное значение. Важное достоинство *P. sibirica* – его смола или живица, которая используется для получения таких ценных продуктов, как кедровый бальзам, иммерсионное масло, скипидар, канифоль [1; 5; 6; 16]. Кедровые орехи являются важным пищевым, кормовым и лекарственным ресурсом [6]. Хвоя *P. sibirica* – источник большого количества биологически активных веществ, которые успешно применяются в парфюмерии и медицине. Она богата эфирными маслами, микроэлементами, содержит β-каротин, аскорбиновую кислоту, витамины группы В и др. [16]. Содержание

биологически активных веществ в хвое голосеменных растений во многом зависит, как от продолжительности жизни хвои, так и от ее анатомо-морфологических параметров [10; 15]. Процессы старения хвои голосеменных в отличие от лиственных и вечнозеленых двудольных растений варьируют от 1 года у *Larix sibirica* Ledeb., 3–6 лет, а в субальпийском поясе до 4–12 лет у *P. sibirica*, и до 12–15 лет у *Picea obovata* Ledeb. [4; 6]. Показано, что на анатомо-морфологические и физиолого-биохимические параметры хвои большое влияние оказывают экологические факторы и погодно-климатические условия, такие как температура, влажность воздуха, уровень инсоляции и др. [2; 10; 15]. Отмечено, что в процессе возрастного развития хвои *P. sibirica* прослеживаются изменения ее анатомо-морфологических структур [14], активности пигментного комплекса [11; 14], содержания вторичных метаболитов [8], витаминов (например, витамина С), эфирных масел. В то же время данные по их накоплению в хвое разного возраста противоречивы. Однако работы, включающие комплексную оценку анатомо-морфологических и биохимических параметров разновозрастной хвои *P. sibirica*, произрастающей в естественных лесных фитоценозах на границе подзон южной и средней тайги на Среднем Урале не проводились, что и определило актуальность настоящего исследования. Выбор территории был связан с тем, что подзоны средней и южной тайги на Урале характеризуются хорошими условиями для жизнедеятельности хвойных пород. Здесь формируются насаждения с участием *P. sibirica* IV, реже V классов бонитета.

Цель работы – изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик разновозрастной хвои *Pinus sibirica* Du Tour в естественном местообитании на Среднем Урале.

Объекты и методы исследования. Исследования проводили в июле 2022 г. в естественном лесном фитоценозе, расположенном в 17 км от г. Нижняя Тура ($58^{\circ}40'05''$ Н 60°00'14''E).

Район исследований находится в таежной зоне, на границе подзон южной и средней тайги. Климат района умеренно-континентальный, по теплообеспеченности характеризуется как прохладный, по влагообеспеченности – как влажный. Среднегодовая температура воздуха $+0,7^{\circ}\text{C}$, среднеиюльская $+17,7^{\circ}\text{C}$, среднеянварская $-16,7^{\circ}\text{C}$. При среднем годовом количестве осадков 673 мм за теплый период (апрель–октябрь) выпадает 489 мм. Почвенный покров Туинского округа представлен подзолистыми почвами, среди которых встречаются небольшие островки болотных. Округ расположен в таежной зоне, на переходе средней тайги в южную. Здесь преобладают хвойные леса (*P. obovata*, *Abies sibirica* Ledeb., *P. sibirica*, *Pinus sylvestris* L.) с мелколиственными (*Betula* sp.) породами. Подлесок редкий, бедный по составу (*Sorbus aucuparia* subsp. *sibirica* (Hedl.) Krylov, *Juniperus* sp., *Rosa* sp.) [20].

Объект исследований – *Pinus sibirica*. Это пластичный вид, отличается устойчивостью к морозу и малотребовательностью к теплу. При достаточной атмосферной и почвенной влажности произрастает почти на всех типах грунта, но предпочитает хорошо дренированные, плодородные почвы, содержащие в своем составе известь. Вид теневыносливый, но плохо переносящий сильное затенение в зрелом возрасте [1; 5; 6].

Модельные деревья *P. sibirica* отбирали в естественном лесном массиве с преобладанием *P. obovata*, *A. sibirica*, с участием *P. sibirica*, *L. sibirica*, *Betula pubescens* Ehrh., сомкнутость крон 0,7–0,8. Травяно-кустарничковый ярус разрежен, пятнами встречались *Vaccinium vitis-idaea* L., *Orthilia secunda* (L.) House, *Pyrola rotundifolia* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth и др. [24]. Площадь обследованной территории составляет 300 м².

Для оценки влияния возраста хвои на исследуемые показатели была собрана хвоя 2, 3 и 4-го года с 5 деревьев 30–35-летнего возраста с южной экспозиции. Длину хвои измеряли на свежесобранной хвое, для чего хвоинки (30 шт) выкладывали на миллиметровую бумагу и фотографировали. Далее на фотографиях проводили измерения длины (с точностью до сотых миллиметра) с использованием специализированной системы анализа изображений SIAMS MesoPlant («СИАМС», г. Екатеринбург). Для изучения анатомического строения хвою (n=30) фиксировали в 70% растворе этилового спирта. Поперечные срезы получали при помощи замораживающего микротома МЗ-2 и помещали в глицерин. Измерение анатомических показателей, таких как площадь поперечного сечения среза хвои, толщину эпидермы, гиподермы и энтодермы, площадь смоляных ходов, проводили с использованием светового микроскопа и специализированной системы анализа изображений SIAMS MesoPlant.

Для определения содержания фотосинтетических пигментов навеску хвои (50 мг) гомогенизировали в 80% ацетоне. Измерения ацетоновых вытяжек пигментов проводили спектрофотометрическим методом при длинах волн 470, 624, 647 и 663 нм на приборе APEL (PD-303UV) (Австрия) и рассчитывали по стандартной методике Н.К. Lichtenthaler [27].

Определение содержания низкомолекулярных антиоксидантов и уровня перекисного окисления липидов (ПОЛ) проводили на образцах хвои, предварительно фиксированных в жидком азоте. Анализ биохимических показателей проводили в 4-кратной биологической и 5 аналитических повторностях. Количество продуктов ПОЛ определяли по реакции малонового диальдегида (МДА) с тиобарбитуровой кислотой (ТБК). Измерение оптической плотности проводили при длинах волн 532 и 600 нм [29]. Содержание свободного пролина определяли спектрофотометрически по модифицированной методике [7] с использованием ацидинингидринового реактива. Оптическую плотность окрашенного комплекса измеряли на спектрофотометре при длине волны 520 нм.

Оценку концентрации фенолов, флавоноидов проводили с использованием экстракта мелкоизмельченной хвои после суточного (24 часа) настаивания в 80% этаноле. Измерение и расчет содержания общего количества фенолов в образцах проводили по галловой кислоте с использованием реактива Фолина-Чокалтеу согласно методике [28]. Количество флавоноидов рассчитывали по рутину, с использованием хлорида алюминия, согласно методике [23]. Для определения содержания аскорбиновой кислоты использовали методику Е.Ж. Hewitt [26]. Навеску хвои растирали в смеси НРО₃ и Na₃PO₄ (в соотношении 3:2). Дальнейшие измерения экстрактов проводили спектрофотометрически при длине волны 265 нм. Расчет всех биохимических показателей проводили на сухой вес хвои (с.в.).

Оценку содержания низкомолекулярных антиоксидантов в хвое проводили в 5-кратной биологической повторности (на усредненной пробе хвои) и 3–5 аналитических

повторностях. Полученные данные обрабатывали статистически с использованием стандартного пакета программ Microsoft Excel и StatSoft STATISTICA 12. Достоверность различий полученных результатов проводили по непараметрическому критерию Манна–Уитни (при $p < 0,05$). В таблицах 1, 2 и на рисунке 1 представлены средние значения и их стандартные ошибки.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследования показали, что длина разновозрастной хвои *P. sibirica* варьирует от $88,83 \pm 1,44$ мм (4-летняя хвоя) до $99,75 \pm 1,62$ мм (3-летняя) (табл. 1). Известно, что морфологические параметры хвои голосеменных во многом зависят от комплекса экологических факторов [10; 14; 18]. Большое влияние на длину хвои оказывают погодные условия как во время заложения почек, так и в период ее роста [14]. Погодные условия (общее количество осадков и суммы среднесуточных температур в вегетационный период) существенно варьировали, о чем свидетельствуют различные значения гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) в районе исследований (2019 г. – ГТК = 1,5; 2021 г. – ГТК = 0,7) [3].

Таблица 1

**Анатомо-морфологические показатели разновозрастной хвои *P. sibirica*
в условиях Среднего Урала**

Параметры	Возраст хвои		
	2 года	3 года	4 года
Длина хвои, мм	$92,21 \pm 1,73$ a	$99,75 \pm 1,62$ b	$88,83 \pm 1,44$ a
Площадь поперечного сечения хвои, $\times 10^4$ мкм ²	$55,61 \pm 0,89$ b	$53,83 \pm 1,53$ b	$47,31 \pm 1,10$ a
Площадь мезофилла, $\times 10^4$ мкм ²	$38,58 \pm 0,58$ b	$37,67 \pm 1,05$ b	$33,53 \pm 0,89$ a
Площадь центрального цилиндра, $\times 10^4$ мкм ²	$11,12 \pm 0,19$ b	$9,70 \pm 0,23$ ab	$8,21 \pm 0,12$ a
Толщина энтодермы, мкм	$33,20 \pm 0,70$ a	$36,56 \pm 0,61$ b	$37,26 \pm 0,46$ b
Площадь смоляных ходов, мкм ²	$274,51 \pm 4,70$ a	$287,91 \pm 5,97$ b	$265,48 \pm 4,72$ a
Толщина эпидермы, мкм	$13,82 \pm 0,24$ a	$14,48 \pm 0,22$ a	$13,56 \pm 0,23$ a
Толщина гиподермы, мкм	$10,59 \pm 0,18$ a	$11,72 \pm 0,20$ a	$11,11 \pm 0,18$ a

Примечание: разные буквы (a, b, c) в столбцах (Хср. \pm m) указывают на достоверные различия по каждому показателю между хвоей разного возраста, одинаковые буквы – на отсутствие различий при уровне значимости $p < 0,05$.

Анализ анатомического строения разновозрастной хвои *P. sibirica* показал, что по мере увеличения возраста хвои происходит незначительное уменьшение площади ее поперечного сечения, площади мезофилла и центрального цилиндра. По большинству показателей различия 4- и 2-летней хвои *P. sibirica* статистически значимы. Снижение площади поперечного сечения хвои и площади мезофилла, в среднем, составило 17,5%, площади центрального цилиндра – 35,4%. Максимальная площадь смолоносной системы отмечена для хвои 3-го года. При этом толщина покровных тканей хвои в процессе возрастного развития практически не изменяется (табл. 1).

Описанные выше тенденции согласуются с литературными данными [9; 14] и объясняются началом процесса старения листового аппарата, который нередко сопровождается редукцией общей ассимилирующей поверхности хвои, начиная с 4-летнего возраста.

Анализ содержания фотосинтетических пигментов в хвое *P. sibirica* в процессе возрастного развития хвои показал относительную стабильность пигментов антенных пигментов.



При этом наблюдалось небольшое снижение концентрации хлорофилла *a* (на 16%) у 4-летней хвои по сравнению с 2-летней, что привело к закономерному снижению концентрации зеленых пигментов в хвое и уменьшению соотношения хлорофилла *a* к сумме антенных пигментов (Хла/Хл*b*+каротиноиды) на 10% и 16%, соответственно (табл. 2). Согласно литературным данным, максимальное содержание хлорофиллов в хвое *P. sibirica* отмечено для хвои 2-го и 3-го года жизни, что согласуется с полученными нами данными [2].

Таблица 2

Содержание пигментов в разновозрастной хвое *P. sibirica* в условиях Среднего Урала

Показатели	Возраст хвои		
	2 года	3 года	4 года
Хла, мг/г с.в.	1,12±0,04b	0,99±0,02b	0,94±0,03a
Хл <i>b</i> , мг/г с.в.	0,42±0,05a	0,47±0,01a	0,44±0,02a
Хла+ <i>b</i> , мг/г с.в.	1,54±0,01b	1,46±0,02ab	1,38±0,05a
Каротиноиды, мг/г с.в.	0,44±0,03a	0,44±0,02a	0,44±0,02a
Хла+ <i>b</i> /каротиноиды	3,58±0,4a	3,36±0,11a	3,17±0,09a
Хла/Хл <i>b</i>	2,35±0,11a	2,12±0,09a	2,13±0,06a
Хла/Хл <i>b</i> +каротиноиды	1,33±0,12b	1,10±0,04ab	1,07±0,02a

Примечание: разные буквы (a, b, c) в столбцах (Хср. ± m) указывают на достоверные различия по каждому показателю между хвоей разного возраста, одинаковые буквы – на отсутствие различий при уровне значимости $p < 0,05$.

Соотношение форм хлорофиллов (Хла/Хл*b*) характеризует потенциальную фотосинтетическую активность листового аппарата и в норме находится в диапазоне 2–3. В литературе отмечено относительное постоянство соотношения форм хлорофилла в хвое *P. sibirica* в процессе ее возрастного развития, что соотносится с полученными нами данными [11; 13; 14]. При этом отмечается, что в процессе старения хвои у *P. sibirica* повышается содержание каротиноидов [11; 14]. Наши исследования показали отсутствие достоверных отличий по показателю содержания в хвое каротиноидов и хлорофилла *b*.

Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) – индикаторная реакция повреждения клеточных мембран. Усиление процессов ПОЛ является одним из основных неспецифических механизмов защиты от повреждающего действия активных форм кислорода (АФК) в условиях окислительного стресса [22]. Сравнительный анализ уровня перекисного окисления липидов в разновозрастной хвое *P. sibirica* показал их достоверное увеличение по мере старения хвои. Так интенсивность ПОЛ в хвое 3-го и 4-го года, по сравнению с 2-летней, увеличилась в 1,9 и 2,1 раза соответственно (рис. 1, а). Данная тенденция говорит об усилении процессов накопления продуктов окисления липидов в хвое *P. sibirica* в процессе ее возрастного развития, что также было отмечено в литературе [11; 14].

Следствием усиления процесса ПОЛ в растениях является активация и интенсификация системы антиоксидантной защиты, которая предотвращает и устраняет последствия окислительного стресса. Одним из компонентов этой системы являются неферментативные низкомолекулярные соединения. В клетках растений низкомолекулярные антиоксиданты представлены очень широко. Большую и разнообразную группу представляют фенольные соединения, к числу которых относятся и

флавоноиды. Как правило, накопление фенольных соединений в растениях служит индикатором низкотемпературного стресса, дефицита воды и минерального питания. Флавоноиды – биологически активные соединения фенольной природы, которые играют важную роль в окислительно-восстановительных реакциях, защищают растительные ткани от избыточной солнечной радиации. Аккумуляция свободного пролина считается типичным ответом растения на воздействие различных негативных факторов окружающей среды [25]. Аскорбиновая кислота – витамин, который в клетках растений непосредственно вступает в реакции со свободно радикальными частицами, инактивируя их, и таким образом, снижает разрушительные последствия окислительного стресса [21].

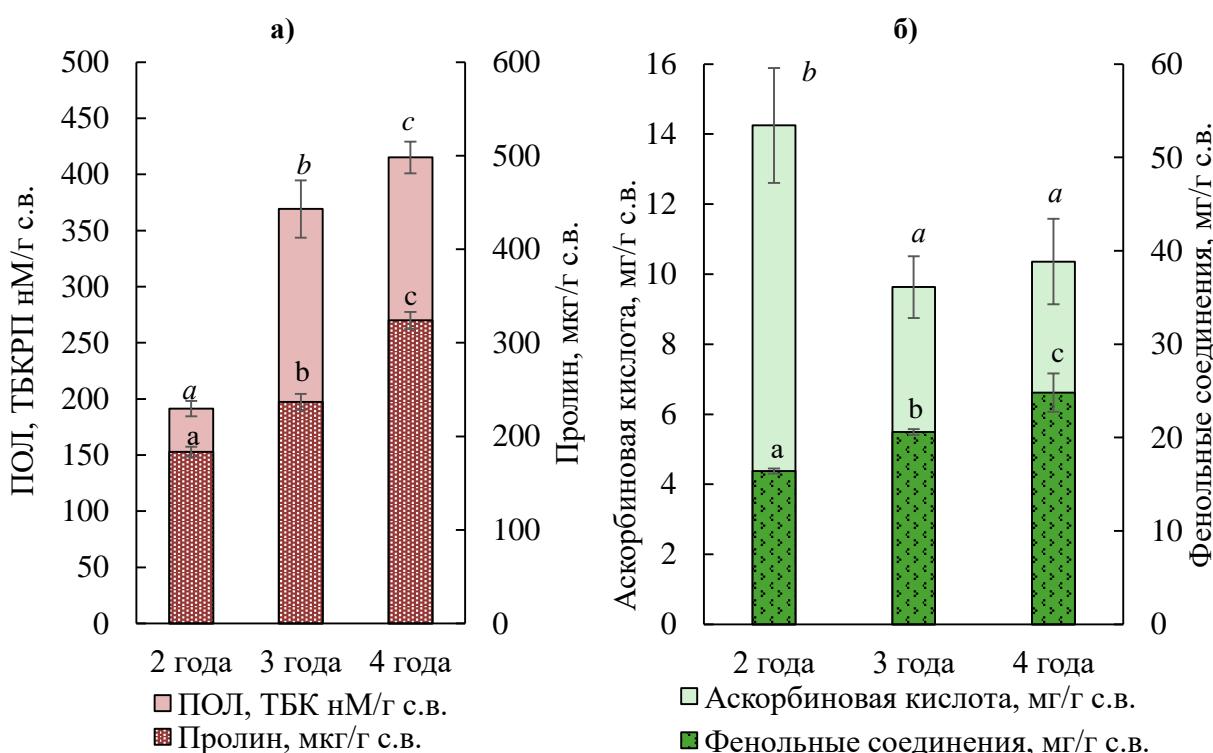


Рис. 1. Интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) и содержание пролина (а), аскорбиновой кислоты и фенольных соединений (б) в разновозрастной хвое *P. sibirica* в условиях Среднего Урала

На рисунке 1 представлены результаты анализа содержания низкомолекулярных антиоксидантов в разновозрастной хвое *P. sibirica*. Установлено, что общее содержание фенольных соединений к 4-му году жизни хвои увеличивается в 1,5 раза. Вероятно, повышенное накопление фенольных соединений связано с усилением с возрастом хвои процессов ПОЛ, отмеченным выше. В то же время максимальное содержание флавоноидов наблюдается в 2-летней хвое ($3,15 \pm 0,14$ мг/г с.в.). К 3-му году жизни хвои концентрация флавоноидов снижается на 15% ($2,75 \pm 0,15$ мг/г с.в.), к 4-му уже на 30% ($2,42 \pm 0,15$ мг/г с.в.).

Повышенное содержание флавоноидов в молодой хвое может положительно влиять на фотосинтетическую деятельность, защищая пигментный комплекс от избыточной инсоляции.

В процессе возрастного развития хвои также наблюдается увеличение содержания свободного пролина (рис. 1). В 3-летней хвое по сравнению с 2-летней – на 29%, в 4-летней по сравнению с 2-летней – на 76,5%. По-видимому, такая динамика изменения данного показателя может быть связана со снижением обводненности хвои и, как следствие, усыханием ее в процессе старения.

Максимальное содержание витамина С выявлено в 2-летней хвое ($14,25 \pm 1,64$ мг/г с.в.), что в 1,4 раза выше, чем в 3 и 4-летней хвое *P. sibirica* (рис. 1), что согласуется с литературными данными, в которых отмечено увеличение накопления аскорбиновой кислоты в молодой хвое [19].

Таким образом, однонаправленных изменений в накоплении низкомолекулярных антиоксидантов в процессе возрастного развития хвои *P. sibirica* не отмечено.

Заключение. Исследование разновозрастной хвои *P. sibirica*, произрастающей на Среднем Урале, показало, что с увеличением возраста хвои наблюдалось уменьшение таких анатомо-морфологических показателей, как площадь поперечного сечения хвои, площади мезофилла и центрального цилиндра.

При этом молодая (2-летняя) хвоя характеризовалась высокой фотосинтетической активностью, т.к. содержала максимальное количество фотосинтетических пигментов, а также аскорбиновой кислоты. В более зрелой (4-летней) хвое усиливались процессы окисдации липидов, о чем свидетельствовало увеличение концентрации продуктов ПОЛ, и, как следствие, активизировалась система антиоксидантной защиты, что проявлялось в увеличении содержания фенольных соединений и свободного пролина.

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

Литература

1. Бех И.А., Кривец С.А., Бисирова Э.М. Кедр – жемчужина Сибири. Томск: Печатная мануфактура, 2009. 49 с.
2. Варлам И.И., Русак С.Н., Казарцева К.В. Сезонные изменения пигментного состава *Pinus sibirica* в условиях урбоэкосистем северных территорий (на примере города Сургута) // Экология урбанизированных территорий. 2019. № 1. С. 82-86. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-11082>.
3. Глазырина М.А., Филимонова Е.И., Лукина Н.В., Кордюк А.А. Динамика ценопопуляционных показателей *Eriophyes palustris* (L.) Crantz, произрастающего в техногенном местообитании // Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы II Международной научно-практической конференции. Книга 2. (г. Киров, 23–24 апреля 2025 г.). Киров: Вятский государственный университет, 2025. С. 236-241.
4. Добровольский В.К. Кедровые леса СССР и их использование. Москва: Лесная промышленность, 1964. 186 с.
5. Игнатенко М.М. Сибирский кедр (биология, интродукция, культура). М.: Наука, 1988. 159 с.
6. Ипатов Л.Ф. Кедр на Севере. Архангельск: Музей леса, 2011. 411 с.
7. Калинкина 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.

8. Плаксина И.В., Судачкова Н.Е., Романова Л.И., Милютина И.Л. Сезонная динамика фенольных соединений в лубе и хвое сосны обыкновенной и кедра сибирского в посадках различной густоты // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 103-108.
9. Полякова О.И. Морфолого-анатомические особенности хвои у семенного и разновозрастного вегетативного потомства мутационных «Ведьминых метел» *Pinus sibirica* Du Tour // Лесной вестник. Forestry bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 51-57. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-51-57>.
10. Рудник Т.И., Зотикова А.П., Бендер О.Г. Морфоанатомические особенности хвои экотипов кедра сибирского в условиях юга Томской области // Вестник ТГУ. 2007. № 300. С. 228-230.
11. Русак С.Н., Варлам И.И., Кравченко И.В., Казарцева К.В. Фотосинтетические пигменты сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) в биоиндикации условий окружающей среды // Проблемы региональной экологии. 2018. № 3. С. 6-11. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-13006>.
12. Семериков Л.Ф., Ипполитов В.В. Резерваты кедра сибирского на Урале // Растительность в условиях техногенных ландшафтов Урала: сб. науч. трудов. Свердловск: УрО РАН, 1989. С. 45-55.
13. Собчак Р.О., Григорьев Ю.С. Биоиндикационное значение флуоресценции хлорофилла некоторых древесно-кустарниковых растений в зимний период // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14, № 1. С. 53-59.
14. Собчак Р.О., Зотикова А.П. Влияние условий высокогорья на анатомо-физиологические показатели хвои сосны сибирской // Вестник ТГУ. 2009. № 326. С. 200-202.
15. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М., Донцов А.С. Комплексный анализ хвои ели сибирской в условиях техногенной среды г. Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2014. Т. 32, № 1-2. С. 43-45.
16. Титов Е.В. Кедр – царь сибирской тайги. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2007. 152 с.
17. Усольцев В.А., Крудышев В.В. Об экологии и географии кедра сибирского // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2011. № 28. С. 147-153.
18. 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>.
19. Шавнин С.А., Юсупов И.А., Монтиле А.А., Голиков Д.Ю., Марина Н.В. Сезонная динамика содержания компонентов антиокислительной системы хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне локального теплового воздействия // Известия вузов. Лесной журнал. 2023. № 2. С. 38-57. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-38-57>.
20. Шакиров А.В. Физико-географическое районирование Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 617 с.
21. Akram N.A., Shafiq F., Ashraf M. Ascorbic Acid-A Potential Oxidant Scavenger and Its Role in Plant Development and Abiotic Stress Tolerance // Front Plant Sci. 2017. V. 8, Article 613. P.1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00613>.
22. 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. P. 4099-4121. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>.

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, № 15. P. 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>.
24. Chukina N., Lukina N., Glazyrina M., Filimonova E., Uchaev A., Nekrasova O. Anatomical, morphological and biochemical features of *Pinus sibirica* needles on recultivated and non-recultivated ash dump sites in the Middle Urals // BIO Web of Conferences. 2024. V. 128, 00004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412800004>.
25. Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. Plant Signal Behav. 2012. 7(11):1456-1466. <https://doi.org/10.4161/psb.21949>.
26. Hewitt E.J., Dickes G.J. Spectrophotometric measurements on ascorbic acid and their use for the estimation of ascorbic acid and dehydroascorbic acid in plant tissues // Biochemical Journal. 1961. V. 78, № 2. P. 384-391.
27. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in enzymology. 1987. V. 148, № 4. P. 350-382.
28. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent // Methods in Enzymology. 1999. V. 299, № 8. P. 152-178.
29. Uchiyama M., Mihara M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test // Anal. Biochem. 1978. V. 8, № 6. P. 287-297.

References

1. Bex, I.A., Krivecz, S.A., & Bisirova, E`M. (2009). *Kedr – zhemchuzhina Sibiri*. Tomsk: Pechatnaya manufaktura. (in Russ.).
2. Varlam, I.I., Rusak, S.N., & Kazarceva, K.V. (2019). Sezonny`e izmeneniya pigmentnogo sostava *Pinus sibirica* v usloviyakh urboekosistem severny`x territorij (na primere goroda Surguta). *E`kologiya urbanizirovanny`x territorij*, 1, 82-86. (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2019-11082>.
3. Glazyrina, M.A., Filimonova, E.I., Lukina, N.V., & Kordyuk, A.A. (2025). Dinamika cenopopulacionny`x pokazatelej *Epipactis palustris* (L.) Crantz, proizrastayushhego v texnogennom mestoobitanii. *E`kologiya rodnogo kraja: problemy` i puti ix resheniya: materialy` II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (ss. 236–241). Kirov: Vyatskij gosudarstvenny`j universitet. (in Russ.).
4. Dobrovolskij, V.K. (1964). *Kedrovyye lesa SSSR i ix ispol`zovanie*. Moskva: Lesnaya promy`shlennost` . (in Russ.).
5. Ignatenko, M.M. (1988). *Sibirskij kedr (biologiya, introdukciya, kul`tura)*. M.: Nauka. (in Russ.).
6. Ipatov, L.F. (2011). *Kedr na Severe*. Arxangel`sk: Muzej lesa. (in Russ.).
7. Kalinkina, L.G., Nazarenko, L.V., & Gordeeva, E.E. (1990). Modificirovanny`j metod vy`deleniya svobodny`x aminokislot dlya opredeleniya na aminokislotnom analizatore. *Fiziologiya rastenij*, 37(3), 617-621. (in Russ.).
8. Plaksina, I.V., Sudachkova, N.E., Romanova, L.I., & Milyutina, I.L. (2009). Sezonnaya dinamika fenol`ny`x soedinenij v lube i xvoe sosny` oby`knovennoj i kedra sibirskogo v posadkakh razlichnoj gustoty`. *Ximiya rastitel`nogo sy`r`ya*, 1, 103-108. (in Russ.).
9. Polyakova, O.I. (2020). Morfologo-anatomicheskie osobennosti xvoi u semennogo i raznovozrastnogo vegetativnogo potomstva mutacionny`x «Ved`miny`x metel» *Pinus sibirica* Du Tour. *Forestry bulletin*, 24(6), 51-57. (in Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-51-57>.
10. Rudnik, T.I., Zotikova, A.P., & Bender, O.G. (2007). Morfoanatomicheskie osobennosti xvoi e`kotipov kedra sibirskogo v usloviyakh yuga Tomskoj oblasti. *Vestnik TGU*, 300, 228-230. (in Russ.).

11. Rusak, S.N., Varlam, I.I., Kravchenko, I.V., & Kazarceva, K.V. (2018). Fotosinteticheskie pigmenty` sosny` sibirskoj (*Pinus sibirica* Du Tour) v bioindikacii uslovij okruzhayushhej sredy` *Problemy` regional`noj e`kologii*, 3, 6-11. (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-13006>.
12. Semerikov, L.F., & Ippolitov, V.V. (1989). Rezervaty` kedra sibirskogo na Urale. *Rastitel`nost` v usloviyax texnogenny`x landshaftov Urala: sb. nauch. trudov*. Sverdlovsk: UrO RAN. (in Russ.).
13. Sobchak, R.O., & Grigor`ev, Yu.S. (2007). Bioindikacionnoe znachenie fluorescencii xlorofilla nekotory`x drevesno-kustarnikov`x rastenij v zimnij period. *Sibirskij e`kologicheskij zhurnal*. 14(1), 53-59. (in Russ.).
14. Sobchak, R.O., & Zotikova, A.P. (2009). Vliyanie uslovij vy`sokogor`ya na anatomo-fiziologicheskie pokazateli xvoi sosny` sibirskoj. *Vestnik TGU*, 326, 200-202. (in Russ.).
15. Sunczova, L.N., Inshakov, E.M., & Donczov, A.S. (2014). Kompleksny`j analiz xvoi eli sibirskoj v usloviyax texnogennoj sredy` g. Krasnoyarska. *Xvojny`e boreal`noj zony`*, 32(1-2), 43-45. (in Russ.).
16. Titov, E.V. (2007). *Kedr – czar` sibirskoj tajgi*. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvenny`j lesotexnicheskij universitet im. G.F. Morozova. (in Russ.).
17. Usol`cev, V.A., & Krudy`shev, V.V. Ob e`kologii i geografii kedra sibirskogo (2011). *Aktual`ny`e problemy` lesnogo kompleksa*, 28, 147-153. (in Russ.).
18. 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-Magnezite Deposit Dumps. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 46-55. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/04>.
19. Shavnin, S.A., Yusupov, I.A., Montile, A.A., Golikov, D.Yu., & Marina, N.V. (2023). Sezonnaya dinamika soderzhaniya komponentov antiokislitel`noj sistemy` xvoi sosny` oby`knovennoj (*Pinus sylvestris* L.) v zone lokal`nogo teplovogo vozdejstviya. *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2, 38-57. (in Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-38-57>.
20. Shakirov, A.V. (2011). *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie Urala*. Ekaterinburg: UrO RAN. (in Russ.).
21. Akram, N.A., Shafiq, F., & Ashraf, M. (2017). Ascorbic Acid-A Potential Oxidant Scavenger and Its Role in Plant Development and Abiotic Stress Tolerance. *Front Plant Sci.*, 8(613), 1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00613>.
22. Anjum, N.A., Sofo, A., Scopa, A., Roychoudhury, A., Gill, S.S., Iqbal, M., Lukatkin, A.S., Pereira, E., Duarte, A.C., & Ahmad, I. (2015). Lipids and proteins – major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4099-4121. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>.
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. Chukina, N., Lukina, N., Glazyrina, M., Filimonova, E., Uchaev, A., & Nekrasova, O. (2024). Anatomical, morphological and biochemical features of *Pinus sibirica* needles on recultivated and non-recultivated ash dump sites in the Middle Urals. *BIO Web of Conferences*, 128, 00004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412800004>.
25. Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M.N., Wani, A.S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signal Behav*, 7(11), 1456-1466. <https://doi.org/10.4161/psb.21949>.
26. Hewitt, E.J., & Dickes, G.J. (1961). Spectrophotometric measurements on ascorbic acid and their use for the estimation of ascorbic acid and dehydroascorbic acid in plant tissues. *Biochemical Journal*, 78(2), 384-391.

27. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in enzymology*, 148(4), 350-382.
28. Singleton, V.L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin–Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299(8), 152-178.
29. Uchiyama, M., & Mihara, M. (1978). Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. *Anal. Biochem*, 8(6), 287-297.

дата поступления: 24.09.2025

дата принятия: 29.10.2025

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