

**Изменение анатомо-морфологических показателей *Pinus sylvestris* L.,  
в условиях серпентинитового карьера**

**Changes in the anatomical and morphological parameters of *Pinus sylvestris* L.,  
in the conditions of serpentinite quarry**

Лукина Н. В., Бажин Д. В., Филимонова Е. И., Глазырина М. А.

Lukina N. V., Bazhin D. V., Filimonova E. I., Glazyrina M. A.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

E-mail: natalia.lukina@urfu.ru; bazhinden2@mail.ru; elena.filimonova@urfu.ru; puma2531@mail.ru

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Реферат.** В работе представлены результаты исследования анатомо-морфологических показателей *Pinus sylvestris* L., произрастающей в условиях серпентинитового карьера на Среднем Урале. Выявлены морфологические и анатомические изменения, имеющие адаптивный характер и способствующие выживанию вида в экстремальных условиях среды. У *P. sylvestris* в условиях карьера установлено достоверное уменьшение морфометрических показателей: высоты деревьев и ежегодного прироста ствола. Под влиянием неблагоприятных факторов (недостаток элементов минерального питания, недостаток воды, высокая каменистость субстрата) в карьере происходило уменьшение длины и диаметра хвои. Из анатомических признаков важно отметить уменьшение числа смоляных ходов при увеличении их диаметра, уменьшение диаметра центрального цилиндра и площади мезодермы.

**Ключевые слова.** Адаптация, анатомия хвои, карьеры, серпентиниты, *Pinus sylvestris*.

**Summary.** The paper presents the results of a study of the anatomical and morphological parameters of *Pinus sylvestris* L. growing in a serpentinite quarry in the Middle Urals. Morphological and anatomical changes have been identified, that are adaptive in nature and contribute to the survival of the species in extreme environmental conditions. *P. sylvestris* under open pit mining conditions shows a significant decrease in morphometric parameters, such as tree height and annual growth of the trunk. Under the influence of unfavorable factors (lack of mineral nutrients, lack of water, high rockiness of the substrate), the length and diameter of the needles decreased. Of the anatomical features, it is important to note a decrease in the number of resin passages with an increase in their diameter, a decrease in the diameter of the central cylinder and the area of the mesoderm.

**Key words.** Adaptation, pine needles anatomy, *Pinus sylvestris*, quarries, serpentinites.

Добыча полезных ископаемых открытым способом, в том числе на Урале, сопровождается существенными нарушениями почвенного и растительного покровов на больших пространствах. Восстановление растительности на подобных территориях происходит крайне медленно. Одним из пионерных видов, способным заселять нарушенные территории, характеризующиеся сильной каменистостью, низким плодородием и неблагоприятным водным режимом на Среднем Урале является *Pinus sylvestris* L. Вид *P. sylvestris* способен успешно адаптироваться к различным условиям обитания. Установлено, что стрессовые условия меняют нормальные физиологические и биохимические процессы, вызывающие изменения морфологии и анатомии растений. У деревьев *P. sylvestris*, растущих в разных условиях окружающей среды, имеются различия в геометрии кроны, морфологии побегов, анатомии хвои (Niinemets et al., 2001; Niinemets, Lukjanova, 2003; Tiwari et al., 2013). Морфологические и анатомические характеристики являются важными индикаторами реакции организма на меняющиеся условия окружающей среды (Urbaniak et al., 2003). Изучение способов реализации растениями адаптивных возможностей в неблагоприятных условиях техногенных местообитаний позволяют понять механиз-

мы устойчивости растений, их сообществ и экосистем (Филимонова и др., 2017). Целью исследования было изучение анатомо-морфологического строения *P. sylvestris*, произрастающей в условиях серпентинитового карьера на Среднем Урале.

Объект исследования – *P. sylvestris* (сосна обыкновенная) – самая распространенная на Урале леособоразующая порода. Ее ареал на севере простирается примерно до полярного круга, на юге доходит до Зауральской степи, образуя степные островные боры (Мамаев, 1983). Морфологические особенности *P. sylvestris* в пределах ареала очень изменчивы. От южной тайги и лесостепи, где находится оптимум произрастания вида, по направлению на север к лесотундре и на юг к степным островным борам от равнины в горы происходит постепенное уменьшение абсолютных размеров ствола, кроны, побегов, хвои (Мамаев, 1983; Галдина, Хазова, 2019). *P. sylvestris* обладает широкой экологической амплитудой в отношении влажности почвы, характеризуется высокой морозоустойчивостью и жаростойкостью, чувствительна к промышленному загрязнению (Егорова, Кулагин, 2007).

Исследования проводили на территории карьера по добыче дорожного камня, расположенного в 2 км от г. Верхнего Тагила (57° 22' 03" с. ш., 60° 00' 22" в. д.). Площадь карьера составляет 3,3 га. Породы представлены дунитами серпентинизированными. Преобладающей фракцией являются крупные агрегаты (от 1 до 10 и более см), содержание мелких частиц снижено. Агрохимический состав субстратов характеризуется очень низким содержанием доступных для растений элементов минерального питания. Реакция среды субстрата слабощелочная. Карьер окружен сосняками черничниковыми на буроземовидных мощных слабощелочных почвах.

Геоботаническое обследование показало, что на опытной площадке 1 (ОП1), расположенной на выровненном дне карьера, преобладает, преимущественно, древесная растительность с доминированием *P. sylvestris* (возраст деревьев от 20 до 30 лет), с высоким обилием подроста и всходов *Betula pubescens* Ehrh. и *B. pendula* Roth. Единично встречаются *Populus tremula* L. и *Salix caprea* L. Сомкнутости древостоя нет. Травянистая растительность, представленная единичными особями *Medicago lupulina* L., *Artemisia absinthium* L., *Calamagrostis arundinaceae* (L.) Roth и др., крайне разрежена. Общее проективное покрытие растениями варьирует от 1 % до 20 %. На внутреннем отвале (опытная площадка 2 – ОП2), расположенном рядом с бортом карьера, кроме подроста *P. sylvestris* и единичных особей *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth, *Poa pratensis* L., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop, *Lathyrus humilis* (Ser) Fisch ex Spreng., встречается редкая на Урале орхидея – *Epipactis atrorubens* (Hoffm.) Besser. (Красная книга Свердловской области, 2018). Контрольные образцы отбирали на опушке лесного массива в 2-х км от пос. Новоуткинска (контрольная площадка – КП). Подстилающие породы в районе – известняки серые органогенные; почвы – дерново-среднеподзолистые.

Сбор материала проводили в конце августа 2020 г. Для изучения морфологических параметров *P. sylvestris* на двух площадках в карьере, а также в естественном местообитании, было отобрано по 10 модельных деревьев возрастом 20–25 лет. Измеряли высоту и годовой прирост ствола. Для анатомо-морфологического анализа с середины кроны каждого модельного дерева отбирали хвою второго года жизни без видимых признаков повреждений. Растительные образцы фиксировали в 70 %-м растворе этилового спирта. Срезы игл готовили на замораживающем микротоме МЗ-2 (Россия). Измерения анатомо-морфологических признаков проводили с помощью микроскопа Olympus CX-41 с программным обеспечением, с увеличением окуляра и объектива 10× и 40×. Статистическая обработка полученных данных выполнена с помощью стандартного пакета программ Microsoft Excel и StatSoft STATISTICA 12. Были проведены однофакторный дисперсионный и дискриминантный анализы. Статистически значимые различия были выявлены с использованием LSD Фишера при уровне значимости  $p < 0,05$ .

Анализ морфологических параметров *P. sylvestris* выявил отличия между контрольными и опытными образцами. В условиях серпентинитового карьера достоверно ( $p < 0,05$ ) уменьшаются средние показатели высоты деревьев и показатели прироста ствола по сравнению с контролем (табл. 1). В карьере (ОП1 и ОП2) высота 20–25-летних особей *P. sylvestris* варьировала от 1,2 до 3,5 м, а в контроле – от 3,5 до 5,0 м.

Известно, что длина хвои *P. sylvestris* характеризуется сильной изменчивостью под влиянием различных внешних и внутренних факторов (Правдин, 1964; Wood, 1972). В карьере на опытных площадках длина хвои *P. sylvestris* достоверно ( $p < 0,05$ ) меньше, чем в контроле. Подобная реакция растений, произрастающих на серпентинитах, отмечена рядом авторов (Alexander et al., 2007; Giuliani et al., 2008).

Анатомия хвои *Pinus* – информативный показатель, как при внутривидовой изменчивости, так и в ответ на действие внешних факторов (Правдин, 1964; Мамаев, 1983). Особенности строения покровных тканей хвои, структура и размеры мезофилла и смоляных каналов являются важными признаками адаптивной способности, характеризующими степень приспособленности к новым условиям

произрастания. Анализ анатомических особенностей хвои *P. sylvestris* показал, что условия серпентинитового карьера вызывали достоверное ( $p < 0,05$ ) уменьшение площади поперечного сечения хвои и площади центрального цилиндра по сравнению с контрольным местообитанием (табл. 2).

Таблица 1

Морфологические параметры *Pinus sylvestris* в условиях серпентинитового карьера и в контроле

Параметры	ОП1	ОП2	КП	
Длина хвои, см	Хср. $\pm$ m	2,77 $\pm$ 0,02a	3,23 $\pm$ 0,05b	5,69 $\pm$ 0,04c
	lim	1,8–3,7	1,8–4,2	4,5–7,3
	Cv, %	13,01	21,79	9,74
Высота дерева, м	Хср. $\pm$ m	1,62 $\pm$ 0,10a	1,79 $\pm$ 0,18a	4,05 $\pm$ 0,23b
	lim	1,2–2,0	1,2–3,5	3,5–5,0
	Cv, %	17,64	33,26	14,20
Прирост дерева, см	Хср. $\pm$ m	8,10 $\pm$ 0,61a	10,41 $\pm$ 1,04a	53,33 $\pm$ 3,80b
	lim	5,14–10,85	6,14–16,43	40–65
	Cv, %	21,20	32,98	17,45

Примечание: здесь и далее различные буквы в строках, соответствующих одинаковым параметрам, указывают на достоверные различия при уровне  $p < 0,05$ .

Таблица 2

Анатомические параметры хвои *Pinus sylvestris* в условиях серпентинитового карьера и в контроле

Параметры	ОП1	ОП2	КП	
Площадь среза, мм <sup>2</sup>	Хср. $\pm$ m	0,582 $\pm$ 0,012a	0,582 $\pm$ 0,022a	0,919 $\pm$ 0,011b
	lim	0,51–0,68	0,44–0,76	0,84–1,02
	Cv, %	9,96	17,4	5,15
Площадь центрального цилиндра, мм <sup>2</sup>	Хср. $\pm$ m	0,297 $\pm$ 0,010a	0,274 $\pm$ 0,011a	0,483 $\pm$ 0,014b
	lim	0,22–0,37	0,19–0,35	0,36–0,59
	Cv, %	13,98	18,93	13,00
Толщина гиподермы, мкм	Хср. $\pm$ m	9,25 $\pm$ 0,75a	9,55 $\pm$ 0,71a	9,25 $\pm$ 0,53a
	lim	5–12,5	7,5–12,5	7,5–12,5
	Cv, %	25,64	23,60	18,24
Толщина эпидермы, мкм	Хср. $\pm$ m	22 $\pm$ 0,9a	20,1 $\pm$ 0,75a	21,5 $\pm$ 1,07a
	lim	17,5–25	17,5–25	15–25
	Cv, %	12,91	11,83	15,74
Число смоляных ходов, шт	Хср. $\pm$ m	4,6 $\pm$ 0,21a	5,25 $\pm$ 0,28a	8,9 $\pm$ 0,49b
	lim	3–6	3–7	6–14
	Cv, %	20,44	23,83	24,70
Диаметр смоляных ходов, мкм	Хср. $\pm$ m	55,8 $\pm$ 1,81c	50,1 $\pm$ 1,51b	42,8 $\pm$ 1,49a
	lim	40–71	34–65	32–55
	Cv, %	14,48	13,49	15,64
Площадь мезодермы, мм <sup>2</sup>	Хср. $\pm$ m	0,23 $\pm$ 0,009a	0,25 $\pm$ 0,014a	0,36 $\pm$ 0,010b
	lim	0,17–0,36	0,13–0,37	0,26–0,44
	Cv, %	18,47	25,37	12,53

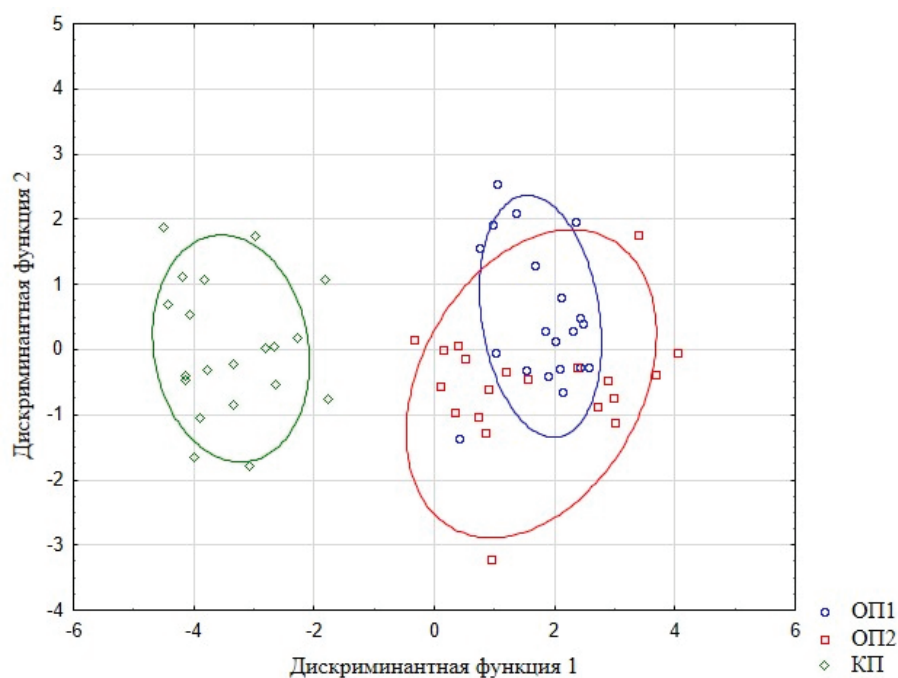


Рис. Дискриминантный анализ хвой *P. sylvestris* в исследуемых местообитаниях по анатомическим признакам. ОП1 и ОП2 – опытные площадки в карьере; КП – контрольная площадка в естественном местообитании.

Существенную роль в адаптации вида к новым условиям произрастания играют размеры ассимиляционных тканей. У *P. sylvestris* ассимиляционные ткани представлены мезодермой или складчатым мезофиллом, состоящим из клеток, оболочки которых формируют складки и выступы. В условиях достаточного увлажнения эта ткань достигает максимальных размеров, а в сухих условиях размеры ее уменьшаются (Галдина, Хазова, 2019). Исследования показали, что в хвое *Pinus* с опытных участков площадь мезодермы в 1,5 раза меньше по сравнению с контролем.

В условиях серпентинитового карьера также отмечено изменение смоловыделяющей системы

хвой *P. sylvestris*: количество смоляных ходов меньше, чем в контроле, но увеличился их диаметр. Толщина эпидермиса и гиподермы хвой *Pinus*, произрастающей на опытных участках в карьере, существенно не отличались от естественного участка. Полученные нами данные согласуются с результатами аналогичных исследований других авторов, указывающих на увеличение площади мезофилла и центрального цилиндра, числа смоляных ходов и длины хвой у *P. sylvestris* в техногенных условиях (Егорова, Кулагин, 2007; 2014; Цандекова, Колмогорова, 2013).

Дискриминантный анализ, проведенный с использованием таких признаков, как площадь среза, площадь центрального цилиндра, число смоляных ходов и их диаметр, площадь мезодермы, отделил контрольный участок от опытных участков по дискриминантной функции 1 (рисунок). Главными параметрами, определяющими разделение, являлись площадь среза и площадь центрального цилиндра. Достоверность, с которой параметры относятся к этим группам, равняется 80 % для ОП1, 90 % для ОП2 и 100 % для КП.

Таким образом, в результате проведенных исследований были выявлены изменения как морфологических, так и анатомических характеристик *P. sylvestris*, произрастающей в условиях серпентинитового карьера на Среднем Урале. Установлено достоверное уменьшение показателей высоты и ежегодного прироста деревьев. Под влиянием неблагоприятных факторов (недостаток питательных веществ, недостаток воды, высокая каменистость субстрата) на серпентинитовых породах уменьшаются длина и диаметр хвой по сравнению с контролем. Из анатомических признаков важно отметить уменьшение числа смоляных ходов при увеличении их диаметра, уменьшение диаметра центрального цилиндра и площади мезодермы. Снижение анатомо-морфологических показателей у *P. sylvestris* можно рассматривать как процесс ксерофитизации, направленный на сохранение влаги и повышение устойчивости деревьев в неблагоприятных условиях.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания УрФУ FEUZ-2020-0057 и при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Свердловской области в рамках научного проекта № 20-44-660011.

ЛИТЕРАТУРА

- Галдина Т. Е., Хазова Е. П.** Влияние генетических и экологических факторов на анатомо-морфологические показатели хвои // Успехи современного естествознания, 2019. – № 4. – С. 7–13.
- Егорова Н. Н., Кулагин А. А.** Особенности строения ассимиляционных органов лесообразующих видов в техногенных условиях // Самарская Лука, 2007. – Т. 16, № 3(21). – С. 463–476.
- Егорова Н. Н., Кулагин А. А.** Изменчивость признаков анатомического строения ассимиляционного аппарата и проводящих корней сосны обыкновенной в экстремальных лесорастительных условиях // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2014. – № 6(50). – С. 52–54.
- Красная книга Свердловской области: животные, растения, грибы.* – Екатеринбург: ООО «Мир», 2018. – 450 с.
- Мамаев С. А.** Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 112 с.
- Правдин Л. Ф.** Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. – М.: Наука, 1964. – 190 с.
- Филимонова Е. И., Лукина Н. В., Глазырина М. А., Шишаева О. С., Веселкин Д. В.** Морфологические особенности самосева *Pinus sylvestris* L. на зарастающих лесом золоотвалах на Среднем Урале // Лесной вестник (Forestry Bulletin), 2017. – Т. 21, № 5. – С. 45–51.
- Цандекова О. Л., Колмогорова Е. Ю.** Анатомические и морфометрические характеристики *Pinus sylvestris* L., произрастающей на техногенно нарушенных землях угольного разреза «Кедровский» // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2013. – № 10(108). – С. 59–63.
- Alexander E. B., Coleman R. G., Keeler-Wolf T., Harrison S.** Serpentine Geocology of Western North America. – NY: Oxford University Press, 2007. – 512 p.
- Giuliani C., Pellegrino R., Tirillini B., Maleci Bini L.** Micromorphological and chemical characterisation of *Stachys recta* L. subsp. *serpentini* (Fiori) Arrigoni in comparison to *Stachys recta* L. subsp. *recta* (Lamiaceae). // Flora, 2008. – Vol. 203. – P. 376–385.
- Niinemets Ü., Ellsworth D. S., Lukjanova A., Tobias M.** Site fertility and the morphological and photosynthetic acclimation of *Pinus sylvestris* needles to light // Tree Physiol, 2001. – № 21. – P. 1231–1244.
- Niinemets Ü., Lukjanova A.** Needle longevity, shoot growth and branching frequency in relation to site fertility and within-canopy light conditions in *Pinus sylvestris* // Ann. For. Sci, 2003. – № 60. – P. 195–208.
- Tiwari S. P., Kumar P, Yadav D., Chauhan D. K.** Comparative morphological, epidermal, and anatomical studies of *Pinus roxburghii* needles at different altitudes in the North-West Indian Himalayas // Turkish Journal of Botany, 2013. – № 37. – P. 65–73.
- Urbaniak L., Karlinski L., Popielarz R.** Variation of morphological needle characters of Scots pine [*Pinus sylvestris* L.] populations in different habitats // Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 2003. – № 72. – P. 37–44.
- Wood P. J.** Sampling Systems to Assess Variability in the Needles of Twelve Mexican Pines // New Phytologist, 1972. – Vol. 71(5). – P. 925–936.