

**Влияние климатических и эдафических факторов
на анатомо-морфологические показатели *Picea obovata* Ledeb.
в искусственных насаждениях (Средний Урал)**

**The climatic and edaphic factors influence on the anatomical and morphological
parameters of *Picea obovata* Ledeb. in artificial plantings (Middle Urals)**

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

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

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
E-mail: natalia.lukina@urfu.ru; ruma2531@mail.ru; nady_dicusa@mail.ru; Anton.Uchaev@urfu.ru, matushchina_2018@bk.ru;
Elena.Filimonova@urfu.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 *Picea obovata* Ledeb., произрастающей в искусственных насаждениях рекреационной зоны пос. Исток на Среднем Урале. Показано, что без улучшения свойств субстрата на участках с низким плодородием и слабой водоудерживающей способностью происходило уменьшение таких морфологических параметров, как высота деревьев, годичный прирост и диаметр побегов. В хвое при недостатке питательных веществ и воды происходило уменьшение площади поперечного сечения, центрального цилиндра, площади мезодермы, толщины гиподермы, увеличение диаметра смоляных ходов. Выявлена тесная связь между ростом *P. obovata* и погодно-климатическими условиями. Отмечено, что снижение количества осадков при повышении температуры воздуха за вегетационный период уменьшают линейный прирост изученных деревьев. Полученные данные могут быть использованы при оценке состояния древесных растений и в целях биомониторинга окружающей среды, а также учитываться при проведении работ по лесовосстановлению.

Ключевые слова. Адаптация, анатомо-морфологическое строение, лесовосстановление, хвоя, *Picea obovata*.

Summary. The article presents the results of anatomical and morphological study of *Picea obovata* Ledeb. growing in artificial planting of the recreational zone on the Middle Urals next to Istok village. It was shown that in sites with low fertility and weak water-holding capacity without improving the properties of the substrate, a decrease in such morphological parameters as tree height, annual growth and shoot diameter. In conditions of water and nutrient deficiency in the spruce needles a decrease of cross-sectional area, central cylinder, mesoderm area, hypoderm thickness were shown. At the same time, an increase in the diameter and area of the resin ducts was noted. A close relationship was revealed between the growth of *P. obovata* and weather and climatic conditions. It was noted that a decrease in the amount of precipitation with an increase in air temperature during the growing season reduces the linear growth of the studied trees. The obtained results can be used to assess the condition of woody plants and for environmental biomonitoring. It can also be taken into account during the reforestation activities.

Key words. Adaptation, anatomical and morphological structure, needles, *Picea obovata*, reforestation.

Введение. Облесение – один из основных способов мелиорации малопродуктивных, бросовых и нарушенных земель. Лесные насаждения имеют важное хозяйственное, почвозащитное и рекреационное значение. На нарушенных землях с помощью лесных насаждений формируют новые ландшафты, более благоприятные для жизни людей и животных. Лесокультурное освоение нарушенных территорий имеет ряд особенностей, связанных со специфичностью экологических условий: составом субстратов, высокой амплитудой колебания температур, неустойчивым водным режимом и др. Это предъявляет особые требования к подбору древесных пород. От правильного выбора зависит сохранность и рост насаждений, а также скорость формирования биогеоценозов, их структура (Трещевская и др., 2017).

Оптимальные условия роста для растения – это те, которые вызывают минимальный набор изменений морфологической структуры и физиологических функций в растении. Стressовые условия, наоборот, меняют нормальные физиологические и биохимические процессы, вызывающие изменения морфологии и анатомии растений (Собчак, 2009; Уразгильдин, Кулагин, 2021). Сохранность и рост древесных насаждений зависят, как от подбора культур, так и от создания оптимальных условий для их роста и развития. Цель работы – оценка влияния погодно-климатических условий и свойств субстрата на анатомо-морфологические параметры *Picea obovata* Ledeb., произрастающей в искусственных насаждениях рекреационной зоны пос. Исток (Свердловская обл., Средний Урал).

Picea obovata Ledeb. (ель сибирская), дерево первой величины, достигающее 35 м, вечнозеленое, однодомное, анемофильное (ветроопыляемое) растение. Одна из основных лесообразующих древесных пород Урала и Сибири. *P. obovata* по морфологическим и биологическим особенностям близка к *Picea abies* (L.) H. Karst. Отличается от нее более короткой хвоей (0,7–2 см) и короткими шишками (5–8 см). Хвоя четырехгранная, колючая. Продолжительность жизни хвои 7–9 лет, к побегам прикрепляется на особых выростах коры – листовых подушечках, хорошо заметных после ее отпадения (Коропачинский, 1983). На возобновление данного вида отрицательно оказывается задернение почвы злаками и периодические лесные пожары, которые особенно губительны именно для этой хвойной породы из-за ее поверхностной корневой системы, тонкой коры и низко опущенной кроны. *P. obovata* умеренно требовательна к плодородию и влажности почв (мезофит, мезотроф), по этим показателям превосходит *Pinus sylvestris* L. Очень теневынослива (Мамаев, Попов, 1989; Попов, 2005).

Материалы и методы. Исследования проводили в 2024 г. Объектом исследований являлись опытные лесные культуры *P. obovata*, созданные рядовой посадкой 2-летних сеянцев в рекреационной зоне пос. Исток. Посадки были проведены без использования мелиорантов. На момент исследований возраст посадок составлял 25 лет. Климат района континентальный. Лето теплое, среднемесячная температура воздуха в июле +17 °C. Зима холодная, длится с ноября по март, среднемесячная температура воздуха в январе –15,9 °C. Среднегодовая температура воздуха +1 °C. Среднегодовое количество осадков 577 мм. В почвенном покрове района преобладают подзолистые и дерново-подзолистые, суглинистые и глинистые почвы. Основными лесами являются сосновые, но в результате вырубок они сменились вторичными березовыми с примесью *Populus tremula* L. (Гафуров, 2008; Шакиров, 2011).

Для оценки состояния посадок по результатам визуального зонирования на лесном участке были выделены и обследованы 2 опытные площадки (ОП). Площадки различались состоянием и развитием высаженных культур. Для изучения морфологических параметров *P. obovata* на ОП было отобрано по 10 модельных деревьев. Измеряли высоту деревьев, годичный прирост ствола и ветвей, диаметр ствола у корневой шейки, длину хвои. Для анатомо-морфологического анализа с серединой кроны каждого модельного дерева отбирали хвою второго года жизни без видимых признаков повреждений. Образцы фиксировали в 70%-м растворе этилового спирта. Поперечные срезы хвои готовили на замораживающем микротоме МЗ-2 (Россия). Измерения анатомо-морфологических параметров хвои проводили при помощи системы Siams Mesoplant (Россия) с использованием светового микроскопа Meiji 4300 (Япония) и цифровой камеры Levenhuk (Китай) при увеличении окуляра и объектива 4× и 20×.

Гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) рассчитывали по формуле Г. Т. Селянинова: ГТК = $\Sigma R \times 10 / \Sigma T$, где ΣR – сумма осадков за период с температурами выше 10 °C (мм), ΣT – сумма среднесуточных температур выше 10 °C за вегетационный период (°C).

Образцы грунта для исследований отбирали на каждой ОП с глубины 0–20 см. Основные физико-химические характеристики почв определяли общепринятыми в почвоведении методами (Аринаушкина, 1970). Статистическая обработка полученных данных выполнена с помощью стандартного пакета программ Microsoft Excel и StatSoft STATISTICA 12. Статистически значимые различия были выявлены с использованием непараметрического критерия Манна-Уитни (при $p < 0,05$).

Результаты и обсуждение. В результате исследований было выявлено, что реакция среды (рН) субстратов на опытных площадках – слабокислая. Субстраты с ОП1 содержали меньше Са и подвижных форм фосфора, а также характеризовались меньшими показателями гигровлаги и общего органического углерода, по сравнению с ОП2 (табл. 1).

Анализ морфологических параметров *P. obovata* показал, что на ОП1 средняя высота деревьев ($142,5 \pm 7,1$ см) была в 2 раза меньше, чем на ОП2 ($293,2 \pm 27,6$ см). Известно, что рост ели в первые годы (до пяти лет) очень медленный. По данным С. А. Мамаева (1983) *P. obovata* на дерново-подзолистых

почвах в южной тайге к 10–15-летнему возрасту достигает 2,1–2,8 м. Затем рост ускоряется, и может достигать к 25 годам 7,0–9,0 м. Средний диаметр ствола у корневой шейки на ОП1 в 1,5 раза меньше, чем на ОП2; средний годичный прирост ствола и ветвей в 1,4 раза меньше соответственно (табл. 2).

Таблица 1
Агрохимические показатели субстратов

№ ОП	рН H ₂ O	Содержание, мг-экв/100 г субстрата		P ₂ O ₅ , г/кг субстрата	Общий органический углерод, %	Гигровлага, %
		Ca	Mg			
ОП1	5,57	2,5	2,1	0,63	1,19	2,12
ОП2	5,84	3,9	2,0	1,04	3,78	2,58

Таблица 2
Морфологические характеристики посадок *Picea obovata*

Параметры		ОП1	ОП2
Высота дерева, см	Xср. ± m	142,50 ± 7,10 а	293,20 ± 27,63 б
	lim	111,00–192,00	210,00–420,00
Диаметр ствола (у корневой шейки), см	Xср. ± m	3,37 ± 0,44 а	5,16 ± 0,86 б
	lim	3,00–4,00	4,00–6,00
Годичный прирост ствола, см	Xср. ± m	9,35 ± 2,44 а	13,33 б
	lim	6,00–13,30	9,00–15,00
Годичный прирост ветвей, см	Xср. ± m	10,77 ± 1,82 а	15,09 ± 1,89 б
	lim	7,90–14,16	11,50–19,91
Длина хвои, см	Xср. ± m	1,11 ± 0,05 а	1,22 ± 0,03 а
	lim	0,60–1,50	0,90–1,50

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

Длина хвои модельных деревьев на ОП1 и ОП2 статистически значимо не различалась, составляя $1,11 \pm 0,05$ см и $1,22 \pm 0,03$ см соответственно. Полученные значения длины хвои соответствуют литературным данным (Мамаев, 1983). Считается, что длина хвои является косвенным показателем энергии роста растения, а масса хвои отражает процесс накопления органических веществ (Тарханов, 1998; Демина, Наквасина, 2016). Масса 100 хвоинок на ОП1 (0,1228 г) была меньше, чем на ОП2 (0,1380 г).

Известно, что хвоя отличается от плоских листьев лиственных деревьев не только внешней формой, но и рядом особенностей внутреннего строения. Хвоя является самым чувствительным органом, который быстро реагирует на условия окружающей среды изменениями своего роста и развития. Особенности ее морфологии и физиологии в значительной степени зависят от комплекса внешних факторов и в то же время находятся под генетическим контролем (Робакидзе, Патов, 2011). Параметры ассимиляционного аппарата хвойных часто рассматривают как объект биоиндикации воздушного загрязнения (Демина, Наквасина, 2016; Уразгильдин, Кулагин, 2021).

Анализ анатомических показателей хвои *P. obovata* выявил достоверное ($p < 0,05$) уменьшение площади поперечного сечения и площади центрального цилиндра на ОП1 по сравнению с ОП2. Важнейшей тканью хвои, как и других листьев, является мезофилл, которому принадлежит основная доля объема. Площадь мезофилла в хвое *P. obovata* на ОП1 была статистически значимо ($p < 0,05$) меньше (в 1,3 раза), чем на ОП2 (табл. 3).

Успешность функционирования мезофилла обеспечивается всеми остальными тканевыми образованиями хвои: покровными, проводящими, механическими, выделительными. Покровные ткани являются основным барьером между окружающей средой и внутренними тканями хвои (Легошина и др., 2013). Толщина эпидермы на ОП не различалась, а толщина гиподермы на ОП2 (19,08 мкм) была статистически значимо больше, чем на ОП1 (16,71 мкм). Аналогичные данные были получены О. М.

Легощиной с соавторами (2013) при изучении влияния выбросов промзоны г. Кемерово на анатомическую структуру хвои *P. obovata*.

Таблица 3

Анатомические характеристики поперечного среза хвои *Picea obovata*

Параметры		ОП1	ОП2
Площадь поперечного среза хвои, $\text{мкм}^2 \times 104$	Xср. \pm m	53,19 \pm 1,27 a	69,28 \pm 3,33 b
	lim	49,71–65,52	55,07–81,18
Площадь центрального цилиндра, $\text{мкм}^2 \times 104$	Xср. \pm m	4,78 \pm 0,14 a	6,65 \pm 0,29 b
	lim	4,18–5,30	5,31–7,55
Толщина эпидермы, мкм	Xср. \pm m	14,26 \pm 0,51 a	15,12 \pm 0,57 a
	lim	11,19–16,82	11,80–17,57
Толщина гиподермы, мкм	Xср. \pm m	16,71 \pm 0,80 a	19,08 \pm 0,43 b
	lim	12,35–21,89	16,00–20,50
Диаметр смоляных ходов, мкм	Xср. \pm m	109,84 \pm 9,19 b	99,43 \pm 7,50 a
	lim	80,49–161,85	78,58–125,00
Площадь мезодермы, $\text{мкм}^2 \times 104$	Xср. \pm m	47,69 \pm 0,99 a	62,27 \pm 3,19 a
	lim	44,33–56,96	49,66–73,99
S центрального цилиндра/S поперечного среза хвои, %	Xср. \pm m	9,00 \pm 0,25 a	9,66 \pm 0,29 a
	lim	8,10–10,17	8,66–11,41

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

Самым стабильным из изученных анатомических характеристик хвои являлся показатель отношения площади центрального цилиндра к площади поперечного среза ($S_{ц.ц}/S_{п.сеч.}$). На ОП1 он в среднем составлял 9,0 %, на ОП2 – 9,6 %. Это свидетельствует об оптимальном соотношении между проводящей системой хвои *P. obovata* и ассимиляционными тканями.

В хвое *P. obovata* обычно развивается 2 смоляных хода, но в условиях затенения встречаются иглы с одним ходом или вовсе без них (Раскатов, 1979). На обоих ОП встречалась хвоя с одним и двумя смоляными ходами. Доля хвои без смоляных ходов на ОП1 (20 %) была значительно ниже, чем на ОП2 (50 %), что вероятно связано с разным загущением кроны деревьев. Диаметр смоляных ходов в хвое на ОП1 был больше, чем на ОП2 (табл. 3).

В настоящее время установлено, что особенности развития хвойных растений, в том числе величина годичного прироста, во многом зависят от климатических условий: температуры и влажности воздуха. *P. obovata* наряду с *P. abies* являются наиболее чувствительными к климатическим условиям таежной зоны (Кищенко, 2004; 2020). Анализ климатических характеристик показал, что в районе исследований за 5-ти летний период с 2019 г. по 2023 г. произошли изменения: была отмечена тенденция к повышению среднегодовой температуры воздуха. Сумма эффективных температур (выше 10 °C) за этот период выросла от 1974,3 °C до 2623,9 °C. Сумма осадков за тот же период уменьшилась от 298,0 мм до 246,0–271,0 мм, и как следствие произошло уменьшение показателей ГТК от 1,51 до 1,03 (рис. 1). Также произошло уменьшение годичных приростов исследуемых деревьев.

Анализ корреляционных связей линейного прироста побегов I порядка с различными метеопараметрами показал, что прирост ствола *P. obovata* на обоих ОП положительно коррелирует со значениями ГТК ($r = 0,7$; $r = 0,9$) и суммой осадков за вегетационные периоды 2019–2023 гг. ($r = 0,9$; $r = 0,6$) соответственно.

Таким образом, оценка состояния 25-летних посадок *P. obovata* в искусственных насаждениях рекреационной зоны пос. Исток (Свердловская обл.) показала, что без улучшения свойств субстрата на участках с низким плодородием и слабой водоудерживающей способностью происходило уменьшение таких морфологических параметров, как высота деревьев, годичный прирост и диаметр побегов. В хвое под влиянием неблагоприятных факторов среды (недостаток питательных веществ, и воды) происходило уменьшение площади поперечного сечения, центрального цилиндра, площади мезодермы, толщины гиподермы, увеличение диаметра и площади смоляных ходов.

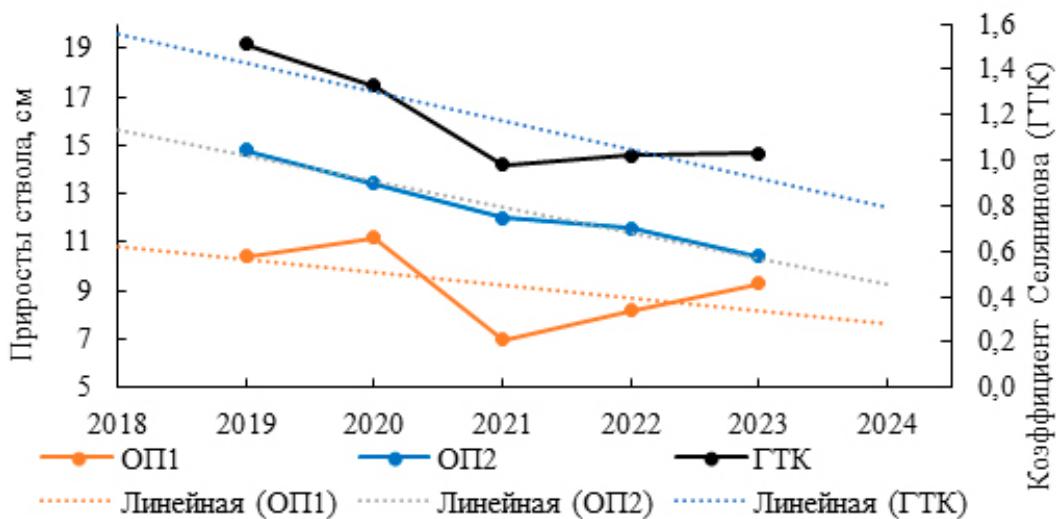


Рис. 1. Показатели коэффициента Селянина (ГТК) и линейные приросты ствола *Picea obovata* на опытных площадках (ОП1 и ОП2).

Выявленна тесная связь между ростом *P. obovata* и погодно-климатическими условиями. Снижение количества осадков при повышении температуры воздуха за вегетационный период уменьшают линейный прирост изученных деревьев.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Аринушкина Е. В.** Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 487 с.
- Гафуров Ф. Г.** Почвы Свердловской области. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. – 396 с.
- Демина Н. А., Наквасина Е. Н.** Изменчивость показателей ассимиляционного аппарата климатиков ели в географических культурах Республики Коми // Вестник САФУ. Сер.: Естеств. науки, 2016. – № 2. – С. 42–50. <https://doi.org/10.17238/issn 2227-6572.2016.2.42>
- Кищенко И. Т.** Влияние климатических факторов на рост представителей рода *Pinus* (Pinaceae) в условиях интродукции // Экология, 2004. – № 4. – С. 249–254.
- Кищенко И. Т.** Влияние климатических факторов на сезонное развитие хвойных лесообразующих видов в таежной зоне (Карелия) // Изв. вузов. Лесн. журн., 2020. – № 3. – С. 72–82. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-72-82>
- Коропачинский И. Ю.** Древесные растения Сибири. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1983. – 384 с.
- Легощина О. М., Неверова О. А., Быков А. А.** Изменчивость анатомической структуры хвои *Picea obovata* Ledeb. в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово // Сибирский экологический журнал, 2013. – № 5. – С. 733–739.
- Мамаев С. А.** Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – 112 с.
- Мамаев С. А., Попов П. П.** Ель сибирская на Урале (внутривидовая изменчивость и структура популяций) – М.: Наука, 1989. – 104 с.
- Попов П. П.** Ель европейская и сибирская: структура, интерградация и дифференциация популяционных систем. – Новосибирск: Наука, 2005. – 231 с.
- Раскатов П. Б.** Экологическая анатомия вегетативных органов деревьев и кустарников. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1979. – 180 с.
- Робакидзе Е. А., Патов А. И.** Рост хвои ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в зависимости от экологических факторов // Изв. вузов. Лесн. журн., 2011. – № 3. – С. 7–14.
- Собчак Р. О.** Диагностика состояния видов хвойных в зонах техногенного загрязнения Республики Алтай // Вестн. Том. гос. ун-та, 2009. – № 325. – С. 185–190.
- Тарханов С. Н.** Изменчивость ели в географических культурах Республики Коми. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 195 с.
- 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.
- Уразгильдин Р. В., Кулагин А. Ю.** Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Ч 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // Биосфера, 2021. – Т. 13, № 3. – С. 86–100. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i4.581>
- Шакиров А. В.** Физико-географическое районирование Урала. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 617 с.