

ЗНАЧЕНИЕ МЕЗОРЕЛЬЕФА В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В ПОДЗОНЕ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ

Н.А. Неверов[✉], Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова, А.Л. Минеев

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской Академии Наук», Архангельск, 163020, Архангельск, пр. Никольский, д. 20

na-neverov@yandex.ru

Приведены данные о влиянии мезорельефа на рост сосны на равнинных территориях севера европейской части России (Устьянский район, Архангельская область). Использованы стандартные методы измерения радиальных приростов, параметров мезорельефа и статистического анализа. Выявлена высокая обратная корреляция толщины стенки ранних трахеид древесины сосны с экспозицией склонов, фотосинтетически активной радиацией и анизотропным распределением суточного тепла ($-0,81 \dots -0,89$). Выявлена высокая прямая корреляция толщины стенки трахеид поздней древесины и топографическим индексом влажности, профильной кривизной (0,88). Отсутствие явных связей рельефа и макроструктурных элементов древесины сосны вероятно вызвано слабой выраженностью рельефа.

Ключевые слова: сосна, мезорельеф, радиальный рост, анатомия древесины, топографический индекс влажности, фотосинтетически активная радиация, анизотропное распределение суточного тепла, угол наклона, экспозиция

Ссылка для цитирования: Неверов Н.А., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В., Минеев А.Л. Значение мезорельефа в формировании структуры древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) в подзоне средней тайги // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 1. С. 121–129. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-121-129

Рельеф является значимым абиотическим фактором продуктивности лесных экосистем. В частности, в низменных моренных ландшафтах Севера Европы продуктивные биоценозы приурочены к долинам рек, занимая такие отдельные элементы мезорельефа, как вершины и склоны гряд или моренные холмы [1–5]. Однако влияние мезорельефа на макроструктуру древесины сосны, которая непосредственно определяет качество древесины, изучено недостаточно. Расчет геоморфометрических параметров рельефа на основе гидрологически корректной цифровой модели рельефа (ЦМР) Архангельской области, построенной на базе ASTER GDEM (версия 2, 2011), позволяет получить точные и объективные данные.

Лимитирующим фактором роста древесных растений в таежной зоне Европейской части России является тепловой режим вегетационного периода; осадки влияют незначительно [6–8]. В других регионах таежной зоны выявлены сходные закономерности. Температура июня — июля ограничивает радиальный рост древесины сосны на севере Финляндии [9, 10] в центральной части Сибири [11] и в Республике Коми [12].

Избыточное количество осадков вымывает микроэлементы (P, Ca, K, Na) из верхних горизонтов почвы, что приводит к ее закислению, избытку Fe, Al и значительному снижению плодородия [13].

Современные цифровые технологии, в частности цифровое моделирование рельефа, позволяет количественно моделировать и анализировать топографию земной поверхности, выявлять взаимосвязь между рельефом и другими природными и антропогенными компонентами геосистемы [14]. Сложность научных и практических исследований, необходимость снижения уровня их субъективности и появление ЦМР свободного доступа и ГИС-технологий определили переход от традиционных морфометрических методов к цифровому моделированию рельефа [15].

Цель работы

Цель работы — выявление взаимосвязи абиотической среды (мезорельефа) с процессом формирования макроструктуры и анатомическим строением древесины сосны.

Материалы и методы

Объект исследования — естественные сосновые древостои (*Pinus sylvestris* L.), Устьянского района Архангельской области (рисунок) (подзона средней тайги). Пробные площади (ПП) были заложены в типичных типах леса (черничном, сфагновом, брусничном).

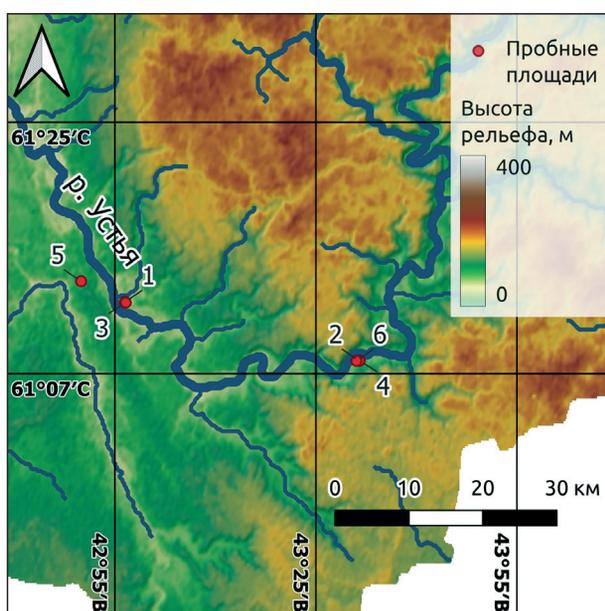
На ПП с помощью возрастного бурава (Huglof, Швеция) было отобрано по 30 кернов древесины сосны у растений без видимых повреждений перпендикулярно стволу дерева на высоте 1,3 м от поверхности земли (табл. 1).

Таксационная характеристика исследуемых древостоев

Taxational characteristics of the studied stands

Номер пробной площади	Тип леса	Высота дерева, м	Полнота	Состав древостоя	Возраст, лет	Бонитет	Запас древесины, м ³ /га
1	Черничный	17	0,8	7С3Е+Б	65	IV	150
2		19	0,7	8С2Е	80	IV	180
3	Лишайниковый	12	0,6	10С	90	Va	40
4		10	0,4	10С	100	Va	40
5	Брусничный	18	0,7	8С2Б	80	III	220
6		18	0,7	8С2Б	70	III	210

Примечание. С — сосна; Е — ель; Б — береза.



Расположение пробных площадей
Location of sample plots

Для макроструктуры древесины были определены доля поздней древесины и ширина годичного слоя, для микроструктуры — толщина клеточных стенок ранней и поздней древесины, поскольку значения этих показателей напрямую определяют физико-механические свойства, а следовательно, и качество древесины.

Доля поздней древесины и ширина годичного слоя измерялись с помощью прибора Lintab 6 (Rinntech, Германия) и программы TSAP-Win [16]. Для измерения толщины стенок трахеид ранней и поздней древесины отбирались образцы ядровой древесины 50–60-летнего возраста толщиной 1 см из 10 кернов с каждой ПП. Затем их кипятили на паровой бане 3 ч. После этого на микротоме МС-2 изготавливались поперечные срезы толщиной от 14...18 микрон. Окрашивание срезов проводили раствором сафранина в течение 2–3 мин. Срезы использовались для измерения

20 клеток ранней и поздней древесины в каждом видимом годичном слое [17] с использованием светового микроскопа Axioscope A1 с дозирующим устройством (Zeiss, Германия).

Для расчета геоморфометрических параметров использовалась гидрологически корректная ЦМР Архангельской области, разработанная на основе свободно распространяемой глобальной ЦМР ASTER GDEM (версия 2, 2011) в программе SAGA GIS (версия 6.4.0, 2018) [18]. Были построены растровые карты наклона и экспозиции склонов, затем на них нанесен векторный слой ПП, и для каждой ПП были извлечены значения параметров рельефа.

Большое количество геоморфометрических параметров (более 20), а также использование при расчетах одних и тех же высотных отметок, вызвали необходимость проведения выбора параметров, влияющих на состояние лесов. В частности, для оценки влияния рельефа на древесину сосны были выбраны следующие геоморфометрические параметры рельефа:

- угол наклона;
- экспозиция склонов;
- общая (ОК), профильная (ПрофК) и плановая (ПланК) кривизны;
- топографический индекс влажности (ТИВ);
- индекс потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор);
- фотосинтетически активная радиация (ФАР);
- анизотропное распределение суточного тепла (АРСТ).

Расчет перечисленных параметров проведен с помощью следующих уравнений:

$$\text{Угол наклона} = \arctan(\sqrt{G^2 + H^2}), \quad (1)$$

где G — угол наклона в направлении с востока на запад;

H — угол наклона в направлении с юга на север;

$$\text{Экспозиция} = 180^\circ - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90^\circ \cdot \left(\frac{G}{|G|}\right); \quad (2)$$

$$\text{ТИВ} = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right), \quad (3)$$

где A — удельная водосборная площадь в конкретной ячейке раstra;

β — локальный уклон (угол наклона в градусах);

$$\text{LS фактор} = \left(\frac{As}{22,13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin \beta}{0,0896}\right)^n, \quad (4)$$

где $m = 0,4 \dots 0,6$;

$n = 1,2 \dots 1,3$;

As — удельная водосборная площадь;

β — угол наклона в градусах;

$$\text{ФАР} = 0,42S + 0,60D, \quad (5)$$

где S — суммарная дневная прямая инсоляция;

D — суммарная дневная рассеянная инсоляция.

$$\text{АРСТ} = \cos(\alpha_{\max} - \alpha) \arctan(\beta), \quad (6)$$

где α_{\max} — экспозиция склона, на котором наблюдается максимальный избыток тепла;

α — экспозиция склона;

β — угол наклона в градусах;

$$\text{ПрофК} = \frac{\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}}{\left(\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right) \sqrt{\left(\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right)^3}}, \quad (7)$$

где $\frac{\partial z}{\partial y}$ — частная производная функции направления земной поверхности с севера на юг;
 $\frac{\partial z}{\partial x}$ — частная производная функции направления земной поверхности с запада на восток;

$$\text{ПланК} = \frac{\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right)^3}}, \quad (8)$$

$$\text{ОК} = -2(2D + 2E) \quad (9)$$

$$\text{где } D = \frac{(z_4 + z_6) - z_5}{l^2} \quad E = \frac{(z_2 + z_8) - z_5}{l^2}.$$

В целом морфометрические показатели ПП отличаются незначительно, что характерно для равнинных территорий, к которым относится и исследуемый регион:

— угол наклона склонов — от $0,97^\circ$ до $1,65^\circ$;
 — значения высот — от 70,6 до 86,2 м;
 — преобладающие экспозиции склонов — северо-восточная, юго-восточная и юго-западная (табл. 2).

Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения Python (версия 2.7.12, 2016) пакет Sci Py (версия 0.18.1, 2016).

Результаты и обсуждение

Полученные показатели ширины годичного слоя, доли поздней древесины, толщины стенок трахеид ранней и поздней древесины типичны для данной широты и условий произрастания (табл. 3) [19–21], и сопоставимы с показателями древесины сосны, произрастающей в Швеции на той же широте, что и исследуемый регион [22].

Корреляционный анализ показателей строения древесины и морфометрических характеристик рельефа выявил следующие закономерности.

Ширина годичного кольца и содержание поздней древесины не имеют выраженной зависимости от показателей рельефа. Выявлена высокая обратная корреляция между толщиной стенки трахеид ранней древесины и экспозицией склонов, индексами ФАР и АРСТ ($r = -0,81 \dots -0,88$). Толщина стенки трахеид поздней древесины коррелирует с индексами ТИВ и профильной кривизной ($r = 0,88$)

Корреляция отсутствует с высотой над уровнем моря, углом наклона склонов, общей и плановой кривизной, LS-фактором (табл. 4).

Древесное кольцо интегрирует влияние комплекса условий природной среды. Важнейшими факторами, определяющими скорость протекания физиологических процессов (дыхание, фотосинтез и рост) являются свет, тепло и влажность почвы [23, 24]. Температура почвы определяет начало возобновления ростовых процессов в начале вегетационного периода [19, 25].

Климатическая реакция древесных растений зависит от экспозиции [26–29] и крутизны склона, регулирующих прямое солнечное излучение, которое является важнейшим источником тепла [30–32]. Прямые солнечные лучи повышают температуру верхних горизонтов почвы и уменьшают ее влажность [33, 34].

Угол наклона — важнейший фактор воздействия на почвы в бореальных лесах, поскольку определяет структуру и направление водного потока на ландшафтном уровне и совместно с кривизной склона создает различные условия влажности почв и определяет характер стока [35]. Исследуемая территория представляет собой слабо покатую равнину с углами наклона не более 2° , чем, вероятно, можно объяснить отсутствие взаимосвязей между шириной годичного кольца,

Т а б л и ц а 2

Морфометрические параметры рельефа исследуемых пробных площадей
Morphometric parameters of the studied sample plots relief

Параметр	Пробная площадь					
	1	2	3	4	5	6
Альтитуда, м	72	70	86	86	85	81
Угол наклона	1,24°	1,65°	0,97°	1,43°	1,40°	1,39°
Экспозиция, румб	С-В	С-В	С-В	Ю-В	Ю-В	Ю-З
Общая кривизна	0,000340	0,000450	0,000304	0,000114	-0,000519	-0,000245
Профильная кривизна	0,000073	0,000060	0,000091	-0,000016	-0,000132	-0,000122
Плановая кривизна	0,004694	0,006984	0,002276	0,003201	-0,023062	-0,000084
ТИВ	12,6	12,5	11,5	12,1	12,1	12,0
LS-фактор	0,44	0,75	0,01	0,50	0,52	0,62
ФАР, кВт/м ²	329,7	330,2	330,6	334,5	333,9	334,8
АРСТ	-0,0181	-0,0163	-0,0136	0,0117	0,0058	0,0240

Примечание. Значения ТИВ, LS-фактор, ФАР, АРСТ, общая кривизна, профильная кривизна, плановая кривизна являются индексами от -1 до 1.

Т а б л и ц а 3

Показатели макроструктуры и анатомического строения древесины сосны
Indicators of the pine wood macrostructure and anatomical structure

Параметр	Пробная площадь					
	1	2	3	4	5	6
Доля поздней древесины, %	25,5 ± 0,86	25,3 ± 0,73	22,8 ± 0,76	23,4 ± 0,45	22,8 ± 0,54	27,4 ± 0,70
Ширина годичного слоя, мм	1,12 ± 0,05	0,75 ± 0,02	0,59 ± 0,03	0,54 ± 0,03	1,50 ± 0,06	1,00 ± 0,03
Толщина клеточной стенки трахеид, мкм						
	ранняя древесина	2,86 ± 0,04	3,22 ± 0,04	2,79 ± 0,06	3,15 ± 0,06	2,64 ± 0,07
поздняя древесина	7,45 ± 0,05	8,01 ± 0,05	7,16 ± 0,07	7,51 ± 0,04	3,64 ± 0,09	4,11 ± 0,10

Т а б л и ц а 4

Коэффициент корреляции по Спирмену между морфометрическими показателями рельефа и показателями качества древесины сосны
Spearman correlation coefficient between morphometric relief indicators and pine wood quality indicators

Морфометрический показатель	Доля поздней древесины	Ширина годичного слоя	Толщина стенок трахеид	
			Ранняя древесина	Поздняя древесина
Альтитуда	0,48	0,54	-0,40	-0,54
Угол наклона	-0,31	-0,37	0,02	0,31
Экспозиция склонов	-0,54	0,54	-0,81	-0,60
ТВИ	-0,2	-0,65	0,66	0,88
Общая кривизна	-0,14	0,14	0,52	0,77
Профильная кривизна	-0,60	-0,08	0,69	0,88
Плановая кривизна	-0,08	0,08	0,34	0,65
LS-фактор	-0,77	-0,25	-0,26	-0,02
ФАР	-0,54	-0,54	-0,81	-0,60
АРСТ	-0,37	0,71	-0,89	-0,77

Примечание. Достоверные значения при $p < 0,05$ выделены жирным шрифтом.

долей поздней древесины с морфометрическими параметрами рельефа.

Обратная корреляция толщины клеточных стенок ранней древесины с С-В экспозицией,

по-видимому связана с местоположением исследуемых древостоев в пределах трех румбов С-В, Ю-В и Ю-З. Юго-западный склон наиболее теплообеспеченный и, возможно, излишняя инсо-

ляция приводит к значительному сокращению скорости радиального роста за счет уменьшения количества ассимилятов, которые начинают расходоваться на дыхание, и активацией ферментов, ответственных за расщепление протопласта [35]. Для параметров ФАР и АРСТ также выявлена значимая отрицательная корреляция, так как их рассчитывают на основе экспозиции.

Распространенное мнение о том, что ФАР положительно влияет на рост растений, обосновано широко распространенной оценкой влияния качества света на фотосинтез, что получено по кривой усваиваемого растением потока фотонов, в соответствии с которой фотоны с длиной волны 600...630 нм обеспечивают фотосинтезом на 20...30 % больше, чем фотоны с длиной волны 400...540 нм [36]. Однако спектры поглощения хлорофиллов а, b и каротиноидов показывает, что количество поглощенного света имеет иную закономерность. Значение ФАР не учитывает разницу между разными длинами волн в диапазоне 400...700 нм. К тому же используется предположение, что волны за пределами этого диапазона имеют нулевую фотосинтетическую активность.

Значения ФАР представляют собой сумму прямой и диффузной инсоляции и зависят от географического положения района, определяющего положение Солнца (угол возвышения Солнца).

Значение высоты Солнца над горизонтом изменяться на 23,5° в умеренных широтах в течение года (наклон плоскости земного экватора к плоскости эклиптики). В высоких широтах угол склонения Солнца максимально пологий. Для прямой солнечной радиации установлена тесная зависимость коэффициента ФАР от высоты Солнца в пределах от 10 до 75° [37].

Чем меньше высота Солнца, тем длиннее путь лучей, тем больше поглощение и рассеивание радиации, тем сильнее изменяется ее спектральный состав: понижается энергия наиболее коротковолновых лучей — синих и фиолетовых, преобладающими становятся желтые и красные. В связи с этим, несмотря на то что самый длинный период инсоляции на севере (полярный день) составляет 13...16 ч в сутки в летний период, интенсивность инсоляции здесь невелика, поскольку в летнее время траектория солнечных лучей здесь пологая.

ТИБ и профильная кривизна являются производными величинами угла наклона и отражают форму склонов.

Образование клеток поздней древесины происходит во второй половине лета и зависит как от погодных условий, так и от содержания элементов минерального питания в почвах. При достаточном их количестве рост клеток поздней древесины может продолжаться до середины сентября [19].

Выявленные высокая степень корреляции ТИБ и толщины стенок трахеид поздней древесины свидетельствует о том, что ТИБ на данной территории, помимо содержания влаги, характеризует плодородие почв, т. е. в зависимости от водного режима (проточного или застойного) изменяется кислотность и характер выноса подвижных химических элементов (например, К и Р), а также гранулометрический состав почв. Наибольшее значение ТИБ выявлено для сосняка черничного (ПП 1, 2, см. табл. 2). В данном случае это самый продуктивный тип леса. ТИБ позволяет выделять и типы условий местопроизрастания. В доказательство изложенного говорят исследования финских коллег, которые установили значимую корреляцию ТИБ с увеличением мощности и повышением рН горизонта A_0 [38].

Выводы

Мезорельеф оказывает значительное влияние на процесс формирования анатомического строения древесины сосны в подзоне средней тайги. Наибольшее влияние на процесс формирования толщины стенок трахеид ранней древесины оказывают экспозиция, ФАР и анизотропное распределение суточного тепла оказывают; а на толщину стенок трахеид поздней древесины топографический индекс влажности и профильная кривизна. Отсутствие значимого влияния мезорельефа и макроструктуры древесины сосны объясняется невысоким уклоном местности (<2°), и слабой кривизной поверхности.

Исследования проведены в рамках государственного задания № 122011300380-5 Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук.

Список литературы

- [1] Орлов А.Я., Кошельков С.П., Осипов В.В., Соколов А.А. Типы лесных биогеоценозов южной тайги. М.: Наука, 1974. 232 с.
- [2] Burnett M., August P., Brown J., Killingbeck K.T. The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity. I. A patch-scale perspective // *Conservation Biology*, 1998, v. 12, pp. 363–370.
- [3] Giesler R., Högberg M., Högberg P. Soil chemistry and plant in Fennoscandian boreal forest as exemplified by a local gradient // *Ecology*, 1998, 79, pp. 119–137. DOI: 10.2307/176869
- [4] Беляев В.В., Бурлаков П.С. Особенности распространения высокопродуктивных хвойных лесов в таежных ландшафтах Европейского Севера // *Вестник Поморского университета. Серия: Естественные и точные науки*, 2006. № 1. С. 49–53.
- [5] Zinko U., Seibert J., Dynesius M., Nilsson C. Plant Species Numbers Predicted by a Topography-based Groundwater Flow Index // *Ecosystems*, 2005, v. 8, pp. 430–441.

- [6] Феклистов П.А., Евдокимов В.Н., Барзут В.М. Биологические и экологические особенности роста сосны в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1997. 140 с.
- [7] Hughes M.K., Olchev A., Bunn A.G., Berner L.T., Losleben M., Novenko E. Different climate responses of spruce and pine growth in Northern European Russia // *Dendrochronologia*, 2019, v. 56, p. 125601.
- [8] Hellmann L., Agafonov L., Ljungqvist F.C., Churakova O., Duthorn E., Esper J., Hülsmann L., Kirilyanov A.V., Moiseev P., Myglan V.S., Nikolaev A.N., Reining F., Schweingruber F.H., Solomina O., Tegel W., Büntgen U. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest // *Environmental Research Letters*, 2016, v. 11, p. 074021.
- [9] Lindholm M., Lehtonen H., Kolström T., Meriläinen J., Eronen M., Timonen M. Climatic signals extracted from ring-width chronologies of Scots pines from the northern, middle and southern parts of the boreal forest belt in Finland // *Silva Fennica*, 2000, v. 34, pp. 317–330.
- [10] Seo J.W., Eckstein D., Jalkanen R., Schmitt U. Climatic control of intra- and inter-annual wood-formation dynamics of Scots pine in northern Finland // *Environmental and Experimental Botany*, 2011, v. 72, pp. 422–431.
- [11] Скомаркова М.В., Ваганов Е.А., Вирт К., Кирдянов А.В. Климатическая обусловленность радиального прироста хвойных и лиственных пород деревьев в подзоне средней тайги Центральной Сибири // *География и природные ресурсы*, 2009. № 2. С. 80–85.
- [12] Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-western Russia // *iForest*, 2008, v.1, pp. 13–21.
- [13] Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 2000, 1999. 768 с.
- [14] Hengl T., Reuter H.I. (eds). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* // *Developments in Soil Science*, 2008, v. 33, Elsevier, 772 p.
- [15] Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: дис. ... д-ра техн. наук. Пуцзино: ИМПБ РАН, 2010. 267 с.
- [16] Rinn F. *TSAP-Win – time series analysis and presentation: dendrochronology and related applications*. Heidelberg, Germany, 2003, 91 p.
- [17] Яценко-Хмельевский А.А. Основы и методы анатомического исследования древесины. Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1954. 337 с.
- [18] Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V. 2 // *Современные проблемы науки и образования*, 2015. № 2. URL: www.science-education.ru/129-21949 (дата обращения 06.03.2023).
- [19] Мелехова Т.А. Формирование годичного слоя сосны в связи с лесорастительными условиями // *Труды Архангельского ордена трудового Красного Знамени лесотехнического института им. В.В. Куйбышева*, 1954. Т. XIV. С. 123–139.
- [20] Коперин Ф.И. Зависимость строения и физико-механических свойств древесины хвойных пород от лесорастительных условий // *Труды Архангельского лесотехнического института*, 1955. Т. XVI. С. 156–168.
- [21] Вихров В.Е., Лобасенок А.К. Технические свойства древесины в связи с типами леса. Минск: Мин-во высшего образования БССР, 1963. 72 с.
- [22] Karlman L., Morling T., Martinsson O. Wood density, annual ring width and latewood content in larch and Scots pine // *Eurasian J. of Forest Research*, 2005, v. 8, pp. 91–96.
- [23] Schulze E.D., Beck E., Müller-Hohenstein K. *Plant ecology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, 702 p.
- [24] Schulze E.D., Mooney H.A. *Biodiversity and ecosystem function*. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, 2012, 525 p.
- [25] Данилов Н.И. Влияние насаждений различного состава и рубок ухода на температурный режим почвы // *Лесное хозяйство*, 1986. № 8. С. 18–22.
- [26] Kirchhefer A.J. The influence of slope aspect on tree-ring growth of *Pinus sylvestris* L. in northern Norway and its implications for climate reconstruction // *Dendrochronology*, 2000, v.18, pp. 27–40
- [27] Cai Q., Liu Y. Climatic response of three tree species growing at different elevations in the Luliang Mountains of Northern China // *Dendrochronology*, 2013, v. 31, pp. 311–317.
DOI: 10.1016/j.dendro.2012.07.003
- [28] Zhang W., Jiang Y., Wang M., Zhang L., Dong M. Topography- and species-dependent climatic responses in radial growth of *Picea meyeri* and *Larix principis-rupprechtii* in the Luyashan Mountains of North-Central China // *Forests*, 2015, v. 6, iss. 1, pp. 116–132.
DOI: 10.3390/f6010116
- [29] Montpellier E.E., Soulé P.T., Knapp P.A., Shelly J.S. Divergent growth rates of alpine larch trees (*Larix lyallii* Parl.) in response to microenvironmental variability // *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2018, v. 50, iss 1, e1415626. DOI: 10.1080/15230430.2017.1415626
- [30] Deng S.F., Yang T.B., Zeng B., Zhu X.F., Xu H.J. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000–2011 // *J. of Mountain Science*, 2013, v. 10, iss 6, pp. 1050–1062.
DOI: 10.1007/s11629-013-2558-z
- [31] Tognetti R., Palombo C. Take a tree to the limit: the stress line // *Tree Physiol.*, 2013, v. 33, iss 9, pp. 887–890.
DOI:10.1093/treephys/tp087
- [32] Wypych A., Ustrnul Z., Schmatz D.R. Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians // *J. of Mountain Science*, 2018, v. 15, iss 2, pp. 237–253. DOI: 10.1007/s11629-017-4374-3
- [33] Chen J., Saunders S.C., Crow T.R., Naiman R.J., Brosofske K.D., Mroz G.D., Brookshire, B.L., Franklin, J.F. Microclimate in forest ecosystem and landscape ecology: variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes // *BioScience*, 1999, v. 49, iss. 4, pp. 288–297.
DOI: 10.2307/1313612
- [34] Kirkham M.B. *Principles of soil and plant water relations*. Boston: Elsevier Academic Press, 2014, 598 p.
- [35] Jenny H. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. New York: McGraw Hill, 1941, 281 p.
- [36] McCree K.J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // *Agricultural Meteorology*, 1971, v. 9, pp. 191–216.
DOI: 10.1016/0002-1571(71)90022-7
- [37] Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 200 с.
- [38] Seibert J., Stendahl J., Sørensen R. Topographical Influences on Soil Properties in Boreal Forests // *Geoderma*, 2007, v. 141, pp. 139–148.
DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.05.013

Сведения об авторах

Неверов Николай Александрович  — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской Академии наук», na-neverov@yandex.ru

Кутинов Юрий Григорьевич — д-р г.-м. наук, гл. науч. сотр. лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской Академии наук», kutinov@fciactic.ru

Чистова Зинаида Борисовна — канд. г.-м. наук, вед. науч. сотр. лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской Академии наук», zchistova@yandex.ru

Полякова Елена Викторовна — д-р г.-м. наук, вед. науч. сотр. лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской Академии наук», lenpo26@yandex.ru

Минеев Александр Леонидович — канд. г.-м. наук, ст. науч. сотр. лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика им. Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской Академии наук», mineew.al@gmail.com

Поступила в редакцию 11.04.2023.

Одобрено после рецензирования 28.04.2023.

Принята к публикации 01.12.2023.

MESORELIEF INFLUENCE ON PINE WOOD STRUCTURE FORMATION IN MIDDLE TAIGA

N.A. Neverov , Yu.G. Kutinov, Z.B. Chistova, E.V. Polyakova, A.L. Mineev

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 12, Nikolsky av., 163012, Arkhangelsk, Russia

na-neverov@yandex.ru

This article presents the data showing the relief influence on the pine trees growth in the even territories of the European part of Russia. The research was carried out in the middle taiga subzone, in the Ustyansky district of the Arkhangelsk region. Natural pine stands were studied in typical conditions of the growth place (blueberry, cowberry, sphagnum forest types). Cores of wood were taken from 30 pieces at each sample area. They were used to determine the annual ring width, the latewood content, the tracheids walls thickness of early and latewood. Morphometric parameters of the relief were calculated on the basis of a digital relief model in SAGA GIS. Relief indicators vary slightly between test areas. To identify the relationships, 7 parameters were selected: slope, aspect, profile curvature, topographic wetness index (TWI), LS factor, photosynthetically active radiation (PAR), diurnal anisotropic heating (DAH). A high inverse correlation of the wall thickness of early pine wood tracheids with aspect, PAR and DAH ($-0,81 \dots -0,89$) was revealed, a high direct correlation was established between the wall thickness of late tracheids with a TWI and profile curvature, which indicates a significant redistribution of heat and moisture by the plain relief. The absence of statistically significant links between relief and macrostructural elements of pine wood is most likely caused by the weak severity of the relief. The even relief in the middle taiga zone plays a certain role in the formation of anatomical elements of pine wood.

Keywords: pine, mesorelief, radial growth, wood anatomy, topographic humidity index, photosynthetically active radiation, anisotropic distribution of daily heat, angle of inclination, exposure

Suggested citation: Neverov N.A., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V., Mineev A.L. *Znachenie mezorel'efa v formirovanii struktury drevesiny sosny v podzone sredney taygi* [Mesorelief influence on pine wood structure formation in middle taiga]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 1, pp. 121–129. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-1-121-129

Reference

- [1] Orlov A.Ya., Koshel'kov S.P., Osipov V.V., Sokolov A.A. *Tipy lesnykh biogeotsenozov yuzhnoy taygi* [Types of forest biogeocenoses of the southern taiga]. Moscow: Nauka, 1974, 232 p.

- [2] Burnett M., August P., Brown J., Killingbeck K.T. The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity. I. A patch-scale perspective. *Conservation Biology*, 1998, v. 12, pp. 363–370.
- [3] Giesler R., Högberg M., Högberg P. Soil chemistry and plant in Fennoscandian boreal forest as exemplified by a local gradient. *Ecology*, 1998, 79, pp. 119–137. DOI: 10.2307/176869
- [4] Belyaev V.V., Burlakov P.S. *Osobennosti rasprostraneniya vysokoproduktivnykh khvoynykh lesov v taezhnykh landshaftakh Evropeyskogo Severa* [Spatial distribution peculiarities of high productive coniferous forests in the taiga landscapes of the European North]. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tochnye nauki* [Bulletin of the Pomeranian University. Series: Natural and Exact Sciences], 2006, no. 1, pp. 49–53.
- [5] Zinko U., Seibert J., Dynesius M., Nilsson C. Plant Species Numbers Predicted by a Topography-based Groundwater Flow Index. *Ecosystems*, 2005, v. 8, pp. 430–441.
- [6] Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Barzut V.M. *Biologicheskie i ekologicheskie osobennosti rosta sosny v severnoy podzone evropeyskoy taygi* [Biological and ecological features of pine growth in the northern subzone of the European taiga]. *Arkhangelsk: AGTU*, 1997, 140 p.
- [7] Hughes M.K., Olchev A., Bunn A.G., Berner L.T., Losleben M., Novenko E. Different climate responses of spruce and pine growth in Northern European Russia. *Dendrochronologia*, 2019, v. 56, p. 125601.
- [8] Hellmann L., Agafonov L., Ljungqvist F.C., Churakova O., Duthorn E., Esper J., Hülsmann L., Kirilyanov A.V., Moiseev P., Mygland V.S., Nikolaev A.N., Reining F., Schweingruber F.H., Solomina O., Tegel W., Büntgen U. Diverse growth trends and climate responses across Eurasia's boreal forest. *Environmental Research Letters*, 2016, v. 11, p. 074021.
- [9] Lindholm M., Lehtonen H., Kolström T., Meriläinen J., Eronen M., Timonen M. Climatic signals extracted from ring-width chronologies of Scots pines from the northern, middle and southern parts of the boreal forest belt in Finland. *Silva Fennica*, 2000, v. 34, pp. 317–330.
- [10] Seo J.W., Eckstein D., Jalkanen R., Schmitt U. Climatic control of intra- and inter-annual wood-formation dynamics of Scots pine in northern Finland. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, v. 72, pp. 422–431.
- [11] Skomarkova M.V., Vaganov E.A., Virt K., Kirilyanov A.V. *Klimaticheskaya obuslovlennost' radial'nogo prirosta khvoynykh i listvennykh porod derev'ev v podzone sredney taygi Tsentral'noy Sibiri* [Climatic Conditionality of Radial Increment of Conifers and Hardwoods in the Middle Taiga Subzone of Central Siberia]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2009, no. 2, pp. 80–85. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.06.014
- [12] Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Impact of climate change on radial growth of Siberian spruce and Scots pine in North-western Russia. *iForest*, 2008, v.1, pp. 13–21.
- [13] Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of landscape]. Moscow: Astraea-2000, 1999, 768 p.
- [14] Hengl T., Reuter H.I. (eds). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, 2008, v. 33, Elsevier, 772 p.
- [15] Florinskiy I.V. *Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya rel'efa* [Theory and applications of mathematical and cartographic modeling of relief]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Pushchino: Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2010, 267 p.
- [16] Rinn F. *TSAP-Win – time series analysis and presentation: dendrochronology and related applications*. Heidelberg, Germany, 2003, 91 p.
- [17] Yatsenko-Khmelevskiy A.A. *Osnovy i metody anatomicheskogo issledovaniya drevesiny* [Fundamentals and methods of anatomical study of wood]. Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1954, 337 p.
- [18] Mineev A.L., Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. *Metodicheskie aspekty sozdaniya tsifrovoy modeli rel'efa Arkhangel'skoy oblasti na osnove ASTER GDEM* [Methodological aspects of creating a digital relief model of the Arkhangelsk region based on ASTER GDEM]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, v. 2. Available at: www.science-education.ru/129-21949 (accessed 02.03.2023)
- [19] Melekhova T.A. *Formirovaniye godichnogo sloya sosny v svyazi s lesorastitel'nymi usloviyami* [Formation of the annual layer of pine in connection with forest-growing conditions]. *Trudy Arkhangel'skogo ordena trudovogo Krasnogo Znameni lesotekhnicheskogo instituta im. V.V. Kuybysheva* [Proceedings of the Arkhangelsk Order of the Red Banner of Labor of the V.V. Kuibyshev Forestry Institute], 1954, v. XIV, pp. 123–139.
- [20] Koperin F.I. *Zavisimost' stroeniya i fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny khvoynykh porod ot lesorastitel'nykh usloviy* [Dependence of the structure and physico-mechanical properties of coniferous wood on forest growing conditions]. *Trudy Arkhangel'skogo lesotekhnicheskogo instituta* [Proceedings of the Arkhangelsk Forestry Institute], 1955, t. XVI, pp. 156–168.
- [21] Vikhrov V.E., Lobasenok A.K. *Tekhnicheskie svoystva drevesiny v svyazi s tipami lesa* [Technical properties of wood in connection with forest types]. Minsk: Min-vo vysshego obrazovaniya BSSR [Publishing House of the Ministry of Higher Education of the BSSR], 1963, 72 p.
- [22] Karlman L., Morling T., Martinsson O. Wood density, annual ring width and latewood content in larch and Scots pine. *Eurasian J. of Forest Research*, 2005, v. 8, pp. 91–96.
- [23] Schulze E.D., Beck E., Müller-Hohenstein K. *Plant ecology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, 702 p.
- [24] Schulze E.D., Mooney H.A. *Biodiversity and ecosystem function*. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, 2012, 525 p.
- [25] Danilov N.I. *Vliyaniye nasazhdeniy razlichnogo sostava i rubok ukhoda na temperaturnyy rezhim pochvy* [The influence of plantings of various composition and logging care on the temperature regime of the soil]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1986, v. 8, pp. 18–22.
- [26] Kirchhefer A.J. The influence of slope aspect on tree-ring growth of *Pinus sylvestris* L. in northern Norway and its implications for climate reconstruction. *Dendrochronology*, 2000, v.18, pp. 27–40
- [27] Cai Q., Liu Y. Climatic response of three tree species growing at different elevations in the Luliang Mountains of Northern China. *Dendrochronology*, 2013, v. 31, pp. 311–317. DOI: 10.1016/j.dendro.2012.07.003
- [28] Zhang W., Jiang Y., Wang M., Zhang L., Dong M. Topography- and species-dependent climatic responses in radial growth of *Picea meyeri* and *Larix principis-rupprechtii* in the Luyashan Mountains of North-Central China. *Forests*, 2015, v. 6, iss. 1, pp. 116–132. DOI: 10.3390/f6010116

- [29] Montpellier E.E., Soulé P.T., Knapp P.A., Shelly J.S. Divergent growth rates of alpine larch trees (*Larix lyallii* Parl.) in response to microenvironmental variability. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2018, v. 50, iss 1, e1415626. DOI: 10.1080/15230430.2017.1415626
- [30] Deng S.F., Yang T.B., Zeng B., Zhu X.F., Xu H.J. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000–2011. *J. of Mountain Science*, 2013, v. 10, iss 6, pp. 1050–1062. DOI: 10.1007/s11629-013-2558-z
- [31] Tognetti R., Palombo C. Take a tree to the limit: the stress line. *Tree Physiol.*, 2013, v. 33, iss 9, pp. 887–890. DOI: 10.1093/treephys/tpt087
- [32] Wypych A., Ustrnul Z., Schmatz D.R. Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians. *J. of Mountain Science*, 2018, v. 15, iss 2, pp. 237–253. DOI: 10.1007/s11629-017-4374-3
- [33] Chen J., Saunders S.C., Crow T.R., Naiman R.J., Brosofske K.D., Mroz G.D., Brookshire, B.L., Franklin, J.F. Microclimate in forest ecosystem and landscape ecology: variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *BioScience*, 1999, v. 49, iss. 4, pp. 288–297. DOI: 10.2307/1313612
- [34] Kirkham M.B. Principles of soil and plant water relations. Boston: Elsevier Academic Press, 2014, 598 p.
- [35] Jenny H. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. New York: McGraw Hill, 1941, 281 p.
- [36] McCree K.J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 1971, v. 9, pp. 191–216. DOI: 10.1016/0002-1571(71)90022-7
- [37] Tooming Kh.G. *Solnechnaya radiatsiya i formirovanie uroznya* [Solar radiation and crop formation]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977, 200 p.
- [38] Seibert J., Stendahl J., Sørensen R. Topographical Influences on Soil Properties in Boreal Forests. *Geoderma*, 2007, v. 141, pp. 139–148. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.05.013

The research was carried out within the framework of state assignment No. 122011300380-5 of the Federal Research Centre for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Authors' information

Neverov Nikolay Aleksandrovich  — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher at the Laboratory of Deep Geological Structure and Dynamics of the Lithosphere of the Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, na-neverov@yandex.ru

Kutinov Yuriy Grigor'evich — Dr. Sci. (Geological and mineralogical), Chief Researcher of the Laboratory of Deep Geological Structure and Dynamics of the Lithosphere of the Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, kutinov@fciactic.ru

Chistova Zinaida Borisovna — Cand. Sci. (Geological and mineralogical), Leading Researcher at the Laboratory of Deep Geological Structure and Dynamics of the Lithosphere of the Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, zchistova@yandex.ru

Polyakova Elena Viktorovna — Dr. Sci. (Geological and mineralogical), Leading Researcher at the Laboratory of Deep Geological Structure and Dynamics of the Lithosphere of the Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, lenpo26@yandex.ru

Mineev Aleksandr Leonidovich — Cand. Sci. (Geological and mineralogical), Senior Researcher at the Laboratory of Deep Geological Structure and Dynamics of the Lithosphere of the Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, mineew.al@gmail.com

Received 11.04.2023.

Approved after review 28.04.2023.

Accepted for publication 01.12.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest