

УДК 630*161:630*81(470.343)

ПЛОТНОСТЬ ЗАБОЛОННОЙ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЛЕСАХ МАРИЙСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ¹

© 2025 г. Ю. П. Демаков, Е. С. Шарапов*, А. С. Королев, О. В. Шейкина

*Поволжский государственный технологический университет,
пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000 Россия*

**E-mail: sharapoves@volgatech.net*

Поступила в редакцию 30.01.2024 г.

После доработки 05.08.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности оценки качества ресурсного потенциала лесов России и эффективности его использования, что можно сделать только на основе глубокого изучения структуры ценопопуляций деревьев по хозяйственно ценным признакам, одним из которых является базисная плотность древесины. Цель исследования — оценка закономерностей индивидуальной и групповой изменчивости величины базисной плотности заболонной древесины у деревьев сосны обыкновенной в различных по возрасту, происхождению, густоте и условиям произрастания древостоях Республики Марий Эл для отбора и последующего воспроизводства наиболее перспективных в хозяйственном отношении особей. Исследования проведены на 13 пробных площадях в чистых по составу одновозрастных древостоях. Для оценки величины базисной плотности заболонной древесины, которую проводили стереометрическим и гидростатическим способами, использовали керны длиной 50 мм, добытые вручную буром Пресслера у 1072 деревьев на высоте 1.3 м от основания ствола. При обработке эмпирического материала использованы стандартные методы математической статистики. В результате установлено, что величина оцениваемого параметра варьирует у деревьев от 291 до 660 кг·м⁻³, перекрывая пределы, установленные отечественными исследователями. Она практически не зависит от условий произрастания, густоты и происхождения древостоев, рангового положения особей в ценопопуляциях, ширины годичного слоя древесины и доли позднелетнего в ней слоя, а обусловлена в основном возрастом деревьев ($R^2 = 0.9$). Доказано, что экологические требования к условиям среды у деревьев с разной плотностью древесины неодинаковы, что отражается на характере динамики их радиального годичного прироста. Разработана шкала для оценки хозяйственной ценности деревьев в ценопопуляциях разного возраста по плотности их заболонной древесины. Таким образом, естественный отбор деревьев по плотности древесины в ценопопуляциях, максимум величины которой отмечается у них в возрасте 100–110 лет, не происходит, и целевая селекция по данному параметру, исходя из этого, не отразится в последующем на производительности насаждений.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, ценопопуляции деревьев, древесина, плотность, вариабельность, хозяйственно ценные генотипы.

DOI: 10.31857/S0024114825010025 EDN: EDUUKI

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00220 (<https://rscf.ru/project/23-16-00220/>) с использованием оборудования ЦКП “Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей” Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

Рациональное использование древесных ресурсов леса и повышение эколого-ресурсного потенциала лесов России обуславливают актуальность совершенствования методов и средств отбора деревьев по целевым хозяйственно ценным параметрам, одним из которых является плотность

древесины (Полубояринов, 1976; Auty et al., 2014; Kimberley et al., 2015; Gil-Moreno et al., 2024). Для успешного решения этой задачи необходимо, прежде всего, детально изучить характер влияния на величину значений этого параметра внешних и внутренних факторов, а также режимов выращивания насаждений, используя при этом новейший арсенал аппаратуры и методик неразрушающего контроля плотности древесины у живых деревьев.

Несмотря на давний интерес исследователей к вопросу о причинах изменчивости плотности древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в разных регионах России и обширный объем накопленного материала, однозначного ответа на него до сих пор не получено, что связано с разнообразием лесных биогеоценозов и методических подходов к решению задачи. Так, по данным одних авторов, величина плотности изменяется в зависимости от условий произрастания деревьев, по мере улучшения которых она либо увеличивается (Жилкин, 1936; Бюсен, 1961; Краснов, Гурский, 2007), либо снижается (Петруша, 1959), либо взаимосвязь данных параметров отсутствует (Полубояринов, 1976; Коновалов, 2007; Шекалев, 2021). Не обнаружено также различий между естественными и искусственно созданными древостоями (Оводов, 2010). Далеко неоднозначны и результаты изучения влияния на плотность древесины исходной густоты лесных культур (Рябokonь, Литаш, 1981; Мелехов и др., 2003; Подошвелев, 2008; Ломов, Сухоруков, 2009; Ревин и др., 2010; Данилов, Степаненко, 2013; Kimberley et al., 2015; Демаков и др., 2019; Šilinskas et al., 2020; Демаков, 2022; Sharapov et al., 2024) и рангового положения деревьев в ценопопуляциях (Жилкин, 1936; Полубояринов, 1976; Данилов, Смирнов, 2014; Тюкавина и др., 2017; Д.А. Зайцев, 2018; Fabisiak, Fabisiak, 2021).

Данный признак закреплен, по мнению ряда авторов, в генотипе деревьев (Konofalska et al., 2021; Szaban et al. 2023), проявляясь у них по-разному в зависимости от сложившихся условий роста, что подтверждено результатами исследований в географических культурах, заложенных в различных регионах России. Так, в Брянской области плотность древесины сосны обыкновенной оказалась наиболее высокой у липецкого и пензенского, а самой низкой — у литовского, эстонского, гродненского и витебского (Лацевич, 2001) климатипов; в Сибири и Калужской области семенные потомства популяций из южных регионов превосходили местные климатипы (Кузьмин, Ваганов, 2007; Мельник и др., 2007; Кузьмин, Роговцев, 2016; Кузьмин, 2018), которые в Казахстане значительно уступали деревьям из Карагандинской, Оренбургской и Курганской областей (Марушак, 2007; Марушак, Максимов, 2014).

Цель исследования — оценка пределов и закономерностей индивидуального и группового

варьирования значений базисной плотности заболонной древесины у деревьев сосны обыкновенной в различных по возрасту, происхождению, густоте и условиям произрастания древостоях Республики Марий Эл для отбора и последующего воспроизводства наиболее перспективных в хозяйственном отношении особей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проведены в 2023 г. на 13 пробных площадях в чистых по составу одновозрастных древостоях сосны обыкновенной естественного и искусственного происхождения, произрастающих в левобережной (Заволжской) части Республики Марий Эл (рис. 1, табл. 1), которая относится к подзоне хвойно-широколиственных лесов (Курнаев, 1973). Климат на этой территории умеренно-континентальный, среднегодовая температура воздуха составляет 3.1°C , приход солнечной радиации — $350 \text{ кДж}\cdot\text{см}^{-2}$ в год, сумма эффективных температур — 2200°C , сумма осадков — 566 мм (Колобов, 1968; Агроклиматические ресурсы..., 1972; Демаков, 2023). Почвы в основном дерново-подзолистые, разные по гранулометрическому составу: от песков до тяжелых суглинков (Смирнов, 1968).

На каждой пробной площади у деревьев на высоте 1.3 м от земли измеряли диаметр ствола в коре и брали с северной его стороны с помощью бурава Пресслера (Haglöf Sweden AB, Лонгселе, Швеция) цилиндрические керны с номинальным диаметром 5.15 мм и длиной 50 мм, которые помещали в индивидуальные пластиковые контейнеры для сохранения влажности древесины. Лабораторные измерения и взвешивание образцов проводили в течение этого же дня. Базисную плотность древесины оценивали как стереометрическим (согласно ГОСТ 16483.1-84), так и гидростатическим способами (Полубояринов, 1976). В первом случае объем сырого керна определяли по его геометрическим размерам (длина и средний диаметр вдоль и поперек волокон), измеренным с помощью штангенциркуля с погрешностью $\pm 0.01 \text{ мм}$. При

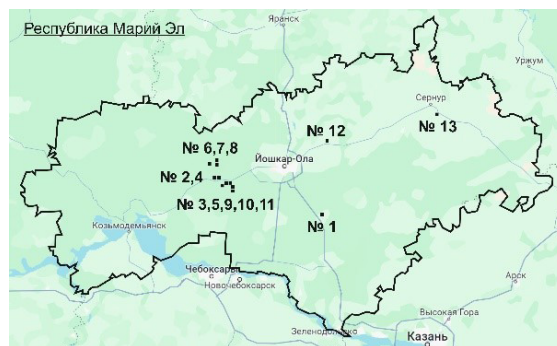


Рис. 1. Расположение объектов исследования (пробных площадей) на территории Республики Марий Эл.

Таблица 1. Краткая характеристика объектов исследования

Номер объекта	Местонахождение	ТЛУ	Возраст, лет	Происхождение	Объем выборки
1	Силикатное лесничество, квартал (кв.) 20	A ₁	45	Искусственное	100
2	Старожильское лесничество, кв. 34 (ППП 35)	A ₁₋₂	55	Искусственное	30
3	Старожильское лесничество, кв. 49 (ППП 37)	A ₁₋₂	62	Искусственное	101
4	Старожильское лесничество, кв. 17 (ППП 29)	A ₂	95	Естественное	90
5	Старожильское лесничество, кв. 17 (ППП 30)	A ₂	125	Естественное	130
6	ГПЗ “Большая Кокшага”, кв. 90 (ППП 9L)	A ₁	95	Естественное	101
7	ГПЗ “Большая Кокшага”, кв. 90 (ППП 90-4)	A ₂	95	Естественное	100
8	ГПЗ “Большая Кокшага”, кв. 87	A ₃	185	Естественное	20
9	Старожильское лесничество, кв. 35 (ППП 33)	A ₅	95	Естественное	25
10	Старожильское лесничество, кв. 35 (ППП 28)	A ₅	185	Естественное	25
11	Старожильское лесничество, кв. 38 (ППП 36)	B ₂	72	Искусственное	30
12	Защитные насаждения на реке Манаге	C ₂	55	Искусственное	60
13	Бушковское лесничество, кв. 39, архив клонов плюсовых деревьев	C ₂₋₃	30	Искусственное	262

Примечание. ППП – постоянная пробная площадь, ГПЗ – государственный природный заповедник, ТЛУ – тип лесорастительных условий (A₁ – сосняк лишайниковый на сухих песчаных почвах, A₁₋₂ – сосняк лишайниково-мшистый на свежих песчаных почвах, A₂ – сосняк брусничниковый на свежих песчаных почвах, A₃ – сосняк черничниковый на влажных песчаных почвах, A₅ – сосняк сфагновый заболоченный, B₂ – сосняк липово-кисличниковый на свежих супесчаных почвах, C₂ – сосняк крапивно-разнотравный на свежих суглинистых почвах, C₂₋₃ – сосняк липово-широколистный на свежих суглинистых временно переувлажненных почвах).

использовании гидростатического способа оценки плотности древесины керн предварительно увлажняли для снижения вероятности образования пузырьков воздуха на его поверхности и погружали в измерительную емкость с дистиллированной водой при помощи металлической иглы без касания ее стенок и дна. Измерение массы вытесненной воды ($m_{\text{дв}}$) известной плотности ($\rho_{\text{дв}}$) проводили на весах ViBRA ALE-623 (Shinko Denshi Co., Ltd., Токио, Япония) с погрешностью 10^{-6} кг. После этого керны высушивали при температуре 103°C до постоянной массы (абсолютно сухое состояние), для измерения которой применяли эти же весы. Для расчета базисной плотности древесины использовали следующие выражения:

стереометрический способ:

$$\rho_c = m_0 / V_{\text{max}},$$

гидростатический способ:

$$\rho_r = (m_0 \rho_{\text{дв}}) / m_{\text{дв}}, \quad (1)$$

где ρ_c , ρ_r – стереометрическая и гидростатическая плотность древесины керна (образца), $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; m_0 – масса образца в абсолютно сухом состоянии, кг; V_{max} – объем образца керна цилиндрической формы при влажности древесины растущего дерева, м^3 ; $\rho_{\text{дв}}$ – плотность дистиллированной воды,

$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (ГСССД 2-77); $m_{\text{дв}}$ – масса вытесненной воды при погружении керна в емкость, кг.

Полученные результаты, отражающие значения оцениваемых параметров у 1072 деревьев, обработаны на ПК с использованием пакетов прикладных программ для статистической обработки и графического представления данных: Microsoft Excel® 2016, SigmaPlot 14 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, CA, США) и Statistica 10 (Dell, Райнд-Пок, TX, США). Определение достоверности различий между групповыми средними базисной плотности проводили с помощью дисперсионного анализа и теста Тьюки (Tukey HSD) с доверительной вероятностью 95%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты показали, что различия между значениями базисной плотности древесины, оцененной стереометрическим и гидростатическим способами по кернам, взятым у деревьев на объектах № 2 и № 4 (табл. 1), не превышают в большинстве случаев $\pm 3\%$ (рис. 2), т. е. не выходят за пределы требуемой точности опыта. В связи с этим нами было принято решение оценивать величину данного параметра на остальных объектах исследования

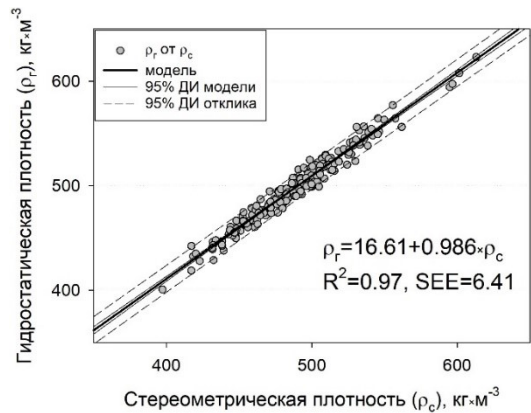


Рис. 2. Взаимосвязь между значениями базисной плотности ядер с объектов № 4 и № 5 (выборка 216 образцов), оцененной стереометрическим и гидростатическим способами: R^2 – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации; ДИ – доверительный интервал для модели и отклика соответственно (коэффициенты модели значимы).

только стереометрическим способом (далее обозначение ρ).

На основе анализа собранного нами эмпирического материала было установлено, что величина базисной плотности заболонной древесины

варьирует в сосняках Республики Марий Эл от 291 до 660 кг·м⁻³ (табл. 2), перекрывая установленные отечественными исследователями пределы для всего ареала этой древесной породы (Полубояринов, Федоров, 1985; Грошев и др., 1980; Боровиков, Уголев, 1989; Усольцев, Цепордей, 2020). Вместе с тем зарубежными учеными установлены более широкие пределы варьирования базисной плотности древесины сосны обыкновенной: 340–783 кг·м⁻³ со средним значением 514 кг·м⁻³ (Konofalska et al., 2021) и 274-697 кг·м⁻³ со средним значением 423 кг·м⁻³ (Auty et al., 2014).

Наиболее велико среднее значение параметра в сосняке черничниковом на объекте № 8, а минимально же оно на плантации клонов плюсовых деревьев в ТЛУ С₂₋₃ (табл. 2). Дерево с максимальной плотностью древесины было встречено нами в сосняке сфагновом (объект № 3), а с минимальной – на объекте № 13.

Некоторые из имеющейся совокупности ценопопуляций, как показал дисперсионный анализ и тест однородности средних (Тьюки), достоверно различаются между собой по средней величине оцениваемого параметра, несмотря на весьма значительное внутреннее варьирование его значений, вклад которого составляет 30.6% (вероятность ошибки < 0.001). Наиболее велика изменчивость параметра в ценопопуляции деревьев на верховом

Таблица 2. Вариабельность базисной плотности древесины в одновозрастных ценопопуляциях сосны (сортировка по средней величине параметра)

Номер объекта	Значения статистических показателей оцениваемого параметра*					
	$M \pm m$	X_{\min}	X_{\max}	S_x	CV	$r_{\rho-d}$
13	357.6 ± 1.7	290.6	446.4	27.8	7.8	–0.172
12	428.6 ± 3.7	368.9	491.2	28.7	6.7	0.427
1	432.8 ± 3.1	356.0	491.5	30.5	7.0	0.110
10	451.5 ± 9.5	371.6	594.3	46.7	10.4	–0.512
2	467.2 ± 7.2	369.7	521.8	39.5	8.5	0.485
3	469.7 ± 4.5	372.1	660.2	45.3	9.7	0.379
5	483.0 ± 3.0	397.3	596.7	34.2	7.1	–0.339
6	485.5 ± 2.8	421.7	557.6	30.5	6.3	0.228
11	489.3 ± 5.7	435.6	570.2	31.6	6.5	0.318
9	493.9 ± 9.7	429.5	647.7	47.8	9.7	–0.106
4	494.8 ± 3.7	431.6	613.0	35.1	7.1	–0.086
7	496.1 ± 3.8	402.6	628.2	38.8	7.8	0.115
8	500.1 ± 10.3	424.5	588.1	45.9	9.2	–0.835

Примечание. * $M \pm m$ – среднее значение параметра и его ошибки; X_{\min} , X_{\max} – минимальное и максимальное значения параметра; S_x – стандартное отклонение значений параметра; CV (%) – коэффициент вариации; $r_{\rho-d}$ – коэффициент корреляции Пирсона между рядами значений базисной плотности древесины и диаметром деревьев; символы “×”, расположенные в одном столбце (по линии), означают отсутствие статистически значимого различия между средними значениями выборок оцениваемого параметра.

болоте (объекты № 9, 10), а минимальна же она на плантации клонов. Ценопопуляция № 13 с самым низким значением плотности древесины достоверно отличается от всех остальных, а ценопопуляции № 4, 7 и 8, деревья которых имеют в среднем самое высокое значение параметра, достоверно отличаются только от пяти: № 1, 3, 9, 12 и 13 (см. символ “×” в табл. 2). Высокое внутреннее варьирование величины параметра указывает на принципиальную возможность отбора в ценопопуляциях наиболее ценных в хозяйственном отношении деревьев, для которого наиболее подходят объекты № 3, 7 и 9, где встречаются особи с высокой плотностью древесины.

Одним из факторов дисперсии базисной плотности древесины является диаметр деревьев, величина которого изменялась на объектах исследования от 7 до 57 см, однако его вклад, как показали расчеты, в основном невелик и варьирует в совокупности ценопопуляций в очень больших пределах, что указывает на специфичность структуры каждой из них. Наиболее тесная связь между значениями диаметра деревьев и плотности их заболонной древесины, которая, являлась при этом отрицательной, отмечается в древостое на объекте № 8 ($r = -0.835$), в остальных же случаях величина коэффициента корреляции варьирует от -0.512 до 0.482 . Деревья разного рангового положения в ценопопуляциях различаются между собой по базисной плотности древесины незначительно, хотя в среднем ее значение наиболее велико у особей III и IV классов Крафта (табл. 3).

Отсутствие тесной сопряженности между базисной плотностью древесины и диаметром деревьев в одновозрастных ценопопуляциях указывает на слабую зависимость базисной плотности древесины и от средней ширины годичного кольца, что подтвердили результаты непосредственных измерений их величины за последние 20 лет (рис. 3). Отсутствие тесной сопряженности между оцениваемыми параметрами свидетельствует также о том, что естественный отбор деревьев по плотности древесины в ценопопуляциях не происходит и целевая

селекция особей не приведет в итоге к снижению производимого насаждениями объема стволовой древесины.

Плотность древесины, как оказалось, не зависит и от густоты древостоя (табл. 4), увеличение которой приводит с возрастом к снижению среднего диаметра деревьев, а также ширины их годичных колец и слоя поздней древесины (табл. 5). Причина этого связана, на наш взгляд, с тем, что плотность древесины, которая в основном зависит от толщины стенок трахеид (Бюсен, 1961; Тюкавина и др., 2017; Рябоконь, Литаш, 1981), лимитируют на объекте № 1 нашего исследования не густота древостоя, а бедность и сухость почвы (Sharapov et al., 2024). Основной вклад в дисперсию оцениваемых параметров здесь, как и на других объектах, вносят также индивидуальные особенности деревьев, закрепленные, вероятно, в их геноме и проявляющиеся в рядах исходных данных в виде “шумов”, искажающих влияние изучаемого фактора. Разная доля участия генотипов в выборках отражается на величине среднеквадратического отклонения значений плотности древесины, которое наиболее велико в варианте опыта с густотой посадки растений 1 тыс. экз/га, а также на характере связи этого параметра с диаметром деревьев. В иных лесорастительных условиях полученные результаты могут быть другими.

Исследования также показали, что ширина раннелетнего слоя годичного кольца деревьев, имеющих высокую плотность древесины, очень сильно флуктуирует по годам и по мере их роста становится гораздо выше, чем у деревьев с низкой плотностью (рис. 4). Динамика же ширины слоя позднелетней древесины, величина которой сильно снизилась после засухи 2010 г., диаметрально противоположна. Этот факт, на наш взгляд, еще одно убедительное подтверждение наличия в ценопопуляциях разных генотипов деревьев, имеющих свои экологические требования.

Важнейшим фактором, влияющим на изменение средней величины базисной плотности древесины (ρ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$) у всей совокупности особей

Таблица 3. Среднее и максимальные значения базисной плотности древесины у деревьев разных классов Крафта в одновозрастных сосняках лишайниково-мшистых

Объект	Базисная плотность древесины у деревьев разных классов развития, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ *							
	I		II		III		IV	
	$M \pm m$	X_{\max}	$M \pm m$	X_{\max}	$M \pm m$	X_{\max}	$M \pm m$	X_{\max}
№ 4	475.2 ± 9.3	545	491.1 ± 6.1	601	508.6 ± 5.9	613	491.0 ± 9.2	595
№ 5	452.4 ± 8.4	526	484.1 ± 3.8	562	496.4 ± 7.0	662	497.6 ± 11	536
№ 7	492.2 ± 13.0	555	502.6 ± 9.1	628	495.9 ± 5.0	573	492.3 ± 8.7	566
В целом	469.2 ± 6.1	555	489.4 ± 3.2	628	499.7 ± 3.5	662	492.8 ± 5.5	595

Примечание. * $M \pm m$ – среднее значение параметра и его ошибки; X_{\max} – максимальные значения параметра.

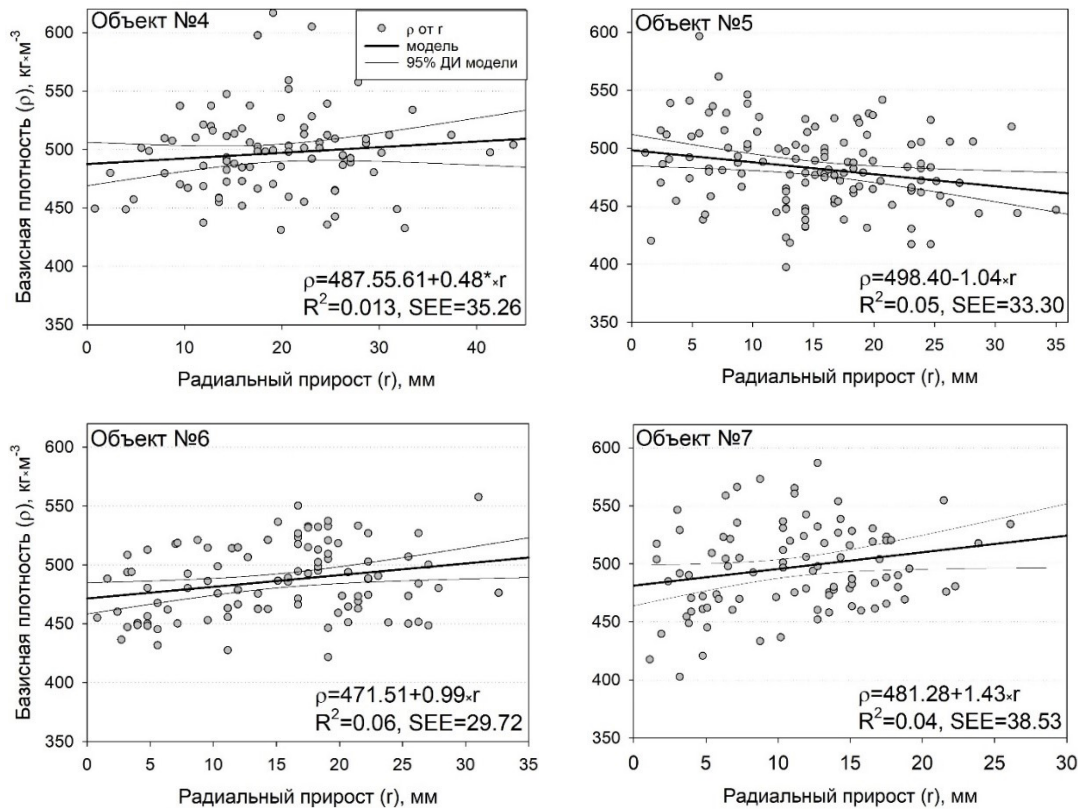


Рис. 3. Характер связи на объектах исследования № 4–6 между величиной радиального прироста деревьев за последние 20 лет и базисной плотности древесины.

Таблица 4. Вариабельность плотности древесины и характера ее связи с диаметром деревьев в 45-летних культурах сосны разной исходной густоты

Исходная густота, экз/га	Значения статистических показателей базисной плотности заболонной древесины*					
	$M \pm m$	X_{\min}	X_{\max}	S_x	$nCV, \%$	$r_{\rho-D}$
500	436 ± 5.7	396	476	79.9	63.2	0.102
1000	437 ± 10.0	378	579	200.3	76.6	0.118
3000	428 ± 8.4	358	483	124.7	53.4	0.626
5000	429 ± 6.8	356	484	128.2	41.8	0.132
10000	441 ± 6.1	390	492	101.7	53.5	-0.028

Примечание. * $M \pm m$ – среднее значение параметра и его ошибки; X_{\min}, X_{\max} – минимальное и максимальное значения параметра; S_x – стандартное отклонение значений параметра; $nCV (\%)$ – нормализованный коэффициент вариации $nCV = 100 \times S_x / (M - X_{\min})$; $r_{\rho-D}$ – коэффициент корреляции Пирсона между рядами значений базисной плотности древесины и диаметром деревьев.

Таблица 5. Величина диаметра деревьев на объекте и слоя поздней древесины у них за последние 10 лет

Параметр	Средние значения параметров в разных вариантах опыта				
	500 экз/га	1000 экз/га	3000 экз/га	5000 экз/га	10000 экз/га
Диаметр, см	22.7 ± 0.60	20.3 ± 0.60	14.9 ± 0.90	12.2 ± 0.60	9.9 ± 0.50
Ширина слоя, мм	0.6 ± 0.03	0.48 ± 0.02	0.32 ± 0.02	0.31 ± 0.01	0.25 ± 0.01
Доля слоя, %	34.2 ± 0.60	31.2 ± 0.50	32.1 ± 0.40	29.1 ± 0.20	29.7 ± 0.50

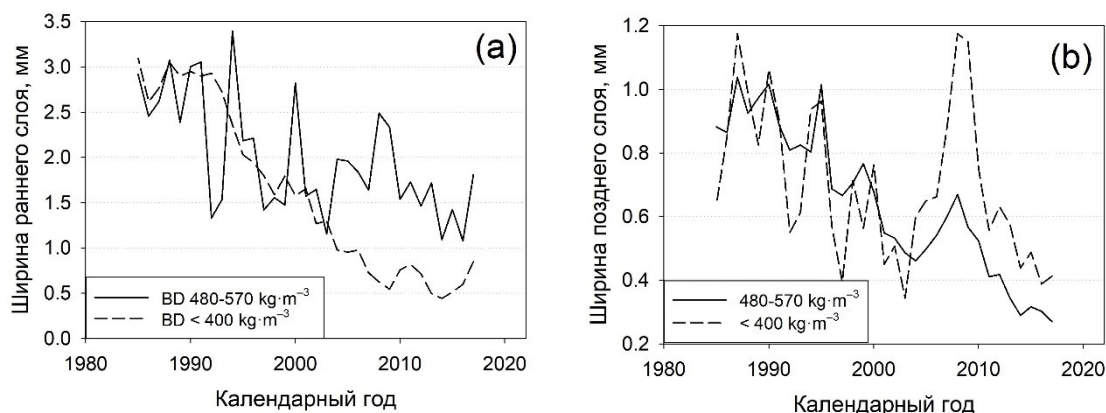


Рис. 4. Динамика ширины раннего (а) и позднего (б) годичных слоев у деревьев с разной плотностью заболонной древесины (Sharapov et al., 2024).

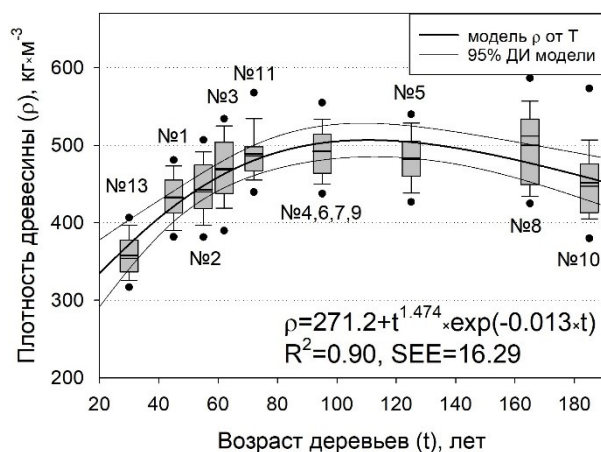


Рис. 5. Зависимость среднего значения базисной плотности древесины (ρ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$) в ценопопуляции сосны обыкновенной от возраста древостоев (t , лет): R^2 – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации (коэффициенты модели значимы). Цифрами обозначены диаграммы размаха, соответствующие выборкам значений плотности по объектам исследования (табл. 1). Границы “ящика” диаграмм размаха – 25-й и 75-й процентиля, границы “усов” – 10-й и 90-й процентиля, точки – 5-й и 95-й процентиля соответственно, тонкая линия в середине “ящика” – медиана, жирная линия – среднее.

в ценопопуляции, является, как показали исследования, возраст деревьев (t , лет). Математически эта закономерность, в которую полностью вписываются все объекты нашего исследования, в том числе культуры разной густоты, а также клоны плюсовых деревьев, аппроксимирует с очень высокой точностью ($R^2 = 0.90$) уравнение $\rho = 271.2 + t^{1.474} \exp(-0.013t)$ (Зайцев, 1991; Гринин и др., 2003). Траектория изменения оцениваемого параметра у деревьев имеет в выбранной системе координат, как следует из этого уравнения,

куполообразную форму с максимумом ориентировочно в их возрасте 100–110 лет (рис. 5). Недоучет или игнорирование этого фактора изменчивости базисной плотности древесины, выявленного также зарубежными исследователями (Fabisiak and Fabisiak, 2021), но для другого, более короткого диапазона изменения возраста деревьев (5–75 лет), являются, на наш взгляд, одной из причин противоречий, которые имеют место в работах разных авторов.

Вариабельность значений базисной плотности древесины у деревьев в ценопопуляциях с возрастом, как следует из представленных данных, не снижается, а, наоборот, имеет даже тенденцию к увеличению, что указывает на отсутствие естественного отбора особей по этому параметру. Не нарушается уровень разнообразия генофонда и при создании лесных культур, поскольку вариабельность значений базисной плотности древесины в древостоях естественного и искусственного происхождения одинакова.

Одним из важных практических результатов наших исследований явилась разработка шкалы для оценки деревьев по плотности их заболонной древесины в ценопопуляциях разного возраста, в том числе и очень молодого (табл. 6). Разработана она на основе регрессионных уравнений, описывающих траектории изменения значений оцениваемого параметра, отклоняющихся от среднего уровня на разную величину среднеквадратического отклонения (S_p): одинарного, двойного и тройного. Деревья, имеющие плотность древесины от $M + S_p$ до $M + 2S_p$, можно условно считать плюсовыми, от $M + 2S_p$ до $M + 3S_p$ – элитными, а более чем $M + 3S_p$ – суперэлитными.

Прямые измерения величины базисной плотности древесины в полевых условиях невозможны, поскольку образцы необходимо выдерживать некоторое время в сушильном шкафу, доводя их

Таблица 6. Критерии для выделения деревьев разных категорий качества в ценопопуляциях сосны обыкновенной по базисной плотности их заболонной древесины

Категория деревьев	Диапазон значений базисной плотности древесины в древостоях разного возраста, кг·м ⁻³							
	20 лет	30 лет	40 лет	50 лет	60 лет	80 лет	100 лет	120 лет
Плюсовые	390–425	420–450	450–480	470–500	490–520	520–555	540–575	545–590
Элитные	426–460	451–490	481–515	501–535	521–555	556–590	576–615	590–630

до абсолютно сухого состояния. В связи с этим актуально использование современных методов и средств неразрушающего косвенного определения плотности древесины у растущих деревьев (Gao et al., 2017; Downes et al., 2018; Sharapov et al., 2024) или же связанных с ней надежных морфологических признаков деревьев, а также выявления ДНК-маркеров, что является главными задачами наших будущих исследований.

ВЫВОДЫ

На основе анализа литературных источников и собранного нами эмпирического материала можно сделать следующие основные выводы:

- 1) базисная плотность заболонной древесины варьирует у деревьев сосны обыкновенной на территории Марийского Заволжья от 291 до 660 кг·м⁻³, перекрывая пределы, установленные отечественными исследователями для всего ареала этой древесной породы;
- 2) величина плотности заболонной древесины практически не связана с шириной годичных колец деревьев, долей позднелетнего слоя в ней, их рангового положения в ценопопуляциях, условиями произрастания, густоты и происхождения древостоев, а зависит в основном от возраста и индивидуальных особенностей особей, на основе которых можно проводить их целевую селекцию;
- 3) насаждения естественного и искусственного происхождения не различаются между собой по средней величине и широте изменений у деревьев величины базисной плотности заболонной древесины;
- 4) базисная плотность заболонной древесины закономерно изменяется с возрастом дерева ($R^2 = 0.9$), достигая максимума в 100–110 лет, что связано с изменением толщины стенок трахеид, обеспечивающих повышение устойчивости ствола к механическим нагрузкам, которые возрастают по мере увеличения его длины;
- 5) деревья с разной плотностью древесины имеют и разные экологические требования к условиям среды, что четко проявляется в характере динамики их радиального годичного прироста;

6) естественный отбор деревьев по плотности древесины в ценопопуляциях не происходит, о чем свидетельствует тенденция к увеличению среднеквадратического отклонения величины этого параметра по мере старения древостоев;

7) целевая селекция деревьев по величине базисной плотности древесины, которая практически не связана с шириной их годичных колец и конкурентоспособностью, не должна привести к снижению производительности насаждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агроклиматические ресурсы Марийской АССР / Под ред. К.И. Марченко Л.: Гидрометеиздат, 1972. 107 с.

Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесная промышленность, 1989. 296 с.

Бюсген М. Строение и жизнь наших лесных деревьев. М.: Гослесбумиздат, 1961. 424 с.

ГОСТ 16483.1-84. Древесина. Метод определения плотности. М., 1999. 7 с.

Гринин А.С., Орехов Н.А., Новиков В.Н. Математическое моделирование в экологии. М.: ЮНИТИ-Дана, 2003. 269 с.

Данилов Д.А., Степаненко С.М. Строение и плотность древесины ели и сосны в плантационных культурах Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2013. Вып. 204. С. 35–45.

Данилов Д.А., Смирнов А.П. Влияние структуры древостоя на плотность древесины сосны и ели в черничном типе леса // Лесотехнический журнал. 2014. № 4. С. 13–20.

Демаков Ю.П. Влияние факторов среды на рост деревьев в сосняках Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2023. 480 с.

Демаков Ю.П. Результаты многолетних опытов по созданию и выращиванию культур сосны обыкновенной в Республике Марий Эл. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2022. 242 с.

Демаков Ю.П., Демитрова И.П., Нуреева Т.В., Симатова Т.Ю. Влияние начальной густоты и интенсивности изреживания древостоя в культурах сосны на прирост и плотность древесины // Вестник ПГТУ.

- Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 2. С. 26–40.
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2019.2.26>.
- Жилкин Б. Д. К вопросу о влиянии условий место-произрастания на анатомическое строение, физические и механические свойства древесины сосны // Труды Брянского лесного института. 1936. Т. 1. С. 29–56.
- Зайцев Г.Н. Математический анализ биологических данных. М.: Высшая школа, 1991. 182 с.
- Зайцев Д.А. Влияние структуры хвойных дендроценозов на строение и плотность древесины сосны и ели: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Санкт-Петербург, 2018. 20 с.
- Колобов Н.В. Климат Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1968. 252 с.
- Коновалов Д.Ю. Качество древесины культур сосны в северной и южной подзонах тайги: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.01. Архангельск, 2007. 16 с.
- Краснов А.В., Гурский А.А. Изменение плотности древесины сосны в насаждениях государственной защитной лесной полосы Оренбургского лесхоза // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2007. № 3. С. 42–44.
- Кузьмин С.Р. Особенности древесины у сосны обыкновенной разного происхождения в географических культурах Западной и Средней Сибири // Строение, свойства и качество древесины — 2018: Мат-лы VI Международного симпозиума им. Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам лесовосстановления. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. С. 126–130.
- Кузьмин С.Р., Ваганов Е.А. Анатомические характеристики годичных колец у сосны обыкновенной в географических культурах Приангарья // Лесоведение. 2007. № 4. С. 3–12.
- Кузьмин С.Р., Роговцев Р.В. Радиальный рост и доля поздней древесины у сосны обыкновенной в географических культурах в Западной и Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 113–125.
- Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 201 с.
- Лацевич А.В. Свойства древесины сосны обыкновенной разного географического происхождения // Труды БГТУ. Сер.: Лесное хозяйство. 2001. Вып. 9. С. 143–146.
- Грошев Б.И., Сеницын С.Г., Мороз П.И., Сиперович П.И. Лесотаксационный справочник. М.: Лесная промышленность, 1980. 288 с.
- Ломов В.Д., Сухоруков А.С. Особенности анатомического строения древесины сосны в культурах с разной густотой посадки // Экология-2007: Мат-лы конференции. М.: МГУЛ, 2009. С. 62–65.
- Марущак В.Н. Биоэкологическая характеристика климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Казахстане: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03. Екатеринбург, 2007. 22 с.
- Марущак В.Н., Максимов С.А. Наследуемость механических свойств древесины у сосны обыкновенной в географических культурах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 11. С. 65–69.
- Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск: Издательство АГТУ, 2003. 110 с.
- Мельник П.Г., Савосько С.В., Станко Я.Н., Дюжина И.А., Степанова О.В. Географическая изменчивость продуктивности и физико-механических свойств древесины сосны обыкновенной // Лесной вестник. 2007. № 6. С. 33–38.
- Оводов А.В. Качество древесины сосны в насаждениях, созданных посевом и посадкой: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.01. Архангельск, 2010. 16 с.
- Петруша А.К. Технические свойства древесины основных пород БССР. Минск: Госиздат БССР, 1959. 151 с.
- Подошвелев Д.А. Динамика изменения физико-механических свойств древесины сосны в зависимости от густоты // Труды БГТУ. Сер. I: Лесное хозяйство. Минск: БГТУ, 2008. Вып. 14. С. 143–146.
- Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесная промышленность, 1976. 160 с.
- Полубояринов О.И., Федоров Р.Б. Влияние климатических факторов на плотность древесины сосны обыкновенной в лесной зоне европейской части СССР // Известия вузов. Лесной журнал. 1985. № 2. С. 5–9.
- Ревин А.И., Смольянов А.Н., Старостюк Н.Б. Физико-механические свойства древесины культур сосны различной густоты посадки в Тамбовской области // Известия вузов. Лесной журнал. 2010. № 2. С. 38–43.
- Рябокоть А.П., Литаш Н.П. Физико-механические свойства древесины сосны в культурах разной густоты // Лесоведение. 1981. № 1. С. 39–45.
- Смирнов В.Н. Почвы Марийской АССР, их генезис, эволюция и пути улучшения. Йошкар-Ола: Маркнигоиздат, 1968. 531 с.
- Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Дроздов И.И., Мелехов В.И. Плотность древесины сосны обыкновенной в различных условиях произрастания // Известия вузов. Лесной журнал. 2017. № 6. С. 6–64.
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.56>

- Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 178 с.
- Щекалев Р.В. Закономерности строения и свойств древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесонасаждениях на европейском северо-востоке: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02. Архангельск, 2021. 40 с.
- Auty D., Achim A., Macdonald E., Cameron A.D., Gardiner B.A. Models for predicting wood density variation in Scots pine // *Forestry*. 2014. V. 87. № 3. P. 449–458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>
- Downes G.M., Lausberg M., Potts B., Pilbeam D., Bird M., Bradshaw B. Application of the IML resistograph to the infield assessment of basic Density in Plantation Eucalypts // *Australian Forestry*. 2018. V. 81. № 3. P. 177–185. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676>
- Fabisiak E., Fabisiak B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees from different social classes of tree position in the stand // *BioResources*. 2021. V. 16. № 4. P. 7492–7508. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7492-7508>
- Gao S., Wang, X., Wiemann M.C. et al. A critical analysis of methods for rapid and non-destructive determination of wood density in standing trees // *Annals of Forest Science*. 2017. V. 74. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>
- Gil-Moreno B., Manso R., O’Ceallaigh C., Harte A.M. The influence of age on the timber properties and grading of Scots pine and larch in Ireland // *Forestry*. 2024. V. 97. № 1. P. 133–146. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad027>
- Kimberley M.O., Cown D.J., McKinley R.B., Moore J.R., Dowling L.J. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2015. V. 45. P. 22. <https://doi.org/10.1186/s40490-015-0053-8>
- Konofalska E., Kozakiewicz P., Buraczyk W., Szeligowski H., Lachowicz H. The technical quality of the wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of diverse genetic origin // *Forests*. 2021. V.12. № 5. P. 619. <https://doi.org/10.3390/f12050619>
- Sharapov E., Demakov Y., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) // *Forests*. 2024. V. 15. № 2. P. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>
- Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušienė L., Aleinikovienė J., Škėma M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities // *Forests*. 2020. V. 11. № 5. P. 587. <https://doi.org/10.3390/f11050587>
- Szaban J., Jelonek T., Okińczyc A., Kowalkowski W. Results of a 57-Year-Long Research on Variability of Wood Density of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) from Different Provenances in Poland // *Forests*. 2023. V. 14. № 3. P. 480. <https://doi.org/10.3390/f14030480>

Scots Pine Trees’ Sap Wood Density in Trans-Volga Forests of the Mari El Republic

Yu. P. Demakov, E. S. Sharapov*, A. S. Korolev, O. V. Sheykina

*Volga State University of Technology,
Lenin sq. 3, Yoshkar-Ola, 424000 Mari El Republic, Russian Federation*

**E-mail: sharapoves@volgatech.net*

The relevance of the study is due to the need to improve the accuracy of assessing the quality of the Russia’s forests resource potential and the efficiency of its use. That can only be done via an in-depth study of the tree coenopopulations’ structure regarding their economically valuable traits, one of which is the basic density of wood. The purpose of the study is to assess the patterns of individual and group variability in the basic sapwood density of Scots pine trees in forest stands of different ages, origins, density and growing conditions located in the Mari El Republic, which will allow to select and subsequently reproduce the most economically promising individuals. The studies were conducted on 13 sample plots in pure, even-aged forest stands. To estimate the value of the basic density of sapwood, which was carried out by stereometric and hydrostatic methods, we used 50 mm long cores, manually extracted with a Pressler borer from 1072 trees at a height of 1.3 m from the base of the trunk. Standard methods of mathematical statistics were used in processing the empirical material. Results. It was found that the value of the estimated parameter varies in trees from 291 to 660 kg m⁻³, overlapping with the limits established by domestic researchers. It is virtually independent of growing conditions, density and origin of tree stands, rank position of individuals in coenopopulations, width of the annual wood growth and the proportion of the late summer layer in it, and is mainly linked to the age of the trees ($R^2 = 0.9$). It has been proven that the

ecological requirements for environmental conditions are different for trees with different wood density, which is reflected in the nature of their radial annual growth dynamics. A scale has been developed for assessing the economic value of trees in coenopopulations of different ages based on the density of their sapwood. Natural selection of trees based on wood density in coenopopulations that reaches its maximum at the age of 100–110 years does not occur, and thus targeted selection based on this parameter will not subsequently affect the productivity of plantations.

Keywords: Scots pine, trees coenopopulations, wood, density, variability, economically valuable genotypes.

Acknowledgements: The study has been carried out with the financial support from the RSF grant No. 23-16-00220 (<https://rscf.ru/project/23-16-00220/>) using the equipment of the CCU “Ecology, biotechnology and processes of development of environmentally-friendly energy sources” of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

REFERENCES

- Agroklimaticheskie resursy Mariiskoi ASSR*, (Agroclimatic resources of the Mari ASSR), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, 107 p.
- Auty D., Achim A., Macdonald E., Cameron A.D., Gardiner B.A., Models for predicting wood density variation in Scots pine, *Forestry*, 2014, Vol. 87, No. 3, pp. 449–458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>
- Borovikov A.M., Ugolev B.N., *Spravochnik po drevesine* (Wood reference book), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1989, 296 p.
- Byusgen M., *Stroenie i zhizn' nashikh lesnykh derev'ev* (The structure and life of our forest trees), Moscow: Goslesbumizdat, 1961, 424 p.
- Danilov D.A., Smirnov A.P., Vliyanie struktury drevostoya na plotnost' drevesiny sosny i eli v chernichnom tipe lesa (Effect of stand structure on density of pine and spruce wood in myrtillus forest type), *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2014, No. 4, pp. 13–20.
- Danilov D.A., Stepanenko S.M., Stroenie i plotnost' drevesiny eli i sosny v plantatsionnykh kul'turakh Leningradskoi oblasti (Structure and density of wood of spruce and pine in forest plantation of Leningrad region), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2013, Issue 204, pp. 35–45.
- Demakov Y.P., Demitrova I.P., Nureeva T.V., Simatova T.Y., Vliyanie nachal'noi gustoty i intensivnosti izrezhivaniya drevostoya v kul'turakh sosny na prirost i plotnost' drevesiny (The effect of initial density and thinning intensity of a pine stand on growth and wood density), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2019, No. 2, pp. 26–40.
- Demakov Yu.P., *Rezultaty mnogoletnikh opytov po sozdaniyu i vyrashchivaniyu kul'tur sosny obyknovennoi v Respublike Marii El* (Results of long-term experiments on the creation and cultivation of Scots pine crops in the Republic of Mari El), Yoshkar-Ola: PGU, 2022, 242 p.
- Demakov Yu.P., *Vliyanie faktorov sredy na rost derev'ev v sosnyakakh Respubliki Marii El* (The influence of environmental factors on tree growth in pine forests of the Mari El Republic), Yoshkar-Ola: PGU, 2023, 480 p.
- Downes G.M., Lausberg M., Potts B., Pilbeam D., Bird M., Bradshaw B., Application of the IML resistograph to the infield assessment of basic Density in Plantation Eucalypts, *Australian Forestry*, 2018, Vol. 81, No. 3, pp. 177–185. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676>
- Fabisiak E., Fabisiak B., Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees from different social classes of tree position in the stand, *BioResources*, 2021, Vol. 16, No. 4, pp. 7492–7508. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7492-7508>
- Gao S., Wang, X., Wiemann M.C. et al., A critical analysis of methods for rapid and non-destructive determination of wood density in standing trees, *Annals of Forest Science*, 2017, Vol. 74, p. 27. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0623-4>
- Gil-Moreno B., Manso R., O'Ceallaigh C., Harte A.M., The influence of age on the timber properties and grading of Scots pine and larch in Ireland, *Forestry*, 2024, Vol. 97, No. 1, pp. 133–146. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad027>
- GOST 16483.1-84*.
- Grinin A.S., Orekhov N.A., Novikov V.N., *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii* (Mathematical modeling in ecology), Moscow: YuNITI-Dana, 2003, 269 p.
- Groshev B.I., Sinitsyn S.G., Moroz P.I., Seperovich I.P., *Lesotaksatsionnyi spravochnik* (Forest Taxation Guide), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1980, 288 p.
- Kimberley M.O., Cown D.J., McKinley R.B., Moore J.R., Dowling L.J., Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine, *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2015, Vol. 45, pp. 22. <https://doi.org/10.1186/s40490-015-0053-8>

- Kolobov N.V., *Klimat Srednego Povolzh'ya* (Climate of the Middle Volga Region), Kazan: Izd-vo Kazanskogo universiteta, 1968, 252 p.
- Konofalska E., Kozakiewicz P., Buraczyk W., Szeligowski H., Lachowicz H., The technical quality of the wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of diverse genetic origin, *Forests*, 2021, Vol. 12, No. 5, p. 619.
<https://doi.org/10.3390/f12050619>
- Konovalov D.Yu., *Kachestvo drevesiny kul'tur sosny v severnoi i yuzhnoi podzonakh taiga. Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk* (Quality of wood of pine crops in the northern and southern subzones of the taiga: author's abstract. Extended abstract of Candidate's agric. sci. thesis), Arkhangelsk, 2007, 16 p.
- Krasnov A.V., Gurskii A.A., *Izmenenie plotnosti drevesiny sosny v nasazhdeniyakh gosudarstvennoi zashchitnoi lesnoi polosy Orenburgskogo leskhoza* (Pine timber density variations in the state forest shelterbelts of the Orenburg Forest enterprise), *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2007, No. 3, pp. 42–44.
- Kurnaev S.F., *Lesorastitel'noe raionirovanie SSSR* (Zoning of forest sites in the USSR), Moscow: Nauka, 1973, 203 p.
- Kuz'min S.R., Osobennosti drevesiny u sosny obyknovЕННОй raznogo proiskhozhdeniya v geograficheskikh kul'turakh Zapadnoi i Srednei Sibiri (Wood features of Scots pine of different origin in the provenance trials in Western and Central Siberia), *Wood structure, properties and quality – 2018, in honor of B.N. Ugolev*, Proc. of The 6-th RCCWS International Symposium dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordinating Council of Wood Science, Krasnoyarsk, September 10–16, 2018, Novosibirsk: FUE “Publishing House SB RAS”, pp. 126–130.
- Kuz'min S.R., Rogovtsev R.V., Radial'nyi rost i dolya pozdnei drevesiny u sosny obyknovЕННОй v geograficheskikh kul'turakh v Zapadnoi i Srednei Sibiri (Radial growth and percent of latewood in Scots pine provenance trials in Western and Central Siberia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, No. 6, pp. 113–125.
- Kuz'min S.R., Vaganov E.A., Anatomicheskie kharakteristiki godichnykh kolets u sosny obyknovЕННОй v geograficheskikh kul'turakh Priangara (The Anatomic Characteristics of Scots Pine Tree Rings in Provenances in the Angara River Basin), *Lesovedenie*, 2007, No. 4, pp. 3–12.
- Latsevich A.V., Svoistva drevesiny sosny obyknovЕННОй raznogo geograficheskogo proiskhozhdeniya (Properties of Scots pine wood of different geographical origins), *Trudy BGTU. Seriya: Lesnoe khozyaistvo*, 2001, Issue 9, pp. 143–146.
- Lomov V.D., Sukhorukov A.S., Osobennosti anatomicheskogo stroeniya drevesiny sosny v kul'turakh s raznoi gustotoi posadki (Peculiarities of the anatomical structure of pine wood in crops with different planting densities), *Ekologiya-2007* (Ecology-2007), Conf. Proc., Moscow: MGUL, 2009, pp. 62–65.
- Marushchak V.N., *Bioekologicheskaya kharakteristika klimatipov sosny obyknovЕННОй (Pinus sylvestris L.) v Kazakhstane. Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk.* (Bioecological characteristics of climatypes of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Kazakhstan. Extended abstract of Candidate's agric. sci. thesis), Ekaterinburg, 2007, 22 p.
- Marushchak V.N., Maksimov S.A., Nasleduemost' mekhanicheskikh svoistv drevesiny u sosny obyknovЕННОй v geograficheskikh kul'turakh (Heritability of mechanical properties of Scots pine wood in provenance trials), *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No. 11, pp. 65–69.
- Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A., *Kachestvo drevesiny sosny v kul'turakh* (The quality of pine wood in crops), Arkhangelsk: Izd-vo Arangel'skogo gos. tekhn. universiteta, 2003, 110 p.
- Mel'nik P.G., Savos'ko S.V., Stanko Ya.N., Dyuzhina I.A., Stepanova O.V., Geograficheskaya izmenchivost' produktivnosti i fiziko-mekhanicheskikh svoistv drevesiny sosny obyknovЕННОй (Geographic variability of productivity and physical and mechanical properties of Scots pine wood), *Lesnoi vestnik*, 2007, No. 6, pp. 33–38.
- Ovodov A.V., *Kachestvo drevesiny sosny v nasazhdeniyakh, sozdannykh posevom i posadkoi: Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk* (Timber quality of pine plantations grown from saplings and from seeds. Extended abstract of candidate's agric. sci. thesis), Arkhangelsk: SAFU, 2010, 16 p.
- Petrusha A.K., *Tekhnicheskie svoistva drevesiny osnovnykh porod BSSR* (Technical properties of wood of the main species of the BSSR), Minsk: Gosizdat BSSR, 1959, 151 p.
- Podoshvelev D.A., Dinamika izmeneniya fiziko-mekhanicheskikh svoistv drevesiny sosny v zavisimosti ot gustoty (Dynamics of changes in physical and mechanical properties of pine wood depending on density), *Trudy BGTU. Seriya I. Lesnoe khozyaistvo*, Minsk: BGTU, 2008, Issue 14, pp. 143–146.
- Poluboyarinov O.I., Fedorov R.B., Vliyanie klimaticheskikh faktorov na plotnost' drevesiny sosny obyknovЕННОй v lesnoi zone evropeiskoi chasti SSSR (The influence of climatic factors on the density of Scots pine wood in the forest zone of the European part of the USSR), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 1985, No. 2, pp. 5–9.
- Poluboyarinov O.I., *Plotnost' drevesiny* (The density of wood), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1976, 160 p.
- Revin A.I., Smol'yanov A.N., Starostyuk N.B., Fiziko-mekhanicheskie svoistva drevesiny kul'tur sosny razlichnoi gustoty posadki v Tambovskoi oblasti (Physical-mechanical Wood Properties of Pine Culture of Different Planting Density in Tambov Region), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2010, No. 2, pp. 38–43.
- Ryabokon' A.P., Litash N.P., Fiziko-mekhanicheskie svoistva drevesiny sosny v kul'turakh raznoi gustoty (Physical and mechanical properties of pine wood in plantations of different density), *Lesovedenie*, 1981, No. 1, pp. 39–45.

- Sharapov E., Demakov Y., Korolev A., Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.), *Forests*, 2024, Vol. 15, No. 2, pp. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>
- Shchekalev R.V., *Zakonomernosti stroeniya i svoistv drevesiny sosny obyknovЕННОй (Pinus sylvestris L.) v lesonasazhdeniyakh na evropeiskom severo-vostoke. Avtoref. diss. d-ra s.-kh. nauk* (Patterns of structure and properties of Scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) in forest plantations in the European northeast. Extended abstract of Doctor's agric. sci. thesis), Arkhangelsk, 2021, 40 p.
- Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušienė L., Aleinikovienė J., Škėma M., Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities, *Forests*, 2020, Vol. 11, No. 5, p. 587. <https://doi.org/10.3390/f11050587>
- Smirnov V.N., *Pochvy Mariiskoi ASSR, ikh genezis, evolyutsiya i puti uluchsheniya* (Soils of the Mari ASSR, their genesis, evolution and ways of improvement), Yoshkar-Ola: Marknigoizdat, 1968, 531 p.
- Szaban J., Jelonek T., Okińczyc A., Kowalkowski W., Results of a 57-Year-Long Research on Variability of Wood Density of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) from Different Provenances in Poland, *Forests*, 2023, Vol. 14, No. 3, p. 480. <https://doi.org/10.3390/f14030480>
- Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Drozdov I.I., Melekhov V.I., Plotnost' drevesiny sosny obyknovЕННОй v razlichnykh usloviyakh proizrastaniya (Wood Density of Scots Pine in Different Growth Conditions), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2017, No. 6, pp. 6–64. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.56>
- Usol'tsev V.A., Tsepordei I.S., *Kvalimetriya fitomassy lesnykh derev'ev: plotnost' i sodержanie sukhogo veshchestva* (Qualimetry of forest tree biomass: density and dry matter content), Ekaterinburg: UGLTU, 2020, 178 p.
- Zaitsev D.A., *Vliyaniye struktury khvoinykh dendrotsenozov na stroenie i plotnost' drevesiny sosny i eli. Avtoref. dis. kand. s.-kh. nauk* (The influence of the structure of coniferous dendrocenoses on the structure and density of pine and spruce wood. Extended abstract of Candidate's agric. sci. thesis), Saint Petersburg, 2018, 20 p.
- Zaitsev G.N., *Matematicheskii analiz biologicheskikh dannyykh* (Mathematical analysis of biological data), Moscow: Nauka, 1991, 183 p.
- Zhilkin B.D., *K voprosu o vliyanii uslovii mestoproizrastaniya na anatomicheskoe stroenie, fizicheskie i mekhanicheskie svoistva drevesiny sosny* (On the influence of growing conditions on the anatomical structure, physical and mechanical properties of pine wood), *Trudy Bryanskogo lesnogo instituta*, 1936, Vol. 1, pp. 29–56.