

УДК 630\*182.8+634.0.652

DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.19

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ДРЕВОСТОЯ В КУЛЬТУРАХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ РАЗНОЙ ИСХОДНОЙ ГУСТОТЫ

Ю. П. Демаков<sup>1</sup>, Т. В. Нуреева<sup>1</sup>, А. С. Пуряев<sup>2</sup>, А. А. Рыжков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет,  
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

<sup>2</sup>ФБУ ВНИИЛМ «Восточно-европейская лесная опытная станция»,  
Российская Федерация, 420097, Казань, ул. Товарищеская, 40

E-mail: DemakovYP@volgatech.net; NureevaTV@volgatech.net; purjaew@rambler.ru

*Приведены математические модели, отражающие результаты многолетнего полевого эксперимента по оценке влияния исходной густоты культур сосны обыкновенной в условиях сухого бора на динамику таксационных параметров и таксовой стоимости древостоя. Показано, что оптимум исходной густоты культур в этих условиях, обеспечивающий наивысшую рентабельность за счёт улучшения товарной структуры древостоев, снижения затрат на их создание и выращивание, составляет 1,5–2 тыс. экз./га.*

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная; лесные культуры; исходная густота; таксационные параметры древостоя; таксовая стоимость; динамика; математические модели.

**Введение.** Одним из основных факторов, определяющих производительность, товарность, жизнестойкость и средоохранные свойства насаждений, а также экономическую эффективность (рентабельность) всего процесса лесовыращивания, является густота древостоев. Вопрос об её оптимизации, имеющий большое практическое значение и давно обсуждаемый в среде лесоводов [1–9], не потерял своей актуальности до наших дней, что объясняется многогранностью проблемы и различием подходов исследователей к её решению. Особенно актуальна задача оптимизации густоты создания лесных культур. Детальный анализ натуральных экспериментов по решению этой задачи применительно к культурам сосны обыкновенной, проведённый В. А. Усольцевым и А. А. Маленко [10–12], показал, что в большинстве случаев была нарушена чистота опытов, которые пришлось быстро прекратить из-за очень малой величины площади делянок (многие исследователи использовали площадки размером 1×1, 1×2 и 2×2 м, на кото-

рые высаживали от 5 до 200 экз. растений с последующим переводом данных на 1 га площади, что является совсем некорректным). Все культуры были заложены по разным технологиям и в разных природных зонах. При всей несопоставимости полученных результатов авторы взяли на себя смелость сделать ряд выводов:

1) в наиболее густых посадках смыкание наступает раньше;

2) в течение первых 15–30 лет после посадки лесных культур, т. е. до смыкания крон и корней деревьев, при которой наступает внутривидовая конкуренция между ними за ресурсы среды, запас древостоя пропорционален исходной густоте, а затем эта зависимость постепенно переходит в колоколообразную и даже обратно пропорциональную;

3) снижение продуктивности при экстремально густых посадках происходит вследствие не только из-за высокой внутривидовой конкуренции деревьев, но и вывала их под действием снеговых и ветровых нагрузок;

© Демаков Ю. П., Нуреева Т. В., Пуряев А. С., Рыжков А. А., 2016.

**Для цитирования:** Демаков Ю. П., Нуреева Т. В., Пуряев А. С., Рыжков А. А. Закономерности развития древостоя в культурах сосны обыкновенной разной исходной густоты // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32). С. 19–33. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.19

4) при низкой исходной густоте культур существует большой риск повреждения их вредными лесными насекомыми.

В настоящее время исследователями признано [3, 5–8], что безотносительного оптимума исходной и текущей густоты древостоев не существует. Он определяется поставленной целью, в качестве которой может выступать либо получение древесины нужного качества и в нужном количестве в минимально короткие сроки, либо увеличение комплексной продуктивности с учётом всех биологических компонентов лесных экосистем, либо повышение устойчивости и долговечности насаждений, их средообразующих и средоохраняющих функций, а также привлекательности для отдыха людей. Добиться того, чтобы лес выполнял одновременно все функции по максимуму ни теоретически, ни практически невозможно, поэтому необходимо заранее точно определить целевое назначение создаваемых насаждений. Оптимальная густота для той или иной древесной породы не может быть единой и должна дифференцироваться по природно-климатическим зонам, а в пределах последних – по эдафическим условиям.

Оптимизация исходной густоты лесных культур, обеспечивающая получение наивысшего экономического эффекта при выращивании древостоя определённого целевого назначения, невозможна, на наш взгляд, без математических моделей динамики развития древостоев и их таксовой стоимости, которых пока ещё никем не создано.

**Цель** работы заключалась в создании математических моделей динамики развития древостоев и их таксовой стоимости, необходимых для обоснованного выбора оптимального варианта исходной густоты культур, обеспечивающего получение наивысшего экономического эффекта. При создании моделей мы опирались на имеющиеся научные разработки [13, 14] и стремились к точности воспроизведения

моделируемого процесса (принцип реалистичности), что достигалось нами за счёт эвристического подхода к решению поставленной задачи и использования параметров, имеющих конкретный биофизический смысл. Мы стремились также к максимально возможному упрощению структуры моделей и понятности их для широкого круга специалистов.

**Объекты и методика.** Исследования проведены на опытном объекте, созданном по проекту Татарской ЛОС в кв. 20 Силикатного лесничества на обширной гари 1972 года, расчищенной от погибшего 50-летнего соснового древостоя естественного происхождения. Рельеф участка ровный, почва дерново-слабоподзолистая песчаная сухая, тип условий произрастания – А<sub>1-2</sub>, тип леса – сосняк разнотравно-лишайниковый. Дополнительную обработку почвы после расчистки корчевателем-собирателем Д-513А не проводили. Посадку осуществили весной 1977 года механизированным способом лесопосадочной машиной СБН-1, в качестве посадочного материала использовали двухлетние стандартные сеянцы сосны. Агротехнических и лесоводственных уходов не проводили в течение всего периода развития культур. Опытный объект состоит из 15 секций и представляет собой чистые культуры сосны разной исходной густоты (табл. 1, рис. 1). От других опытных объектов, созданных по данной тематике, он отличается большой величиной делянок и наличием вариантов с низкой густотой (500 и 1000 экз./га), не испытанных никем ранее.

На объекте в 1988, 1991, 1996, 1999, 2003, 2008 и 2011 годах проведена оценка состояния древостоев с полным перечётом деревьев и обмером таксационных параметров (высоты, протяжённости и проекции кроны, числа живых мутовок, диаметра наиболее толстых живых ветвей) у 15–20 деревьев центральных ступеней толщины. В 1996–1999 годах проведено комплексное изучение структуры подпо-

логовой растительности, грибов-макромицетов и почвенной мезофауны, проведены наблюдения за гигротермическим режимом почв, проанализирован ход роста деревьев по высоте и толщине, оценена масса лесной подстилки и корней растений. В 2008 году у 500 нижних ветвей деревьев оценена динамика линейного го-

дичного прироста. Цифровой эмпирический материал обработан общепринятыми методами математической статистики на ПК с использованием пакетов стандартных прикладных программ Excel и Statistica. Предварительные результаты исследований опубликованы в различных источниках [15, 16].

Таблица 1

Общая характеристика опытного объекта культур сосны разной исходной густоты

Вариант опыта	Номер секций	Площадь секций, га	Схема посадки	Исходная густота культур, экз./га
I	3, 9, 12	0,77; 0,66; 0,78	5,10×4,30; 5,00×4,10; 5,00×4,00 м	460, 490, 500
II	4, 7, 10	0,52; 0,45; 0,54	3,14×3,18; 3,28×3,17; 3,30×3,00 м	1000, 960, 1010
III	1, 5, 11	0,24; 0,24; 0,21	3,13×1,15; 3,14×1,18; 3,10×1,00 м	2780, 2700, 3225
IV	2, 6, 8	0,18; 0,35; 0,15	2,92×0,68; 3,27×0,68; 3,10×0,62 м	5040, 4500, 5200
V*	13, 14, 15	1,54; 1,62; 0,65	1,50×0,62; 1,50×0,62; 1,40×0,62 м	10750, 10750, 11520

**\*Примечание:** в качестве контроля выбраны участки производственных культур, непосредственно примыкающие к опытному объекту, созданные в то же время, теми же рабочими и тем же посадочным материалом.

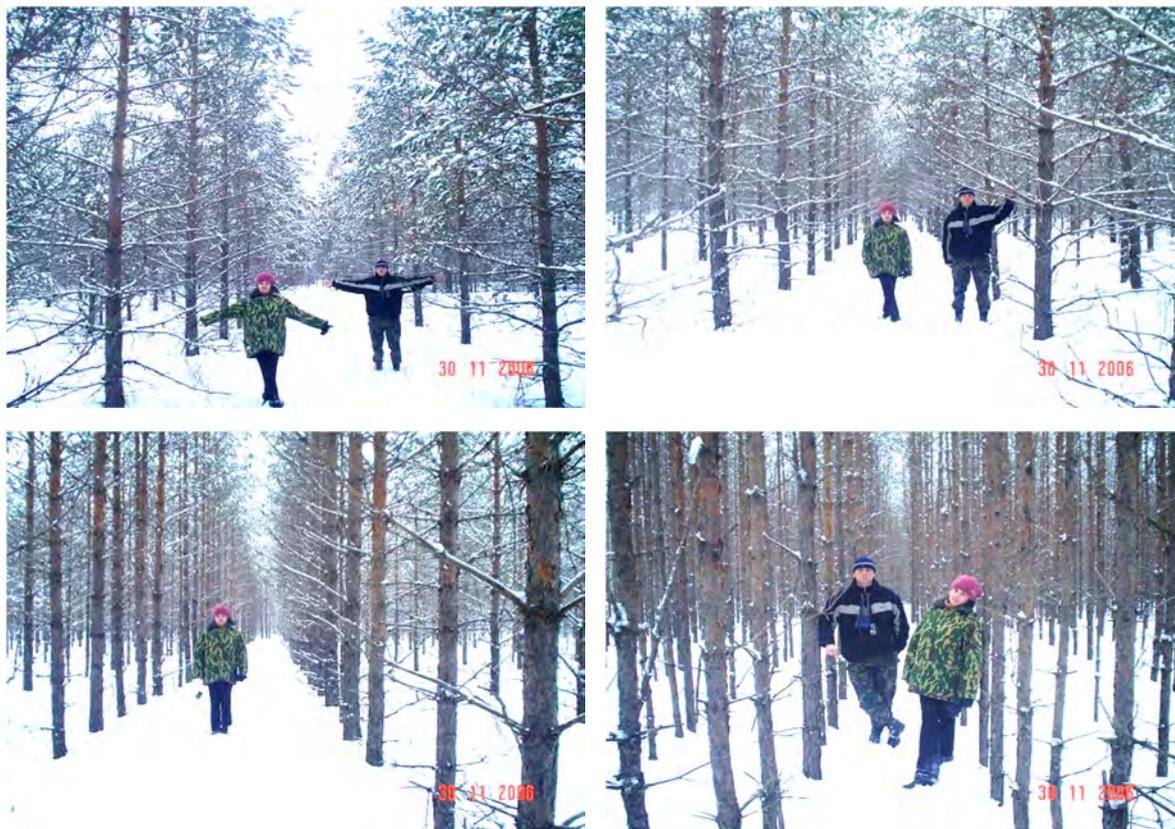


Рис. 1. Общий вид 30-летних культур сосны разной исходной густоты на опытном объекте: верхние снимки слева направо – густота 500 и 1000 экз./га соответственно; нижние снимки слева направо – густота 3 тыс. и 10 тыс. экз./га

**Результаты и обсуждение.** Исследования показали, что влияние исходной густоты культур на состояние и таксационные параметры древостоя более или менее отчётливо проявляется уже в возрасте пяти лет и по мере его увеличения различия становились всё более выраженными. Густота посадки культур менее всего оказывает влияние на высоту деревьев и её годичный прирост, хотя и здесь существуют существенные различия между вариантами опыта. Так, в течение шести лет после создания культур наиболее высокий годичный прирост в высоту имели деревья в варианте самой густой посадки (рис. 2), что связано с так называемым эффектом Олли [17, 18], согласно

которому у объединённых в группу особей, по сравнению с одиночными, значительно повышается успешность развития и устойчивость к неблагоприятным факторам среды. По мере смыкания древесного полога влияние этого эффекта на величину годичного прироста деревьев постепенно перекрывают конкурентные отношения между ними в ценозах. В возрасте культур более 25 лет наиболее высокий годичный прирост в высоту уже имеют деревья в варианте самой низкой исходной густоты, которые в возрасте 40 лет будут превышать по высоте густые на 1,7 м. В дальнейшем, как показали расчёты, различия будут ещё более значительными (рис. 3).

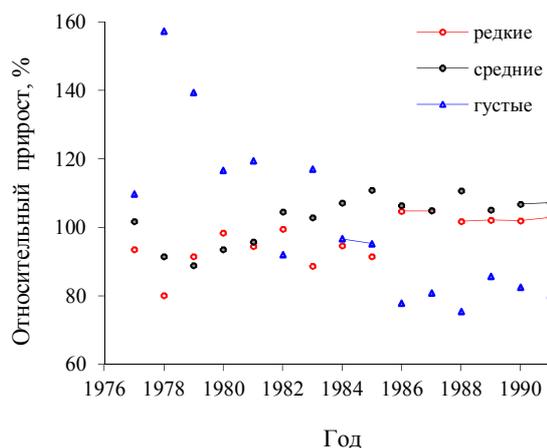
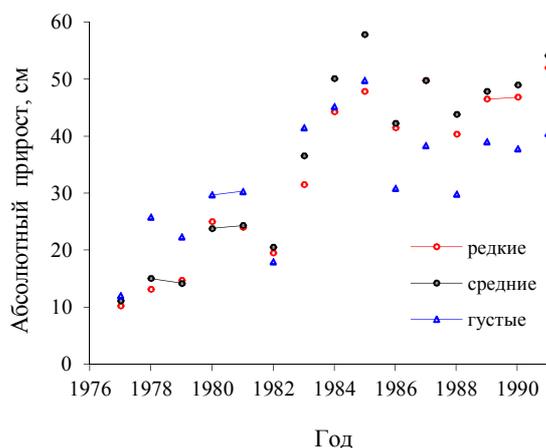


Рис. 2. Динамика годичного прироста деревьев в высоту в культурах сосны разной густоты

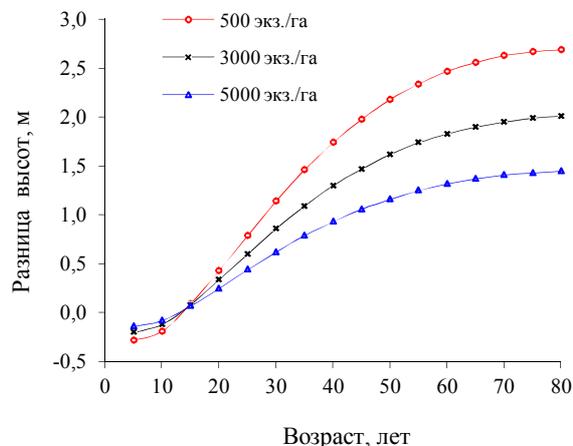
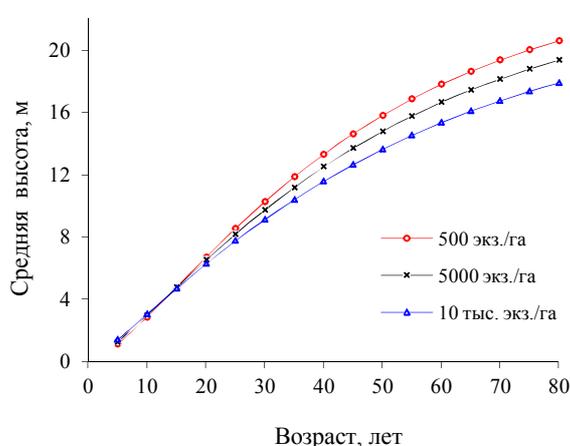


Рис. 3. Динамика средней высоты деревьев в культурах сосны разной исходной густоты (слева) и её разницы по отношению к варианту 10 тыс. экз./га

Таблица 2

**Параметры уравнений динамики средней высоты древостоя в различных вариантах опыта**

Вариант опыта	Исходная густота культур, экз./га	Значения параметров уравнения $H = K \cdot \{1 - \exp[-a \cdot 10^{-3} \cdot t]\}^b$			
		$K$	$a$	$b$	$R^2$
I	500	24,7	27,13	1,499	0,997
II	1000	24,6	26,80	1,483	0,985
III	3000	24,3	25,49	1,418	0,996
IV	5000	24,0	24,18	1,356	0,994
V	11000	22,9	20,24	1,186	0,981

Наиболее обоснованной математической моделью динамики высоты древесных растений является уравнение Митчерлиха  $Y(t) = K \cdot [1 - \exp(-a \cdot t)]^b$ , все параметры которого имеют конкретный биофизический смысл [13, 14]. Расчёты показали, что в каждом варианте опыта значения параметров регрессионных уравнений, описывающих динамику средней высоты деревьев ( $H$ , м), сугубо специфичны (табл. 2), закономерно изменяясь в градиенте исходной густоты культур ( $N$ , тыс. экз./га) и их возраста ( $t$ , лет). Обобщённая математическая модель, обеспечивающая не только очень высокую точность аппроксимации исходных данных ( $R^2 = 0,972$ ;  $p < 0,001$ ), но и учитывающая эффект Олли и усиливающееся со временем негативное влияние переуплотнения ценопопуляции, имеет следующий вид:

$$H = (24,82 - 0,174 \cdot N) \cdot \{1 - \exp[-(27,46 - 0,656 \cdot N) \cdot 10^{-3} \cdot t]\}^{1,516 \cdot \exp(-0,0223 \cdot N)}$$

Характер изменения размеров стволов деревьев в толщину несколько иной, чем в высоту: негативный эффект избыточной густоты культур здесь проявляется более резко, а положительного влияния скученности ценопопуляций в первые годы жизни культур практически не прослеживается и уже с возраста 5–7 лет наибольший радиальный годичный прирост отмечается в варианте самой низкой исходной густоты (рис. 4). В возрасте 40 лет средний диаметр деревьев в варианте опыта 500 экз./га будет уже в 2,5 раза (на 13 см)

выше, чем в варианте самой густой посадки. В дальнейшем, как показали расчёты (рис. 5), различия будут ещё более значительными. Увеличение густоты культур приводит к снижению дифференциации деревьев по их размерам, которая по мере развития древостоев неуклонно возрастает. Обобщённые математические модели динамики среднего и максимального диаметра деревьев ( $D$ , см) в культурах разной густоты ( $N$ , тыс. экз./га), а также значений среднеквадратического отклонения этого таксационного параметра древостоя ( $S_D$ , см) имеют следующий вид:

$$D_{\text{cp}} = 1,816 \cdot (t - 5)^{0,707 \cdot \exp(-0,047 \cdot N)}, \\ R^2 = 0,935; p < 0,001;$$

$$D_{\text{max}} = 2,683 \cdot (t - 5)^{0,703 \cdot \exp(-0,033 \cdot N)}, \\ R^2 = 0,917; p < 0,001.$$

$$S_D = 0,60 \cdot (t - 5)^{0,587 \cdot \exp(-0,033 \cdot 7N)}, \\ R^2 = 0,674; p < 0,01.$$

По мере развития древостоев изменяются также значения коэффициентов асимметрии и эксцесса рядов их распределения по размерам. Динамика этих показателей довольно своеобразна и представляет собой волновые колебания (рис. 6), причиной которых, по мнению некоторых исследователей [19], является естественная цикличность процесса дифференциации деревьев, обусловленная действием изменяющихся погодных условий. Эти изменения происходят стохастично и трудно прогнозируемы.

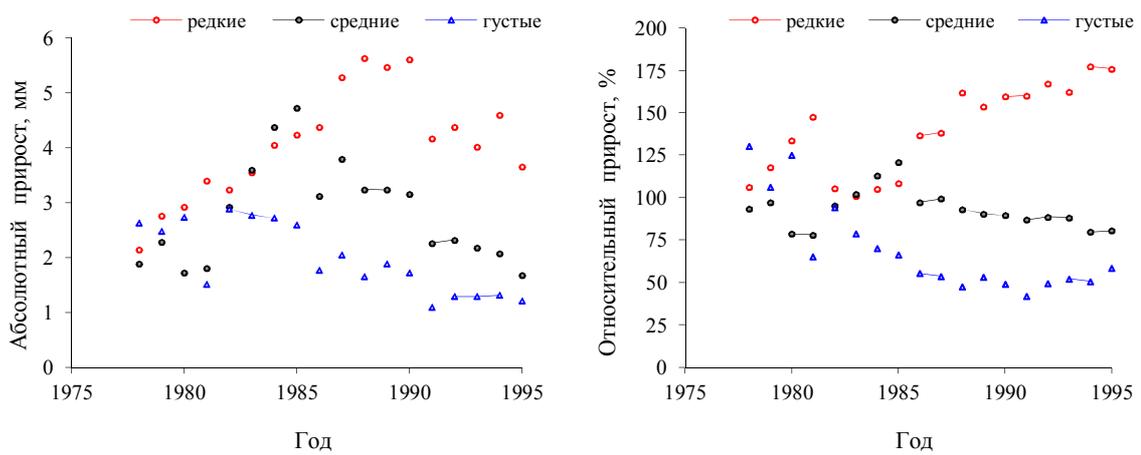


Рис. 4. Динамика радиального годичного прироста деревьев в культурах сосны разной густоты

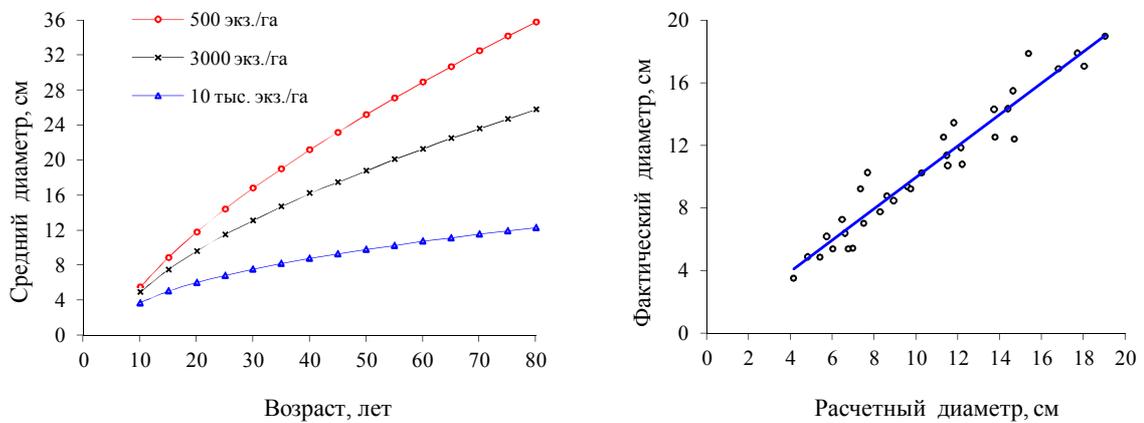


Рис. 5. Динамика величины среднего диаметра деревьев в культурах сосны разной исходной густоты и согласованность расчётных данных с фактическими

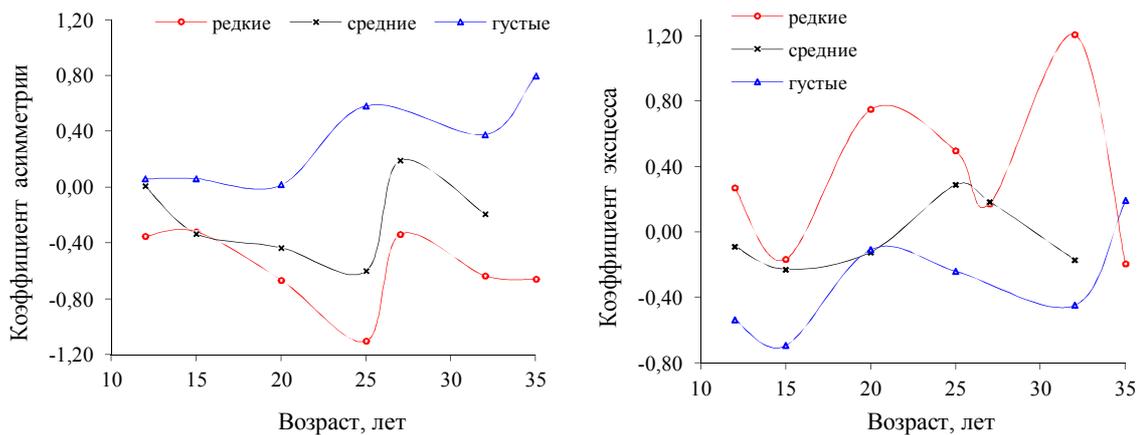


Рис. 6. Динамика величины коэффициентов асимметрии и эксцесса диаметра деревьев в культурах сосны разной исходной густоты и его разницы по отношению к варианту 10 тыс. экз./га

По значениям среднего диаметра ( $D$ , см) и высоты ( $H$ , м) древостоя можно без особых затруднений на основе полученных нами ранее моделей [20] оценить объём ствола ( $V$ , м<sup>3</sup>) и фитомассу различ-

ных фракций ( $M$ , кг) среднего дерева в культурах сосны разной исходной густоты, а также проанализировать изменение потока ассимилянтов между различными органами деревьев в ходе их роста, что сделать

путём прямых натуральных экспериментов очень сложно. Для этого необходимо использовать следующий набор уравнений:

$$V = 5,18 \cdot 10^{-5} \cdot H^{0,868} \cdot (D + 1)^2;$$

$$M_{\text{общ.}} = 4,906 \cdot 10^{-2} \cdot H^{0,743} \cdot (D + 1)^2;$$

$$M_{\text{ствола}} = 2,013 \cdot 10^{-2} \cdot H^{0,891} \cdot (D + 1)^2;$$

$$M_{\text{ветвей}} = 9,608 \cdot 10^{-3} \cdot H^{0,415} \cdot (D + 1)^2;$$

$$M_{\text{хвои}} = 22,31 \cdot 10^{-3} \cdot (D + 1)^{1,777};$$

$$M_{\text{корней}} = 20,86 \cdot 10^{-3} \cdot (D + 1)^{2,484}.$$

Расчёты на основе этих уравнений показали, что общая абсолютно сухая фитомасса среднего дерева в варианте опыта с густотой посадки 500 экз./га в возрасте старше 30 лет в четыре раза выше, чем в самых густых культурах, а по массе хвои – в три раза. Варианты опыта существенно различаются между собой по характеру распределения потока ассимилянтов между различными органами деревьев. Так, на образование годичного прироста фитомас-

сы корней в густых культурах запасённых деревом питательных веществ расходуется меньше, чем в редких, а на образование годичного прироста фитомассы хвои, наоборот, больше (рис. 7). В результате этого в густых культурах с увеличением возраста деревьев происходит неуклонное снижение эффективности работы ассимиляционного аппарата, который производит всё меньше массы стволовой древесины (рис. 8). С увеличением исходной густоты культур происходит также возрастание нагрузки на сосущие корни, которым становится всё труднее обеспечивать влагой и питательными веществами крону деревьев, что приводит к их ослаблению и снижению засухоустойчивости. Деревья в редких культурах наиболее эффективно используют солнечную энергию и депонируют углекислоту.

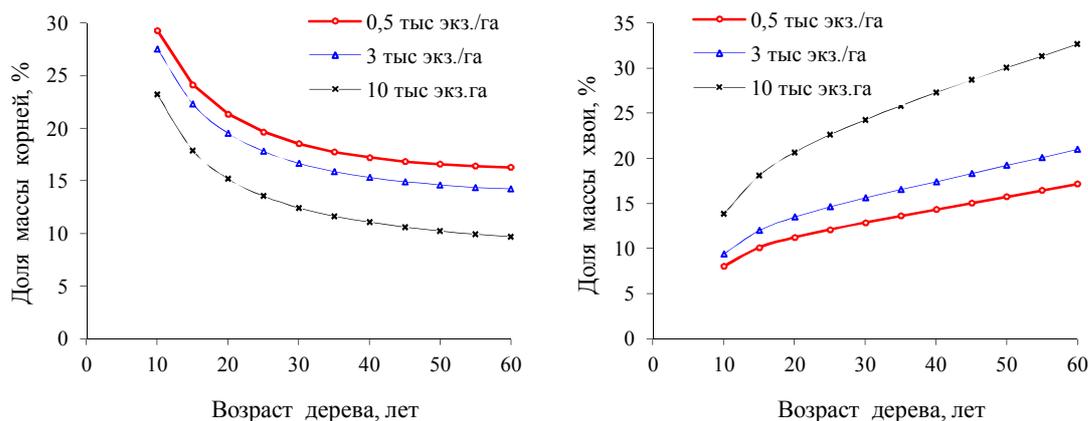


Рис. 7. Закономерности изменения распределения годичного прироста массы ассимилянтов между различными органами деревьев в культурах сосны разной исходной густоты

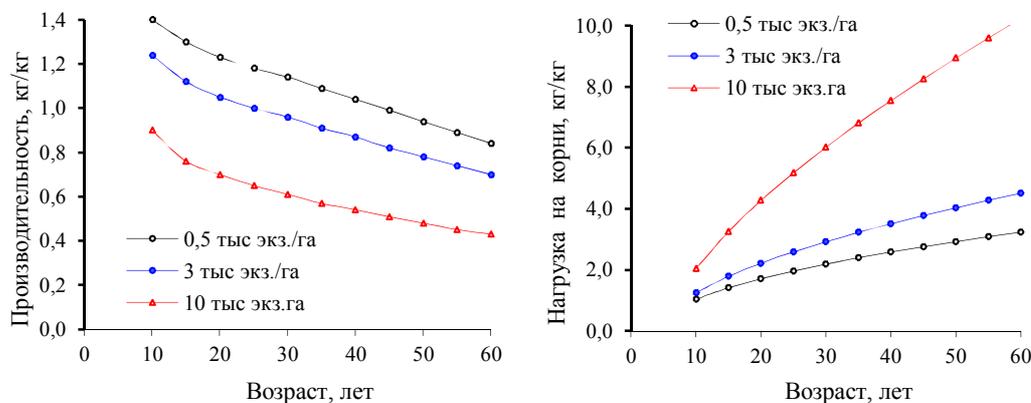


Рис. 8. Динамика производительности ассимиляционного аппарата деревьев (слева) и нагрузки на их сосущие корни в культурах сосны разной исходной густоты

Исходная густота культур существенным образом влияет на динамику значений относительной протяжённости крон деревьев ( $H$ , %) и площади их проекции ( $S$ , м<sup>2</sup>), а также возраста отмирания нижних ветвей ( $t$ , лет), что наилучшим образом аппроксимируют следующие уравнения регрессии:

$$H = 80 \cdot \exp(-11,41 \cdot 10^{-4} \cdot (t - 5)^2 \cdot N^{0,5}) + 20;$$

$$R^2 = 0,916; p < 0,001;$$

$$S = 1,253 \cdot \exp(-88,76 \cdot 10^{-3} \cdot N) \cdot D^{0,822};$$

$$R^2 = 0,806; p < 0,001;$$

$$A = 30 \cdot \exp(-72,54 \cdot 10^{-3} \cdot N) \times [1 - \exp(-33,91 \cdot 10^{-3} \cdot t)]; R^2 = 0,865; p < 0,001.$$

Густота культур оказывает значительное влияние также на рост ветвей деревьев, динамику длины которых ( $L$ , см) и величину её среднеквадратического отклонения ( $S_L$ , см) описывают следующие уравнения:

$$L = 432 \cdot \exp(-11,83 \cdot 10^{-2} \cdot N) \times [1 - \exp(-89,71 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot N^{0,246})];$$

$$R^2 = 0,982; p < 0,001;$$

$$S_L = 50,2 \cdot \exp(-33,30 \cdot 10^{-3} \cdot N) \times [1 - \exp(-10,91 \cdot 10^{-2} \cdot t)]; R^2 = 0,933;$$

$$p < 0,001.$$

Анализ этих уравнений показывает, что в результате отмирания нижних ветвей деревьев протяжённость их кроны во всех вариантах опыта к возрасту культур 80 лет выравнивается, устанавливаясь на отметке 20–30 % общей длины ствола (рис. 9). Средняя продолжительность жизни ветвей в густых культурах будет составлять в этом возрасте 13–14 лет, а длина – всего 130 см (рис. 10). В редких же культурах продолжительность жизни ветвей будет достигать уже 26–27 лет, а длина – 390 см. Площадь проекции кроны деревьев в варианте самой редкой посадки в возрасте 80 лет будет в 5,6 раза выше, чем в наиболее густой, достигая 22,7 м<sup>2</sup>.

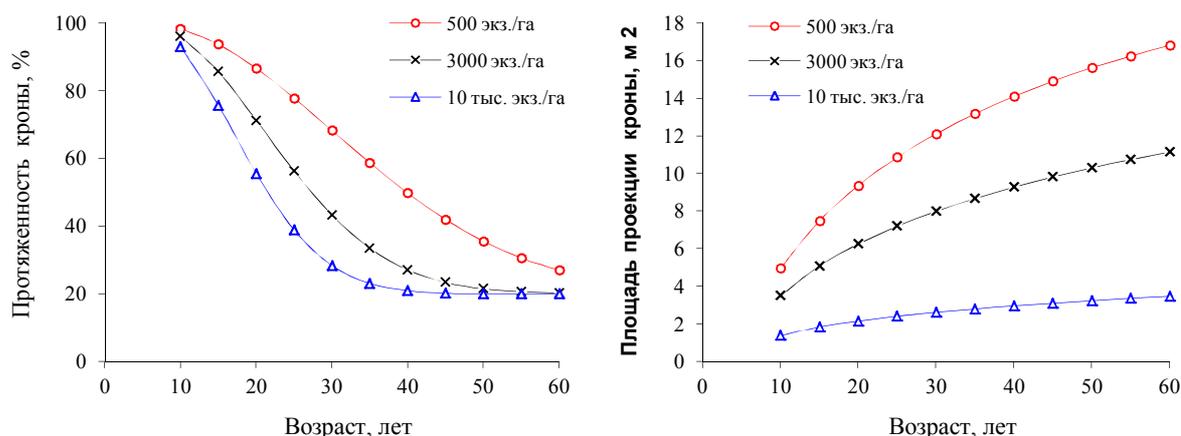


Рис. 9. Динамика параметров кроны среднего дерева в культурах сосны разной исходной густоты

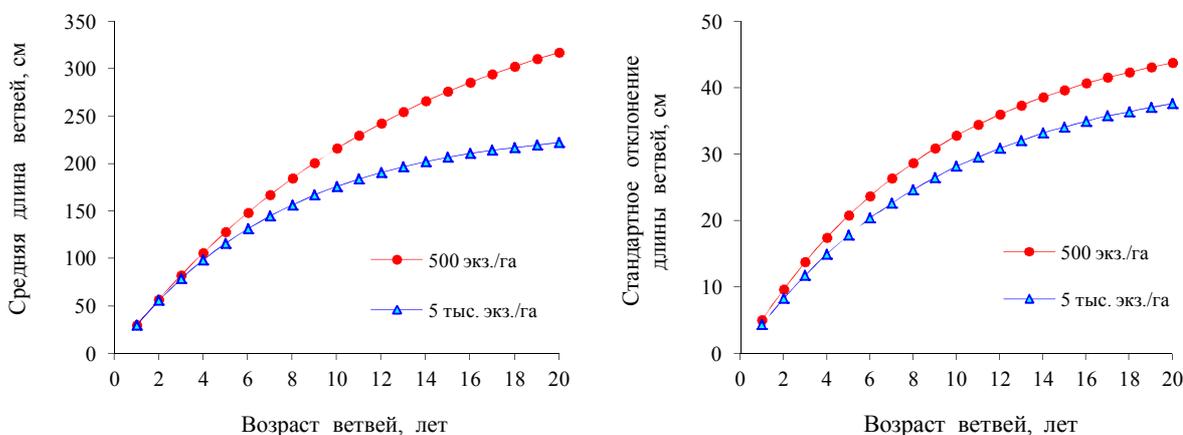


Рис. 10. Динамика параметров длины ветвей деревьев в культурах сосны разной исходной густоты

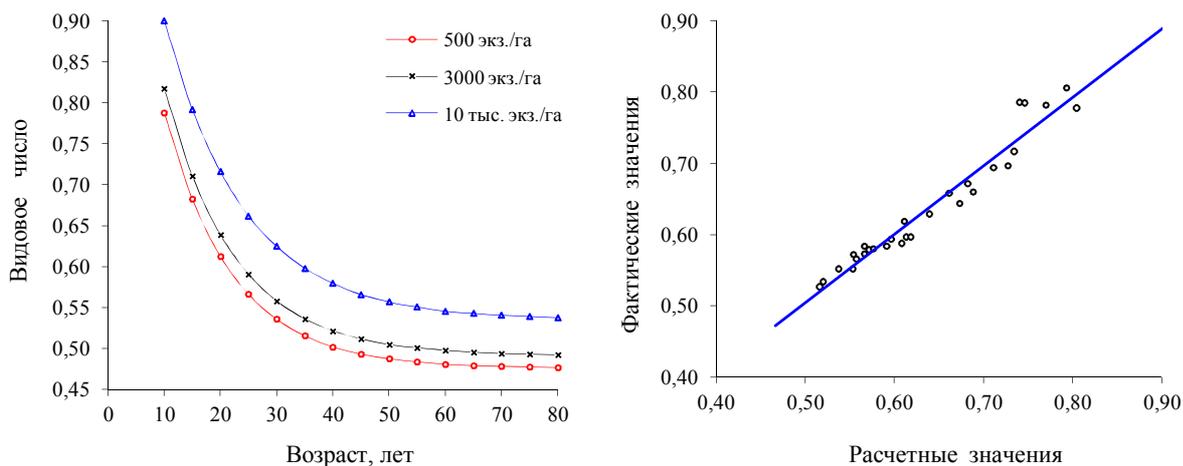


Рис. 11. Динамика видового числа ствола среднего дерева в культурах сосны разной густоты и согласованность расчётных данных с фактическими

Увеличение исходной густоты культур имеет не только негативные, но и позитивные эффекты, способствуя формированию очищенных от сучьев, более полндревесных малосбежистых стволов деревьев, динамику видового числа которых ( $F$ ) с высокой точностью отображает (рис. 11) уравнение регрессии, описывающее 99 % дисперсии фактических значений параметра:

$$F = (55,8 \cdot 10^{-4} \cdot N + 0,309) \times \\ \times \exp[-(83,2 - 1,30 \cdot N) \cdot 10^{-3} \cdot (t - 10)] + \\ + (62,3 \cdot 10^{-4} \cdot N + 0,473).$$

Наиболее сложно прогнозируемым параметром является сохранность деревьев в культурах, величина которой зависит от многих факторов, часто напрямую не связанных с их исходной густотой. Отпад деревьев в результате их конкурентной борьбы за свет и другие ресурсы среды начинается происходить лишь после смыкания древесного полога, которое в культурах с исходной густотой 11 тыс. экз./га наступило уже в возрасте 5 лет, густотой 5 тыс. экз./га – 7 лет, 3 тыс. экз./га – 12 лет. В варианте опыта с густотой 1 тыс. экз./га оно, как показали расчёты, проведённые на основе модели динамики площади проекции крон деревьев, может наступить лишь в возрасте 55 лет, а густотой 500 экз./га – 90 лет, да и то при условии сохранности всех высаженных расте-

ний. Основной причиной отпада деревьев на опытном объекте, кроме внутривидовой конкуренции, являлась корневая губка, которая не встречалась пока только в варианте самой густой посадки. Динамику сохранности деревьев ( $W$ , %) с учётом воздействия на них патологических факторов описывает уравнение:

$$W = 92,9 \cdot \exp(-98,76 \cdot 10^{-4} \cdot N^{0,606} \cdot t) + 7,1; \\ R^2 = 0,823; p < 0,001$$

На основе всех приведённых выше моделей несложно вычислить динамику в культурах разной исходной густоты запаса стволовой древесины, фитомассу различных фракций древостоя и годичного прироста значений всех этих параметров. Графическое отображение результатов расчётов (рис. 12) свидетельствует о том, что наиболее высокий запас древостоя до возраста 65–70 лет имеют культуры с густотой посадки 3 тыс. экз./га, а после этого – с густотой 1 тыс. экз./га. Запас древостоя в культурах с густотой посадки 500 экз./га до 80 лет ниже, чем в других вариантах опыта. Кульминация среднего годичного прироста запаса в культурах густотой 10 тыс. экз./га отмечается в возрасте 25 лет и составляет 3,1 м<sup>3</sup>/га, густотой 5 тыс. экз./га – 40 лет (4,7 м<sup>3</sup>/га), 3 тыс. экз./га – 55 лет (5,6 м<sup>3</sup>/га), 1000 и 500 экз./га – 80 лет (5,2 и 3,8 м<sup>3</sup>/га соответственно).

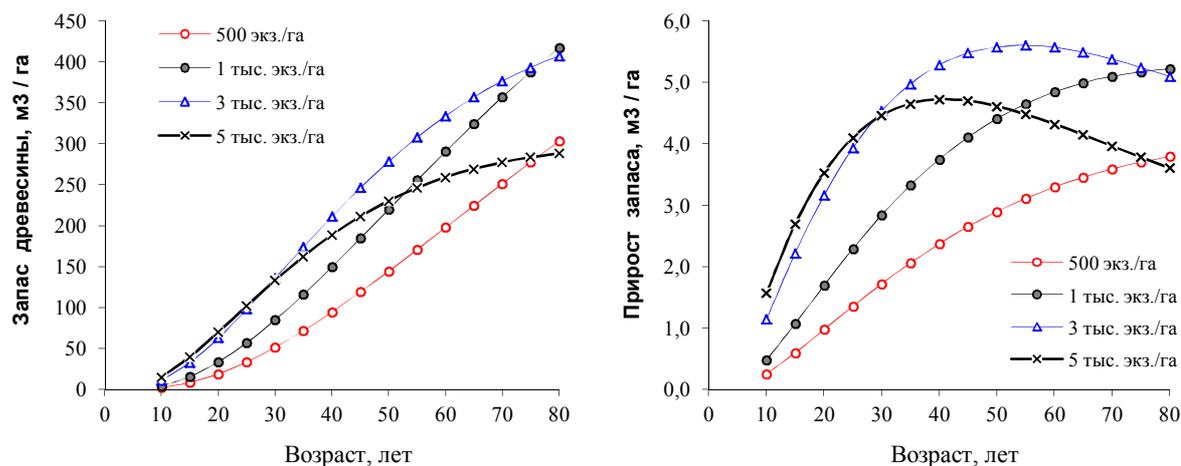


Рис. 12. Динамика запаса стволовой древесины и его среднего годовичного прироста в культурах сосны разной исходной густоты

Окончательное решение по выбору оптимального варианта исходной густоты культур можно сделать лишь на основе оценки таксовой стоимости древостоев [21], зависящей не только от их запаса, но и товарной структуры. Выход ликвидной древесины в сосняках составляет, исходя из существующих всеобщих товарных таблиц [22, с. 147], 0,88 общего объёма ствола, а характер распределения её по категориям крупности зависит только от диаметра дерева ( $D$ , см) на высоте 1,3 м, что с высокой точностью ( $R^2 > 0,999$ ;  $p < 0,001$ ) описывает следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{крупной}} &= 0,9 \cdot \{1 - \exp[-10,56 \cdot 10^{-4} \cdot (D - 15)^{2,149}]\}; \\
 P_{\text{мелкой}} &= 0,91 / (8,25 \cdot 10^{-6} \cdot D^{4,131} + 1); \\
 P_{\text{дров}} &= 0,16 \cdot \exp(-17,67 \cdot 10^{-2} \cdot D) + 0,03; \\
 P_{\text{средней}} &= M_{\text{общий}} - 0,12 - \\
 &\quad - P_{\text{крупной}} - P_{\text{мелкой}} - P_{\text{дров}}.
 \end{aligned}$$

Расчёт таксовой стоимости древостоя, проведённый на основе данных уравнений, в которых в качестве независимой переменной использовали средний диаметр древостоя, и ставок за единицу объёма древесины на корню, утверждённых постановлением Правительства Российской Федерации от 29 апреля 2006 года за № 263, показал, что она нелинейно увеличивается с возрастом, выходя в определённый момент времени на плато. Для мате-

матического описания её динамики лучше всего подходит уравнение Митчерлиха  $Y_{(t)} = K \cdot [1 - \exp(-a \cdot 10^{-3} \cdot t)]^b$ , параметры которого закономерно изменяются по вариантам густоты культур ( $N$ , тыс. экз./га):

$$\begin{aligned}
 K &= 89,6 \cdot \exp(-83,97 \cdot 10^{-3} \cdot N^{1,767}) + 7,0; \\
 R^2 &= 0,991; \quad p < 0,001; \\
 a &= 21,90 \cdot (N - 0,06)^{0,246}; \quad R^2 = 0,994; \\
 p &< 0,001; \\
 b &= 3,75 \cdot \exp(-88,40 \cdot 10^{-4} \cdot N^2); \quad R^2 = 0,993; \\
 p &< 0,001.
 \end{aligned}$$

Анализируя графическое отображение результатов расчётов (рис. 13), можно сделать вывод о том, что после 70–80 лет наиболее высокую таксовую стоимость имеет древостой в варианте с густотой 1 тыс. экз./га, а до этого момента времени – в культурах густотой 3 тыс. экз./га. Культуры более высокой густоты уступают им по таксовой стоимости древостоя уже после 30–40 лет. Для обоснованного выбора оптимального варианта исходной густоты культур необходимо опираться не на текущую (накопленную) таксовую стоимость древостоя, а на величину её среднего годовичного прироста, динамику которой описывает куполообразная кривая. Кульминация значений данного параметра соответствует оптимальному обороту рубки древостоя или возрасту его экономической спелости, обеспечивающему достижение

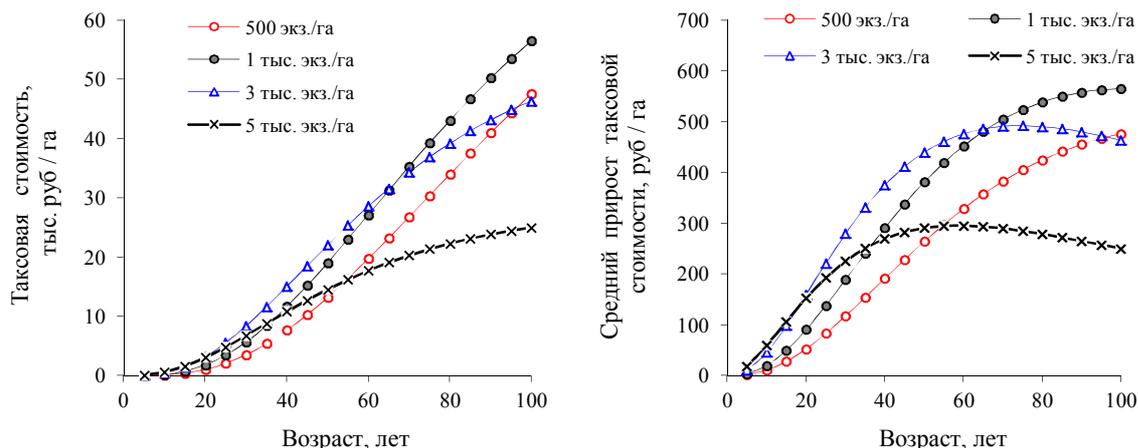


Рис. 13. Динамика стоимости стволовой древесины на корню и её среднего годовичного прироста в культурах сосны разной исходной густоты, вычисленная по второму разряду такс

наивысшей эффективности выращивания культур. Оптимальной по величине этого параметра является исходная густота культур 1 тыс. экз./га, обеспечивающая при проведении рубки главного пользования в 100 лет средний годичный прирост таксовой стоимости древесины 566 руб./га (эта величина, естественно, будет зависеть от курса рубля, но это не отразится на соотношении между различными вариантами опыта). Дальнейшее увеличение густоты посадки будет приводить к снижению не только прироста таксовой стоимости и возраста экономической спелости древостоя, но и к увеличению затрат на создание культур и лесоводственные уходы, проведение которых, как показывают опыт и научные исследования [23, 24], далеко не всегда даёт положительные результаты и в основном нерентабельно в бедных лесорастительных условиях. Создание насаждений с густотой более 5–6 тыс. экз./га является заведомо убыточным, особенно при использовании саженцев с закрытой корневой системой. Этот вывод, основанный на математическом моделировании результатов 35-летних наблюдений, подтверждают также данные, приведённые в работе И. В. Туркевича [21], в которой показано, что наиболее высокую таксовую стоимость имеет древостой в культурах сосны с густотой 1,7 тыс. экз./га. Увеличение исходной густоты культур снижает не только продуктивность и жизнеспособность

насаждений, но и их экологические и рекреационные свойства. При этом, однако, необходимо учитывать риски повреждения культур вредными лесными насекомыми, болезнями и копытными животными, с учётом воздействия которых исходную густоту культур целесообразно увеличить до 2,5–3,0 тыс. экз./га.

**Заклучение.** Результаты проведённого исследования, таким образом, убедительно свидетельствуют о возможности создания лесных культур и плантаций сосны обыкновенной в сухих и свежих борах Республики Марий Эл с исходной густотой не более 1,5–2 тыс. экз./га, что позволяет не только существенно снизить затраты на их производство, но и избежать необходимости проведения нерентабельных рубок ухода, обеспечивая длительный интенсивный прирост деревьев. При этом, однако, существует определённый риск возникновения очагов вредных лесных насекомых, особенно майского хруща, и некоторое ухудшение товарности древостоев. Окончательное решение по выбору оптимального варианта исходной густоты культур можно сделать лишь на основе экономических расчётов, основанных не только на оценке динамики таксовой стоимости древостоев, но и их целевого назначения, а также лесопатологической обстановки, для уточнения которой необходимо проводить специальные обследования и мониторинговые наблюдения.

## Список литературы

1. Мартынов А. Н. Густота культур хвойных пород и ее значение // Обзорная информация ЦБНТИлесхоза. М.: ЦБНТИлесхоз, 1974. 59 с.
2. Редько Г. И. Густота лесных культур. Л.: ЛТА, 1978. 52 с.
3. Кузьмичев В. В., Савич Ю. Н. Влияние густоты посадки на рост сосновых культур // Лесоведение. 1979. № 6. С. 50-63.
4. Рябоконт А. П. Определение биологического оптимума густоты сосновых древостоев в условиях свежей субори // Лесоведение. 1979. № 3. С. 16-23.
5. Шинкаренко И. Б., Дзедзюля А. А. Оптимизация режимов густоты при целевом выращивании сосновых культур // Лесоведение и лесоводство: Обзорная информация ЦБНТИлесхоз. 1983. № 3. С. 1-40.
6. Юодвалькис А. И., Озолинчюс Р. В. Лесоводственно-биологические аспекты оптимизации первоначальной густоты сосновых насаждений // Лесное хозяйство. 1987. № 9. С. 20-22.
7. Писаренко А. И., Редько Г. И., Мерзленко М. Д. Искусственные леса. М.: ВНИИЦлесресурс, 1992. Ч. 2. 239 с.
8. Бузыкин А. И., Пшеничникова Л. С., Суховольский В. Г. Густота и продуктивность древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 2002. 152 с.
9. Влияние густоты на таксационные показатели сосновых молодняков естественного и искусственного происхождения / Д. С. Собачкин, В. Е. Бенькова, Р. С. Собачкин, А. И. Бузыкин // Лесоведение. 2009. № 2. С. 3-9.
10. Усольцев В. А., Маленко А. А. Культуры сосны разной густоты посадки и проблема ее оптимизации // Ботанические исследования в Сибири. Красноярск: Красноярское отд. Российского ботанического общества, 2008. Вып. 16. С. 136-164.
11. Усольцев В. А., Маленко А. А. Лесные культуры разной начальной густоты. Сообщение 1. Оптимизационные аспекты группы и плотности // Экопотенциал. 2014. № 3 (7). С. 23-33.
12. Усольцев В. А., Маленко А. А. Лесные культуры разной начальной густоты. Сообщение 2. Анализ опытных посадок сосны обыкновенной // Экопотенциал. 2014. № 3 (7). С. 34-47.
13. Демаков Ю. П. Диагностика устойчивости лесных экосистем: методологические и методические аспекты. Йошкар-Ола: Периодика Марий Эл, 2000. 415 с.
14. Демаков Ю. П. Унификация подходов к математическому описанию биологических объектов и процессов // Лесные стационарные исследования: методы, результаты, перспективы. Тула: Гриф и К°, 2001. С. 131-134.
15. Демаков Ю. П., Калинин К. К. Оптимизация исходной густоты культур сосны в борах Республики Марий Эл // Лесохозяйственная информация ВНИИЦлесресурс. 1997. Вып. 11. С. 15-21.
16. Экологический подход к оптимизации исходной густоты культур сосны / Ю. П. Демаков, К. К. Калинин, А. И. Шургин и др. // Экология и леса Поволжья. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. Вып. 2. С. 277-299.
17. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
18. Титов Ю. В. Эффект группы у растений. Л.: Наука, 1978. 151 с.
19. Павлов И. Н., Барабанова О. А. О формировании устойчивых лесных культур // Лесное хозяйство. 2006. № 3. С. 31-33.
20. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики / Ю. П. Демаков, А. С. Пуряев, В. Л. Черных, Л. В. Черных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 2 (26). С. 19-36.
21. Туркевич И. В. Кадастровая оценка лесов. М.: Лесная промышленность, 1977. 168 с.
22. Лесотаксационный справочник / Б. И. Грошев, С. Г. Сеницын, П. И. Мороз, И. П. Сиперович. М.: Лесная промышленность, 1980. 288 с.
23. Сеннов С. Н. Уход за лесом (экологические основы). М.: Лесная промышленность, 1984. 128 с.
24. Загреев В. В., Сеницын С. Г. Древесный отпад: величина, товарная структура, использование // Лесное хозяйство. 1988. № 11. С. 33-37.

Статья поступила в редакцию 14.07.16.

## Информация об авторах

**ДЕМАКОВ Юрий Петрович** – доктор биологических наук, профессор-консультант кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет; старший научный сотрудник, заповедник «Большая Кокшага». Область научных интересов – биогеоценология, математическое моделирование динамики лесных экосистем. Автор 300 публикаций, в том числе 11 монографий и учебных пособий.

**НУРЕЕВА Татьяна Владимировна** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – искусственное и плантационное лесовыращивание, рекультивация нарушенных земель. Автор 90 публикаций, в том числе трёх монографий и учебных пособий.

*ПУРЯЕВ Айнур Султангалиевич* – кандидат биологических наук, доцент, директор филиала ВНИИЛМ «Восточно-европейская лесная опытная станция». Область научных интересов – лесоведение, почвоведение, плантационное лесовыращивание. Автор 55 публикаций, в том числе одной монографии.

*РЫЖКОВ Андрей Анатольевич* – аспирант, Поволжский государственный технологический университет; начальник охраны животного и растительного мира заповедника «Большая Кокшага». Область научных интересов – плантационное лесовыращивание.

UDC 630\*182.8+634.0.652

DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.19

## REGULARITIES OF WOOD STAND DEVELOPMENT COMPOSED OF SCOTS PINE WITH DIFFERENT INITIAL DENSITY

*Yu. P. Demakov<sup>1</sup>, T. V. Nureeva<sup>1</sup>, A. S. Puryaev<sup>2</sup>, A. A. Ryzhkov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Volga State University of Technology,

3, Lenin Square, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

<sup>2</sup>All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry

«East-European forest experiment station»,

40, Tovarishcheckaya St., Kazan, 420097, Russian Federation

E-mail: DemakovYP@volgatech.net, NureevaTV@volgatech.net, purjaew@rambler.ru

**Key words:** Scots Pine ; forest species; initial density; inventory parameters of a wood stand; stumpage value; dynamics; mathematical models.

### ABSTRACT

**Introduction.** Wood stand density in one of the core factors defining yield, merchantability, viability, habitat-forming properties of plantations and cost effectiveness of forest cultivation. The issue of stand density optimization is of practical importance for the industry; it has been extensively discussed by silviculturists. This may be due to the complexity of the problem and a diversity of approaches to solve it. The research is aimed at elaborating mathematical models of wood stand development dynamics and its stumpage value calculation. These are the two essential components for making a well-grounded decision on the optimum initial density of the wood stand and ensuring the best cost advantage. **Materials and methods.** The research was carried out on the experimental plot established in 1977 and included 15 sections where the initial density of pure Scots Pine varied from 0.5 to 11 thousand trees per ha. This experiment is unique due to the fact that it covers a wide area including the plots with very low density which didn't undergo any prior research. Condition tool-assisted assessment of wood stands was carried out in 1988, 1991, 1996, 1999, 2003, 2008 and 2011; in 1996-1999 a complex research into the structure of subordinate vegetation, mushroom productivity and population of soil mesofauna was carried out. Statistical material was processed by mathematical statistics using the packages of standard application programmes Excel and Statistica. **Conclusions.** In the conditions of dry and fresh pine wood of the Mari El Republic it is deemed reasonable to establish plantations of Scots Pine with initial thickness below 1.5-2 thousand trees per ha. It allows significant reduction of production costs, ensures long intensive increment and helps avoid thinning to waste. The final decision in terms of selection of optimum initial density of the stand can be made based on econometric calculations, which assess the stumpage value dynamics, as well as on forest pathology situation, which requires additional specific research and monitoring coverage.

### REFERENCES

1. Martynov A. N. Gustota kultur khvoynykh porod i ee znachenie [Density of coniferous species and its significance]. *Obzornaya informatsiya TSBNTIleskhoza* [Survey information of TSBNTI forestry enterprise]. Moscow: TSBNTI forestry enterprise, 1974. 59 p.
2. Redko G. I. *Gustota lesnykh kultur* [Density of wood species]. Leningrad: LTA, 1978. 52 p.
3. Kuzmichev V. V., Savich Yu.N. Vliyaniye gustoty posadki na rost sosnovykh kultur [The impact of plantation density onto the growth rate of coniferous species]. *Lesovedenie* [Forest science]. 1979. No 6. Pp. 50-63.

4. Ryabokon A. P. Opredelenie biologicheskogo optimuma gustoty sosnovykh drevostoev v usloviyakh svezhey subori [Definition of biological optimum of pine wood stand density in the fresh subor environment]. *Lesovedenie* [Forest science]. 1979. No 3. Pp. 16-23.
5. Shinkarenko I. B., Dzedzyulya A.A. Optimizatsiya rezhimov gustoty pri tselevom vyrashchivanii sosnovykh kultur [Optimization of density conditions for the target-specific cultivation of pine species]. *Lesovedenie i lesovodstvo: Obzornaya informatsiya TSBNTIleskhoz* [Forest science and forest management: Survey information of TSBNTI forestry enterprise]. 1983. No 3. Pp. 1-40.
6. Yuodvalkis A. I., Ozolinchus R.V. Lesovodstvenno-biologicheskie aspekty optimizatsii pervonachalnoy gustoty sosnovykh nasazhdeniy [Forestry and biological aspects of optimization of initial density in pine stands]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry]. 1987. No 9. Pp. 20-22.
7. Pisarenko A. I., Redko G.I., Merzlenko M.D. Iskusstvennye lesa [Artificial forests]. Moscow: VNIITSlesresurs, 1992. Part 2. 239 p.
8. Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S., Sukhovolskiy V.G. Gustota i produktivnost drevesnykh tsenozov [Density and productivity of wooden census]. Novosibirsk: Nauka, 2002. 152 p.
9. Sobachkin D.S., Benkova V.E., Sobachkin R.S., Buzykin A.I. Vliyaniye gustoty na taksatsionnye pokazateli sosnovykh molodnyakov estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya [The impact of density on the inventory indicators of young natural pine stand and plantations]. *Lesovedenie* [Forest science]. 2009. No 2. Pp. 3-9.
10. Usoltsev V. A., Malenko A.A. Kultury sosny raznoy gustoty posadki i problema ee optimizatsii [Pine species of different density and the problems of its optimization]. *Botanicheskie issledovaniya v Sibiri* [Botanical research in Siberia]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskoe otd. Rossiyskogo botanicheskogo obshchestva, 2008. Iss. 16. Pp. 136-164.
11. Usoltsev V. A., Malenko A.A. Lesnye kultury raznoy nachalnoy gustoty. Soobshchenie 1. optimizatsionnye aspekty gruppy i plotnosti [Forest species of various initial density. Report 1. Optimization aspects of a group and density]. *Ekopotentsial* [Ecopotential]. 2014. No 3 (7). Pp. 23-33.
12. Usoltsev V. A., Malenko A.A. Lesnye kultury raznoy nachalnoy gustoty. Soobshchenie 2. Analiz opytnykh posadok sosny obyknovennoy [Forest species of various initial density. Report 2. Analysis of experimental plantations of Scots Pine]. *Ekopotentsial* [Ecopotential]. 2014. No 3 (7). Pp. 34-47.
13. Demakov Yu. P. *Diagnostika ustoychivosti lesnykh ekosistem: metodologicheskie i metodicheskie aspekty* [Diagnostics of sustainable forest eco-systems]. Yoshkar-Ola: Mari El Periodicals, 2000. 415 p.
14. Demakov Yu. P. Unifikatsiya podkhodov k matematicheskomu opisanii biologicheskikh obektov i protsessov [Unification of approaches to mathematical description of biological objects and processes]. *Lesnye statsionarnye issledovaniya: metody, rezultaty, perspektivy* [Forest statistical research; methods, results, prospects]. Tula: Grif & Co, 2001. Pp. 131-134.
15. Demakov Yu. P., Kalinin K.K. Optimizatsiya iskhodnoy gustoty kultur sosny v borakh Respubliki Mariy El [Optimization of initial density of pine species in the pine stands of Mari El]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya VNIITSlesresurs* [Forestry information VNIITS forest resources]. 1997. Iss. 11. Pp. 15-21.
16. Demakov Yu.P., Kalinin K.K., Shurgin A.I. et al. Ekologicheskiy podkhod k optimizatsii iskhodnoy gustoty kultur sosny [Environmental approach to optimization of initial density of pine species]. *Ekologiya i lesa Povolzhya* [Forest ecology in the Volga region]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2002. Iss. 2. Pp. 277-299.
17. Odum Yu. *Osnovy ekologii* [Basics of ecology]. Moscow: Mir, 1975. 740 p.
18. Titov Yu. V. *Effekt gruppy u rasteniy* [Group effect in plants]. Leningrad: Nauka, 1978. 151 p.
19. Pavlov I. N., Barabanova O.A. O formirovaniy ustoychivyykh lesnykh kultur [On the development of sustainable forest species]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry]. 2006. No 3. Pp. 31-33.
20. Demakov Yu.P., Puryaev A.S., Chernykh V.L., Chernykh L.V. Ispolzovanie allometricheskikh zavisimostey dlya otsenki fitomassy razlichnykh fraktsiy derevev i modelirovaniya ikh dinamiki [The use of allometric dependences for the purpose of assessment of biomass of different tree fractions and modelling their dynamics]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest, Ecology, Nature Management]. 2015. No 2 (26). Pp. 19-36.
21. Turkevich I. V. Kadastrovaya otsenka lesov [Cadastral valuation of forests]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1977. 168 p.
22. Groshev B.I., Sinitsyn S.G., Moroz P.I., Siperovich I.P. *Lesotaksatsionnyy spravochnik* [Forest engineering reference]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1980. 288 p.
23. Sennov S. N. Ukhod za lesom (ekologicheskie osnovy) [Forest tending (environmental basics)]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1984. 128 p.
24. Zagreev V. V., Sinitsyn S.G. Drevesnyy otpad: velichina, tovarnaya struktura, ispolzovanie [Loss of growing forest: amount, commodity value and use]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry]. 1988. No 11. Pp. 33-37.

The article was received 14.07.16.

**Citation for an article:** Demakov Yu. P., Nureeva T. V., Puryaev A. S., Ryzhkov A. A. Regularities of Wood Stand Development Composed of Scots Pine with Different Initial Density // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2016. No 4(32). Pp. 19-33. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.19

#### Information about the authors

*DEMAKOV Yury Petrovich* – Doctor of Biological Sciences, Professor-Consultant of the Department of Forest Species and Forest Works Mechanization, Volga State University of Technology; Senior Researcher of the nature reserve «Bolshaya Kokshaga». Research interests – biogeocenology, mathematic modelling of forest ecosystems dynamics. Author of 300 publications including 11 monographs and students' manuals.

*NUREEVA Tatiana Vladimirovna* – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Silvicultures Selection and Bioengineering, Volga State University of Technology. Research interests – artificial and plantation forest cultivation, regeneration of disturbed lands. Author of 90 publications, including 3 monographs and students' manuals.

*PURYAEV Ainur Sultangalievich* – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Director of the branch of All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanisation of Forestry «East-European forest experiment station». Research interests – silviculture, soil science, planted forestry. Author of 55 publications including 1 monograph.

*RYZHKOV Andrey Anatolievich* – postgraduate student of Volga State University of Technology; Head of Plant and Animal Life Protection at a nature reserve «Bolshaya Kokshaga». Research interests – planted forestry.