

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 630*56+630*181

ТАКСАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ПО ДАННЫМ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А. В. Лебедев, В. В. Кузьмичев

*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева
127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49*

E-mail: av11993@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2022 г.

При рассмотрении не только сырьевых функций, но и экосистемных особую роль приобретает характер динамики таксационных показателей на всем протяжении существования древостоев. Для регулирования интенсивности выполнения экосистемных функций первоочередными задачами становятся повышение долговечности насаждений и их производительности. Нами исследована динамика роста и производительности сосновых древостоев по данным долговременных наблюдений за сосновыми древостоями естественного и искусственного происхождения на постоянных пробных площадях Лесной опытной дачи Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К. А. Тимирязева. Выявлено четыре основных варианта динамики запасов сосновых древостоев, что требует разработки новых подходов к ее моделированию. При этом жизненный цикл древостоя представляет собой не монотонный, как это принято считать, а волнообразный процесс динамики всех таксационных показателей, обусловленный разной интенсивностью воздействия как внутренних (проявление саморегуляции в древесных сообществах и петель обратной связи), так и внешних факторов. Наличие нескольких этапов динамики может быть отражено эмпирическими моделями, в основу которых заложена сумма простых ростовых функций или немонотонных функций с одной точкой максимума или мультипликативно-аддитивными моделями ростовой и поправочной функций. Обобщенные модели динамики сумм площадей сечений и запасов древесины показали, что в поздних возрастах перегущенные культуры имеют преимущество перед редкими. Немонотонная динамика показателей производительности древостоев требует учета при обосновании возрастов спелости и проектировании рубок ухода.

Ключевые слова: *рост, производительность, саморегуляция, модели динамики древостоев.*

DOI: 10.15372/SJFS20230201

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения роста древостоев часто используются данные последовательной инвентаризации лесов. Этот способ не лишен ошибок и неточностей, к которым могут приводить, например, неполный учет заготовки древесины, недостаточная представленность древостоев по классам возраста (Неповинных, 2009). Отмеченных недостатков лишен метод длительных наблюдений за таксационными показателями на постоянных

пробных площадях. Его использование позволяет получить реальную картину ростовых процессов древостоев. Но здесь оказать влияние на результаты могут методические ошибки. Кроме того, каждая отдельно взятая пробная площадь уникальна, поэтому для больших территорий имеющиеся фактические данные могут быть недостаточно репрезентативными. Но это не мешает выявлять общие тенденции в росте и производительности, достоверность которых повышается при большом разнообразии древостоев.

Основоположники лесной науки в Германии В. Danckelmann и А. Schwappach (Pretzsch et al., 2019) считали, что необходимо проводить длительные наблюдения за отдельными деревьями и древостоями, поэтому во второй половине XIX в. были основаны первые лесные исследовательские станции (Ganghofer, 1881; Milnik, 1999). Одними из первых в Европе появились лесная исследовательская станция в Баден-Вюртемберге (Германия), научно-исследовательская станция Нижней Саксонии в Геттингене (Германия), Институт исследований леса, снега и ландшафтов (Швейцария). На самых старых лесных опытных участках постоянные наблюдения проводятся с 1848 г. (Pretzsch et al., 2019). С этого времени начали создаваться лесные исследовательские станции и в других европейских странах. Организация лесного опытного дела в России началась во второй половине XIX в. и связана с созданием экспериментальных посадок в Лисинском учебно-опытном лесхозе, Лесной опытной даче Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К. А. Тимирязева, Щелковском учебно-опытном лесхозе и ряде других объектов.

Согласно общепринятой устоявшейся модели, древостой в процессе динамики однократно достигает максимума запаса, после чего происходит его распад, что отражено, например, в закономерности морфогенеза древостоев (Рогозин, Разин, 2015), некоторых таблицах хода роста и моделях динамики таксационных показателей. При этом в лучших условиях произрастания спелость наступает раньше, чем в худших, а долговечность в бореальной зоне снижается по направлению с севера на юг. Из-за сложившихся представлений о монотонном росте и ограниченности материалов длительных наблюдений на пробных площадях остается неисследованной динамика древостоев на этапах естественной спелости и распада. При рассмотрении не только сырьевых функций, но и экосистемных, особую роль приобретает характер динамики таксационных показателей на всем протяжении существования древостоев. Для регулирования интенсивности выполнения экосистемных функций первоочередными задачами становятся повышение долговечности насаждений и их производительности.

Целью настоящей работы стало исследование динамики роста и производительности сосновых древостоев по данным долговременных наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами для исследования послужили данные многолетних наблюдений за сосновыми древостоями естественного и искусственного происхождения на постоянных пробных площадях (ппп) Лесной опытной дачи Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К. А. Тимирязева (Дубенок и др., 2020; Dubenok et al., 2021), которые позволили выделить основные варианты динамики запаса. Наибольшее количество материалов наблюдений накоплено по культурам сосны (*Pinus L.*) разной начальной густоты посадки растений, шт./га: 32 тыс. (ппп 4/А, 4/Б, 4/Д, 4/Е, 4/Ж, 4/К, 4/Л, 4/М, 4/Н и 4/О), 16 тыс. (опытные делянки ппп 11/Б), 8 тыс. (ппп 6/А, 6/Б, 6/Д, 6/Е, 6/Н, 6/Н1, 6/П, 6/Р, 6/Х, 6/Ц, 6/Ч и 6/Ш), 4 тыс. (ппп 6/2, 6/3, 6/4, 6/5 и 6/6) и 2 тыс. (ппп 5/М₁, 5/М₂, 5/М₃ и 5/М₄). Внутри каждой рассматриваемой группы густот совокупности не являются полностью однородными. На пробных площадях с начальными густотами растений 32 тыс. и 2 тыс. шт./га представлены сосновые древостои из семян различного географического происхождения, а при 8 тыс. шт./га проводились рубки ухода различной интенсивности, не приводящие к нарушению структуры древесного полога. Но, несмотря на разнообразие древостоев на пробных площадях, возможно выделение общих закономерностей в их росте и производительности.

При построении моделей динамики таксационных показателей применялось два подхода: 1) с выявлением возрастного тренда, аппроксимируемого монотонными функциями и 2) с применением аддитивной модели нескольких простых функций. При первом из них для выравнивания возрастных трендов отдельно по каждой группе средних высот использовались регрессионные нелинейные модели смешанных эффектов, которые позволяют учитывать изменчивость таксационных показателей по каждой пробной площади, а при оценке параметров фиксированной части в них исключено влияние разного числа наблюдений по каждому древостою (Лебедев, Кузьмичев, 2021). Для выравнивания средних высот использована ростовая функция А. Mitscherlich (1948) или F. J. Richards (1959). С учетом добавления случайных эффектов для отдельных пробных площадей получена нелинейная модель смешанных эффектов:

$$H_i = (a + \alpha_i)(1 - \exp(-(b + \beta_i)A))^{c+\gamma_i} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

Таблица 1. Используемые метрики качества моделей

Название	Формула
Корень из среднеквадратической ошибки (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$
Средний абсолютный процент ошибки (MAPE)	$MAPE = 100 \times \sum \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right / n$
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	$MAE = \frac{\sum y_i - \hat{y}_i }{n}$
Среднее смещение ошибок (MBE)	$MBE = \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)}{n}$
Коэффициент детерминации (R2)	$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$

Примечание. n – число наблюдений; значение: y_i – фактическое, \hat{y}_i – предсказанное по модели.

где H – средняя высота, м; A – возраст древостоя, лет; i – индекс пробной площади; a, b, c – параметры фиксированных эффектов; α, β, γ – случайные эффекты пробной площади ($\alpha_i \sim N(0, \tau_\alpha^2)$, $\beta_i \sim N(0, \tau_\beta^2)$, $\gamma_i \sim N(0, \tau_\gamma^2)$); ε_i – случайная ошибка ($\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$); N – функция нормального распределения.

Анализ литературных источников (Неповинных, 2009; Кузьмичев, 2015) и работа с опытными данными позволили для выравнивания зависимости средних диаметров от возраста использовать степенную функцию. С учетом добавления случайных эффектов для отдельных пробных площадей получена нелинейная модель смешанных эффектов:

$$D_i = (a + \alpha_i)A^{(b+\beta_i)} + \varepsilon_i, \quad (2)$$

где D – средний диаметр, см; A – возраст древостоя, лет; i – индекс пробной площади; a, b – параметры фиксированных эффектов; α, β – случайные эффекты пробной площади ($\alpha_i \sim N(0, \tau_\alpha^2)$, $\beta_i \sim N(0, \tau_\beta^2)$); ε_i – случайная ошибка ($\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$); N – функция нормального распределения.

Изменение количества стволов с увеличением возраста вычислялось с использованием функции Вейбулла (Кузьмичев, 2015). Включение в уравнение в виде случайных эффектов пробных площадей параметров масштаба и формы кривой позволило получить нелинейную модель смешанных эффектов:

$$N_i = N_0 \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{b + \beta_i}{A} \right)^{c + \gamma_i} \right) \right), \quad (3)$$

где N – число деревьев, шт./га; N_0 – начальная плотность, шт./га; A – возраст древостоя, лет; i – индекс пробной площади; b, c – параметры фиксированных эффектов; β, γ – случайные эффекты пробной площади ($\beta_i \sim N(0, \tau_\beta^2)$, $\gamma_i \sim N(0, \tau_\gamma^2)$); ε_i – случайная ошибка ($\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$); N – функция нормального распределения.

Сравнение оценок для регрессионных моделей разной структуры основывалось на численном и графическом анализе остатков. Для регрессионных уравнений рассчитывались метрики качества, позволяющие судить о качестве модели (табл. 1).

Все материалы в работе анализировались с использованием статистических методов при $p < 0,05$ с применением пакета анализа данных Microsoft® Excel для Mac (версия 16.62); R 3.6.3 с библиотеками lme4 1.1, merTools 0.5.2, lmerTest 3.1-2, performance 0.5.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В сосновых древостоях заложено более 100 ппп, причем примерно 1/5 часть – в древостоях естественного происхождения, а остальные – в лесных культурах. Цели исследований на пробных площадях существенно различались, но в возрастных изменениях запаса можно выделить несколько вариантов (рис. 1).

Вариант разрушения древостоев естественного происхождения после достижения максимума встретился примерно в 20 % случаев. Он

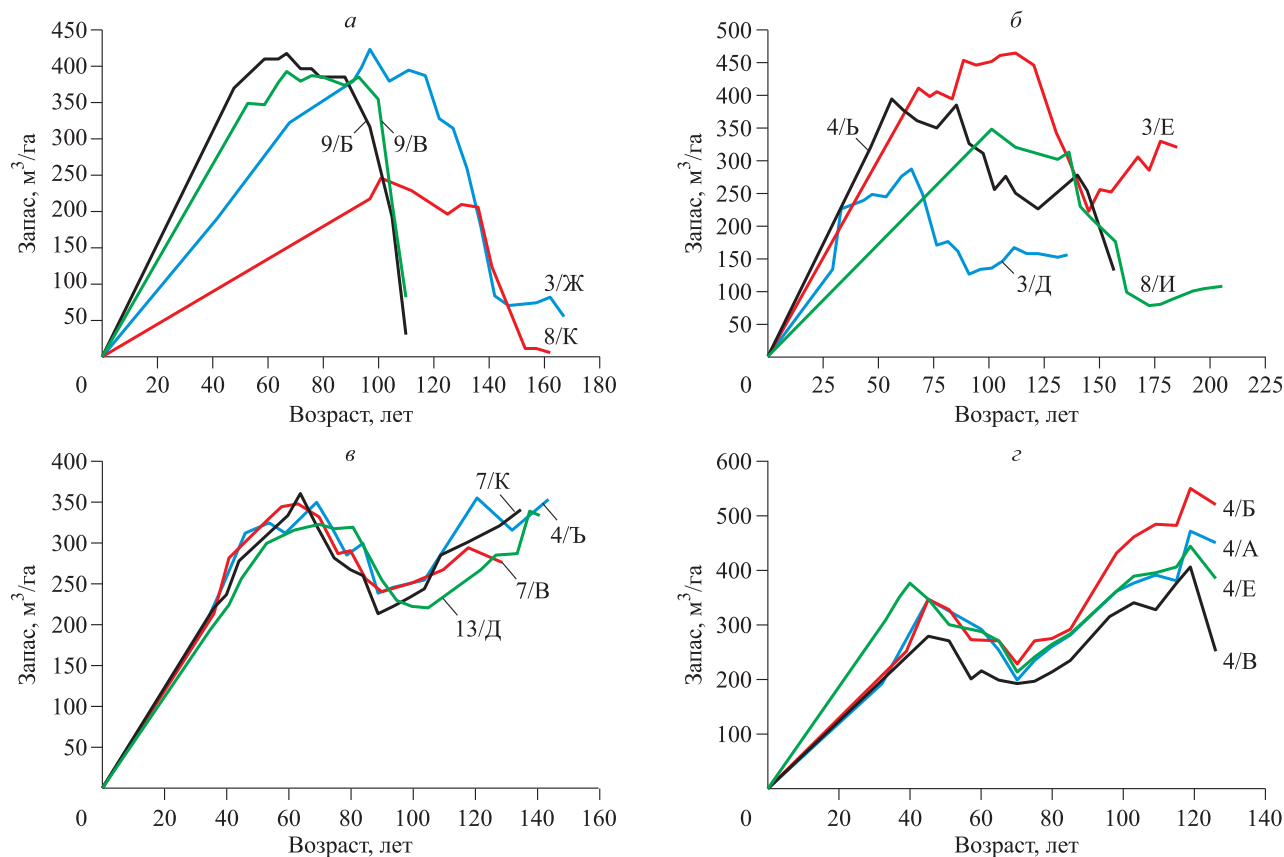


Рис. 1. Варианты динамики запаса сосновых древостоев на постоянных пробных площадях.

а – разрушение древостоя после достижения максимума; *б* – снижение запаса после достижения максимума с дальнейшей стабилизацией; *в* – достижение второго максимума, примерно равного первому; *г* – достижение второго максимума, превосходящего первый.

реализовался только в условиях высокого антропогенного воздействия (на границах Лесной опытной дачи вблизи железной дороги и мест повышенных рекреационных нагрузок). На ппп преобладает второй вариант динамики – снижение запаса после максимума и его сохранение на среднем уровне в течение некоторого (довольно значительного) времени. Также наблюдается вариант достижения запасом второго максимума примерно на том же уровне, что и первый. И только в культурах (преимущественно с густотой посадки растений 32 тыс. шт./га) второй максимум превышает первый. Такое деление является условным и не охватывает всех возможных вариантов, но подтверждает мнение А. В. Богачева (2007) о неопределенности динамики древостоев после достижения максимума запасов. Для других древесных пород (береза (*Betula* L.), дуб (*Quercus* L.)) также наблюдается наличие двух-трех максимумов в динамике запасов древесины (Кузьмичев и др., 2018; Kuzmichev et al., 2018). Для лиственных древостоев кривая динамики запасов, как правило,

имеет только один максимум, после которого наступает их разрушение. Наличие множества вариантов динамики таксационных показателей древостоев требует разработки новых подходов к ее моделированию. Разрабатываемые модели должны учитывать наиболее часто встречающиеся в природе случаи роста и изреживания древостоев, которые в нашем случае относятся к культурам сосны разной начальной густоты (варианты динамики с несколькими максимумами запасов).

Первый подход к описанию фактической динамики таксационных показателей древостоев (с введением поправки к ростовой функции). Для изучения фактического роста проведено выравнивание таксационных показателей: средняя высота, средний диаметр и число деревьев. Оценки моделей роста по средней высоте приводятся в табл. 2. Полученные уравнения показали хорошую степень соответствия экспериментальным данным: RMSE находится в диапазоне 0.916–1.053, а MAPE – 3.410–3.853. В варианте с начальной густотой растений

Таблица 2. Параметры моделей роста по средней высоте культур сосны при разной начальной густоте посадки растений

Параметр	Оценка	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -value	RMSE	MAE	MBE	MAPE
2 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				0.916	0.675	-0.005	3.410
<i>a</i>	2.520e+01	7.980e+01	< 2e-16				
<i>b</i>	4.821e-02	8.861e+00	< 2e-16				
<i>c</i>	2.081e+00	9.473e+00	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{α_i}	4.612e-01	–	–				
σ_{β_i}	8.813e-03	–	–				
σ_{γ_i}	2.809e-02	–	–				
<i>corr</i> (α_i, β_i)	-0.999	–	–				
<i>corr</i> (β_i, γ_i)	-0.998	–	–				
<i>corr</i> (α_i, γ_i)	0.998	–	–				
σ	9.392e-01	–	–				
8 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				1.053	0.845	-0.008	4.207
<i>a</i>	2.618e+01	1.152e+01	< 2e-16				
<i>b</i>	4.124e-02	2.002e+01	< 2e-16				
<i>c</i>	2.886e+00	1.211e+01	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{α_i}	5.053e-01	–	–				
σ_{β_i}	3.252e-03	–	–				
σ_{γ_i}	7.471e-02	–	–				
<i>corr</i> (α_i, β_i)	-0.998	–	–				
<i>corr</i> (β_i, γ_i)	-0.999	–	–				
<i>corr</i> (α_i, γ_i)	0.998	–	–				
σ	1.081e+00	–	–				
32 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				0.999	0.750	0.233	3.853
<i>a</i>	3.643e+01	1.922e+01	< 2e-16				
<i>b</i>	1.505e-02	4.195e+00	< 2e-04				
<i>c</i>	1.324e+00	4.857e+00	< 2e-04				
Случайные компоненты							
σ_{α_i}	6.089e+00	–	–				
σ_{β_i}	1.162e-02	–	–				
σ_{γ_i}	8764e-01	–	–				
<i>corr</i> (α_i, β_i)	-0.999	–	–				
<i>corr</i> (β_i, γ_i)	-0.999	–	–				
<i>corr</i> (α_i, γ_i)	0.999	–	–				
σ	9.689e-01	–	–				

32 тыс. шт./га модель дает небольшое завышение прогнозируемых значений (MBE = 0.233). В двух остальных случаях MBE близко к нулю, что указывает на отсутствие недооценки или переоценки предсказанных средних высот древостоев. Оценки дисперсий для случайных компонент свидетельствуют о наличии индиви-

дуальных особенностей в изменении средней высоты древостоев на отдельно взятых пробных площадях.

Анализ числовых значений параметров фиксированных компонентов показывает наличие зависимости асимптотического значения средних высот от начальной густоты.

Таблица 3. Параметры моделей роста по среднему диаметру культур сосны при разной начальной густоте посадки

Параметр	Оценка	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -value	RMSE	MAE	MBE	MAPE
2 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				1.010	0.830	0.009	3.565
<i>a</i>	7.604e-01	5.853e+00	< 2e-16				
<i>b</i>	5.780e-01	1.301e+01	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{α_i}	7.604e-01	–	–				
σ_{β_i}	8.624e-02	–	–				
<i>corr</i> (α_i, β_i)	–0.995	–	–				
σ	1.048e+00	–	–				
8 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				0.756	0.626	0.125	2.941
<i>a</i>	1.587e+00	1.564e+01	< 2e-16				
<i>b</i>	6.318e-01	4.349e+01	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{α_i}	3.270e-01	–	–				
σ_{β_i}	4.727e-02	–	–				
<i>corr</i> (α_i, β_i)	–0.995	–	–				
σ	7.625e-01	–	–				
32 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				0.683	0.526	0.030	3.163
<i>a</i>	6.461e-01	9.760e+00	< 2e-16				
<i>b</i>	8.232e-01	4.847e+01	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{α_i}	2.083e-01	–	–				
σ_{β_i}	5.117e-02	–	–				
<i>corr</i> (α_i, β_i)	–0.995	–	–				
σ	7.073e-01	–	–				

В густых посадках растений средние высоты достигают больших значений (при 32 тыс. шт./га $a = 36.43$) по сравнению с редкими (при 2 тыс. шт./га $a = 25.20$).

Оценки моделей роста по среднему диаметру приводятся в табл. 3.

Полученные уравнения показали хорошую степень соответствия экспериментальным данным: RMSE находится в диапазоне 0.683–1.010, а MAPE – 2.941–3.565. Среднее значение остатков близко к нулю (MBE – 0.009–0.125), т. е. модель не приводит к значительному завышению или занижению прогнозируемых значений.

Оценки дисперсий для случайных компонент свидетельствуют о наличии индивидуальных особенностей в изменении средних диаметров древостоев на отдельно взятых пробных площадях.

Параметры моделей изменения числа деревьев и оценка их качества приводятся в табл. 4. Естественное изреживание каждого древостоя

происходит по индивидуальной траектории, а в ряде случаев – со значительными отклонениями фактических значений от прогнозируемой кривой.

Несмотря на отражение общей тенденции убыли числа деревьев при увеличении возраста, полученные уравнения характеризуются повышенными значениями критериев качества: RMSE – в диапазоне 87.3–181.8, MAPE – 12.0–47.1 и MAE – 64.2–195.5.

После оценки параметров и расчетов критериев качества для уравнений (1–3) выполнялся графический анализ остатков. На рис. 2 представлены визуализации зависимости остатков для средних высот и диаметров, числа деревьев и сумм площадей сечений от возраста. Для всех рассматриваемых таксационных показателей нарушается свойство независимости регрессионных остатков. Наблюдается периодичность в их распределении вдоль возрастной шкалы.

Таблица 4. Параметры моделей изреживания культур сосны при разной начальной густоте посадки растений

Параметр	Оценка	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -value	RMSE	MAE	MBE	MAPE
2 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				181.803	155.033	-28.650	47.057
<i>b</i>	1.843e+01	2.396e+01	< 2e-16				
<i>c</i>	1.773e+00	3.457e+01	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{β_i}	1.268e+00	–	–				
σ_{γ_i}	2.226e-02	–	–				
<i>corr</i> (β_i, γ_i)	-0.836	–	–				
σ	1.856e+02	–	–				
8 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				87.330	64.245	-1.620	12.003
<i>b</i>	1.928e+01	2.581e+01	< 2e-16				
<i>c</i>	1.899e+00	3.401e+01	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{β_i}	2.463e+00	–	–				
σ_{γ_i}	1.758e-01	–	–				
<i>corr</i> (β_i, γ_i)	0.864	–	–				
σ	9.208e+01	–	–				
32 тыс. шт./га							
Фиксированные компоненты				262.921	195.529	-18.604	18.562
<i>b</i>	1.176e+01	1.111e+01	< 2e-16				
<i>c</i>	1.945e+00	1.870e+01	< 2e-16				
Случайные компоненты							
σ_{β_i}	3.447e+00	–	–				
σ_{γ_i}	3.303e-01	–	–				
<i>corr</i> (β_i, γ_i)	0.979	–	–				
σ	2.778e+02	–	–				

Продолжительность периода в среднем составляет 80 лет, а амплитуда колебаний для средней высоты достигает 3 м, среднего диаметра – до 2 см, числа деревьев – до 1000 шт. и суммы площадей сечений – до 20 м². Таким образом, возрастное изменение рассматриваемых таксационных показателей является немонотонной зависимостью, а стандартные общепринятые зависимости позволяют выделить только возрастную тренд.

Модель динамики таксационных показателей может быть представлена в виде мультипликативной смеси функций временного тренда и волновой составляющей (поправка к ростовой функции), которая аппроксимируется уравнением вида (Демаков, 2000):

$$\frac{Y_t}{Y_p} = a \cos(wA + f) + 1, \quad (4)$$

где Y_t – фактическое значение таксационного показателя; Y_p – значение таксационного показателя,

вычисленное по уравнению возрастного тренда; A – возраст древостоя, лет; a, w, f – параметры уравнения.

Для моделей возрастных трендов средних высот и диаметров, числа деревьев оценки параметров уравнения (4) приведены в табл. 5.

С учетом найденных коэффициентов уравнения позволяют объяснить для колебаний средних высот от 16 до 40 % дисперсии, для средних диаметров – от 21 до 34 % и для числа деревьев – от 27 до 55 %. Результаты проведенных расчетов подтверждают, что в среднем период колебания составляет около 80 лет. Графический анализ остатков для уравнения (4) не выявил наличия закономерностей в их расположении, поэтому они являются независимыми.

Несмотря на низкие в ряде случаев коэффициенты детерминации, полученные уравнения передают общую закономерность для волновой составляющей по группам начальных густот древостоев. Результаты анализа данных по культурам сосны Лесной опытной дачи позволяют

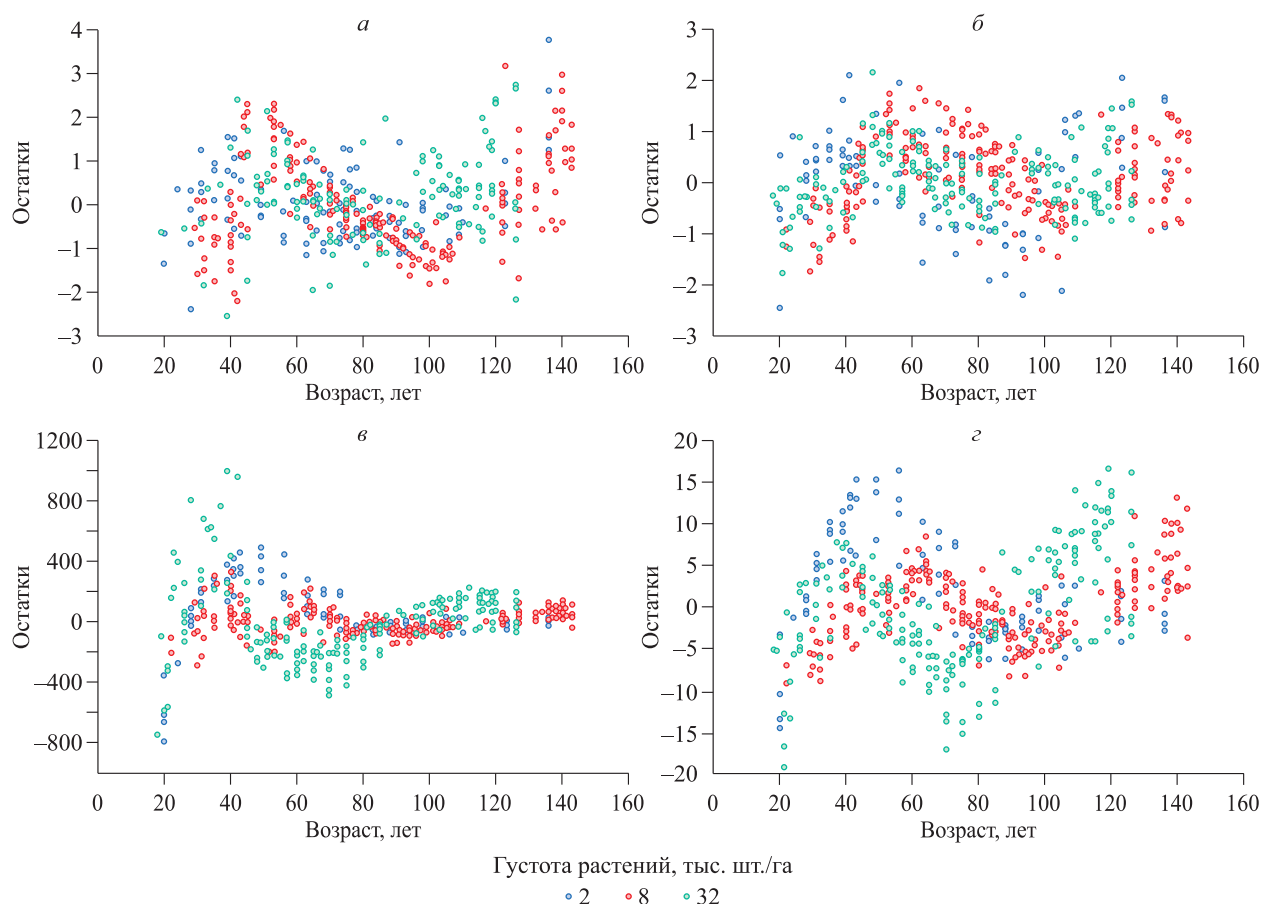


Рис. 2. Отклонения от уравнений роста и изреживания.
 а – средняя высота; б – средний диаметр; в – число деревьев; г – сумма площадей сечений.

Таблица 5. Оценки параметров поправочной функции и ее достоверность

Показатель	Начальная густота растений, тыс. шт./га	Оценки параметров			R^2	RMSE
		a	w	f		
Средняя высота	2	0.0272	0.0756	2.547	0.170	0.0424
	8	0.0469	0.0828	1.136	0.403	0.0432
	32	0.0292	0.0803	1.986	0.156	0.0540
Средний диаметр	2	0.0367	0.0808	2.718	0.341	0.0357
	8	0.0390	0.0812	1.646	0.213	0.0365
	32	0.0307	0.0899	1.485	0.208	0.0419
Число деревьев	2	0.345	0.0567	3.280	0.545	0.198
	8	0.246	0.0616	3.516	0.267	0.176
	32	0.230	0.0753	4.040	0.538	0.165

констатировать, что в целом волновая составляющая специфична для каждого отдельно взятого древостоя, но при этом, используя только одну гармонику, можно выделить общие тенденции для разных древостоев. Для обобщенных зависимостей поправок к ростовым функциям для средних высот и диаметров, числа деревьев по группам начальных густот (от 2 до 32 тыс.шт./га) получены следующие уравнения

(для средней высоты $R^2 = 0.264$, для среднего диаметра $R^2 = 0.231$ и числа деревьев $R^2 = 0.413$):

$$\frac{H_t}{H_p} = 0,0344 \cos(0,0795A + 1,954) + 1, \quad (5)$$

$$\frac{D_t}{D_p} = 0,0355 \cos \times (0,084A - 0,031N_b + 2.387) + 1, \quad (6)$$

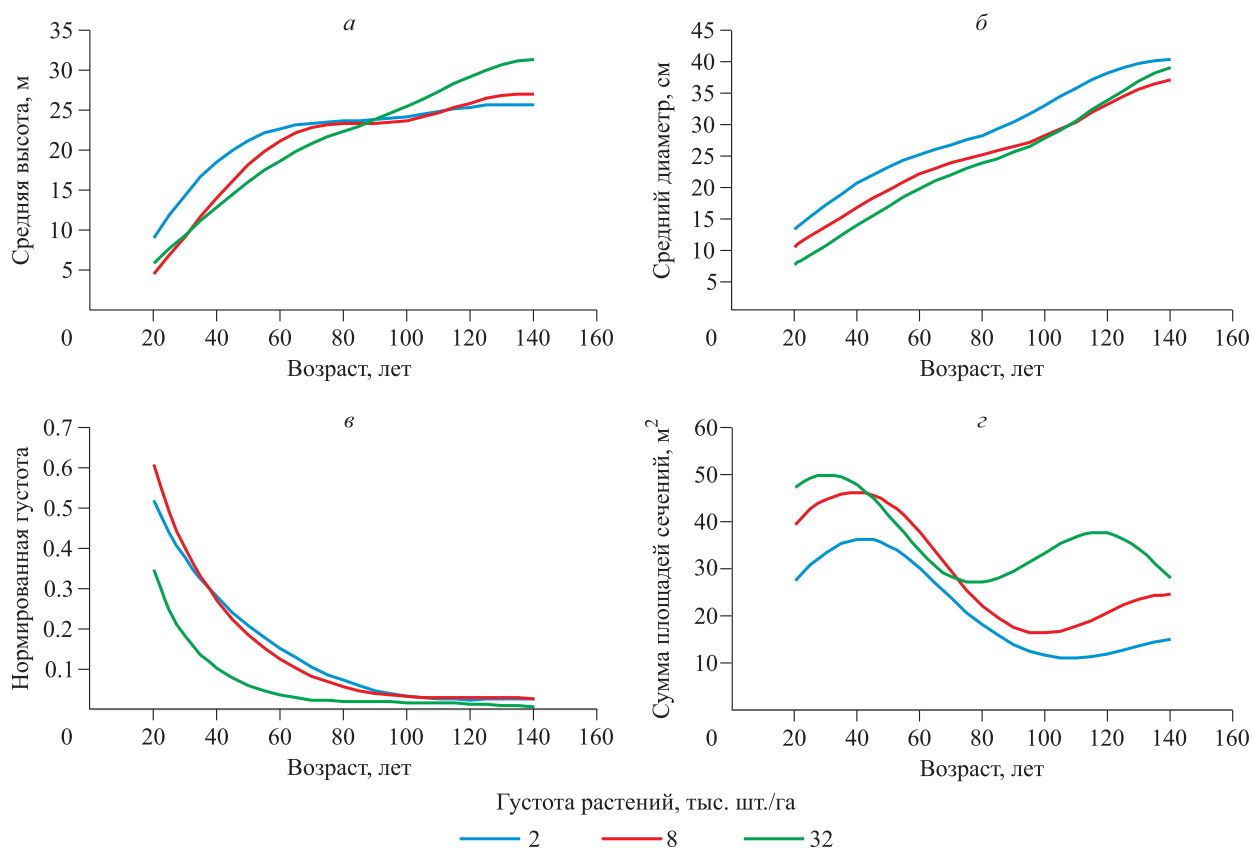


Рис. 3. Усредненные линии динамики таксационных показателей с учетом поправки к ростовой функции. *a* – средняя высота; *b* – средний диаметр; *v* – нормированное на начальную плотность число деревьев; *z* – сумма площадей сечений.

$$\frac{N_t}{N_p} = 0,274 \cos((0,0006N_b + 0,056)A + 0,0243N_b + 3,271) + 1, \quad (7)$$

где H – средняя высота, м; D – средний диаметр, см; N – число деревьев, шт./га; t и p – индексы для фактического и вычисленного по уравнению возрастного тренда таксационного показателя соответственно; A – возраст древостоя, лет; N_b – начальная плотность, тыс. шт./га.

В данном случае не стоит обращать внимание на низкие значения коэффициентов детерминации для регрессионных уравнений, передающих отклонения от функций роста, так как основная цель заключается в передаче общей закономерности. Таким образом, процесс роста и изреживания древостоев можно представить мультипликативно-аддитивной математической моделью, которая записывается в следующем виде:

$$Y_t = X_t \times W_t + Z_p, \quad (8)$$

где Y_t – прогнозируемый показатель, X_t – возрастная тренд, W_t – поправка к функции роста, Z_p – случайная «шумовая» составляющая.

С учетом только фиксированных эффектов для уравнений (1–3) и поправки к функции роста (4) усредненные линии роста по средним высоте и диаметру, изреживания и изменения суммы площадей сечений в культурах сосны разной начальной плотности показаны на рис. 3.

Древостои с начальной плотностью растений 2 тыс. шт./га на начальных этапах характеризуются интенсивным ростом по средней высоте, но к 80 годам с ними сравнялись культуры с начальной плотностью 8 тыс. шт./га, а к 90 годам их догнали и в дальнейшем превосходили культуры с начальной плотностью 32 тыс. шт./га. После 100 лет разница в средних высотах для самых густых и самых редких древостоев составляет в среднем 20 %.

Сумма площадей сечений связана со средним диаметром и числом деревьев. При большей начальной плотности средние диаметры меньше, чем в более редких посадках. Разница в средних диаметрах между самым густым и самым редким вариантами составила от 10 до 30 %. Но после 100 лет в варианте с начальной плотностью растений 32 тыс. шт./га средние диаметры стали больше, чем в варианте с 8 тыс.шт./га. Сопостав-

ление нормированных на начальную густоту кривых изменения числа деревьев показывает, что интенсивнее процесс отпада протекает в более густых культурах: при 32 тыс. шт./га к возрасту 80 лет осталось 2 % деревьев от высаженного, а при 2 тыс. шт./га – 7 %. Изменение структуры древостоев рубками ухода при начальной густоте 8 тыс. шт./га, вероятно, послужило причиной сближения нормированных кривых изреживания с вариантом 2 тыс. шт./га. С учетом введения поправок к функциям роста кривая изменения суммы площадей сечений приобрела два выраженных максимума в возрасте 40–50 лет и в 110–130 лет. В густых древостоях значения максимальных сумм площадей сечений больше, а возраст их достижения наступает раньше, чем в редких. Аналогичным образом происходит и изменение запаса.

Второй подход к описанию динамики таксационных показателей древостоев (аддитивная модель нескольких простых функций). В общем виде динамика средних высот и диаметров древостоев с учетом наличия отклонений от монотонной зависимости может быть успешно описана суммой двух ростовых функций А. Mitscherlich (1948):

$$Y = a_0(1 - \exp(-a_1A))^{a_2} + b_0(1 - \exp(-b_1A))^{b_2}, \quad (9)$$

где Y – средняя высота или средний диаметр; A – возраст древостоя; a и b – параметры уравнения.

Первое слагаемое уравнения (9) отвечает за динамику таксационных показателей во время первой волны роста. Коэффициент a_0 показывает предельную высоту или диаметр, которых

достигает древостой по ее окончанию. Второе слагаемое позволяет учесть увеличение прироста при наступлении следующей волны. Сумма коэффициентов $a_0 + b_0$ является предельным значением таксационных показателей, к которым стремится древостой по окончанию второй ростовой волны. Достоверное выравнивание фактических данных с использованием уравнения (9) возможно только при наличии наблюдений в возрасте выхода на асимптоту ростовой кривой к окончанию второй волны. К настоящему времени такие экспериментальные данные отсутствуют, поэтому получение обобщенной модели роста по средней высоте или диаметру с применением такого подхода затруднительно. Результаты наблюдений за динамикой средних высот и диаметров в культурах сосны показывают, что в среднем значение b_0 находится в диапазоне 30–50 % от a_0 . На рис. 4 показана выравненная с использованием суммы двух ростовых функций кривая средних высот и диаметров для пп 6/4.

Результаты непрерывных наблюдений на постоянных пробных площадях в культурах сосны позволили обобщить динамику таксационных показателей на возрастном промежутке от 0 до 140 лет, тем самым охватив все основные этапы формирования и роста древостоев. Как было показано ранее, в динамике таксационных показателей имеются отклонения от ростовых функций. В зависимости от начальной густоты культур растений (2 тыс., 4 тыс., 8 тыс., 16 тыс. и 32 тыс. шт./га), получена обобщенная модель динамики сумм площадей сечений, в основу которой заложена сумма двух функций плот-

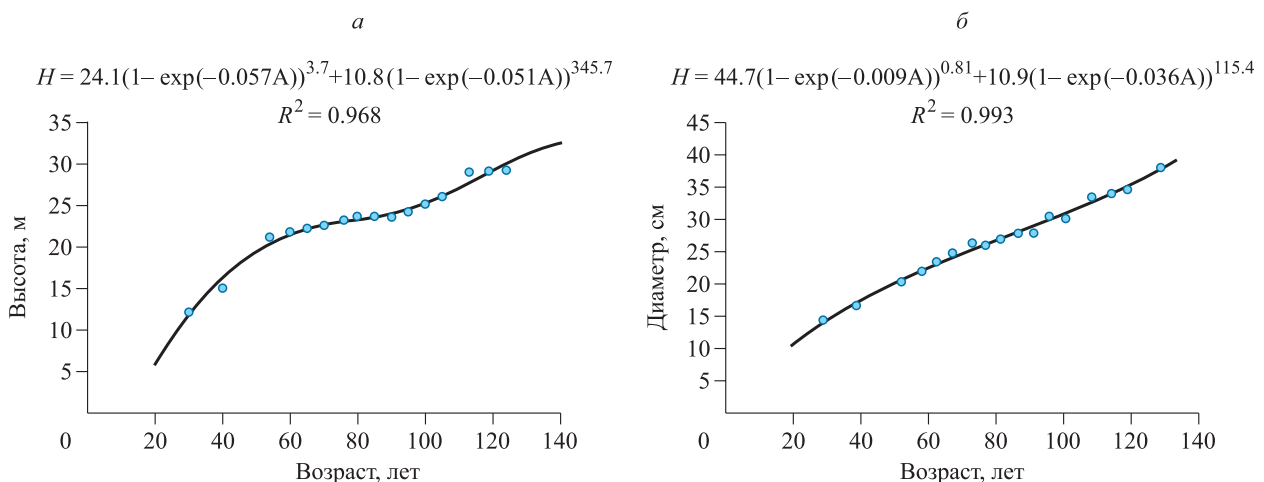


Рис. 4. Аддитивные модели двух функций Митчерлиха динамики средних высот (а) и средних диаметров (б) в культурах сосны.

ности вероятности распределения Вейбулла (RMSE = 4,9, R² = 0.650):

$$G = (-12,03N_0 + 2487,6) \times \frac{-0,0004N_0 + 2,2}{-0,4214N_0 + 61,9} A^{-0,0004N_0+1,2} \times \exp\left(-\left(\frac{A}{-0,4214N_0 + 61,9}\right)^{-0,0004N_0+2,2}\right) + (44,06N_0 + 884,2) \times \frac{-0,0296N_0 + 6,2}{-0,3964N_0 + 135,0} A^{-0,0296N_0+5,2} \times \exp\left(-\left(\frac{A}{-0,3964N_0 + 135,0}\right)^{-0,0296N_0+6,2}\right), \quad (10)$$

где G – сумма площадей сечений, м²/га; A – возраст, лет; N_0 – начальная плотность растений, шт./га.

Графическая интерпретация модели в диапазоне начальных плотностей растений от 2 до 32 тыс. шт./га представлена на рис. 5.

Самые густые культуры характеризуются наивысшим значением сумм площадей сечений на протяжении всего периода лесовыращивания. В первом максимуме для начальной плотности растений 32 тыс.шт./га составляет 40 м², а для 2 тыс. – 37 м². Во втором максимуме разница гораздо существенней: для начальной плотности 32 тыс. шт./га – 37 м² и для 2 тыс. шт./га – 18 м². С повышением начальной плотности растений происходит ускорение прохождения древостоями этапов жизненного цикла. В варианте с начальной плотностью 32 тыс. шт./га достижение

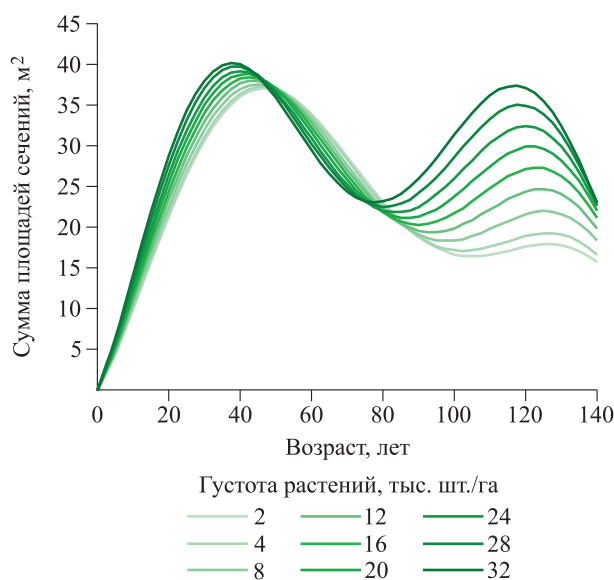


Рис. 5. Аддитивная модель двух функций Вейбулла динамики сумм площадей сечений в культурах сосны разной начальной плотности растений.

первого максимума сумм площадей сечений происходит в 35 лет, второго – в 115 лет, а при начальной плотности 2 тыс. шт./га – соответственно в 45, а второй – в 125 лет. Таким образом, разница в прохождении отдельных этапов между самым густым и самым редким вариантами посадки составляет в среднем 10 лет.

Аналогично сумме площадей сечений получена модель динамики запаса древесины в культурах сосны разной начальной плотности (RMSE = 61.1, R² = 0.504):

$$M = (-147,7N_0 + 19446) \times \frac{-0,0002N_0 + 2,8}{-0,373N_0 + 63,8} A^{-0,0002N_0+1,8} \times \exp\left(-\left(\frac{A}{-0,373N_0 + 63,8}\right)^{-0,0002N_0+2,8}\right) + (465,2N_0 + 13256) \times \frac{-0,0141N_0 + 5,3}{-0,361N_0 + 136,9} A^{-0,0141N_0+4,2} \times \exp\left(-\left(\frac{A}{-0,361N_0 + 136,9}\right)^{-0,0141N_0+5,3}\right), \quad (11)$$

где M – запас древесины, м³/га; A – возраст, лет; N_0 – начальная плотность растений, шт./га.

Сравнение динамики запаса древесины для вариантов с разной начальной плотностью посадки показывает, что в самых густых культурах происходит ускорение этапов жизненного цикла древостоев происходит быстрее, чем в самых редких (рис. 6).

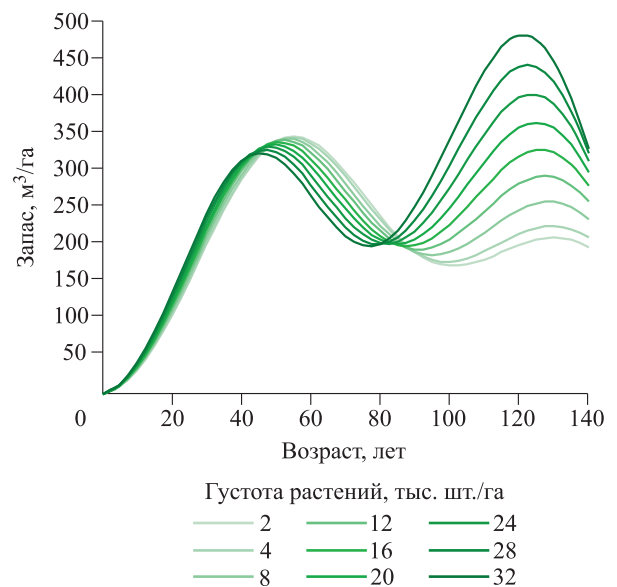


Рис. 6. Аддитивная модель двух функций Вейбулла динамики запасов в культурах сосны разной начальной плотности растений.

Разница между вариантом 32 тыс. и 2 тыс. растений/га составляет в среднем 10 лет. При прохождении первого максимума динамики запаса наиболее производительными оказались самые редкие культуры. Наибольший запас на промежутке до 80 лет имеет вариант с густотой посадки 2 тыс. растений (345 м³ в 55 лет), а наименьший – с начальной густотой 32 тыс. растений/га (320 м³ в 45 лет).

При этом до 40 лет самым производительным был максимально густой вариант культур. На промежутке от 80 до 140 лет вариант с начальной густотой растений 32 тыс. шт./га становится наиболее производительным (480 м³ в 120 лет), а с начальной густотой 2 тыс. шт./га – наименее производительным (210 м³ в 130 лет).

Рассмотрение только возрастного промежутка до 80 лет может привести к ошибочному выводу, что наиболее густой вариант посадки оказался наименее производительным. Фактически оказалось, что после достижения нестабильного состояния из-за эффекта переуплотнения к 45 годам запустились механизмы внутренней регуляции численности особей. В результате отпада быстрорастущих деревьев (на это указывают волновые тенденции в средних высотах и диаметрах) произошла перегруппировка деревьев на площади, доступ к большому количеству ресурсов получили медленно растущие особи, что в итоге позволило к 120 годам сформироваться максимально производительному насаждению. Гипотеза о наличии медленно и быстрорастущих деревьев с разными траекториями динамики таксационных показателей подтверждается результатами долговременных наблюдений в Германии (Pretzsch, 2021). Эти исследования показали, что в прошлом подчиненные деревья в настоящее время имеют лучшие показатели роста и медленно растущие характеризуются более быстрым ростом.

На промежутке до 80 лет результаты модели динамики запасов разногустотных культур соответствуют выводам В. А. Усольцева и А. А. Маленко (2014), Л. С. Пшеничниковой (2018), М. В. Рогозина и Г. С. Разина (2015), что в загущенных посадках со временем происходит снижение производительности древостоев. Но из-за ограниченности использованных экспериментальных материалов возрастом наблюдений в среднем до 60–80 лет не было возможности проследить динамику древостоев на более длительный период. Фактически после прохождения этапа перегруппировки деревьев в результате интенсивного отпада не выдержав-

ших конкуренции особей и быстрорастущих экземпляров перегущенные культуры в 2 раза превосходили по растущему запасу древесины редкие. В рамках реализации принципов климатически оптимизированного лесного хозяйства культуры с высокой начальной густотой имеют значительное преимущество перед редкими посадками, так как позволяют депонировать большее количество углерода на продолжительный период времени.

В некоторой степени волнообразный эффект в динамике таксационных показателей может быть связан с действием антропогенных факторов и климатическими изменениями. Но все же главной движущей силой рассматриваемого явления стоит считать внутреннюю регуляцию в древесных сообществах. В пользу этого утверждения имеются высказывания в работах А. В. Богачева (2007), М. Д. Мерзленко и Н. А. Бабича (2011). Подобные варианты динамики древостоев выявлены ранее для не затронутых сильным антропогенным воздействием насаждений (Wiedemann, 1948; Усольцев, 1994).

Результаты исследований в сосновых культурах Лесной опытной дачи полностью подтверждают выводы, приведенные в работах Ю. П. Демакова (2000), М. Д. Мерзленко, Н. А. Бабича (2011), М. Д. Мерзленко (2021). При этом они распространяются как на лесные культуры, так и на насаждения естественного происхождения. Данный факт проиллюстрирован возможными вариантами динамики запасов (см. рис. 1), а также при обобщении данных с постоянных пробных площадей в сосняках естественного происхождения Лесной опытной дачи (Лебедев, 2019; Дубенок и др., 2020), поэтому явление волнообразного роста можно считать общей закономерностью для древостоев независимо от их происхождения. Таким образом, жизненный цикл древостоя представляет собой не монотонный, как это принято, а волнообразный процесс динамики всех таксационных показателей, обусловленный разной интенсивностью воздействия как внутренних (проявление саморегуляции в древесных сообществах и петель обратной связи), так и внешних факторов.

Немонотонная динамика запасов древостоев ставит под сомнение принятые положения по обоснованию возрастов рубки насаждений на основании соотношения текущего и среднего изменения запаса. Согласно уравнению (11), если для варианта с начальной густотой деревьев 2 тыс. шт./га возраст количественной спелости в 40 лет не вызывает сомнений, то при

32 тыс. шт./га имеется два практически равнозначных максимума текущего изменения запаса (10 м^3) и два варианта выбора возраста количественной спелости – в 35 и 115 лет. При обосновании минимального возраста рубки в 35 лет максимальный запас древесины составит 325 м^3 в 45 лет (преимущественно балансы), а при возрасте рубки 115 лет – 480 м^3 в 120 лет (преимущественно деловая крупная и средняя древесина).

Теория рубок ухода базируется на монотонном изменении таксационных показателей. Так как волнообразная динамика – это следствие конкурентных отношений между отдельными деревьями, то проведение рубок ухода должно способствовать снижению конкуренции путем увеличения площадей питания. По результатам наблюдений на постоянных пробных площадях С. Н. Сеннов (1999) пришел к выводу, что густота древостоя – результат роста и конкуренции, повреждений, воздействия вредителей и болезней. Рубки ухода нарушают естественные механизмы саморегуляции и способствуют повышению продуктивности за счет дополнительного извлечения древостоем элементов питания из почвы, что означает усиление конкуренции между оставшимися деревьями. При этом удаление соседних деревьев не способствует росту и выживаемости оставшихся, а изменчивость прироста в 70 % случаев связана с генетическими факторами. При проведении рубок ухода по низовому методу в первую очередь удаляются отстающие в росте деревья, которые к возрасту 110–130 лет могли бы обеспечить формирование большего запаса древесины, чем в возрасте 40–60 лет, сформированного за счет быстрорастущих деревьев. В литературе для культур сосны сообщается, что рубки ухода не повышают их общую производительность, а лишь улучшают качественные показатели древостоев (Успенский, 1994).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях устойчивого лесопользования и перехода к климатически оптимизированному лесному хозяйству крайне важно знать динамику древостоев за пределами возраста естественной спелости. Наличие в древесных популяциях конкуренции между отдельными растениями и деревьев, генетически предрасположенных к быстрому и медленному росту, способствует проявлению волнообразного характера динамики таксационных показателей независимо от

происхождения насаждений, что противоречит общепринятым закономерностям, заложенным в таблицы хода роста и в большинство эмпирических и эколого-физиологических моделей роста. Наличие нескольких этапов динамики может быть схематично отражено эмпирическими моделями, в основу которых заложена сумма простых ростовых функций или немонотонных функций с одной точкой максимума. Обобщенные модели динамики сумм площадей сечений и запасов древесины показали, что в поздних возрастах перегущенные культуры имеют преимущество перед редкими. Немонотонная динамика показателей производительности древостоев требует учета при обосновании возрастов спелости и проектировании рубок ухода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богачев А. В. Лесотаксационные исследования. М.: ВНИИЛМ, 2007. 344 с.
- Демаков Ю. П. Диагностика устойчивости лесных экосистем (методические и методологические аспекты). Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. 415 с.
- Дубенок Н. Н., Кузьмичев В. В., Лебедев А. В. Результаты экспериментальных работ за 150 лет в Лесной опытной даче Тимирязевской сельскохозяйственной академии. М.: Наука, 2020. 382 с.
- Кузьмичев В. В. Изреживание и рост лесных культур: монография. М.: РГАУ-МСХА, 2015. 236 с.
- Кузьмичев В. В., Дубенок Н. Н., Лебедев А. В. Анализ экологических функций древостоев березы и дуба в условиях урбанизированной среды по материалам долгосрочных наблюдений // Рос. с.-х. наука. 2018. № 5. С. 29–31.
- Лебедев А. В. Динамика продуктивности и средообразующих свойств древостоев в условиях городской среды (на примере Лесной опытной дачи Тимирязевской академии): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. СПб: СПбГЛТУ, 2019. 20 с.
- Лебедев А. В., Кузьмичев В. В. Регрессионные модели смешанных эффектов в лесохозяйственных исследованиях // Сиб. лесн. журн. 2021. № 1. С. 13–20.
- Мерзленко М. Д. Обоснование теории волнообразного роста хвойных лесных культур // Лесн. вестн. 2021. Т. 25. № 2. С. 5–9.
- Мерзленко М. Д., Бабич Н. А. Теория и практика искусственного лесовосстановления. Архангельск: Сев. (Аркт.) фед. ун-т им. М. В. Ломоносова, 2011. 239 с.
- Неповинных А. Г. Прогнозирование строения и роста сосняков Красноярской лесостепи: дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск: СибГТУ, 2009. 179 с.
- Пшеничникова Л. С. Эффективность разногустотного режима лесовыращивания культур сосны в южной тайге Средней Сибири // Хвойные бореал. зоны. 2018. Т. 36. № 6. С. 517–523.
- Рогозин М. В., Разин Г. С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы: моногр. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2015. 277 с.

- Сеннов С. Н. Итоги 60-летних наблюдений за естественной динамикой леса. СПб: СПбНИИЛХ, 1999. 98 с.
- Усольцев В. А. Расчленение эдафической и ценогической составляющих продуктивности древостоев по данным густотного эксперимента // Леса Урала и хоз-во в них. 1994. Вып. 17. С. 77–85.
- 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.
- Успенский В. В. Итоги 60-летних наблюдений культур сосны // Лесн. хоз-во. 1994. № 8. С. 48–50.
- Dubenok N. N., Lebedev A. V., Gemonov A. V. Data set of long-term experiments in forest experimental station of the Timiryazev agricultural academy since 1862 // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2021. P. 012025.
- Ganghofer von A. Das Forstliche Versuchswesen. Augsburg, 1881. Band I. 505 p.
- Kuzmichev V. V., Lebedev A. V., Dubenok N. N. Analysis of ecological functions of birch and oak stands in conditions of urbanized environment on materials of long-term observations // Rus. Agr. Sci. 2018. V. 44. Iss. 6. P. 524–527 (Original Rus. Text © V. V. Kuzmichev, A. V. Lebedev, N. N. Dubenok. Ros. sel'skokhoz. nauka. 2018. N. 5. P. 29–31).
- Milnik A. Bernhard Danckelmann. Leben und Leistungen eines Forstmannes. Suderburg: Nimrod Verlag, 1999. 352 p.
- Mitscherlich A. Pflanzenphysiologische Bodenkunde. Deutsche Akademie der Wissenschaften, Vorträge und Schriften. 1948. Bd 1. H. 28. 226 p.
- Pretzsch H. Trees grow modulated by the ecological memory of their past growth. Consequences for monitoring, modelling, and silvicultural treatment // For. Ecol. Manag. 2021. V. 487. Article number: 118982.
- Pretzsch H., del Río M., Biber P., Arcangeli C., Bielak K., Brang P., Dudzinska M., Forrester D. I., Klädtke J., Kohnle U., Ledermann T., Matthews R., Nagel J., Nagel R., Nilsson U., Ningre F., Nord-Larsen T., Wernsdörfer H., Sycheva E. Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives // Eur. J. For. Res. 2019. V. 138. Iss. 1. P. 165–185.
- Richards F. J. A flexible growth function for empirical use // J. Exp. Bot. 1959. N. 10. P. 290–300.
- Wiedemann E. Die Kiefer. Hannover: Verlag Schaper, 1948. 337 p.

FOREST SURVEY PARAMETERS OF PINE TREE STANDS ACCORDING TO LONG-TERM OBSERVATION DATA

A. V. Lebedev, V. V. Kuzmichev

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy
Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127434 Russian Federation

E-mail: avl1993@mail.ru

When considering not only raw materials, but ecosystem functions of forests, the dynamics of forest stand indicators at all stages of growth is important. To regulate a high degree of fulfillment of ecosystem functions, the priority tasks are to increase the stability of stands and their productivity. The aim of the research is to study dynamics of growth and productivity of pine tree stands according to long-term observations data. The materials for the study were data of long-term observations due to the pine forest stands and plantations on permanent plots of the Forest Experimental Station of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Four main characteristics of the stock dynamics of pine stands have been identified, which requires the development of new approaches to its modeling. At the same time, the life cycle of a stand is not a monotonous process, as is customary, but a wave-like process of the dynamics of all main stand indicators, due to the different dependence of the influence of both internal (manifestations of self-regulation in stands and feedback loops) and external factors. The presence of several stages of dynamics can be reflected by empirical models, which include the sum of simple growth functions or nonmonotonic functions with one detection of the maximum or multiplicative-additive models of growth and correction functions. Generalized models of the dynamics of the stand basal areas and stocks of measurements that in late ages overcrowded stands have an advantage over rare ones. The nonmonotonic dynamics of stand yield and productivity indicators needs to be taken into account when substantiating the age of maturity and when designing thinning.

Keywords: growth, productivity, self-regulation, models of dynamics of a tree stands.

How to cite: Lebedev A. V., Kuzmichev V. V. Forest survey parameters of pine tree stands according to long-term observation data // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 2. P. 3–16 (in Russian with English abstract and references).