

УДК 630*5

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОСТА СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПО ДАННЫМ ПОВТОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А. В. Лебедев

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

E-mail: alebedev@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 18.04.2024 г.

Учитывая важность сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для лесного хозяйства в Европейской части России, необходимо иметь инструменты, позволяющие принимать обоснованные решения по управлению процессом лесовыращивания и планированию лесопользования. Цель работы – создание динамической модели роста и производительности сосновых древостоев естественного происхождения Европейской части России с использованием данных повторных наблюдений на 99 постоянных пробных площадях с 1862 по 2023 г. Модель роста и производительности древостоев состоит из отдельных уравнений зависимостей средней высоты, среднего диаметра и числа растущих деревьев от начального и конечного возрастов и начальных значений соответствующих таксационных показателей и зависимости средней видовой высоты от средней высоты древостоя. Разработанная в исследовании модель обеспечивает прогнозирование таксационных показателей в рамках установленной лесоустроительной инструкцией точности, обеспечивая уверенный прогноз в среднем на 9 лет. Средняя абсолютная ошибка для средних высот, диаметров и видовых высот не превышает 5 %, а для числа деревьев, суммы площадей сечений и запаса – 15 %. Разработанная модель может служить альтернативой традиционным таблицам хода роста при проектировании и обосновании лесохозяйственных мероприятий, при таксации лесов методом актуализации, а также для принятия управленческих решений при ведении хозяйства в сосновых лесах. В сочетании с дополнительными уравнениями она может использоваться для прогнозирования углероддепонирующего потенциала сосновых древостоев.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, прогнозирование роста древостоев, динамическая модель роста древостоев.

DOI: 10.15372/SJFS20240407

ВВЕДЕНИЕ

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) имеет важное экономическое значение и относится к основным лесобразующим породам в лесах России. По итогам первого цикла государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) выявлено, что насаждения с ее участием занимают значительные площади в европейской части страны, особенно в Мурманской области и Республике Карелия (Филипчук и др., 2022). Большую роль сосна играет при искусственном лесовосстановлении на местах вырубок, гарей и погибших древостоев, а в условиях лесостепи и степи считается одной из основных пород для

лесоразведения (Родин и др., 2023). Важность этой лесобразующей породы подтверждается многочисленными исследованиями, направленными на изучение использования, охраны, защиты и воспроизводства сосновых лесов (Галдина и др., 2012; Чучалина, Санникова, 2013; Демичева и др., 2015; Эбель и др., 2019; Прокошева и др., 2021; Берденгалиева, 2023; Дубенок и др., 2023). В последние десятилетия на фоне возрастающего значения декарбонизации сосновые леса рассматриваются в качестве инструмента по депонированию атмосферного углерода (Уткин и др., 2004; Сунгурова и др., 2019). Учитывая важность сосны обыкновенной для лесного хозяйства в Европейской части

России, необходимо иметь инструменты, позволяющие принимать обоснованные решения по управлению процессом лесовыращивания, планированию лесопользования, проектированию лесохозяйственных мероприятий и повышению эффективности выполнения древостоями экологических функций.

Для прогнозирования роста древостоев, проектирования лесохозяйственных мероприятий (назначение рубок ухода, обоснование возрастов спелости и др.) широкое применение находят эмпирические модели роста и производительности древостоев, одной из простых разновидностей которых являются таблицы хода роста. За многолетнюю историю практического использования в нашей стране был выявлен ряд критических недостатков, например: 1) таблицы не отражают реальный рост насаждений ни индивидуально по каждому насаждению, ни по их совокупности, а дают лишь представление об усредненной таксационной характеристике (Кузьмичев, 1977, 2013; Богачев, 2007; Дубенок, Лебедев, 2023); 2) не учитывают изменяющиеся во времени параметры климатической системы, антропогенные воздействия, которые влияют на рост древостоев (Сеннов, 1999; Кузьмичев, 2013; Pretzsch et al., 2014); 3) при составлении таблиц многими авторами предпринимается попытка выдать изменения таксационных показателей, полученных путем однократных измерений, за истинную динамику древостоев (Кузьмичев, 2013; Лебедев, 2023); 4) несовершенство классификационной основы (бонитетная, лесотипологическая и др.) для составления таблиц (Рогозин, 2013; Хлюстов, Лебедев, 2016). Несмотря на недостатки, таблицы хода роста древостоев продолжают использоваться в лесном хозяйстве (Pretzsch et al., 2008), будучи одним из важнейших достижений лесной науки (Prodan, 1968).

С середины XIX в. составлено большое количество таблиц хода роста сосновых древостоев Европейской части России (Варгас де Бедмар, 1850; Тюрин, 1913; Павлов, 1965; Левин, 1966; Таблицы..., 2008). В последней четверти XX в. в нашей стране сформировалось мнение, что на смену традиционным таблицам должны прийти более совершенные эмпирические модели роста и производительности древостоев. Этому способствовало развитие математико-статистических методов и использование электронных вычислительных машин при анализе лесотаксационных материалов. В 1991 г. А. В. Богачевым (1991) опубликована модель роста сосновых древостоев, в которой основой прогноза дина-

мики таксационных показателей служит исходная характеристика: возраст, число деревьев, средняя высота, средний диаметр и протяжение кроны. В. К. Хлюстовым (1993) представлены результаты исследований по разработке моделей прогнозирования динамики таксационных показателей растущей части древостоев. Прогноз в них осуществляется исходя из начальных значений возраста, средних высот и диаметров, количества деревьев.

В последние десятилетия в европейских странах для разработки моделей роста древостоев активно используются алгебраический разностный подход (ADA) и его обобщенная версия (GADA). Ростовые кривые, получаемые с применением ADA, являются либо анаморфными с разными асимптотами, либо полиморфными с одной асимптотой (Bailey, Clutter, 1974), что не отвечает сложившимся представлениям о динамике таксационных показателей древостоев. Эти недостатки были устранены в GADA (Cieszewski, Bailey, 2000). С использованием двух этих подходов получены модели роста основных лесобразующих пород в Испании (Diéguez-Aranda et al., 2006; Rojo-Alboreca et al., 2017), Болгарии (Stankova, 2014), Польше (Socha, Ochał, 2017; Socha et al., 2021), Норвегии (Allen et al., 2020), Швеции (Johansson, 2013), Сирии (Suliman et al., 2021) и др., которые служат альтернативой таблицам хода роста и устраняют некоторые характерные для них недостатки. В России такие модели разработаны на ограниченном материале (Лебедев, Кузьмичев, 2022; Лебедев, 2023).

Цель настоящих исследований – разработка динамической модели роста и производительности сосновых древостоев Европейской части России с использованием данных повторных наблюдений на постоянных пробных площадях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследовании использованы данные по 99 постоянным пробным площадям в сосновых древостоях естественного происхождения Европейской части России, наблюдения на которых проводились с 1862 по 2023 г. (табл. 1).

Географически охвачены Архангельская, Брянская, Вологодская, Костромская, Ленинградская, Мурманская, Московская и Свердловская области, г. Москва, республики Карелия, Коми и Марий-Эл в пределах природного ареала сосны обыкновенной от 53 до 68° с. ш. Пробные

Таблица 1. Распределение пробных площадей по регионам и источники оригинальных данных

Регион	Число пробных площадей, шт.	Годы наблюдений	Возраст, лет	Источник данных
Архангельская область	6	1949–2019	28–200	Неволин и др., 2008; Ильинцев и др., 2016; Вахтомина, Ивкина, 2020
Брянская область	5	1933–2017	5–205	Тихонов, 2006; Кишенков и др., 2017
Вологодская область	8	1946–2017	68–198	Писанов, 1992; Мухин, 2019
Костромская область	21	1962–2001	5–124	Мальщук, 2003
Ленинградская область	9	1963–2014	33–198	Федорчук и др., 1998; Данилов, 2016
Москва и Московская область	20	1862–2021	30–187	Абатуров, Меланхолин, 2004; Полякова и др., 2009; Мерзленко, Мельник, 2015; Дубенок и др., 2020; Лежнев и др., 2022
Мурманская область	4	1962–2023	33–97	Третьяков и др., 2024
Республика Карелия	4	1985–2013	30–125	Гаврилов, 2011; Матюшкин, Мошников, 2018
Республика Коми	3	1982–2018	90–201	Пахучий и др., 2019
Республика Марий-Эл	8	1981–2016	60–116	Демаков, Исаев, 2017
Свердловская область	11	1975–1999	70–170	Тукачева, 2019
И т о г о...	99	1862–2023	5–205	–

площади неравномерно распределены по субъектам Российской Федерации – от 4 в Республике Карелии и Мурманской области до 21 на территории Костромской области. Возраст насаждений составил от 5 до 201 лет. Методика проведения полевых работ на пробных площадях и камеральной обработки результатов рассматривается в источниках, содержащих оригинальные данные.

Сформированный набор данных о динамике растущей части сосновых древостоев естественного происхождения Европейской части России включает следующие основные показатели: календарный год проведения таксационных работ, возраст, средняя высота и диаметр древостоя, число деревьев на 1 га, сумма площадей поперечных сечений и запас древесины. Описательные статистики для каждого показателя приведены в табл. 2.

Средние высоты находятся в диапазоне 0.3–40.2 м, средние диаметры – 1.3–58.4 см, суммы площадей сечений – 0.7–46.9 м²/га и запасы – 1–671 м³/га.

Модель роста и производительности древостоев состоит из отдельных уравнений: 1) зависимости средней высоты (H_2), среднего диаметра (D_2) и числа растущих деревьев (N_2) от начального и конечного возрастов (A_1 , A_2) и начальных значений соответствующих таксационных показателей (H_1 , D_1 , N_1) и 2) зависимости средней видовой высоты (HF) от средней высоты древостоя (H). Сумма площадей сечений (G) рассчитывается как произведение площади сечения среднего дерева на число растущих деревьев, а запас – как произведение суммы площадей сечений на среднюю видовую высоту древостоя. Уравнения прогнозирования таксационных показателей, заложенные в модель, приведены в табл. 3.

Таблица 2. Описательные статистики сформированного набора данных

Показатель	<i>mean</i>	<i>std</i>	min	max	<i>n</i>
Календарный год	1969	35	1862	2023	469
Возраст, лет	92	41	5	201	469
Средняя высота, м	20.7	7.4	0.3	40.2	457
Средний диаметр, см	24.8	11.4	1.3	58.4	467
Число деревьев, шт./га	1376	3337	7	34 600	462
Сумма площадей сечений, м ² /га	25.2	10.0	0.7	46.9	469
Запас, м ³ /га	249	130	1	671	441

Примечание. *mean* – средняя арифметическая; *std* – среднеквадратическое отклонение; *min* – минимальное значение; *max* – максимальное значение; *n* – число наблюдений.

Таблица 3. Уравнения, заложенные в модель динамики сосновых древостоев

Показатель	Уравнение	Источник
Средняя высота	$H_2 = \exp\left(X_0 - \left(\frac{b_1}{X_0}\right)A_2^c\right), X_0 = \frac{1}{2}\left(\ln(H_1) + (\ln^2(H_1) - 4b_1A_1^c)^{\frac{1}{2}}\right)$	Cieszewski, 2004
Средний диаметр	$D_2 = \exp\left(X_0 - \left(\frac{b_1}{X_0}\right)A_2^c\right), X_0 = \frac{1}{2}\left(\ln(D_1) + (\ln^2(D_1) - 4b_1A_1^c)^{\frac{1}{2}}\right)$	Cieszewski, 2004
Число деревьев	$N_2 = N_1 \left(\frac{1 - \exp\left(\frac{-b_2}{A_3^{b_3}}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-b_2}{A_1^{b_3}}\right)} \right)$	Stankova, Diéguez-Aranda, 2014
Видовая высота	$HF = b_0 + b_1H$	Шевелев, Ефремова, 2018

Примечание. b, c – параметры уравнений.

Для описания роста по средним высоте и диаметру отдано предпочтение динамическому уравнению, основанному на ростовой функции F. X. Schumacher (1939). В работе T. V. Stankova и U. Diéguez-Aranda (2014) в уравнении естественного изреживания в качестве независимой переменной выступает верхняя высота древостоев. Так как при таксации лесов России этот показатель не определяется, то вместо него в уравнение включен возраст древостоя.

Для моделирования динамики таксационных показателей данные долговременных наблюдений были представлены в виде последовательных парных значений: начальный и конечный возраст, начальный и конечный таксационный показатель (средние высота и диаметр, число деревьев). В набор данных включались только соседние наблюдения, чтобы исключить возможное влияние изменений в климатической системе и воздействие хозяйственных мероприятий на рост древостоев. Качество моделей

оценивалось с использованием метрик качества: квадратный корень из среднеквадратической ошибки (RMSE), средний абсолютный процент ошибки (MAPE), средняя абсолютная ошибка (MAE), среднее смещение ошибки (MBE) и коэффициент детерминации (R^2) (Лебедев, 2023). Статистические выводы сделаны при $p = 0.05$. Анализ данных выполнен в R 3.6.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки параметров уравнений динамики таксационных показателей сосновых древостоев и метрики качества приведены в табл. 4.

Числовые значения параметров для всех уравнений статистически значимы при $p < 0.05$. Полученные модели хорошо объясняют большую часть вариации зависимых переменных: коэффициенты детерминации (R^2) составили от 0.930 до 0.972. Средняя абсолютная ошибка

Таблица 4. Оценки параметров и метрики качества уравнений, заложенных в модель динамики сосновых древостоев

Уравнение	Параметр	Оценка	Метрики качества				
			RMSE	MAPE	MAE	MBE	R^2
Средняя высота	b_1	77.194	1.546	4.937	0.986	-0.121	0.948
	c	-0.804					
Средний диаметр	b_1	68.659	1.830	4.724	1.112	-0.219	0.971
	c	-0.648					
Число деревьев	b_2	-4.421	560.243	11.726	147.014	15.989	0.930
	b_3	0.928					
Видовая высота	b_0	1.676	0.492	4.133	0.325	0.032	0.972
	b_1	0.390					

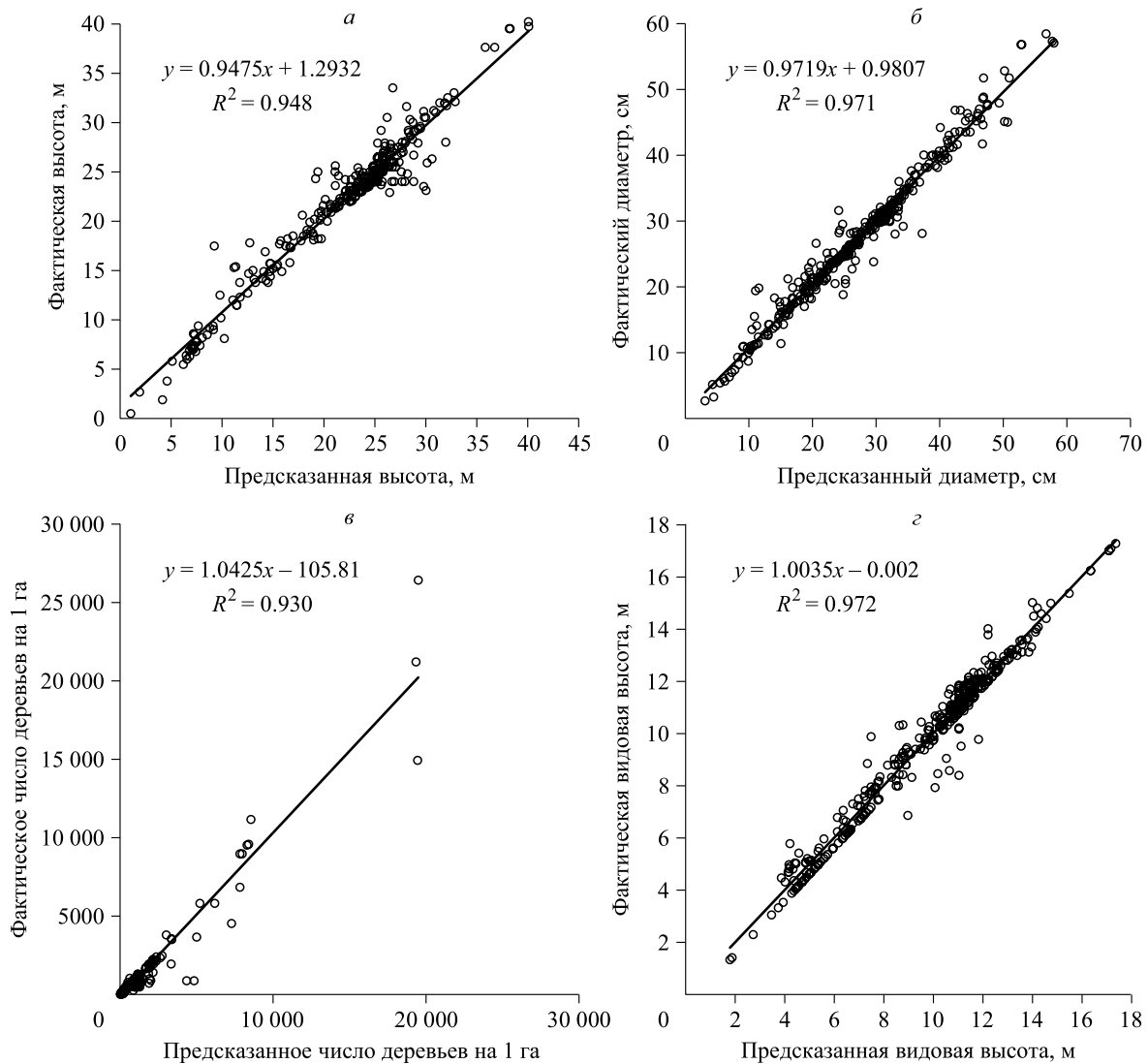


Рис. 1. Соответствие фактических и прогнозируемых таксационных показателей.

а – средняя высота; б – средний диаметр; в – число деревьев; г – видовая высота.

(МАРЕ) для средних высот, диаметров и видовых высот не превышает 5 %, а для числа деревьев – 15 %. Для средних высот средняя абсолютная ошибка (MAE) составляет 1.0 м, для средних диаметров – 1.1 см, для числа деревьев – 147 шт./га и для средней видовой высоты – 0.3 м. Используемый комплекс метрик качества указывает на возможность получения достаточно уверенных прогнозов для рассматриваемых таксационных показателей. Проведенное сравнение фактических и прогнозируемых значений для каждого уравнения показывает, что систематические ошибки отсутствуют, а большинство точек располагается вдоль линии соответствия (рис. 1).

Наборы смоделированных кривых роста по средней высоте и среднему диаметру в сопоставлении с рядами изменения этих таксацион-

ных показателей на пробных площадях представлены на рис. 2 и 3. В каждом фактическом древостое рост происходит по индивидуальной траектории, что подтверждает ранее приводившиеся в литературе выводы (Кузьмичев, 1977, 2013; Сеннов, 1999; Богачев, 2007; Лебедев, 2023). На отдельных (непродолжительных) временных промежутках смоделированные кривые синхронны с рядами изменения средних высот и диаметров на пробных площадях, что может указывать на наличие неучтенных факторов, не позволяющих давать прогнозы на длительный период.

Например, для многих географических районов показано, что на рост и производительность древостоев существенное влияние оказывают происходящие климатические изменения (Sharma et al., 2012; Pretzsch et al., 2014; Socha,

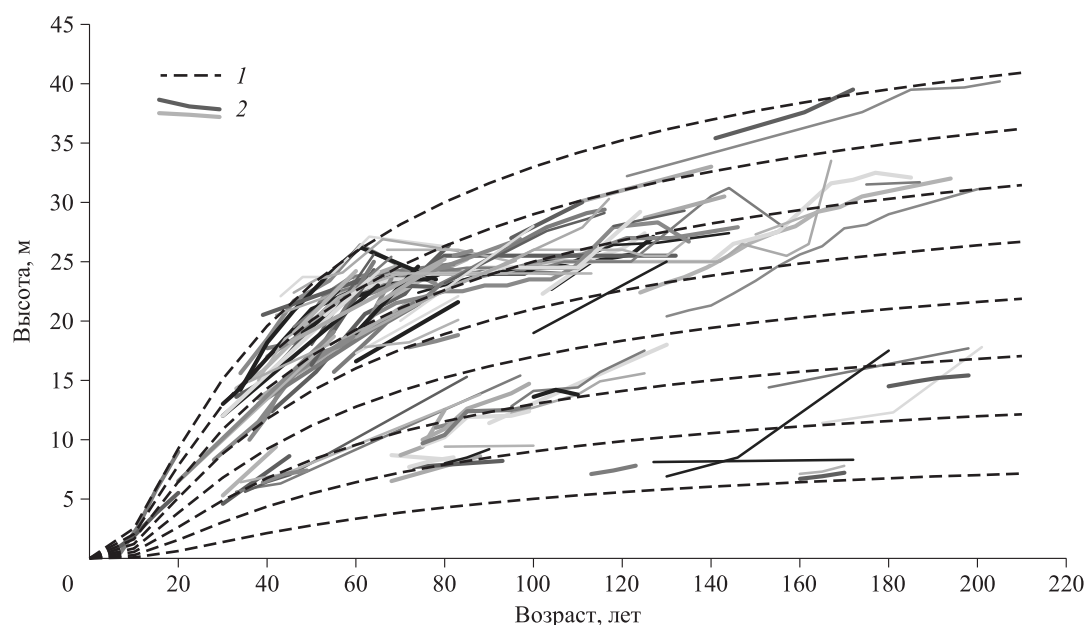


Рис. 2. Смоделированные кривые роста по средней высоте (1) со значениями 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 и 33 м в 100 лет и данные с пробных площадей (2).

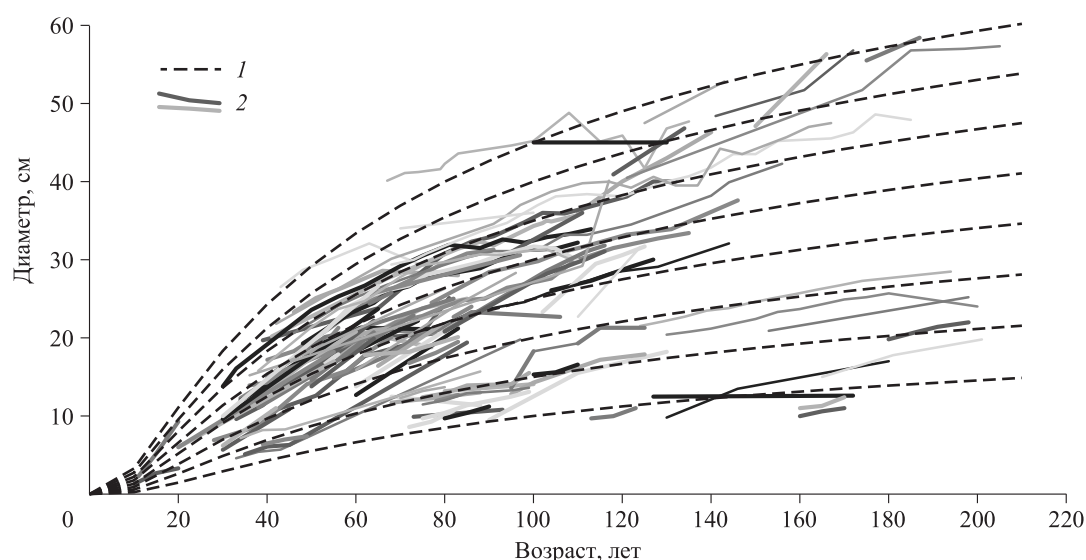


Рис. 3. Смоделированные кривые роста по среднему диаметру (1) со значениями 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 45 см в 100 лет и данные с пробных площадей (2).

Оскал, 2017). Полученный набор кривых динамики средних высот, дифференцированных от 5 до 33 м в возрасте 100 лет с градацией 4 м, имеет минимальные расхождения (в среднем $\pm 2-5\%$) со шкалой классов бонитета нормальных сосновых древостоев Северной Евразии (Таблицы..., 2008; Лебедев, Кузьмичев, 2022) (рис. 2). Практически совпадение двух бонитетных шкал объясняется тем, что в используемой для моделирования выборке с данными постоянных пробных площадей средний календарный год составил 1969, а при обобщении таблиц хода роста А. З. Швиденко с соавт. (Таблицы...,

2008) использовали, главным образом, материалы советского периода. Имеющиеся материалы не позволяют в полной мере учесть изменения в последние десятилетия степени воздействия многих влияющих на рост древостоев факторов.

Кривые роста по средней высоте и среднему диаметру полиморфны с множественными асимптотами, что соответствует биологическим и географическим особенностям рассматриваемых процессов (Загреев, 1978). Наличие множества асимптот позволяет устанавливать соответствие между предельными значениями таксационных показателей и качеством условий

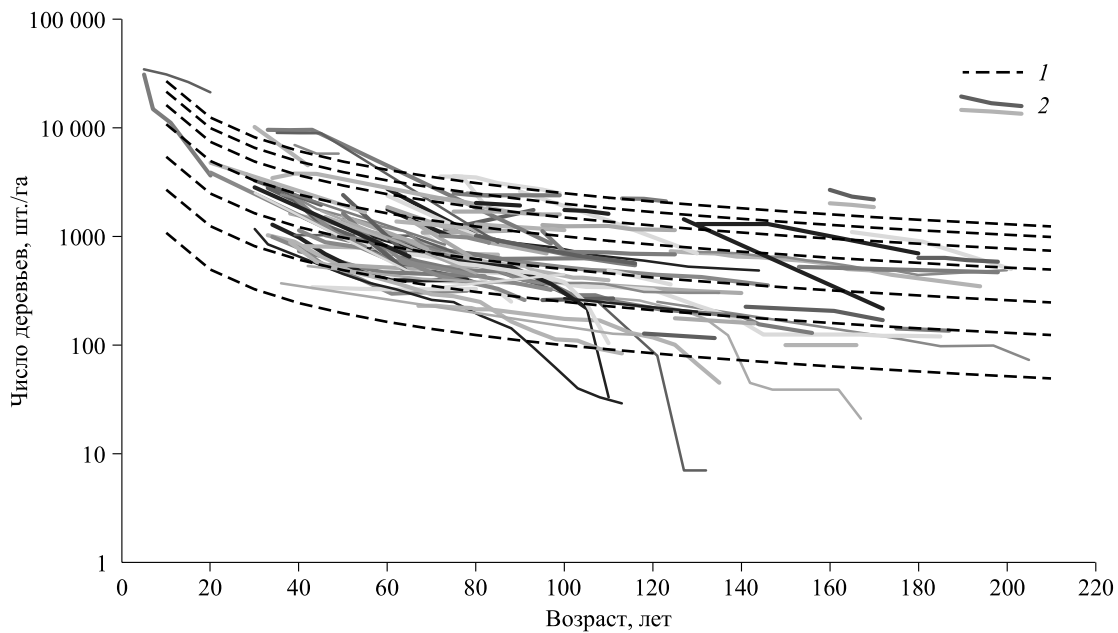


Рис. 4. Смоделированные кривые естественного изреживания древостоев (1) со значениями 100, 250, 500, 1000, 1500, 2000 и 2500 деревьев на 1 га в 100 лет и данные с пробных площадей (2).

произрастания. В условиях, приближенных к экологическому оптимуму, древостои будут достигать максимальных значений средних высот и диаметров, в то время как с возрастанием роли лимитирующих факторов будет происходить снижение их производительности. Каждая отдельно взятая смоделированная кривая характеризуется индивидуальной формой и скоростью роста в отдельные возрастные этапы. Например, при ухудшении условий произрастания относительный рост древостоев (отношение таксационного показателя в произвольно взятом возрасте к его значению в базовом возрасте 100 лет) замедляется в молодом возрасте, но с увеличением возраста темпы относительного роста возрастают и процесс происходит по времени дольше, чем в хороших условиях. Набор смоделированных кривых естественного изреживания сосновых древостоев в сопоставлении с рядами изменения количества деревьев на пробных площадях показан на рис. 4. Модель представляет упрощенное отображение процесса изреживания и позволяет отразить только общую тенденцию по уменьшению числа растущих деревьев с увеличением возраста. В качестве недостатка стоит отметить анаморфность кривых, что характерно для многих разработанных динамических моделей такого типа, поэтому они не отражают общую закономерность, согласно которой в высокогустотных древостоях интенсивность изреживания выше, чем в низкогустотных (Бузыкин, Пшеничникова, 2011; Пшеничникова

и др., 2022). Для различных сочетаний начальных значений числа деревьев в одном возрасте прогнозируемый по уравнению отпад для них будет одинаковым. Несмотря на это, на коротких временных промежутках для многих пробных площадей смоделированные кривые синхронны с динамикой в фактических данных.

По сравнению с традиционными таблицами хода роста полученная модель прогнозирует наиболее вероятную кривую изменения количества деревьев в древостое с увеличением его возраста, а не при фиксированной полноте.

Как показано во многих исследованиях (Кузьмичев, 1977, 2013; Rogozin, Razin, 2015; Лебедев, 2023), полнота не является стабильной на протяжении всего периода лесовыращивания и зависит от ценотических факторов и внешних воздействий. Для оценки относительной полноты и предельно возможного количества деревьев в заданном возрасте могут применяться подходы, основанные на расчете индексов густоты древостоев, нормальных сумм площадей сечений на основании прогнозируемых по уравнениям средних высот и диаметров. Использование предельных значений позволяет переходить к обоснованию режимов лесохозяйственных мероприятий, например установлению сроков повторяемости и интенсивности рубок ухода в соответствии с действующими рекомендациями и наставлениями.

С использованием моделей динамики средних высот и диаметров, естественного изрежи-

Таблица 5. Метрики качества прогнозирования сумм площадей сечений и запасов сосновых древостоев

Критерий соответствия	Сумма площадей сечений	Запас
RMSE	4.439	47.920
MAPE	13.338	14.578
MAE	2.968	33.120
MBE	-1.104	-15.162
R^2	0.896	0.885

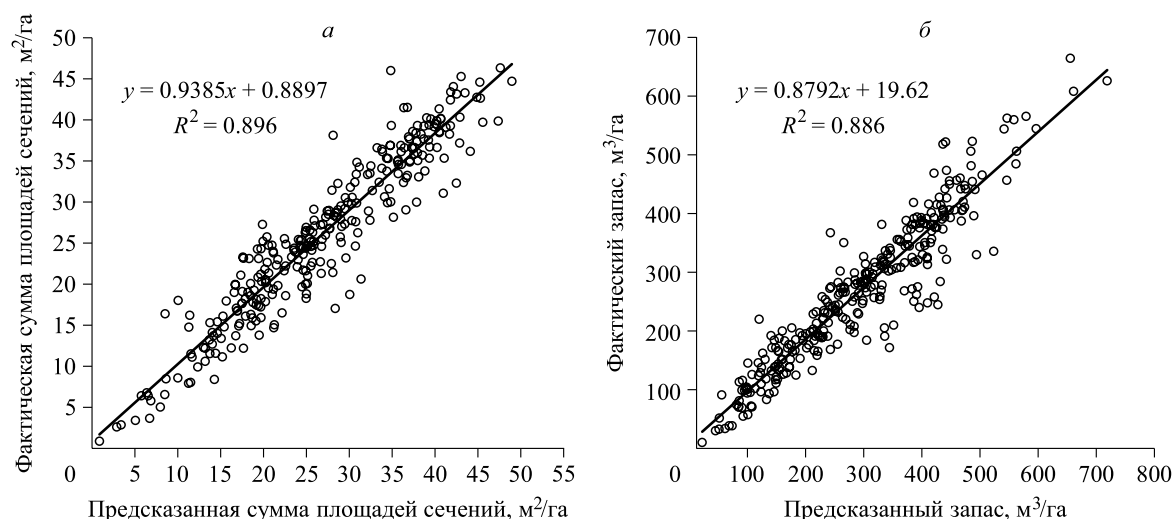
вания выполнены прогнозы сумм площадей сечений и запасов древесины. На значения метрик качества оказывают влияние, во-первых, ошибки прогнозирования таксационных показателей, используемых в расчетах, и, во-вторых, наличие случайных ошибок (табл. 5). Для сумм площадей сечений средняя абсолютная ошибка (MAPE) составила 13.3 %, для запасов – 14.6 % при средних абсолютных ошибках (MAE) 3.0 м²/га и 33.1 м³/га соответственно. Средние смещения ошибок (MBE) имеют отрицательные значения, что указывает на тенденцию к некоторому завышению прогнозируемых показателей.

Полученные модели позволяют объяснять 89.6 % вариации сумм площадей сечений и 88.5 % запасов. Сравнение фактических и прогнозируемых таксационных показателей показано на рис. 5, где большинство точек располагается вдоль линии соответствия.

В соответствии с Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 5 августа 2022 г. № 510 «Об утверждении лесоустроительной инструкции» (2022) при таксации лесов методом актуализации до-

пустимые случайные ошибки определения таксационных показателей составляют для запаса ± 30 %, средней высоты – ± 15 %, среднего диаметра – ± 20 %. Разработанная в исследовании модель обеспечивает прогнозирование данных таксационных показателей в рамках установленной нормативами точности, обеспечивая уверенный прогноз в среднем на период 9 лет. Учитывая влияние большого количества разнообразных факторов на динамику древостоев, к прогнозированию таксационных показателей на более длительные периоды нужно подходить с осторожностью, так как они могут приводить к возникновению значительных отклонений.

Данные, использованные при разработке динамической модели роста сосновых древостоев Европейской части России, имеют ряд ограничений. Во-первых, это отсутствие единых методических подходов к проведению работ на постоянных пробных площадях, обработке результатов полевых измерений и преследуемых целей при их закладке. Во-вторых, неравномерная представленность древостоев в градиенте лесорастительных условий Европейской части России, а также отдельных возрастных групп и уровней производительности. Практически отсутствуют в наборе данных молодняки, а экстраполяция прогнозов на этот возрастной период может приводить к ошибкам в таксационных показателях. В-третьих, значительный временной охват наблюдений на пробных площадях, что потребовало использования только соседних парных наблюдений для минимизации влияния не учитываемых моделью изменяющихся факторов внешней среды. Этих ограничений будут

**Рис. 5.** Соответствие фактических и прогнозируемых таксационных показателей.

а – сумма площадей сечений; б – запас.

лишены данные, полученные в ходе первого и последующих циклов ГИЛ, которые позволяют сформировать репрезентативную выборку с материалами, собранными по единой методике на территории всей страны. Зарубежный опыт показывает, что повторные наблюдения на постоянных пробных площадях, заложенных в ходе проведения ГИЛ, могут стать надежной основой для разработки новых моделей динамики таксационных показателей древостоев (McCullagh et al., 2017; Allen et al., 2020; Maleki et al., 2022).

Применяемые в отечественном лесном хозяйстве таблицы хода роста древостоев по классификации Н. Pretzsch (2009) относятся к моделям второго поколения, использование которых ограничено строго увязанными с классами бонитета рядами изменения средних высот и диаметров, числа деревьев, сумм площадей сечений, запасов и т. д. Для решения многих практических задач требуются инструменты, позволяющие прогнозировать динамику древостоев при различных сочетаниях начальных значений таксационных показателей и при различных вариантах лесопользования (Vanclay, 2010). Разработанная модель для сосновых древостоев Европейской части России относится к современным моделям прогнозирования таксационных характеристик на уровне отдельного древостоя, к преимуществам которой относится инвариантность относительного базового возраста и возможность давать прогнозы в широком диапазоне значений начальных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые регрессионные уравнения для прогнозирования динамики средних высот и диаметров, естественного изреживания в совокупности формируют модель роста и производительности чистых одновозрастных сосновых древостоев Европейской части России. Разработанная модель может служить альтернативой традиционным таблицам хода роста при проектировании и обосновании лесохозяйственных мероприятий, при таксации лесов методом актуализации, а также для принятия управленческих решений при ведении хозяйства в сосновых лесах. В сочетании с дополнительными уравнениями она может использоваться для прогнозирования углерододепонирующего потенциала сосновых древостоев.

Исследование выполнено за счет гранта РФНФ № 23-76-01016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абатуров А. В., Меланхолин П. Н. Естественная динамика леса на постоянных пробных площадях в Подмосковье. Тула: Гриф и К, 2004. 336 с.
- Берденгалieва А. Н. Дистанционный мониторинг поврежденных пожарами сосновых насаждений на севере Волгоградского Заволжья // *Вопр. степевед.* 2023. № 3. С. 104–115.
- Богачев А. В. Модель прогноза роста сосновых насаждений // *Лесоведение.* 1991. № 1. С. 2–11.
- Богачев А. В. Лесотаксационные исследования. М.: ВНИИЛМ, 2007. 344 с.
- Бузыкин А. И., Пишеничникова Л. С. Естественное изреживание молодняков ели разной густоты в экспериментальных посадках // *Лесоведение.* 2011. № 3. С. 44–50.
- Варгас де Бедмар А. Р. Исследования запаса и прироста лесонасаждений Санкт-Петербургской губернии, произведенные графом Варгас-де-Бедмаром, поручиком Корпуса лесничих, с 1843 по 1848 год. СПб., 1850. 200 с.
- Вахтомина М. Н., Ивкина С. С. Динамика отпада и продуктивность старовозрастных сосновых насаждений в Емцовском учебно-опытном лесхозе САФУ // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 1 декабря 2020 г. Вологда: Вологод. гос. ун-т, 2020. С. 9–12.*
- Гаврилов В. Н. Динамика формирования сосновых молодняков различного происхождения на осушенных осоково-кустарничково-сфагновых болотах в Южной Карелии // *ИВУЗ. Лесн. журн.* 2011. № 3. С. 45–50.
- Галдина Т. Е., Романова М. М., Ситников К. С. Географические культуры – инструмент сохранения биоразнообразия сосны обыкновенной в условиях центральной лесостепи // *Лесотех. журн.* 2012. № 1 (5). С. 85–95.
- Данилов Д. А. Особенности формирования смешанных древостоев, товарная структура и плотность древесины сосны и ели: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02. СПб.: СПбГЛТУ им. С. М. Кирова, 2016. 407 с.
- Демаков Ю. П., Исаев А. В. Динамика состояния сосновых древостоев на постоянных пробных площадях // *Науч. тр. гос. природ. заповед. «Большая Кокшага».* 2017. № 8. С. 257–310.
- Демичева Н. В., Гуцина В. А., Остробородова Н. И. Лесопатологическое и санитарное состояние лесов Ахунско-Ленинского лесничества Пензенской области // *Нива Поволжья.* 2015. № 4 (37). С. 33–38.
- 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.
- Дубенок Н. Н., Лебедев А. В. Динамика таксационных показателей лесных культур сосны по данным долгосрочных наблюдений // *Рос. с.-х. наука.* 2023. № 4. С. 48–51.
- Дубенок Н. Н., Лебедев А. В., Гостев В. В. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области // *Лесотех. журн.* 2023. Т. 13. № 4.1 (52). С. 5–22.
- Загребев В. В. Географические закономерности роста и продуктивности древостоев. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 240 с.

- Ильинцев А. С., Третьяков С. В., Ершов Р. А., Демиденко С. А., Богданов А. П. Динамика смешанных сосново-еловых древостоев после проведения первого приема длительно-постепенной рубки в Архангельской области // Лесн. вестн. 2016. Т. 20. № 5. С. 173–178.
- Кишенков Ф. В., Неруш М. Н., Афонаскина В. В., Овсянников И. В. Продуктивность коренных сосновых насаждений на стационарах Брянского опытного лесничества // Роль учебно-опытных лесхозов вузов России в подготовке кадров для лесного сектора: Материалы науч.-практ. конф., Брянск, 21–23 сент. 2017 г. Брянск: Брянск. гос. инж.-технол. акад., 2017. С. 102–104.
- Кузьмичев В. В. Закономерности роста древостоев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 160 с.
- Кузьмичев В. В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели. Новосибирск: Наука, 2013. 208 с.
- Лебедев А. В. Эмпирические модели роста и производительности древостоев по данным долговременных наблюдений в условиях антропогенных воздействий и климатических изменений: дис. ... д-ра с.-х. наук: 4.1.6. М.: Рос. гос. агр. ун-т – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2023. 425 с.
- Лебедев А. В., Кузьмичев В. В. Построение бонитетной шкалы с использованием обобщенного алгебраического разностного подхода // Сиб. лесн. журн. 2022. № 3. С. 48–58.
- Левин В. И. Сосняки Европейского Севера. М.: Лесн. пром-сть, 1966. 152 с.
- Лежнев Д. В., Дубей Д., Глазунов Ю. Б., Коротков С. А. Динамика сосновых лесов в Серебряноборском участке лесничества Московской области // Вопросы геологического и комплексного изучения экосистем Восточной Азии: Сб. докл. науч. конф., Благовещенск, 4–7 октября 2022 г. Благовещенск: Ин-т геол. и природопольз. ДВО РАН, 2022. С. 217–219.
- Мальцукова Н. В. Повышение продуктивности сосновых лесов Ветлужско-Унженской низменности: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03. М.: МГУЛ, 2003. 137 с.
- Матюшкин В. А., Мошников С. А. Динамика структуры и продуктивности сосняка травяно-сфагнового в результате осушения и комплексного ухода // Тр. Карел. НЦ РАН. 2018. № 5. С. 26–38.
- Мерзленко М. Д., Мельник П. Г. Опыт лесоводственного мониторинга в Никольской лесной даче. М.: МГУЛ, 2015. 112 с.
- Мухин А. К. Многолетняя динамика заболачивающихся сосняков в условиях влияния водохранилища // ИВУЗ. Лесн. журн. 2019. № 3 (369). С. 17–31.
- Неволин О. А., Третьяков С. В., Еремина О. О. Динамика высокопродуктивных сосново-березовых насаждений // ИВУЗ. Лесн. журн. 2008. № 5. С. 21–29.
- Павлов В. М. Особенности хода роста сосны в бассейне реки Унжи // Новое в лесной таксации и лесоустройстве. 1965. Сб. 2. С. 37–39.
- Пахучий В. В., Пахучая Л. М., Губер Д. В. Динамика таксационных показателей сосновых древостоев на объектах гидромелиорации в Республике Коми // Акт. пробл. лесн. комплекса. 2019. № 54. С. 39–42.
- Писанов В. С. Динамика типов сфагновых сосняков в условиях влияния водохранилища // ИВУЗ. Лесн. журн. 1992. № 1. С. 52–57.
- Полякова Г. А., Лысиков А. Ю., Меланхолин П. Н. Динамика сосновых насаждений Лохина острова // Акт. пробл. лесн. комплекса. 2009. № 23. С. 107–111.
- Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 05.08.2022 № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции». М.: Минприроды РФ, 2022.
- Прокошева К. Ю., Абсаямова С. Л., Абсаямов Р. Р., Поздеев Д. А. Ландшафтно-лесоводственная характеристика сосновых насаждений рекреационных зон особо охраняемых природных территорий Удмуртской Республики // Вестн. Ижевск. гос. с.-х. акад. 2021. № 3 (67). С. 26–38.
- Пшеничникова Л. С., Онучин А. А., Собачкин Р. С., Петренко А. Е. Особенности роста сосновых культур разной густоты в условиях южной тайги // Сиб. лесн. журн. 2022. № 3. С. 24–33.
- Рогозин М. В. Селекция сосны обыкновенной для плантационного выращивания. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2013. 200 с.
- Рогозин М. В., Разин Г. С. Развитие древостоев. Модели, законы, гипотезы. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2015. 277 с.
- Родин С. А., Проказин Н. Е., Казаков В. И., Лабанова Е. Н. Выращивание укрупненных семян сосны обыкновенной для лесоразведения в лесостепной и степной зонах Европейской части России // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 г. СПб.: СПбГЛТУ им. С. М. Кирова, 2023. С. 346–349.
- Сеннов С. Н. Итоги 60-летних наблюдений за естественной динамикой леса. СПб.: СПбНИИЛХ, 1999. 98 с.
- Сунгурова Н. Р., Худяков В. В., Страздаускас С. Е. Сравнительная структура углеродного пула в наземной фитомассе культур сосны и ели // ИВУЗ. Лесн. журн. 2019. № 3 (369). С. 159–165.
- Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (норм.-справ. материалы) / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, С. Нильссон, Ю. И. Булуй. Изд. 2-е, доп. М.: Фед. агентство лесн. хоз-ва; Междунар. ин-т прикл. сист. анализа (ИАСА), 2008. 886 с.
- Тихонов А. С. 100-летие Брянского опытного лесничества. Калуга: Изд. пед. центр «Гриф», 2006. 267 с.
- Третьяков С. В., Богданов А. П., Цветков И. В., Давыдов А. В., Карабан А. А. Моделирование роста производных сосняков брусничного типа леса разной густоты в Мурманской области // Лесотех. журн. 2024. Т. 14. № 1 (53). С. 35–53.
- Тукачева А. В. Последствия лесных пожаров и лесоводственных мероприятий в осушаемых насаждениях Среднего Урала: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Екатеринбург: УГЛТУ, 2019. 259 с.
- Тюрин А. В. Исследование хода роста нормальных сосновых насаждений в Архангельской губернии // Тр. по лесн. опытному делу в России. Вып. 45. СПб., 1913. 135 с.
- Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Честных О. В. Пулы углерода фитомассы и почв сосновых лесов России // Хвойные бореал. зоны. 2004. Т. 22. № 1–2. С. 13–21.

- Федорчук В. Н., Кузнецова М. Л., Андреева А. А., Мусеев Д. В. Резерват «Вепский лес». Лесоводственные исследования. СПб.: СПбНИИЛХ, 1998. 208 с.
- Филипчук А. Н., Мальшиева Н. В., Золина Т. А., Федоров С. В., Бердов А. М., Косицын В. Н., Югов А. Н., Кинигопуло П. С. Аналитический обзор количественных и качественных характеристик лесов Российской Федерации: итоги первого цикла государственной инвентаризации лесов // Лесохоз. инф. 2022. № 1. С. 5–34.
- Хлюстов В. К. Прогнозирование текущего прироста и оптимизация повышения продуктивности древостоев на примере сосняков и березняков Северного Казахстана: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02. СПб.: СПбГЛТА им. С. М. Кирова, 1993. 37 с.
- Хлюстов В. К., Лебедев А. В. Экологическая типизация хода роста древостоев // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экол. Природопольз. 2016. № 4 (32). С. 5–18.
- Чучалина А. А., Санникова Н. С. Влияние низовых пожаров на возобновление хвойных видов в сосняке бруснично-чернично-зеленомошном // Изв. Оренбург. гос. агр. ун-та. 2013. № 3 (41). С. 13–16.
- Шевелев С. Л., Ефремова М. Н. Особенности объемообразующих показателей в древостоях Красноярско-Ачинско-Канской лесостепи // Хвойные бореал. зоны. 2018. Т. 36. № 1. С. 97–101.
- Эбель Е. И., Залесова Е. С., Зарубина Л. В. Динамика среднего диаметра древостоя при рубках ухода в сосняках // Леса России и хоз-во в них. 2019. № 2 (69). С. 55–61.
- Allen II M. G., Antón-Fernández C., Astrup R. A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned managed Norway spruce forests in Norway // Scand. J. For. Res. 2020. V. 35. Iss. 5–6. P. 238–251.
- Bailey R. L., Clutter J. L. Base-age invariant polymorphic site curves // For. Sci. 1974. V. 20. Iss. 2. P. 155–159.
- Cieszewski C. J. GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull and other exponential functions // Proc. Int. Conf. For. Measur. and Qualit. Methods and Manag. Athens, USA: Univ. Georgia, 2004. P. 248–261.
- Cieszewski C. J., Bailey R. L. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes // For. Sci. 2000. V. 46. Iss. 1. P. 116–126.
- Diéguez-Aranda U., Grandas-Arias J. A., Álvarez-González J. G., Gadow K. von. Site quality curves for birch (*Betula pubescens* Ehrh.) stands in north-western Spain // Silva Fenn. 2006. V. 40. N. 4. P. 631–644.
- Johansson T. A site dependent top height growth model for hybrid aspen // J. For. Res. 2013. V. 24. N. 4. P. 691–698.
- Maleki K., Astrup R., Kuehne C., Paul McLean J., Antón-Fernández C. Stand-level growth models for long-term projections of the main species groups in Norway // Scand. J. For. Res. 2022. V. 37. Iss. 2. P. 130–143.
- McCullagh A., Black K., Nieuwenhuis M. Evaluation of tree and stand-level growth models using national forest inventory data // Europ. J. For. Res. 2017. V. 136. Iss. 2. P. 251–258.
- Pretzsch H. Forest dynamics, growth and yield. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009. 664 p.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870 // Nature Comm. 2014. V. 5. Article 4967. 10 p.
- Pretzsch H., Grote R., Reineking B., Roötzer Th., Seifert St. Models for forest ecosystem management: A European perspective // Ann. Bot. 2008. V. 101. Iss. 8. P. 1065–1087.
- Prodan M. Forest Biometrics. New York, NY: Pergamon Press, 1968. 447 p.
- Rojo-Alboreca A., Cabanillas-Saldaña A. M., Barrio-Anta M., Notivol-Paño E., Gorgoso-Varela J. J. Site index curves for natural Aleppo pine forests in the central Ebro valley (Spain) // Madera Bosques. 2017. V. 23. N. 1. P. 143–159.
- Schumacher F. X. A new growth curve and its application to timber yield studies // J. For. 1939. V. 37. P. 819–820.
- Sharma R. P., Brunner A., Eid T. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway // Scand. J. For. Res. 2012. V. 27. Iss. 7. P. 619–636.
- Socha J., Ochal W. Dynamic site index model and trends in changes of site productivity for *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. in southern Poland // Dendrobiology. 2017. V. 77. P. 45–57.
- Socha J., Solberg S., Tyminska-Czabańska L., Tompalski P., Vallet P. Height growth rate of Scots pine in Central Europe increased by 29 % between 1900 and 2000 due to changes in site productivity // For. Ecol. Manag. 2021. V. 490. Article 119102.
- Stankova T. V., Diéguez-Aranda U. Derivation and analysis of new stand-level mortality models based on existing growth equations // Ecol. Res. 2014. V. 29. Iss. 2. P. 319–330.
- Suliman T., Berger U., Maaten-Theunissen M. van der, Maaten E. van der, Ali W. Modeling dominant height growth using permanent plot data for *Pinus brutia* stands in the Eastern Mediterranean region // For. Syst. 2021. V. 30. N. 1. Article eSC03.
- Vanclay J. K. Robust relationships for simple plantation growth models based on sparse data // For. Ecol. Manag. 2010. V. 259. Iss. 5. P. 1050–1054.

DYNAMIC MODEL OF GROWTH OF PINE TREE STANDS IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA ACCORDING TO REPEATED OBSERVATIONS

A. V. Lebedev

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

E-mail: alebedev@rgau-msha.ru

Given the importance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for forestry in the European part of Russia, it is necessary to have tools that allow one to make informed decisions on managing the forest growing process and planning forest use. The aim of the study is to develop a dynamic model of the growth and productivity of pine forest stands in the European part of Russia using data from repeated observations on permanent sample plots. The data used in the study are represented by 99 permanent sample plots in natural pine stands in the European part of Russia, observations of which were carried out from 1862 to 2023. The growth and productivity model of stands consists of separate equations for the dependence of the average height, average diameter and number of growing trees on the initial and final ages and initial values of the corresponding stand indicators and the dependence of the average form height on the average height of the stand. The model developed in the study provides forecasting of stand indicators within the accuracy established by the Forest measurement instructions, providing a confident forecast for an average period of 9 years. The average absolute percentage of error for average heights, diameters and form heights does not exceed 5 %, and for the number of trees, the stand basal areas and stand volume does not exceed 15 %. The developed model can serve as an alternative to traditional course growth tables in the design and justification of forestry activities, in the inventory of forests using the updating method, as well as for making management decisions when managing pine forests. In combination with additional equations, it can be used to predict the carbon sequestration potential of pine stands.

Keywords: *Scots pine, prediction of tree stand growth, dynamic model of tree stand growth.*

How to cite: *Lebedev A. V. Dynamic model of growth model of pine tree stands in the European part Russia according to repeated observations // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 4. P. 72–83 (in Russian with English abstract and references).*