

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>

УДК (630*232.312.3 + 630*232.323.7) : 630*232.32



Динамика роста хвойных древостоев *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour: модифицированная модель

Виктор И. Лисицын ✉, lisicyn-viktor@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Татьяна П. Новикова, novikova_tp.vglta@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Артур И. Новиков, arthur.novikov@vglta.vrn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Модификация модели динамики хода роста общей биомассы древостоев сфокусирована на использовании возраста физиологической зрелости (спелости), который, как показывают предыдущие расчеты, является константой для каждого вида: *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour. Валидация модифицированной модели проводилась для хвойных древостоев – еловых, сосновых и кедровых, родственных в биологическом отношении. Для древостоев *P. sylvestris*, *P. abies* и *P. sibirica* аллометрический параметр, характеризующий связь биомассы с площадью насаждения, не зависит от класса бонитета и является константой для каждого вида. Поведение параметра, который характеризует скорость расхода ресурса, индивидуально для каждого вида. Для древостоев *P. abies* этот параметр возрастает, а для *P. sylvestris* убывает с ростом бонитета, для древостоев *P. sibirica* эта зависимость оказывается нелинейной. В будущем данное обстоятельство нуждается в дополнительном исследовании. Статистический критерий Нэша-Сатклиффа показал высокую точность (для древостоев второго бонитета NSE = 0.9987 для *P. sylvestris*, NSE = 0.9828 для *P. abies* и NSE = 0.9781 для *P. sibirica*) модифицированной модели. По сравнению с аналогичными моделями, не учитывающими возраст физиологической зрелости, качество модифицированной модели возросло на порядок. Для всех видов древостоев дополнительно рассчитывалось относительное отклонение расчета от эмпирических данных, которое в целом составило 1-2 %, за исключением возрастов, меньших по сравнению с физиологическим возрастом зрелости. Для этих возрастов относительное отклонение повышалось до 5 %, что связано, по мнению авторов, с процессами становления хвойного насаждения как экологической системы.

Ключевые слова: модель динамики древостоев, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., ель европейская, *Picea abies* L., сосна кедровая сибирская, *Pinus sibirica* Du Tour, сосновые древостои, еловые древостои, кедровые древостои

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лисицын, В. И. Динамика роста хвойных древостоев *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour: модифицированная модель / В. И. Лисицын, Т. П. Новикова, А. И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 54–69. – Библиогр.: с. 64–68 (35 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.

Поступила 11.04.2024. Пересмотрена 23.05.2024. Принята 23.05.2024. Опубликована онлайн 17.06.2024.

Growth dynamics of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour coniferous stands: modified model

Victor I. Lisitsyn ✉, lisicyn-viktor@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Tatyana P. Novikova, novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Arthur I. Novikov, arthur.novikov@vglta.vrn.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Modification of the growth dynamics model of the total biomass of forest stands is focused on using the age of physiological maturity (ripeness), which, as shown by previous calculations, is a constant for each species: *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour. Validation of the modified model was carried out for coniferous stands – spruce, pine and cedar, biologically related. For stands of *P. sylvestris*, *P. abies* and *P. sibirica* is an allometric parameter that characterizes the relationship of biomass with the area of planting, does not depend on the class of bonus and is a constant for each species. The behavior of the parameter that characterizes the rate of resource consumption is individual for each type. For stands of *P. abies*, this parameter increases, and for *P. sylvestris* decreases with increasing bonus, for stands of *P. sibirica*, this dependence turns out to be nonlinear. In the future, this circumstance needs additional research. The statistical Nash-Sutcliffe criterion showed high accuracy (by coniferous stands of the second site class NSE = 0.9987 for *P. sylvestris*, NSE = 0.9828 for *P. abies* and NSE = 0.9781 for *P. sibirica*) of the modified model. Compared with similar calculations that do not take into account the age of physiological maturity, the quality of the modified model has increased by an order of magnitude. For all types of coniferous stands, the relative deviation of the calculation from empirical data was additionally calculated, which in general amounted to 1-2%, with the exception of ages lower than the physiological age of maturity. For these ages, the relative deviation increased to 5%, which, according to the authors, is associated with the processes of formation of coniferous plantations as an ecological system.

Keywords: model of the stand's dynamics, Scots pine, *Pinus sylvestris* L., European spruce, *Picea abies* L., Siberian pine, *Pinus sibirica* Du Tour, pine stands, spruce stands, cedar stands

Funding: the study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Lisitsyn V. I., Novikova T. P., Novikov A. I. (2024). Growth dynamics of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour coniferous stands: modified model. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 54-69 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.

Received 11.04.2024. **Revised** 23.05.2024. **Accepted** 23.05.2024. **Published online** 17.06.2024.

Введение

Ключевая роль лесов в балансе углерода во всем мире не подлежит сомнению. Леса, как представляют W.V. Reid и H.A. Mooney (2018) [1],

N.L. Harris et al (2021) [2], являются местом обитания подавляющего большинства наземного биоразнообразия. Смещение энергетического баланса Земли увеличением лесного покрова (биомассы) при

снижении лесных площадей, что следует из данных Х.-P. Song и др. (2018) [3], значительно усиливается в течение последних нескольких десятилетий. Принятие Киотского протокола в 1997 году подчеркнуло роль лесов в регулировании климата, что безусловно признано научным сообществом во всем мире. Поэтому управление качеством адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR), как это показано у А.И. Novikov и др. (2019), Т.Р. Novikova и др. (2021, 2022, 2023), разработкой FLR-алгоритмов [4-6] справочной информационной системы FLR-Library [7-9] с целью дальнейшего увеличения углерода, хранящегося в биомассе деревьев, имеет решающее значение для поддержания мониторинга и прогнозирования роли лесов в смягчении климата. Мониторинг лесной биомассы и накопления углерода опирается на источники данных, ориентированные на уровень древостоев, что дает возможность получать точные оценки надземной биомассы в десятилетнем масштабе при наличии систематических лесных кадастров. В частности, динамические модели роста древостоев прогнозируют рост леса во времени, что позволяет оценить его запасы за период ротации. Основная идея состоит в том, чтобы сформулировать такой закон роста, который хорошо соответствует реальной структуре древостоя и его можно использовать так, чтобы характеристики древостоя изменялись во времени в зависимости от ключевых факторов, таких как условия окружающей среды.

Рост и плодоношение деревьев могут определяться качеством посевного [34] и посадочного [35] материала, размерами и геометрией дерева, конкуренцией соседей и альтитудой произрастания у D.A. Coomes и R.B. Allen (2007)², N. Yazici et al. (2023) [10]; доступностью ресурсов и условиями окружающей среды у L. Marqués (2021) [11]. Эмпирические (в самом широком смысле этого слова) модели роста древостоев интерпретируют эффекты ассимиляции углерода и реакции на изменение ресурсов и условий окружающей среды путем явного описания изменчивости ресурсов – например, доступности света и почвенной воды у К.Е.А. Wood (2023)

[12], или через эффекты зависимости от биомассы у Т.С. Kohyama (2019) [13], или комбинации этих эффектов у В. Roitberg и др. (2024) [14].

Существует широкий набор динамических моделей, от «регрессивных» до эколого-физиологических (ЭФМ), разработанных и уточненных ранее В.И. Лисицыным и др. (2021, 2022) [15-17], которые применяются для достижения вышеуказанных целей. В последнее время наблюдается рост количества данных о реакции лесов на изменение климата, расширяется спектр моделей лесов, использующих различные методологические подходы. С нашей точки зрения, перспективными являются модели, которые базируются на термодинамике неравновесных процессов в открытых системах. Современный взгляд на применение законов термодинамики в экологии развит в работе S. Nielsen и др. (2020) [18], где показано, что законы термодинамики «работают» в экологии, в том числе и в экологии леса.

Проблема моделирования хвойных древостоев в настоящее время весьма актуальна и ей посвящено достаточно много работ. В специальном выпуске E. Harold (2021) [19] представлены материалы по всем аспектам моделирования роста и урожайности лесов, включая сбор и анализ данных, подходы к моделированию, а также валидации и реализации моделей. Следует отметить работы Н.Н. Дубенок и др. (2023) [20] и Т.В. Stankova (2016) [21], в которых моделируется рост древостоев *P. sylvestris*, а также работы P.V. Mikhaylov (2021) [22], где рассматриваются современные проблемы моделирования еловых древостоев в канадских и европейских лесах, в том числе изучаются вопросы российских еловых древостоев. В работах Р.Н. Матвеевой и др. (2020) [23], Р.Н. Матвеевой и др. (2023) [24], С.В. Левина (2022) [25] обращено внимание на проблему выращивания *P. sibirica*, которая характеризуется качественным и достаточно ранним плодоношением.

В вышеуказанных работах, как правило, представлено «регрессивное» направление моделирования, необходимость использования которого

² Coomes D.A., Allen R.B. Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology*. 2007; 95 (5): 1084-1097. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01280.x>.

для практического лесоводства не вызывает сомнений. Однако во многих вопросах, связанных с проблемами прогнозирования роста древостоев, управлением лесов, роль ЭФМ для оценки динамики роста древостоев занимает достаточно высокое место, так как параметры этих моделей имеют ясный эколого-физиологический смысл. Причем, что важно отметить, в структурно-динамическом моделировании изменение этих параметров позволяет реагировать на многие внешние факторы, значительно изменяющие развитие древостоев.

Ранее при участии первого автора разработана ЭФМ [16, 17], где в качестве отправной точки лежит положение о достижении в процессе роста древостоя стационарного режима, который с термодинамической точки зрения характеризуется балансом энтропии и энергии. Начало стационарного режима соответствует времени t_{st} , при котором биомасса древостоя достигает максимального значения. Эта ЭФМ применялась для расчета динамики роста полных (нормальных) древостоев *P. sylvestris* [16], *Q. robur* [26], *P. sibirica* [27]. В них показано, что точность модели достигает достаточно высоких статистических показателей

В работах В.И. Лисицына и Т.П. Новиковой (2023) [27], В.И. Лисицына и др. (2023) [28] указано на важность использования при моделировании констант (интегральных величин), которые позволяют разрабатывать адекватные действительности модели древостоев. Одной из целей настоящей работы является следующее предложение - в качестве такой константы использовать время достижения физиологической зрелости (спелости), способы нахождения которого рассматриваются в работах [28, 29]. Такая модификация метода позволит значительно улучшить статистические показатели точности воспроизводимых результатов, и, что особенно важно, ввести ЭФМ константу, характеризующую начало функционирования древостоя как системного продукта. Это предположение, безусловно, требует дальнейшего изучения с точки зрения законов «экологической» термодинамики.

Цель работы – исследовать эффективность модифицированной ЭФМ для расчета еловых (*Picea abies* (L.) H.Karst.), сосновых (*Pinus sylvestris* L.) и кедровых (*Pinus sibirica* Du Tour) древостоев в сравнении с ЭФМ, не учитывающей возраст биологической зрелости древостоев.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Объект: полные древостои: 1) *P. sylvestris*; 2) *P. abies*; 3) *P. sibirica*.

Предмет: набор табличных значений вариант общей продуктивности биомассы и числа деревьев на гектар в древостоях указанных видов, извлеченный из моделей хода роста А.З. Швиденко и др. (2008) [30].

Теоретические предпосылки

Теоретической базой данного исследования является ЭФМ [15,16], в которой на основе аналитического решения системы дифференциальных уравнений были получены функции, описывающие ход роста древостоев в зависимости от времени, причем для биомассы отдельного дерева было использовано известное уравнение Людвиг фон Берталанффи³ (1958).

$$\frac{dm}{dt} = fgm^q - rm . \quad (1)$$

Уравнение (1), как известно, является следствием применения закона сохранения энергии в биологических процессах (баланс энергии). Ранее было показано [15], что в процессе роста древостой термодинамически достигает стационарного режима. В это время наблюдается баланс энтропии. С момента наступления стационарного режима общая биомасса насаждения достигает максимального значения. Исходя из этого положения, в [15] выведено новое дифференциальное уравнение, определяющее зависимость числа деревьев на гектар от времени. В результате получена система связанных дифференциальных уравнений, которая имеет аналитическое решение при заданных начальных условиях. Для решения системы дифференциальных уравнение требуется задать эти начальные условия. Значения для начальных условий выбираются из

³ Von Bertalanffy, L. Quantitative Laws in Metabolism and Growth. Q. Rev. Biol. 1957, 32, 217–231. DOI: <https://doi.org/10.1086/401873>.

Таблиц биологической продуктивности (общей продуктивности биомассы) и Таблиц хода роста (числа деревьев на гектар) при минимальном времени, приведенном в этих таблицах. Обычно это время ограничено 10-20 годами.

В отличие от работ [23, 24], где начальное время t_0 , как уже сказано выше, определяется из таблиц хода роста как минимальное значение по времени в этих таблицах, в настоящей работе в качестве начальных значений m_0 и N_0 выбираем значения этих величин при $t_0 = t_{сп.}$, где $t_{сп.}$ - время физиологической спелости, которое находится по методу, разработанному в [25, 26], причем значения и средней биомассы отдельного дерева, и числа деревьев на гектар для $0 < t < t_0$, т.е. для возрастов меньше времени физиологической спелости, рассчитываются из соответствующих уравнений для $m(t)$ и $N(t)$.

Вид уравнений для $m(t)$ и $N(t)$ дается в [15], расчет динамики роста по которым требует знания четырех параметров модели: биомассы единичного дерева m_∞ и количества таких деревьев N_∞ на единицу площади (например, га) для максимального момента времени, скорости расхода ресурса r , аллометрического коэффициента q .

Сбор данных

Для создания модифицированной ЭФМ использовали наборы данных [30], обозначенных как предмет исследования, для:

1) полного (нормального) соснового древостоя *P. sylvestris* – стр. 384 и стр. 81 соответственно в работе [30];

2) елового древостоя *P. abies* в экорегионах южной тайги северной подзоны смешанных лесов – стр.509 и стр.185 соответственно в работе [30];

3) кедрового древостоя *P. sibirica* на Юго-западном макросклоне Горного Алтая – стр. 606 и стр. 271 соответственно в работе [30].

Анализ данных

Расчеты проводили в соответствии с программой расчета динамики роста древостоев по эколого-физиологической модели, основанной на термодинамическом подходе [31]. Программа создана в

среде RTC Mathcad Prime 4.0, причем она может быть реализована и в более ранних версиях Mathcad-a. В программе определяли параметры модели и производили расчет значений:

- биомассы m отдельного дерева, т;
- числа деревьев N на гектар, шт. га⁻¹;
- общей биомассы M насаждения, т.

Отдельный блок программы рассчитывал возраст физиологической спелости по методу, предложенному в [27, 28].

Для определения статистической значимости результатов предусмотрены следующие блоки:

– в таблицах общей продуктивности не всегда сохраняется промежуток времени между данными в 10 лет, поэтому недостающие значения определяли с помощью линейной экстраполяции, если этот промежуток равнялся 20 годам. Линейная экстраполяция давала ошибку в данных, не превосходящую 0,5%. Проверку осуществляли на таблицах данных с временным шагом в 10 лет;

– качество модели оценивали статистическим критерием эффективности Нэша-Сатклифа⁴ NSE [32], согласно которому рассчитывали значение критерия по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^K (Y_i^{emp} - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^K (Y_i^{emp} - Y_{mean})^2}, \quad (2)$$

где Y_i^{emp} – эмпирические данные для конкретной величины из таблиц; Y_i – расчетные данные по модели для тех же моментов времени; Y_{mean} – среднее (медианное) значение той же величины. Значение NSE может находиться в интервале $(-\infty, 1)$, где 1 соответствует идеальному описанию данных моделью, 0 – качеству описания, совпадающему с описанием эмпирическим средним (медианным) значением, $ME < 0$ – свидетельствует о непригодности используемой модели.

– в программе рассчитывались среднеквадратичное отклонение по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (Y_i^{emp} - Y_i)^2}{K-1}} \quad (3)$$

– для каждого рассчитанного по модели значения определялась относительная ошибка

⁴ Nash J E and Sutcliffe J V 1970 River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. J. Hydrology 10(3) 282 [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

$$\varepsilon_i = \frac{|Y_i^{emp} - Y_i|}{Y_i^{emp}} \quad (4)$$

Расчеты биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар проводили для всех классов бонитета хвойных древостоев, которые даны в таблицах А.З. Швиденко и др. [30].

Результаты

В табл. 1-4 приведены значения следующих параметров ЭФМ: t_{sp} – возраст физиологической спелости в годах, m_0 – биомасса отдельного дерева в тоннах, полученная делением общей биомассы древостоя M_0 на число деревьев на гектар N_0 (соответствующие значения взяты из указанных таблиц

для возрастов, равных t_{sp}), m_{∞} , N_{∞} , r , q - параметры модели, определенные по результатам оптимизации g_j критерию эффективности Нэша-Сатклифа ME . Для всех видов древостоя и для всех бонитетов рассчитывались среднееквадратичное отклонение и относительная ошибка по формулам (3) и (4). Отношение среднееквадратичного отклонения к соответствующему медианному значению величин составляло не более 0,005. Относительная ошибка для промежутков времени $t_{sp} < t < t_{max}$ не превышала 2 %. Для значений времени меньших, чем возраст физиологической спелости ошибка увеличивалась до 5 %.

Таблица 1

Исследование модифицированной ЭФМ роста древостоев *Picea abies* (L.) H.Karst. по уровням бонитета

Table 1

A study of the modified EFM of the growth of *P. abies* stands by forest site class

Бонитет Site class	t_{cn} (лет) t_{sp} (years)	m_0 (тонн) m_0 (tonnes)	N_0 1/га N_0 1/ha	m_{∞} , (тонн) m_{∞} (tonnes)	N_{∞} 1/га N_{∞} 1/ha	r	t_{max} (лет) t_{max} (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа NSE		
								m	N	M
1	0	0.1468	1183	1.70	230	0.046	200	0.9999	0.9969	0.9914
2	50	0.083658	1591	1.08	310	0.048	190	0.9995	0.9981	0.9828
3	50	0.054987	1975	0.690	370	0.05	180	0.9998	0.9999	0.9971
4	50	0.036893	2369	0.400	450	0.052	160	0.9995	0.9998	0.9993
5	50	0.021759	3070	0.188	625	0.0555	150	0.9973	0.999	0.9969

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 2

Исследование модифицированной ЭФМ роста полных древостоев *P. sylvestris* по уровням бонитета

Table 2

A study of the modified EFM of the growth of *P. sylvestris* normal stands by forest site class

Бонитет Site class	t_{cn} (лет) t_{sp} (years)	m_0 (тонн) m_0 (tonnes)	N_0 1/га N_0 1/ha	m_{∞} , (тонн) m_{∞} (tonnes)	N_{∞} 1/га N_{∞} 1/ha	r	t_{max} (лет) t_{max} (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа NSE		
								m	N	M
1б	50	0.348244	911	3.00	175	0.0523	140	0.9996	0.9997	0.9931
1а	50	0.247725	1055	2.35	190	0.051	160	0.9998	0.9987	0.9884
1	50	0.168356	1245	1.90	200	0.047	160	0.9991	0.9995	0.9940
2	50	0.109560	1506	1.40	240	0.044	160	0.9996	0.9989	0.9987
3	60	0.106629	1433	1.07	260	0.038	180	0.9981	0.9999	0.9934

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 3

Исследование модифицированной ЭФМ роста древостоев *Pinus sibirica* Du Tour по уровням бонитета

Table 3

A study of the modified EFM of the growth of *P. sibirica* stands by forest site class

Бонитет Site class	t_{cn} (лет) t_{sp} (years)	m_0 (тонн) m_0 (tonnes)	N_0 1/га N_0 1/ha	m_{∞} (тонн) m_{∞} (tonnes)	N_{∞} 1/га N_{∞} 1/ha	r	t_{max} (лет) t_{max} (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа ME		
								m	N	M
2	40	0.020277	3970	3.20	140	0.046	240	0.9990	0.9998	0.9781
3	40	0.01129	5341	1.95	192	0.044	240	0.9975	0.9916	0.9831
4	40	0.006321	6929	1.05	288	0.047	240	0.9970	0.9951	0.9742
5	40	0.003613	8110	0.60	370	0.049	240	0.9969	0.9993	0.9610

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 4

Исследование не учитывающей возраст физиологической зрелости ЭФМ роста полных древостоев *P. sylvestris* по уровням бонитета

Table 4

A study of the age-disregarding physiological maturity EFM of the full stand's growth of *P. sylvestris* by site class

Бонитет Bonitet	m_0 (тонн) m_0 (tonnes)	N_0 1/га N_0 1/ha	m_{∞} (тонн) m_{∞} (tonnes)	N_{∞} 1/га N_{∞} 1/ha	r	t_{max} (лет) t_{max} (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа ME		
							m	N	M
1б	0.004204	8277	2.95	172	0.0523	140	0.9995	0.9948	0.9721
1а	0.002912	10061	2.35	187	0.051	160	0.9981	0.9967	0.9683
1	0.001886	12753	1.80	195	0.047	160	0.9986	0.9931	0.9640
2	0.001024	16753	1.40	222	0.044	160	0.9961	0.9958	0.9930
3	0.000568	23756	1.09	230	0.038	180	0.9971	0.9901	0.9536

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Оптимизация проводилась для $m(t)$ и $N(t)$ как функций четырех независимых параметров модели - m_{∞} , N_{∞} , r , q . Эти функции в зависимости от указанных параметров имеют локальные минимумы. Оптимизация проводилась как сказано выше по критерию эффективности Нэша-Сатклифа ME с учетом минимальности среднеквадратичного отклонения и относительной ошибки. Значения, полученные в результате оптимизации, приводятся в табл. 1-4, за исключением аллометрического параметра q , определяющего связь площади поверхности и биомассы особи, который составляет 0.7 как для елового древостоя, так и для соснового древостоя для всех бонитетов. Этот параметр для кедрового бонитета ра-

вен 0.74. Он также одинаков для всех бонитетов кедрового древостоя. В табл. 4 для сравнения даны те же значения, что и в табл. 2 для соснового древостоя, но без учета возраста физиологической спелости, т.е. немодифицированная модель.

На рисунках показаны зависимости величин $m1(t)$, $N1(t)$ и $M1(t)$, рассчитанные на основе модифицированной ЭФМ для трех исследуемых древостоев: *Pinus sylvestris* L. (рис. 1-3), *Picea abies* (L.) H.Karst. (рис. 4-6), *Pinus sibirica* Du Tour (рис. 7-9). На них приводятся, кроме того, соответствующие эмпирические значения $m(t)$, $N(t)$ и $M(t)$ из таблиц А.З. Швиденко и др. [30], причем значение биомассы отдельного дерева $m(t)$ дается в тоннах, числа деревьев на гектар $N(t)$ – в 1/га и общая биомасса

древостоя $M(t)$ в т/га. Для наглядности и репрезентативности выбраны разные классы бонитета.

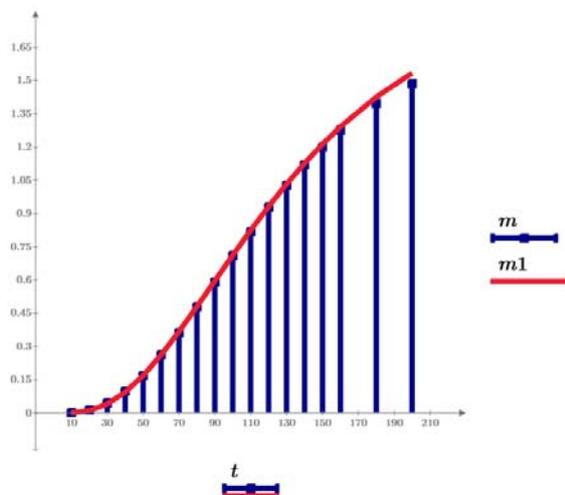


Рисунок 1. Зависимость биомассы отдельного дерева от времени для древостоя *P. sylvestris* (1 класс бонитета)

Figure 1. Dependence of individual tree biomass on time for a *P. sylvestris* stand (site class I)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

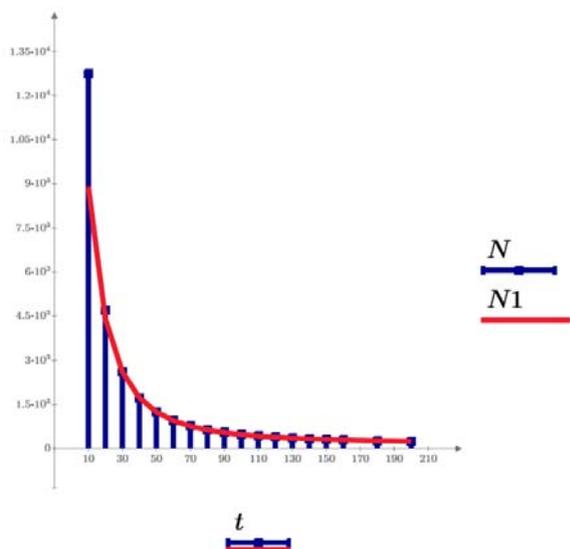


Рисунок 2. Зависимость числа деревьев на гектар $N(t)$ от времени для древостоя *P. sylvestris* (1 класс бонитета)

Figure 2. Dependence of the number of trees per hectare $N(t)$ on time for a *P. sylvestris* stand (site class I)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

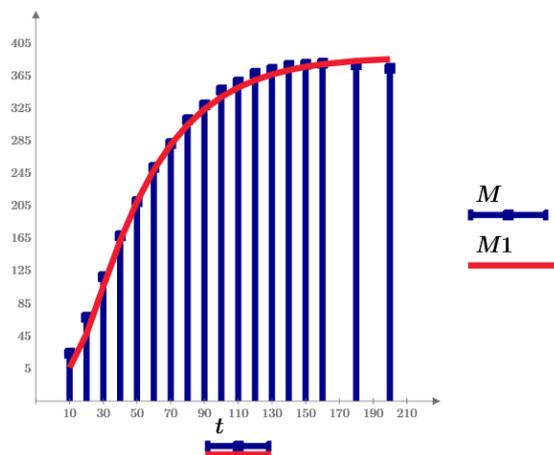


Рисунок 3. Зависимость общей биомассы древостоя на одном гектаре $M(t)$ от времени древостоя *P. sylvestris* (1 класс бонитета)

Figure 3. Dependence of total stand biomass per hectare $M(t)$ on time for a *P. sylvestris* stand (site class I)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

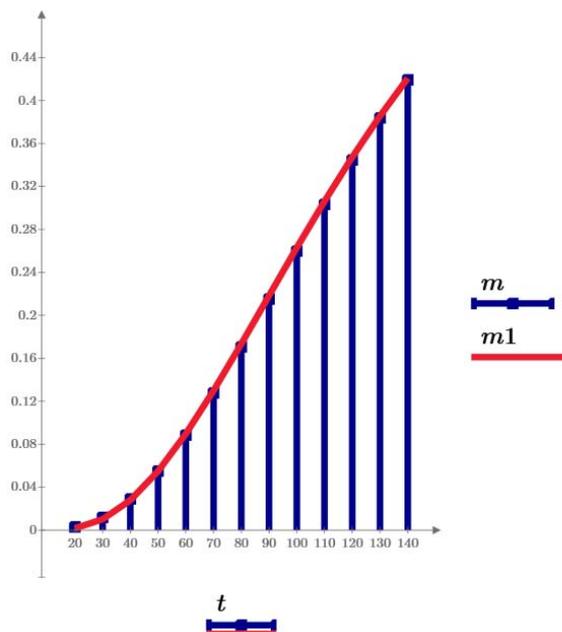


Рисунок 4. Зависимость биомассы отдельного дерева от времени для древостоя *P. abies* (3 класс бонитета)

Figure 4. Dependence of individual tree biomass on time for a *P. abies* stand (site class III)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

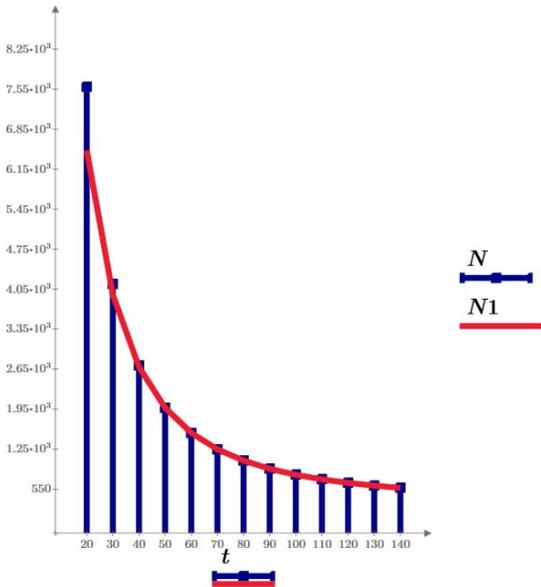


Рисунок 5. Зависимость числа деревьев на гектар $N(t)$ от времени для древостоя *P. abies* (3 класс бонитета)

Figure 5. Dependence of the number of trees per hectare $N(t)$ on time for a *P. abies* stand (site class III)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

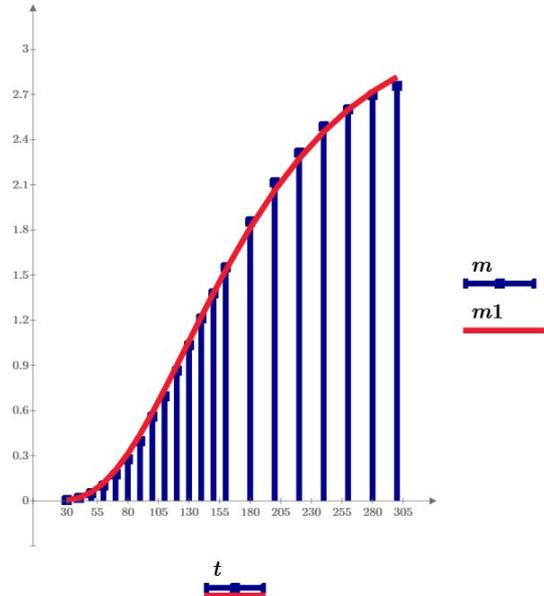


Рисунок 7. Зависимость биомассы отдельного дерева от времени для древостоя *P. sibirica* (2 класс бонитета)

Figure 7. Time dependence of individual tree biomass for a *P. sibirica* stand (site class II)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

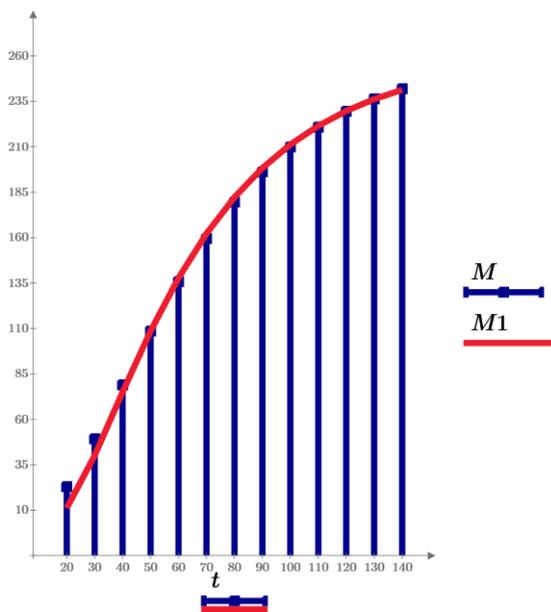


Рисунок 6. Зависимость общей биомассы древостоя на одном гектаре $M(t)$ от времени для древостоя *P. abies* (3 класс бонитета)

Figure 6. Time dependence of total stand biomass per hectare $M(t)$ for a *P. abies* stand (site class III)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

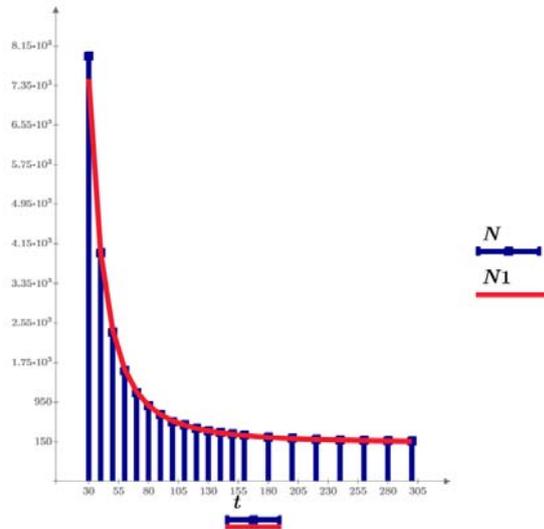


Рисунок 8. Зависимость числа деревьев на гектар $N(t)$ от времени для древостоя *P. sibirica* (2 класс бонитета)

Figure 8. Dependence of the number of trees per hectare $N(t)$ on time for a *P. sibirica* stand (site class II)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

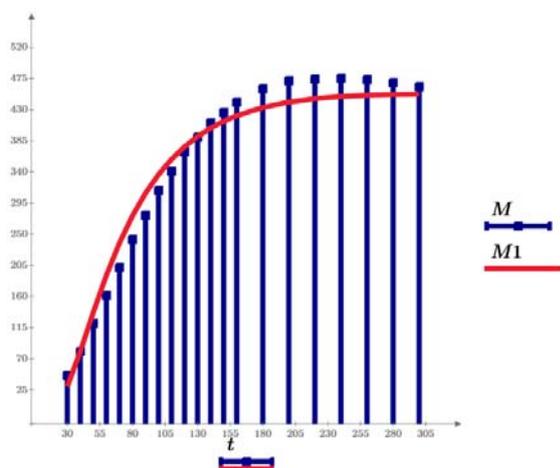


Рисунок 9. Зависимость общей биомассы древостоя на одном гектаре $M(t)$ от времени для древостоя *P. sibirica* (2 класс бонитета)

Figure 9. Dependence of total biomass of a stand on one hectare $M(t)$ on time for a *P. sibirica* stand (site class II)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Обсуждение

Аллометрический параметр q , как указано выше, составляет 0.7 для елового древостоя и для соснового древостоя для всех бонитетов, а для кедрового древостоя он равен 0.74 для всех бонитетов, что подчеркивает как биологическую близость этих пород, так и наличие важной для моделирования константы. Это значение согласуется с данными работ М.Д. Корзухина (2019) [32] и S.E. Jorgensen (2018) [33], где приводится следующий интервал $0.66 < q < 1$. Параметр r , который характеризует скорость расхода ресурса, не только зависит от бонитета, но и имеет разную направленность зависимости для исследуемых древостоев. Если для елового древостоя с увеличением бонитета параметр r возрастает практически по линейному закону, то у соснового древостоя этот параметр убывает, т.е. «скорость расхода ресурса растет с увеличением бонитета для елового древостоя и убывает для соснового. Этот факт особенно интересен тем, скорость расхода ресурса уменьшается с ростом бонитета для сосновых насаждений и древостоев для достижения стационарного режима (максимального значения биомассы) требуется больше время (растет значение

t_{max}) [18]». Для еловых насаждений ситуация обратная – с ростом бонитета увеличивается скорость расхода ресурса и время достижения максимального значения биомассы снижается. В кедровых древостоях параметр r не имеет однозначной зависимости от бонитета. Объяснение такой зависимости возможно не только с лесоводческих позиций, но и исследуя процесс накопления эксергии древостоем.

Значения критерия эффективности для указанных бонитетов соснового и елового древостоев близки к 1 (см. табл. 1 и 2), а для биомассы отдельного дерева и числа деревьев на гектар отличие от 1 наблюдается только в пятом знаке после запятой, т.е. качество модели практически идеальное. Несколько хуже результаты для древостоя кедра сибирского, но близость критерия эффективности к 1 по-прежнему высока, хотя она и снижена по сравнению с еловым и сосновым древостоем. Особенно, такое снижение характерно для общей биомассы насаждения. Это заметно и по соответствующему рис. 9, тогда как у двух первых древостоев эмпирические значения практически сливаются с рассчитанными по модифицированной ЭФМ (рис. 1-6). Следует отметить, что возраст физиологической спелости у древостоя кедра равен 40 годам, а первые соответствующие значения в таблице А.3. Швиденко и др. [30] начинаются с 30 лет. Поэтому преимущества модификации метода не заметно и критерий эффективности об этом свидетельствует. В табл. 4 приведены соответствующие значения параметров модели и значений критерия эффективности без учета возраста физиологической зрелости. Из анализа табл. 4 видно, что, хотя значения критерия эффективности достаточно близки к 1, но они уступают по точности соответствующим значениям табл. 1 и 2.

В таблицах даны начальные значения (m_0, N_0) и конечные значения (m_{∞}, N_{∞}) . Начальные значения в табл. 1 и 2 взяты для момента времени t_{en} , которые одинаковы для соснового и елового древостоя у всех бонитетов за исключением 3 бонитета соснового древостоя, где отличие составляет 10 лет. Это подтверждает предположение авторов о том, что время наступления физиологической зрелости (спелости) является константой и может

использоваться в моделировании. В табл. 4 эти значения взяты как минимальные по возрасту в таблицах А.З. Швиденко и др. [30]. Конечные значения (m_{∞}, N_{∞}), приведенные в таблицах, определялись в результате процедуры оптимизации по критерию эффективности. Этим объясняется небольшое отличие полученных значений (m_{∞}, N_{∞}) в табл. 2 и 4.

Проведенное усовершенствование модели позволяет надеяться на ее использование для моделирования лиственных насаждений. Причем не только дубовых и березовых, а также очень важным представляется моделирование осиновых и тополевых древостоев. Особенный интерес для моделирования представляют естественные гибриды осины и тополя, которые отличаются быстрым ростом и сравнительно высокой продуктивностью. Именно это качество, а также устойчивость гибридов к поражению насекомыми и болезнями используется для создания эффективно работающих карбоновых полигонов, прежде всего в Воронежской области.

Дальнейшее применение модифицированной модели возможно «для расчета нужной в экологических приложениях величины – эксергии, которая является важнейшим экологическим индикатором для описания развития экосистемы» [26].

Выводы

1. Модифицированная ЭФМ с высокой точностью описывает динамику роста насаждений *P. sylvestris* | *P. abies* для первых пяти бонитетов (в среднем $NSE = 0,9997$ | $0,9969$).

2. Критерий q , характеризующий аллометрию единичного дерева, составляет 0.7 как для елового

древостоя, так и для соснового древостоя для всех бонитетов и равен 0.74 для древостоя кедра сибирского. Это свидетельствует о биологической близости древостоев

3. Зависимость параметра модели r , ответственного за скорость убывания ресурса от класса бонитета для соснового древостоя отличается от такой же зависимости для елового древостоя. Направления изменения параметра r прямо противоположны. Для кедрового древостоя эта зависимость ближе к еловому. Для соснового древостоя параметр r убывает, а для елового он возрастет. Такое поведение этой зависимости нуждается в дальнейших исследованиях, используя эксергетический подход.

4. Время установления стационарного режима, соответствует времени, при котором биомасса насаждения достигает максимума.

5. Время наступления физиологической зрелости (спелости) является константой и может использоваться в моделировании.

6. Сравнение соответствующих параметров, предсказанных для одного и того же древостоя *P. sylvestris* 1 класса бонитета по модифицированной ЭФМ (критерий Нэша-Сатклифа $NSE = 0,9940$) и ЭФМ без применения возраста физиологической спелости (критерий Нэша-Сатклифа $NSE = 0,9640$) показывает, что модифицированная ЭФМ дает статистически более точные результаты прогнозирования общей биомассы.

Список литературы

1. Reid W. V., Mooney H. A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science. Ecology, Economy and Society; V. Dayal et al. eds. Singapore : Springer Singapore, 2018; 4: 49-61. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5675-8_4.
2. Harris N. L. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nature Climate Change. 2021; 11 (3): 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
3. Song, X.-P. et al. Global land change from 1982 to 2016. Nature. 2018; 560 (7720): 639-643. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>.
4. Novikov A. I. et al. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture. Data. 2019; 4 (3): 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
5. Novikova T. P. Study of a set of technological operations for the preparation of coniferous seed material for reforestation. Forestry Engineering Journal. 2021; 11 (4): 150-160. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13>.

6. Novikova T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology. *Inventions*. 2022; 7 (1): 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
7. Novikova T. P. Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (1): 112-128. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8>.
8. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (3): 164-179. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.
9. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (4): 114-124. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.
10. Yazici N. et al. Gene diversity in seed crop of Taurus cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) over an altitudinal range. *Geography. Environment. Sustainability*. 2023; 4 (16): 63-71. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2922>.
11. Marqués L., Camarero J. J., Zavala M.A. et al. Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter? *Trees*. 2021; 35: 1207-1219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02109-8>.
12. Wood K. E. A., Kobe R. K., Ibáñez I., McCarthy-Neumann S. Tree seedling functional traits mediate plant-soil feedback survival responses across a gradient of light availability. *PLOS ONE*. 2023; 18 (11): e0293906. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293906>.
13. Kohyama T. S., Kohyama T. I., Sheil D. Estimating net biomass production and loss from repeated measurements of trees in forests and woodlands: Formulae, biases and recommendations. *Forest Ecology and Management*. 2019; 433: 729-740. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.010>.
14. Roitberg B., Li C., Lalonde R. Tree adaptive growth (TAG) model: a life-history theory-based analytical model for post-thinning forest stand dynamics / B. Roitberg, // *Frontiers in Plant Science*. 2024; 15: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344883>.
15. Лисицын, В.И. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода / В. И. Лисицын, М. В. Драпалюк, Н. Н. Матвеев // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022; 3 (387): 213-225. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>.
16. Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Saushkin V.V. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021; 875: 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012042>.
17. Lisitsyn, V.I.; Matveev, N.N. Entropy Production Using Ecological and Physiological Models of Stand Growth Dynamics as an Example. *Forests* 2022, 13: 1948. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111948>.
18. Nielsen S.; Müller F.; Marques, J.; Bastianoni, S.; Jørgensen, S. Thermodynamics in Ecology—An Introductory Review. *Entropy*. 2020; 22: 820. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22080820>.
19. Harold E. Burkhart Modeling Forest Stand Dynamics, Growth and Yield *Forests*. 2021; 12: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12111553>.
20. Дубенок, Н. Н. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области / Н. Н. Дубенок, А. В. Лебедев, В. В. Гостев // *Лесотехнический журнал*. 2023; 13 (4.1): 5-22. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>.
21. Stankova T.V. A dynamic whole-stand growth model, derived from allometric relationships. *Silva Fennica*. 2016; 50 (1): 1406. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.1406>.
22. Modeling of growth and development of spruce stands in the West Siberian South taiga plain forest region P V Mikhaylov, S L Shevelev, S M Sul'tson, S V Verkhovets and A A Goroshko. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 677 (2021) 052118 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/677/5/052118
23. Matveeva R N, Bratilova N P, Butorova O F, Kolosovsky E V and Svalova A I. Siberian cedar in subordinate crops. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2020; 548: 052018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052018>.

24. Матвеева Р.Н. Изменчивость репродуктивного развития полусибов плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour / Р. Н. Матвеева, Ю. Е. Щерба, Н. А. Шенмайер // Лесотехнический журнал. 2023; 13 (49): 99-111. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/7>.
25. Левин С.В. Эколого-биологические особенности произрастания кедра сибирского (*Pinus sibirica* du tour.) в условиях интродукции воронежской области. Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2022; 144: 25-32. <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2022-144-25-32>.
26. Применение эколого-физиологического моделирования для описания динамики роста дубовых древостоев / В. И. Лисицын, Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, С. В. Внукова // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, 24-26 мая 2023 г. – Санкт-Петербург, 2023. - С. 283-286.
27. Моделирование динамики роста кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour). В. И. Лисицын, Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова // Физические основы современных наукоемких технологий. Материалы Международного научно-методического семинара. Воронеж, 2023, 31-38 DOI: https://doi.org/10.58168/PBMT_31-38.
28. Лисицын, В. И. Определение возраста биологической зрелости в эколого-физиологической модели динамики древостоя / В. И. Лисицын, Т. П. Новикова // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. СПб, 2023. С. 286-288.
29. Лисицын В.И., Новикова Т.П., Новиков А.И. Моделирование возраста биологической зрелости сосновых и дубовых древостоев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 246. С. 6–21. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21>.
30. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных есообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, С. Нильсон, Ю. И. Булуй. – 2-е изд., доп. М., 2008: 886. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/fqdwk>.
31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662105 РФ. Программа расчета динамики роста древостоев по эколого-физиологической модели, основанной на термодинамическом подходе : № 2020661370 : заявл. 01.10.2020 : опубл. 08.10.2020; заявитель ВГТУ. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/xwgo1w>.
32. Корзухин М.Д. Построение кривых хода роста древостоев на основе обобщенной модели Берталанфи по данным государственного лесного реестра // Лесоведение. 2019; 2: 105-114. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819020049>.
33. Jorgensen, S.E. Thermodynamics and ecological modelling. Boca Raton, CRC Press, 2018: 384. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482278613>.
34. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić et al. // Forestry Engineering Journal. 2019; 9 (2): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
35. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // Forests. 2021; 12 (2): 240. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.

References

1. Reid W. V., Mooney H. A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science. Ecology, Economy and Society; V. Dayal et al. eds. Singapore : Springer Singapore, 2018; 4: 49-61. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5675-8_4.
2. Harris N. L. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nature Climate Change. 2021; 11 (3): 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
3. Song, X.-P. et al. Global land change from 1982 to 2016. Nature. 2018; 560 (7720): 639-643. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>.

4. Novikov A. I. et al. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture. *Data*. 2019; 4 (3): 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
5. Novikova T. P. Study of a set of technological operations for the preparation of coniferous seed material for reforestation. *Forestry Engineering Journal*. 2021; 11 (4): 150-160. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13>.
6. Novikova T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology. *Inventions*. 2022; 7 (1): 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
7. Novikova T. P. Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (1): 112-128. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8>.
8. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (3): 164-179. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.
9. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (4): 114-124. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.
10. Yazici N. et al. Gene diversity in seed crop of Taurus cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) over an altitudinal range. *Geography. Environment. Sustainability*. 2023; 4 (16): 63-71. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2922>.
11. Marqués L., Camarero J. J., Zavala M.A. et al. Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter? *Trees*. 2021; 35: 1207-1219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02109-8>.
12. Wood K. E. A., Kobe R. K., Ibáñez I., McCarthy-Neumann S. Tree seedling functional traits mediate plant-soil feedback survival responses across a gradient of light availability. *PLOS ONE*. 2023; 18 (11): e0293906. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293906>.
13. Kohyama T. S., Kohyama T. I., Sheil D. Estimating net biomass production and loss from repeated measurements of trees in forests and woodlands: Formulae, biases and recommendations. *Forest Ecology and Management*. 2019; 433: 729-740. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.010>.
14. Roitberg B., Li C., Lalonde R. Tree adaptive growth (TAG) model: a life-history theory-based analytical model for post-thinning forest stand dynamics / B. Roitberg, // *Frontiers in Plant Science*. 2024; 15: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344883>.
15. Lisitsyn, V. I. Modelirovanie dinamiki xoda rosta drevostoev na osnove termodinamicheskogo podxoda / V. I. Lisitsyn, M. V. Drapalyuk, N. N. Matveev // *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2022; 3 (387): 213-225. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>.
16. Lisitsyn V. I., Matveev N. N., Saushkin V. V. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021; 875: 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012042>.
17. Lisitsyn V. I.; Matveev N. N. Entropy Production Using Ecological and Physiological Models of Stand Growth Dynamics as an Example. *Forests* 2022, 13: 1948. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111948>.
18. Nielsen S., Müller F., Marques J., Bastianoni S., Jørgensen S. Thermodynamics in Ecology—An Introductory Review. *Entropy*. 2020; 22: 820. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22080820>.
19. Harold E. Burkhart Modeling Forest Stand Dynamics, Growth and Yield *Forests*. 2021; 12: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12111553>.
20. Dubenok N. N., Lebedev A. V., Gostev V. V. (2023). Modeling of stem taper of Scotch pine in the Kostroma region. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*, Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 5-22 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>.
21. Stankova T. V. A dynamic whole-stand growth model, derived from allometric relationships. *Silva Fennica*. 2016; 50 (1): 1406. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.1406>.

22. Modeling of growth and development of spruce stands in the West Siberian South taiga plain forest region / P V. Mikhaylov, S. L. Shevelev, S. M. Sul'tson, S. V. Verkhovets, A. A. Goroshko. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 677 (2021) 052118 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/677/5/052118
23. Matveeva R. N., Bratilova N. P., Butorova O. F., Kolosovsky E. V., Svalova A. I. Siberian cedar in subordinate crops. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2020; 548: 052018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052018>.
24. Matveeva R. N. Izmenchivost' reproduktivnogo razvitiya polusibov plyusovy'x derev'ev Pinus sibirica Du Tour / R. N. Matveeva, Yu. E. Shherba, N. A. Shenmajer // Lesotexnicheskij zhurnal. 2023; 13 (49): 99-111. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/7>.
25. Levin S. V. E'kologo-biologicheskie osobennosti proizrastaniya kedra sibirskogo (Pinus sibirica du tour.) v usloviyax introdukcii voronezhskoj oblasti. Byulleten' gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada. 2022; 144: 25-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2022-144-25-32>.
26. Primenenie e'kologo-fiziologicheskogo modelirovaniya dlya opisaniya dinamiki rosta dubovy'x drevostoev / V. I. Lisicyan, N. N. Matveev, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova, S. V. Vnukova // Lesa Rossii: politika, promy'shlennost', nauka, obrazovanie : materialy' VIII Vserossijskoj nauchno-texnicheskoy kon-ferencii, 24-26 maya 2023 g. – Sankt-Peterburg, 2023: 283-286. (In Russ.)
27. Modelirovanie dinamiki rosta kedra sibirskogo (Pinus sibirica Du Tour) / V. I. Lisiysyn, N. N. Matveev, N.S. Kamalova, N.Y. Evsikova // Fizicheskie osnovy' sovremenny'x naukoemkix tehnolo-gij. Materialy' Mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminara. Voronezh, 2023, 31-38. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.58168/PBMT_31-38.
28. Lisitsyn, V. I. Opredelenie vozrasta biologicheskoy zrelosti v e'kologo-fiziologicheskoy mode-li dinamiki drevostoya / V. I. Lisicyan, T. P. Novikova // Lesa Rossii: politika, promy'shlennost', nauka, obrazovanie. SPb, 2023: 286-288. (In Russ.)
29. Lisitsyn V. I., Novikova T. P., Novikov A. I. Modelirovanie vozrasta biologicheskoy zrelosti osnovny'x i dubovy'x drevostoev // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoy akademii. 2023; 246: 6–21. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21>.
30. Tablicy i modeli xoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovny'x esoobrazuyushhix porod Se-vernoj Evrazii : normativno-spravochny'e materialy' / A. Z. Shvidenko, D. G. Shhepashhenko, S. Nil'son, Yu. I. Buluj. – 2-e izd., dop. M., 2008: 886. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/fqdwk>.
31. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy' dlya E'VM № 2020662105 RF. Program-ma rascheta dinamiki rosta drevostoev po e'kologo-fiziologicheskoy modeli, osnovannoy na termodinami-cheskom podxode: № 2020661370: zayavl. 01.10.2020: opubl. 08.10.2020; zayavitel' VSUFT. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/xwgoiw>.
32. Korzuxin M. D. Postroenie krivy'x xoda rosta drevostoev na osnove obobshhennoj modeli Berta-lanfi po danny'm gosudarstvennogo lesnogo reestra // Lesovedenie. 2019; 2: 105-114. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819020049>.
33. Jorgensen S.E. Thermodynamics and ecological modelling. Boca Raton, CRC Press, 2018: 384. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482278613>.
34. Ivetic V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetic et al. // Forestry Engineering Journal. 2019; 9 (2): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
35. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // Forests. 2021; 12 (2): 240. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.

Сведения об авторах

✉ Лисицын Виктор Иванович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,

ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: viktor-lisicyn@yandex.ru.

Новикова Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Новиков Артур Игоревич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru.

Information about the authors

✉ *Victor I. Lisitsyn* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, viktor-lisicyn@yandex.ru

Tatyana P. Novikova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Technologies and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Arthur I. Novikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Wood Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva St., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author