



Сравнительный анализ хвойных древостоев регионов Северной Евразии в рамках эколого-физиологической модели

Виктор И. Лисицын¹ ✉, viktor-lisicyn@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Николай Н. Матвеев¹, nmtv@vglta.vrn.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Наталья Ю. Евсикова¹, natalyaevsikova@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>

Нина С. Камалова¹, rcamel@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В настоящей работе проведен анализ расчетов динамики роста хвойных древостоев регионов Евразии с использованием разработанной ранее авторами эколого-физиологической модели (ЭФМ). Эта модель термодинамически обоснованна и содержит четыре параметра, которые определяются с помощью процедуры оптимизации и имеют, как правило, «эколого-физиологический» смысл. В модели в качестве эмпирических данных используются таблицы хода роста (ТХР) биопродуктивности насаждений. В отличие от ранних работ авторов, в которых для обоснования модели были использованы обобщенные данные биопродуктивности древостоев, в предлагаемой работе для исследования влияния географии произрастания хвойных древостоев на динамику роста применяются местные таблицы хода роста (ТХР) различных регионов. Всего рассмотрено 53 хвойных древостоя первого класса бонитета, из которых 25 ТХР естественных древостоев сосны (*Pinus sylvestris*), 18 ТХР естественных и культурных насаждений ели (*Picea abies*) и 10 ТХР естественных и культурных насаждений лиственницы (*Larix*). В рамках ЭФМ показано, что параметр модели, характеризующий удельную скорость расхода ресурса при росте деревьев, не зависит ни от географии региона, ни от породы древостоя, а является характеристикой бонитета насаждения. Тогда как второй параметр модели, выражающий связь площади поверхности древостоя с его биомассой, постоянен только в пределах данной породы, что указывает на принадлежность данного насаждения к определенной породе. То есть параметры эколого-физиологической модели не только имеют ясный «физический» смысл, но и являются обобщенными характеристиками древостоя, которые определяют и бонитет насаждения, и его породу. Из термодинамического обоснования применяемой ЭФМ следует обоснованность используемых параметров модели, которые, в свою очередь, дают термодинамическое обоснование широко применяемой в практике лесоведения бонитетной шкале.

Ключевые слова: эколого-физиологическая модель, параметры модели q и r , местные таблицы хода роста, бонитетная шкала, сосна обыкновенная, *Pinus Sylvestris* L., ель европейская, *Picea Abies* L., лиственница, *Larix*

Финансирование: исследование проведено в рамках работы по теме «Влияние условий произрастания древесной растительности на термодинамические характеристики древостоев», поддержанной локальным грантом ФГБОУ ВО ВГЛТУ в 2025 г.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи, членов Научно-технического Совета ФГБОУ ВО ВГЛТУ и лично проректора по науке и инновациям профессора С.С. Морковину за поддержку исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сравнительный анализ хвойных древостоев регионов Северной Евразии в рамках эколого-физиологической модели / В.И. Лисицын, Н.Н. Матвеев, Н.Ю. Евсикова, Н.С. Камалова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 146-161. – Библиогр.: с. 159-161 (15 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/9>.

Поступила 10.06.2025. *Пересмотрена* 07.10.2025. *Принята* 30.11.2025. *Опубликована онлайн* 26.12.2025.

Article

Comparative analysis of the Northern Eurasia regions coniferous forest stands within the framework of the ecological-physiological model

Victor I. Lisitsyn¹ ✉, viktor-lisicyn@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Nikolay N. Matveev¹, nmtv@vglta.vrn.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Natalia Yu. Evsikova¹, natalyaevsikova@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>

Nina S. Kamalova¹, rcamel@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

¹*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

Abstract

This paper analyzes estimates of coniferous forest growth dynamics in Eurasian regions using an ecological-physiological model (EPM) previously developed by the authors. This model is thermodynamically sound and contains four parameters determined through an optimization procedure and typically have an ecological-physiological meaning. The model utilizes growth progression tables (GPTs) of stand bioproductivity as empirical data. Unlike the authors' earlier studies, which used generalized stand bioproductivity data to validate the model, this paper utilizes local growth progression tables (GPTs) from various regions to study the influence of coniferous forest stand geography on growth dynamics. A total of 53 first-class coniferous stands were examined, including 25 natural pine (*Pinus sylvestris*) stands, 18 natural and cultivated spruce (*Picea abies*) stands, and 10 natural and cultivated larch (*Larix*) stands. The EFM demonstrated that the model parameter characterizing the specific rate of resource consumption during tree growth is independent of both regional geography and stand species, but is a characteristic of the stand's forest quality. The second model parameter, expressing the relationship between stand surface area and biomass, is constant only within a given species, indicating the stand's affiliation with a specific species. This means that the parameters of the ecological-physiological model not only have a clear "physical" meaning but also serve as generalized stand characteristics that determine both the stand's forest quality and its species. The thermodynamic justification of the applied EFM demonstrates the validity of the model parameters, which, in turn, provide a thermodynamic justification for the bonitet scale widely used in forestry practice.

Keywords: *ecological-physiological model, model parameters q and r , local growth tables, bonitet scale, Scots pine, *Pinus Sylvestris* L., Norway spruce, *Picea Abies* L., larch, *Larix**

Funding: the study was carried out as part of work on the topic "The influence of the conditions for the growth of wood vegetation on the thermodynamic characteristics of the tree stands", supported by the local grant of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov in 2025.

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of the article, members of the Scientific and Technical Council of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov and personally vice-rector for science and innovation of Professor S.S. Morkovina for research support.

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

For citation: Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Evsikova N.Yu., Kamalova N.S. (2025) Comparative analysis of the Northern Eurasia regions coniferous forest stands within the framework of the ecological-physiological model. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 146-161 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/9>.

Received 10.06.2025. **Revised** 07.10.2025. **Accepted** 30.11. 2025. **Published online** 26.12.2025.

Введение

Большое разнообразие отличающихся по теоретическому подходу и внутреннему содержанию существующих в настоящее время моделей роста древостоев можно разделить на две группы: эмпирические модели (ЭМ) и теоретические модели⁸. В теоретическом моделировании выделим особую группу – эколого-физиологические модели (ЭФМ) [1]. Выбор той или иной модели зависит от многих факторов: во-первых, от целей, поставленных перед исследователем; во-вторых, от требуемой точности воспроизведения эмпирических данных; в-третьих, от возможности прогнозировать динамику древостоя и мн. др.

Достоинством ЭМ моделей являются [2-4]:

- 1) простота использования для нужд практического лесоводства;
- 2) достаточно высокая точность воспроизведения эмпирических данных;
- 3) возможность прогноза развития данного древостоя в течение определенного временного интервала (порядка 20 лет, см. [5]);
- 4) возможность моделирования динамики древостоя после частичной гибели, вызванной прореживанием и т.д. [2, 6].

Достоинства ЭФМ следующие:

- 1) параметры модели q и g имеют ясный эколого-физиологический смысл;
- 2) значения параметров могут характеризовать вид древостоя, породу дерева, бонитет насаждения, тип растительности;

3) точность воспроизведения эмпирических данных у современных ЭФМ приблизительно равна точности ЭМ [5].

К недостаткам модели, которые затрудняют широкое использование ЭФМ в практическом лесоводстве можно отнести:

- а) необходимость использовать математический аппарат, применяемый для решения дифференциальных уравнений, владеть дифференциальным и интегральным исчислением;
- б) знакомство с элементами системного анализа для проведения процедуры оптимизации, в которой используются модели многокритериального принятия решений на основе принципов оптимальности⁹.

Однако эти недостатки скорее являются продолжением достоинств ЭФМ. Краткий обзор современного состояния использования ЭФМ можно найти в работе М Д Корзухина [7], где применялось уравнение Бергаланффи для построения кривых хода роста¹⁰.

В работах [8, 11] ЭФМ использовалась для древостоев, таблицы хода роста (ТХР) и биопродуктивности которых были обобщены А.З. Швиденко [10] до уровня крупных регионов. В таком случае невозможно учесть влияние на полученные параметры ЭФМ климатических особенностей и географического расположения областей произрастания древостоев. Поскольку результаты работы [11] привязываются к климату и географии регионов, было бы более корректным применение локальных (местных) таблиц, данные которых, в том числе и для биопродуктивности

⁸ Pretzsch H. Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model. Berlin: Springer-Verlag, 2009; XIX: 664. ISBN 978-3-642-14861-3.

⁹ Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 608 с.

¹⁰ Bertalanffy L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts. Braunschweig: Vieweg, 1953; 60.

насаждений, приведены в монографиях В.А. Усольцева¹¹ [12]. В этом случае важно получить не только значения параметров ЭФМ, но и исследовать их зависимость от конкретного региона, а также от укрупненных областей, содержащих мелкие регионы с близкими природными условиями.

Целью настоящей работы является доказательство инвариантности параметров модели q и r относительно географии регионов произрастания насаждений для хвойных древостоев первого бонитета.

Выбор первого бонитета обусловлен прежде всего тем фактом, что данный класс бонитета представлен практически во всех регионах Евразии для хвойных пород. Очень важной особенностью данной работы считаем нахождение общих характеристик древостоя в виде констант модели как для бонитета насаждения, так и для породы. Константы в моделировании имеют принципиальный характер¹² и важны при построении как ЭФМ, так и ЭМ. В качестве базовых исходных эмпирических данных в настоящей работе нами были использованы таблицы биологической продуктивности, полученные В.А. Усольцевым на основе локальных ТХР [12].

Материалы и методы

1. Принципы построения ТХР

В разработанной нами ЭФМ [1, 8, 9] актуальным является возраст древостоя t_{max} , при котором биомасса насаждения достигает максимального значения. Это время установления в лесной экосистеме стационарного процесса [1, 8, 11], который может быть достаточно продолжительным. Биологический смысл пика биомассы заключается в «климаксном» состоянии развития биологических объектов системы [13], когда баланс роста и отмирания стремится к нулю, а

ключевые элементы насаждения – деревья, как высшие вегетирующие растения, достигают возраста биологической зрелости (спелости) [14].

Параметры ЭФМ рассчитываются в результате процесса многокритериальной оптимизации¹³ с использованием стандартного критерия Нэша–Сатклиффа¹⁴ с учетом минимума относительного отклонения эмпирических значений от рассчитанных для всего временного интервала, который приведен для них в ТХР. При этом в процессе оптимизации необходимо разделять варьируемые параметры модели на остающиеся неизменными (константами) и на изменяемые переменные.

Следует особо остановиться на принципах работы бонитетной шкалы и принципах построения ТХР. Наши соображения следующие:

- наиболее точным, как утверждается в практическом руководстве по таксации, является исторический метод построения ТХР, но он, как правило, не используется [15], так как лес растет долго по сравнению с отрезком времени, начиная с которого проводятся регулярные таксационные измерения; реально применяют другие методы построения ТХР, к которым относятся метод указательных насаждений (аналитический) Гартинга, метод полосок (статистический) Баура, метод повторных пересчетов (комбинированный) Гейера, метод ЦНИИЛХ и др. Каждый из перечисленных методов имеет как положительные стороны, так и недостатки. Применение того или иного метода зависит от целей исследования, квалификации исследователя, имеющихся у него ресурсов и т.д.

Логично предположить, что теоретическим обоснованием методов построения ТХР является эргодическая гипотеза, согласно которой среднее

¹¹Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 762 с. – URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3302>.

¹²Рогозин М.В., Разин Г.С. Модели динамики и моделирование развития древостоев // Сибирский лесной журнал. – 2015. – № 2. – С. 55-70. – DOI: 10.15372/sjfs20150205.

¹³Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 608 с.

¹⁴Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. J. Hydrology. 1970; 10 (3): 282-290. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

значение физической величины по времени равняется среднему значению по ансамблю. Строго говоря, эргодическая гипотеза справедлива для замкнутых систем¹⁵, физические величины в которых могут быть описаны микроканоническим распределением, точнее микроканоническим для изолированной системы, каноническим или большим каноническим для открытой системы. Безусловно, эргодическую гипотезу нельзя использовать для объяснения процессов, происходящих в сложных лесных экосистемах, но если достаточно длительное время поддерживается стационарный режим [7], то гипотеза может качественно пояснить основные моменты построения ТХР, тогда исторический метод будет представлять собой усреднение физических величин (таксационных показателей) по времени, тогда как любой из альтернативных методов претендует на среднее значение физической величины (таксационного показателя) по ансамблю. Составление ТХР производится в большинстве случаев в рамках бонитетной шкалы, которой мы придерживаемся в данной работе. При этом не будем вдаваться в подробности методов получения локальных ТХР, которые были использованы В.А. Усольцевым для расчета таблиц биопродуктивности соответствующих регионов. Нами были взяты данные биопродуктивности для 12 естественных древостоев сосны (*Pinus sylvestris*), 8 естественных и культурных насаждений ели (*Picea abies*) и 7 естественных и культурных насаждений лиственницы (*Larix*).

2. Основные положения ЭФМ

Прежде, чем привести результаты расчетов характеристик ЭФМ, опишем основные моменты ее получения [1, 9]. Как уже указывалось выше, основой модели является установление времени достижения максимального значения биомассы насаждения t_{max} . Иногда в указанных выше монографиях данные о t_{max} в ТХР отсутствовали. В таких случаях значения t_{max} были получены нами квадратичной экстраполяцией данных о самых

больших показателях биомассы при соответствующих значениях времени, так как они имели вид функции от времени, которая стремится к максимуму. Экстраполяция считается обоснованной, если она дает значение функции, выходящее за пределы экстраполирования на величину порядка временного «шага». Мы сочли возможным распространить экстраполяцию до трех временных шагов. Эти древостои в таблицах отмечены (*) и приведены в качестве примеров, в которых наблюдается инвариантность параметров модели q и r относительно разных регионов произрастания. Параметры модели определяются ниже.

- Среднее значение биомассы одного дерева m считается по формуле $m = M / N$, где M и N – биомасса древостоя и число деревьев на гектар в один и тот же момент времени, соответственно. Для расчета биомассы отдельного дерева используется балансовое уравнение Берталанффи¹⁶:

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

В уравнении (1) f – удельная скорость поглощения ресурса; g – удельная скорость расхода ресурса; g и q – аллотропические параметры модели, которые выражают связь биомассы с поверхностью особи. Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$m(t) = m_{\infty}(1 + b \exp(-at))^p, \quad (2)$$

где $b = \left(\frac{m_0}{m_{\infty}}\right)^{1-q} - 1$; $a = r(1 - q)$; $p = 1/(1 - q)$.

Для оценки числа деревьев на гектар нами было получено следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN(t)}{dt} = (f_1 g_1 m_1^{q_1 - 1} - r_1)N, \quad (3)$$

где f_1 , g_1 , q_1 , r_1 – параметры, имеющие смысл, аналогичный соответствующим параметрам уравнения (1); m_1 – функция, зависящая от времени и удовлетворяющая уравнению (1) с измененными параметрами в (3). Решение уравнения (3) имеет вид:

¹⁵ Математическая энциклопедия: Гл. ред. И.М. Виноградов, Т. 5. – Москва: Советская энциклопедия, 1984. – С. 1011.

¹⁶ Bertalanffy L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts. Braunschweig: Vieweg, 1953; 60.

- $N(t) = N_0 \frac{(1+b_1)^{p_1 t}}{(1+b_1 \exp(-a_1 t))^{p_1}}, \quad (4)$
- где $b_1 = \left(\frac{N_\infty}{N_0}\right) - 1; a_1 = r_1(1 - q_1); p_1 = 1/(1 - q_1)$.

Параметры модели b_1 и b определяются из начальных (m_0, N_0) и конечных значений (m_∞, N_∞). Начальные значения (m_0, N_0), согласно [3], берутся из ТХР, а конечные значения (m_∞, N_∞) подлежат определению в результате процедуры оптимизации. По этой же процедуре находятся и значения параметров q и r . В результате мы имеем 4 независимых параметра для определения функций $m(t)$ и $N(t)$.

Оптимизация в данной работе выполняется в несколько этапов. На первом этапе неизвестные параметры разбиваются на два уровня: а) q и r , б) (m_∞, N_∞). Далее с

помощью критерия Нэша-Сатклиффа¹⁷ M_m, M_N, M_M биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар и биомассы древостоя в целом, соответственно, определяются «овражный» тип функций $M_m(q,r)$ и $M_N(q,r)$ при фиксированных значениях второй группы параметров (m_∞, N_∞). В качестве конкретного примера приводим расчеты, используя ТХР максимально продуктивных сосняков Воронежской обл. и др. обл. ЦЧР. Задаем уровень значений функций $M_m(q,r)$ и $M_N(q,r)$ равным 0.995 и определяем значения параметра q на «верхней» qN_1 и нижней стороне qN_2 оврага для критерия $M_N(q,r)$ и qM_1 и qM_2 для критерия $M_m(q,r)$, соответственно, при конкретном значении параметра r (см. Табл. 1).

Таблица 1

Значения параметров q и r при уровне функций $M_m(q,r)$ и $M_N(q,r)$ равном 0.995

Table 1

Values of q and r parameters at the function levels $M_m(q,r)$ and $M_N(q,r)$ are equal to 0.995

qN_1	qN_2	qM_1	qM_2	r
0.6477	0.6177	0.6444	0.6345	0.03
0.7122	0.6845	0.7094	0.6973	0.04
0.7513	0.7316	0.75292	0.7417	0.05
0.78858	0.7662	0.7845	0.77471	0.06
0.8132	0.7929	0.8087	0.80016	0.07

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

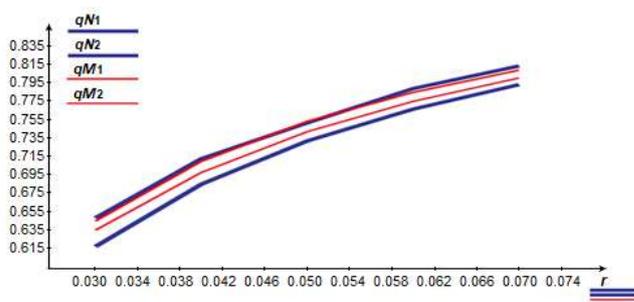


Рисунок 1. Форма «оврага» при уровне критериев 0.995. Красные кривые – «овраг» для критерия M_m , синие – для критерия M_N

Figure 1. The shape of the “ravine” at the criterion level of 0.995. Red curves are the “ravine” for the M_m criterion, blue ones are for the M_N criterion.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author’s composition

¹⁷ Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of

principles. J. Hydrology. 1970; 10 (3): 282-290. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

На рисунке 1 приведена форма «оврага» для отыскания оптимальных значений параметров модели. Видно, что «овраги» идут подобно и красный «овраг» содержится в синем. Это говорит об одинаковом влиянии соответствующих критериев на результат оптимизации. На втором этапе в процесс оптимизации включается вторая пара параметров (m_{∞}, N_{∞}). Для этих параметров существует очевидное ограничение $M_{\infty} < M(t_{\max})$. В данном случае M – общая биомасса древостоя в конкретный момент времени Овражный тип предопределил метод оптимизации как метод случайного поиска. Для первой группы параметров были получены значения $q = 0.748$ и $r = 0.05$. Значения находились по следующему алгоритму: для значений m_{∞} и N_{∞} определялся уровень $M_{\infty} = m_{\infty}$ и N_{∞} , равный приблизительно 270 т/га. Изменяя число деревьев на гектар (для него также существует естественное ограничение $N < N(t_{\max})$ и биомассу отдельного дерева, произведение которых нам приблизительно известны, находим параметры m_{∞} и N_{∞} , которые соответствуют максимальному значению критерия Нэша-Сатклиффа для общей биомассы насаждения M_M . Результаты этих расчетов приведены в таблице 2. Определив на первых двух этапах значения параметров модели, на третьем этапе находится точность полученных параметров, используя

многокритериальный анализ, применяемый в системном анализе¹⁸. Мы использовали для определения точности полученных значений параметров модели $q = 0.748$ и $r = 0.05$ шесть критериев (метрик качества [5]). (Для второй пары параметров процедура определения точности не проводилась). Три критерия Нэша-Сатклиффа M_m, M_N, M_M биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар и биомассы древостоя в целом, соответственно, три величины среднего значения абсолютной ошибки в процентах $\Delta N_{cp}, \Delta M_{cp}, \Delta m_{cp}$. Вес каждого критерия определяется по возрастанию критерия Нэша-Сатклиффа для первых трех критериев и по убыванию среднего значения абсолютной ошибки для следующих трех критериев. Точность определения $\varepsilon_1 = 0.02$ для параметра q и $\varepsilon_2 = 0.002$ для параметра r . Тогда для сравнения мы включаем 9 пар значений параметра. Шкала весов определяется из интервала 1-9 для каждого критерия. Оптимальной считается пара значений параметров, получившая наибольший суммарный вес. Соответствующие расчеты приведены в таблице 3. Таким образом, по итогам многокритериальной процедуры оптимизации (см. Табл. 3) получены следующие значения параметров: $q = 0.748$ с точностью $\varepsilon_1 = 0.02$, $r = 0.05$ с точностью $\varepsilon_2 = 0.002$, $m_{\infty} = 1.43$ тонны, $N_{\infty} = 190$ л/га.

Таблица 2

Зависимость критерия Нэша-Сатклиффа от второй группы параметров (m_{∞}, N_{∞})

Table 2

Dependence of the Nash-Sutcliffe criterion on the second group of parameters (m_{∞}, N_{∞})

M_M	m_{∞} , тонн	N_{∞} , л/га	M_{∞} , тонн/га
0.9855	1.674	160	267.8
0.987	1.59	170	270.3
0.988	1.5	180	270.0
0.990	1.43	190	271.7
0.989	1.358	200	271.6
0.988	1.298	210	272.58

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

¹⁸ Рыков А. С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. —

Определение оптимальной пары параметров с помощью многокритериальной процедуры оптимизации

Table 3

Determining the optimal pair of parameters using a multi-criteria optimization procedure

N п/ п	q	r	M _N	Вес с M _N	M _M	Вес с M _M	M _m	Вес с M _m	ΔN _c P	Вес ΔN _c P	ΔM _c P	Вес ΔM _c P	Δm _c P	Вес Δm _c P	Σ вес
1	0.74 8	0.05	0.999 4	7	0.990	5	0.999 5	9	2.18	7	4.49	5	3.05	9	42
2	0.75	0.05	0.998 9	5	0.989 1	6	0.998 5	7	2.90	6	4.22	6	3.56	7	37
3	0.74 6	0.05	0.999 7	8.5	0.986 6	4	0.999 3	8	1.71	9	4.77	4	3.46	8	41. 5
4	0.74 8	0.04 8	0.995 6	2	0.990 7	8	0.990 1	3	6.28	2	3.85	8	5.23	5	28
5	0.74 8	0.05 2	0.999 3	6	0.984 6	2	0.993 1	4	3.22	5	5.12	2	7.10	2	21
6	0.75	0.05 2	0.999 7	8.5	0.986 0	3	9965	6	2.14	8	4.84	3	5.58	4	32. 5
7	0.75	0.04 8	0.993 8	1	0.991 7	9	0.985 1	1	7.62	1	3.58	9	5.97	3	24
8	0.74 6	0.04 8	0.997 0	3	0.989 6	7	0.994 0	5	4.98	3	4.12	7	4.69	6	31
9	0.74 6	0.05 2	0.998 7	4	0.983 2	1	0.988 4	2	4.34	4	5.40	1	8.62	1	13

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных расчетов параметров ЭФМ сведены в Таблицы 4 – 6. В Таблице 4 представлены показатели для естественных сосняков Центра Европейской части России, Белоруссии и некоторых стран Западной Европы, Урала, Сибирских регионов РФ и регионов Казахстана. Показатели для естественных и культурных насаждений ели регионов России и Казахстана приводятся в Таблице 5, для естественных лиственничников регионов России – в Таблице 6.

Во 2 – 11 столбцах всех таблиц последовательно указаны: а) регион произрастания насаждения; б) тип древостоя сосны, автор ТХР и год получения ТХР (эти сведения полностью соответствуют данным монографии [8]); в) значения

варьируемых параметров m_{∞} , N_{∞} , q , r , возраст древостоя t_{max} , при котором достигается максимальная биомасса насаждения, значения критерия Нэша-Сатклиффа¹⁹ M_m , M_N , M_M для рассчитанных значений биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар и биомассы древостоя в целом, соответственно.

В столбцах с четвертого по седьмой всех таблиц приведены полученные в процессе оптимизации значения варьируемых параметров ЭФМ: q – аллотропический параметр, позволяющий выразить площадь насаждения через биомассу; r – удельная скорость расхода ресурса; m_{∞} – биомасса среднего дерева; N_{∞} – число деревьев на гектар. Значения параметров m_{∞} и N_{∞} приняты как предельные для данного древостоя. Они изменяются в достаточно большом интервале для разных

¹⁹ Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of

principles. J. Hydrology. 1970; 10 (3): 282-290. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

насаждений данного бонитета, как, впрочем, и соответствующие им начальные значения, которые берутся из ТХР. Значения параметров q и r , напротив, демонстрируют постоянство как в пределах породы (параметр q), так и в пределах данного бонитета (параметр r). Отсюда делаем важный вывод, что определяющий связь биомассы насаждения и площади поверхности параметр q , может являться характеристикой породы древостоя, а параметр r может претендовать на характеристику бонитета насаждения. Именно, в этом проявляется основное достоинство эколого-физиологической модели, параметры которой не только имеют ясный физический смысл, но и содержат обобщенный смысл в качестве характерных признаков древостоя.

В восьмом столбце таблиц даны значения времени древостоя t_{max} , при котором биомасса насаждения достигают максимального значения. Они очень различаются по величине, и зачастую в процессе аппроксимации выходят за пределы интервала значений, которые даны в ТХР. Если значения t_{max} превышают порядок двух десятков лет,

то точность расчетов снижается, особенно для величины общей биомассы M (см. критерий, Нэша-Сатклиффа, приведенный в последнем столбце Таблиц 4 – 6).

Столбцы с девятого по одиннадцатый несут информацию о значениях критерия Нэша-Сатклиффа, который является одним из критериев оптимальности соответствия рассчитанных значений биомассы отдельного дерева m , числа деревьев на гектар N и общей биомассы древостоя M . Кроме того, среднее абсолютное отклонение рассчитанных значений биомассы отдельного дерева m , числа деревьев на гектар N и общей биомассы древостоя M от соответствующих эмпирического, приведенных в ТХР. Как известно, близость критерия Нэша-Сатклиффа к 1 означает оптимальное согласие модели с экспериментом. Значение критерия в 0.99 дает для относительного отклонения величину, не превышающую 5 % для всего временного интервала изменения m , N и M от начального до максимального, представленного в соответствующей ТХР (см. также таблицу 3).

Таблица 4

Сосновые естественные насаждения. Результаты расчетов параметров ЭФМ и значения критерия Нэша-Сатклиффа

Table 4

Natural Pine Plantations. Results of Calculations of the EFM Parameters and the Values of the Nash-Sutcliffe Criterion

№ п/п Item No.	Регион Region	Тип древостоя, автор ТХР, год получения Type of tree stand, author of GCT, year of receipt	m_{∞} , тонн m_{∞} , tons	N_{∞} , 1/га N_{∞} , 1/ha	q	r	t_{max} , лет t_{max} , years	M_m	M_N	M_M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Московская обл. Moscow region	(*)Сомкнутые сосняки, Козловский, 1967 Closed pine forests, Kozlovsky, 1967	1.71	180	0.75	0.05	162	0.989	0.990	0.969
2	Воронежская обл. и др. обл. ЦЧР Voronezh region and other regions of the Central Chernozem region	Максимально продуктивные сосняки, Кирюков, 1982 Maximum productive pine forests, Kiryukov, 1982	1.43	1970	0.748	0.05	140	0.999	0.999	0.990

Естественные науки и лес

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	Белоруссия Belarus	Модальные сосняки, орликовый и черничные типы, Багинский, 1984 Modal pine forests, orlikovoe and bilberry types, Baginsky, 1984	2.42	75	0.75	0,05	135	0.998	0.992	0.997
4	Европейская Россия, Южная тайга European Russia, Southern Taiga	Смешанные леса, модальные сосняки, Швиденко и др., 1996 Mixed forests, modal pine forests, Shvidenko et al., 1996	2.3	72	0.75	0.05	140	0.999	0.996	0.998
5	Швеция Sweden	Нормальные сосняки, Маас, 1911, цит. по Орлову, 1928 Normal pine forests, Maas, 1911, cited by Orlov, 1928	1.05	280	0.75	0.045	180	0.979	0.992	0.965
6	Северо-Германская низменность North German Plain	Нормальные сосняки, Schwappach, 1896, цит. по Орлову, 1928 Normal pine forests, Schwappach, 1896, cited by Orlov, 1928	3.5	164	0.8	0.05	172	0.989	0.996	0.994
7	Германия Germany	Нормальные сосняки при умеренном разреживании, Wiedemann, Schober, 1957 Normal pine forests under moderate thinning, Wiedemann, Schober, 1957	2.4	101	0.75	0.05	143	0.996	0.988	0.987
8	Средний Урал Middle Urals	Сосняки припышминских боров, Чудников, Козловский и др., 1955 Pine forests of the Pyshma pine forests, Chudnikov, Kozlovsky et al., 1955	1.3	315	0.75	0.05	150	0.977	0.999	0.978
9	Средний Урал Middle Urals	(*)Сомкнутые сосняки, Милованович, 1967 Closed pine forests, Milovanovic, 1967	1.7	175	0.75	0.05	281	0.992	0.999	0.992
10	Казахстан Kazakhstan	Казахский мелкосопочник, нормальные сосняки, Швиденко, 1996 Kazakh low hills, normal pine forests, Shvidenko, 1996	1.36	250	0.75	0.05	180	0.980	0.966	0.977

Естественные науки и лес

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	Западная Сибирь Western Siberia	Средняя и южная тайга, нормальные сосняки, Швиденко, 1996 Middle and southern taiga, normal pine forests, Shvidenko, 1996	1.62	165	0.75	0.05	190	0.993	0.982	0.982
12	Казахстанское Прииртышье Kazakhstan's Irtysh region	Ленточные боры, нормальные сосняки, Швиденко, 1996 Ribbon pine forests, normal pine forests, Shvidenko, 1996	0.93	303	0.7	0.051	160	0.967	0.982	0.990

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 5

Еловые естественные и культурные насаждения. Результаты расчетов параметров ЭФМ и значения критерия Нэша-Сатклиффа для регионов России, Белоруссии и Киргизии

Table 5

Spruce Natural and Cultivated Plantations. Results of Calculations of the EFM Parameters and the Values of the Nash-Sutcliffe Criterion for the Regions of Russia, Belarus and Kyrgyzstan

№ п/п Item No.	Регион Region	Тип древостоя, автор ТХР, год получения Type of tree stand, author of GCT, year of receipt	m_{∞} , тонн m_{∞} , tons	N_{∞} , 1/га N_{∞} , 1/ha	q	r	t_{max} , лет t_{max} , years	M_m	M_N	M_M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Северо-Восток Европейской России (Коми) North-East of European Russia (Komi)	Сомкнутые смешанные ельники с пихтой и березой, 1967 Closed mixed spruce forests with fir and birch, 1967	0.75	310	0.68	0.05	114	0.992	0.993	0.990
2	Северный Тянь-Шань Northern Tien Shan	Сомкнутые древостои ели Шренка, Харитонов, 1987 Closed stands of Shrenk's spruce, Kharitonov, 1987	1.49	383	0.68	0.049	250	0.995	0.996	0.931
3	Московская обл. Moscow region	(*) Культуры ели, Козловский, Павлов, 1967 Spruce cultures, Kozlovsky, Pavlov, 1967	0.75	385	0.68	0.05	116	0.980	0.976	0.972

Естественные науки и лес

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	Центральные и Юго-Восточные районы Европейской России Central and South-Eastern regions of European Russia	(*) Культуры ели, Моисеев, 1971 Spruce cultures, Moiseev, 1971	0.6	523	0.68	0.05	110	0.996	0.990	0.976
5	Белоруссия Belarus	Модальные ельники, черничный и орликовый типы, Багинский, 1984 Modal spruce forests, blueberry and orlik types, Baginsky, 1984	1.38	140	0.68	0.05	130	0.992	0.994	0.983
6	Ленинградская обл. Leningrad region	Модальные ельники, кисличный тип, Третьяков и др., 1965 Modal spruce forests, wood sorrel type, Tretyakov et al., 1965	0.76	170	0.68	0.05	83	0.984	0.999	0.941
7	Среднее Поволжье Middle Volga region	(*) Смешанные сомкнутые ельники, Моисеев, 1971 Mixed closed spruce forests, Moiseev, 1971	1.2	240	0.68	0.05	151	0.999	0.999	0.936
8	Белоруссия Belarus	(*) Нормальные ельники, Багинский, Моисеенко, 1984 Normal spruce forests, Baginsky, Moiseenko, 1984	0.9	365	0.68	0.05	178	0.993	0.997	0.935

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 6

Лиственничные естественные и культурные насаждения. Результаты расчетов параметров ЭФМ и значения критерия Нэша-Сатклиффа для регионов Центральной России и Европы

Table 6

Natural and Cultivated Larch Stands. Results of Calculations of the EFM Parameters and the Values of the Nash-Sutcliffe Criterion for the Regions of Central Russia and Europe

№ п/п Item No.	Регион Region	Тип древостоя, автор ТХР, год получения Type of tree stand, author of GCT, year of receipt	m_{∞} , тонн m_{∞} , tons	N_{∞} , 1/га N_{∞} , 1/ha	q	r	t_{max} , лет t_{max} , years	M_m	M_N	M_M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Естественные науки и лес

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Дальний Восток Far East	(*)Нормальные лиственничники, Корякин и др., 1982, густота 3 Normal larch forests, Koryakin et al., 1982, density 3	2.10	205	0.73	0,05	137	0.992	0.995	0.959
2	Хабаровский край Khabarovsk Krai	Модальные лиственничники, Корякин и др., 1982 Modal larch forests, Koryakin et al., 1982	1.87	112	0.73	0.05	186	0.990	0.990	0.991
3	Южный район Красноярского края Southern region of Krasnoyarsk Krai	Модальные лиственничники, Фалалеев, Поляков, 1969 Modal larch forests, Falaleev, Polyakov, 1969	1.6	235	0.75	0.05	202	0.996	0.993	0.996
4	Западные Саяны Сомкнутые Western Sayan Mountains Closed	(*) Сомкнутые лиственничники, В/О «Леспроект», 1975 Closed larch forests, All-Union Association "Lesproekt", 1975	1.82	225	0.73	0.05	221	0.993	0.988	0.967
5	Архангельская область Arkhangelsk region	Сомкнутые чистые естественные лиственничники, Молчанов, 1971 Closed pure natural larch forests, Molchanov, 1971	1.45	406	0.74	0.03	226	0.993	0.995	0.987
6	Всеобщие для Сибири General for Siberia	Нормальные лиственничники, Фалалеев, 1985 Normal larch forests, Falaleev, 1985	1.43	360	0.73	0.05	283	0.990	0.945	0.975
7	Река Ангара, среднее и южное течение Angara River, middle and southern reaches	Модальные лиственничники, Фалалеев, Поляков, 1969 Modal larch forests, Falaleev, Polyakov, 1969	1.89	208	0.74	0.05	222	0.997	0.995	0.953

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Выводы

Анализируя данные расчетов, можно сделать следующие выводы:

1. ЭФМ, может быть применена для описания динамики хода роста, которая представлена местными ТХР.

2. Географическое положение регионов и типология леса практически не оказывают влияния на значения параметров ЭФМ g и q .

3. Использование ЭФМ для расчета характеристик ТХР установило, что параметр g не зависит от типологии леса и географического расположения региона и может характеризоваться как признак

бонитета насаждения, если будут проведены исследования для других бонитетов. Можно с известной долей вероятности утверждать, что результаты, полученные непосредственно при использовании ЭФМ, также термодинамически обоснованны.

4. Отсутствие зависимости в поведении параметров m_{∞} и N_{∞} от региона вполне объяснимо, так как экспериментальные данные о биомассе насаждений и числе деревьев на гектар для любого

бонитета, в том числе и для первого, сильно отличаются в разных регионах.

Необходимо продолжить исследования в выбранном направлении для подтверждения полученных закономерностей для других, прежде всего лиственных, пород, имеющих большое значение в решении многих проблем как лесоводческого характера, так и общеэкологического (например, карбоновой проблемы).

Список литературы

1. Лисицын В.И., Драпалюк М.В., Матвеев Н.Н. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – Т. 3 (387). – С. 213-225. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>.
2. Kazimirović M., Stajić B., Petrović N., Ljubičić J., Košanin O., Hanewinkel M., Sperlich D. Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands: explicit mapping of site index classification in Serbia. *Annals of Forest Science*. 2024; 81: 15. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01231-0>.
3. Kuehne C., McLean J.P., Maleki K., Antón-Fernández C., Astrup R. A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned even-aged Scots pine forests in Norway. *Silva Fennica*. 2022; 56 (1): 10627. – DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10627>.
4. Maleki K., Astrup R., Kuehne C., McLean J.P., Antón-Fernández C. Stand-level growth models for long-term projections of the main species groups in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2022; 37(2): 130–143. – DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2056632>.
5. Лебедев А.В. Динамическая модель роста и производительности сосновых древостоев (*Pinus sylvestris* L.) Унженской низменности // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3 (55). – С. 127-151. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
6. Li C., Barclay H., Huang S., Roitberg B., Lalonde R., Xu W., Chen Y. Modelling the stand dynamics after a thinning induced partial mortality: A compensatory growth perspective. *Front. Plant Sci*. 2022; 13: 1044637. – DOI: [10.3389/fpls.2022.1044637](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1044637).
7. Корзухин М.Д. Построение кривых хода роста древостоев на основе обобщенной модели Бергаланфи по данным государственного лесного реестра. *Лесоведение*, 2019, №2 с.105-114.
8. 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>.
9. Лисицын В.И., Новикова Т.П., Новиков А.И. Динамика роста хвойных древостоев (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H. Karst и *Pinus sibirica* Du Tour): модифицированная модель // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 2 (54). – С. 54-69. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.
10. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильсон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы. – 2-е изд., доп. – Москва : Федеральное агентство лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, 2008. – 886 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/fqdwk>.
11. Лисицын В.И. Расчет эксергии хвойных (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus sibirica* Du Tour) и лиственных (*Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth) древостоев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3 (55). – С. 23-36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2>.
12. Усольцев В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Электронная база данных. 4-е дополненное издание.

Монография. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-5-8295-0862-3. – URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.

13. Erb K.-H., Gingrich S. Biomass – critical limits to a vital resource. *One Earth*. 2022; 5 (1): 7-9. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.014>.
14. Lisitsyn V.I., Novikova T.P., Novikov A.I. Modeling the biological maturity age of pine and oak forest stands. *Izv. Saint-Peterburg Forest. Tech. Akad.* 2023; 246: 6-23. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21..>
15. Сальникова И.С. и др. Таксация леса. Ход роста насаждений : учебное пособие. – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – 130 с.

References

1. Lisitsyn V.I., Drapalyuk M.V., Matveev N.N. Modelirovanie dinamiki hoda rosta drevostoev na osnove termodinamicheskogo podhoda. [Modeling the dynamics of forest stand growth based on the thermodynamic approach]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2022; 3 (387): 213-225. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>.
2. Kazimirović M., Stajić B., Petrović N., Ljubičić J., Košanin O., Hanewinkel M., Sperlich D. Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands: explicit mapping of site index classification in Serbia. *Annals of Forest Science*. 2024; 81: 15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01231-0>.
3. Kuehne C., McLean J.P., Maleki K., Antón-Fernández C., Astrup R. A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned even-aged Scots pine forests in Norway. *Silva Fennica*. 2022; 56 (1): 10627. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10627>.
4. Maleki K., Astrup R., Kuehne C., McLean J.P., Antón-Fernández C. Stand-level growth models for long-term projections of the main species groups in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2022; 37(2): 130–143. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2056632>.
5. Lebedev A.V. Dinamicheskaya model' rosta i proizvoditel'nosti sosnovykh drevostoev (*Pinus sylvestris* L.) Unzhenskoy nizmennosti. [Dynamic model of growth and productivity of pine stands (*Pinus sylvestris* L.) of the Unzha Lowland]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2024; 14, 3 (55): 127-151. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
6. Li C., Barclay H., Huang S., Roitberg B., Lalonde R., Xu W., Chen Y. Modelling the stand dynamics after a thinning induced partial mortality: A compensatory growth perspective. *Front. Plant Sci*. 2022; 13: 1044637. DOI: 10.3389/fpls.2022.1044637.
7. Korzukhin M.D. Construction of growth curves of forest stands based on the generalized von Bertalanffy model using state forest register data. *Lesovedenie*, 2019, no. 2, pp. 105-114.
8. 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>.
9. Lisitsyn V.I., Novikova T.P., Novikov A.I. Dinamika rosta hvojnnykh drevostoev (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H. Karst i *Pinus sibirica* Du Tour): modifitsirovannaya model. [Dynamics of coniferous forest stands growth (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H. Karst and *Pinus sibirica* Du Tour): a modified model]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2024; 14, 2 (54): 54-69. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.
10. Shvidenko A.Z., Shechepashchenko D.G., Nil'son S., Buluj Yu.I. Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnykh lesoobrazuyushchih porod Severnoj Evrazii : normativno-spravochnye materialy. [Tables and models of the growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia: normative and reference materials.]. 2nd ed., suppl. Moscow: Federal Forestry Agency of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 2008: 886. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/fqdwk>.
11. Lisitsyn V.I. Raschet eksergii hvojnnykh (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus sibirica* Du Tour) i listvennykh (*Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth) drevostoev. [Calculation of exergy of coniferous (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H. Karst., *Pinus sibirica* Du Tour) and deciduous (*Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth) stands]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*

- = Forestry Engineering Journal. 2024; 14, 3 (55): 23-36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2>.
12. Usol'cev V.A. Biomassa i pervichnaya produkciya lesov Evrazii. [Biomass and Primary Production of Eurasian Forests]. Electronic Database. 4th Supplemented Edition. Monograph. Ekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forest Engineering University, 2023. (In Russ.). 1 electronic optical disk (CD-ROM). ISBN 978-5-8295-0862-3. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
 13. Erb K.-H., Gingrich S. Biomass – critical limits to a vital resource. *One Earth*. 2022; 5 (1): 7-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.014>.
 14. Lisitsyn V.I., Novikova T.P., Novikov A.I. Modeling the biological maturity age of pine and oak forest stands. *Izv. Saint-Peterburg Forest. Tech. Akad.* 2023; 246: 6-23. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21>.
 15. Salnikova I.S. et al. Taksaciya lesa. Hod rosta nasazhdenij. [Forest taxation. Growth progress of plantations]. Teaching aid. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural State Forest Engineering University. Yekaterinburg: USFEU, 2020: 130. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ *Лисицын Виктор Иванович* – кандидат ф.-м. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: viktor-lisicyn@yandex.ru.

Матвеев Николай Николаевич – доктор ф.-м. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>, e-mail: nmtv@vglta.vrn.ru.

Евсикова Наталья Юрьевна – кандидат ф.-м. наук, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: natalyaevsikova@mail.ru.

Камалова Нина Сергеевна – кандидат ф.-м. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, e-mail: rcamel@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Victor I. Lisitsyn* – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Professor of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: viktor-lisicyn@yandex.ru.

Nikolay N. Matveev – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>, e-mail: nmtv@vglta.vrn.ru.

Natalia Yu. Evsikova – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: natalyaevsikova@mail.ru.

Nina S. Kamalova – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, e-mail: rcamel@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author