

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2>

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



**Расчет эксергии хвойных (*Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst.,
Pinus sibirica Du Tour) и лиственных (*Quercus robur* L., *Betula pendula* Roth)
древостоев**

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

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

Эксергия была введена в качестве определителя состояния, структуры и функции экосистемы. Эту величину можно представить в двух ипостасях: первая – энергия, накопленная в экосистеме, вторая – ее деградация и образование энтропии. В настоящее время понятие эксергии в экологии используется для переопределения дарвиновского принципа «выживания сильнейших» в «экологическую термодинамику», согласно которому самая приспособленная экосистема способна использовать и сохранять потоки энергии и материалов наиболее эффективным образом. Возникает необходимость адекватно рассчитывать эксергию экосистем, так как информация об этой характеристике позволяет не только управлять экосистемами в ближайшей перспективе, но и прогнозировать возможности экосистем в противостоянии с современными угрозами их целостности и адаптации системам к этим вызовам. Важность практического расчета эксергии в связи с вышесказанным не подлежит сомнению. Наряду с известной практикой расчета эксергии живых организмов, использующих генную структуру, необходимо иметь альтернативные способы расчета эксергии. В работе предлагается альтернативный метод расчета эксергии лесных экосистем, который содержит как элементы традиционного подхода к расчету эксергии, так и новые положения, связанные с использованием эколого-физиологических моделей динамики роста древостоев.

Ключевые слова: эксергия, плотность энтропии, производство и поток энтропии, модель динамики древостоев, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., ель европейская, *Picea abies* L., сосна кедровая сибирская, *Pinus sibirica* Du Tour, *Quercus robur* L., дуб черешчатый, *Betula pendula* Roth, береза повислая

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

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: 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 / В. И. Лисицын // Лесотехнический журнал. – 2024 – Т. 14. – № 3 (55). – С. 23–36. – Библиогр.: с. 33–36 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2>.

.....

Поступила: 27.08.2024. **Пересмотрена** 15.09.2024. **Принята:** 18.09.2024. **Опубликована онлайн:** 11.11.2024.

Article

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

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

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

Abstract

Exergy was introduced as a determinant of the state, structure and function of an ecosystem. This value can be represented in two hypostases: the first is the energy stored in the ecosystem, the second is its degradation and entropy formation. Currently, the concept of exergy in ecology is used to redefine the Darwinian principle of "survival of the fittest" into "ecological thermodynamics", according to which the most adapted ecosystem is able to use and conserve flows of energy and materials in the most efficient way. There is a need to adequately calculate the exergy of ecosystems, as information on this characteristic allows not only to manage ecosystems in the short term, but also to predict the capacity of ecosystems to withstand current threats to their integrity and adapt systems to these challenges. The importance of practical calculation of exergy in connection with the above is beyond doubt. Along with the known practice of calculating the exergy of living organisms using gene structure, it is necessary to have alternative ways of calculating exergy. This paper proposes an alternative method for calculating the exergy of forest ecosystems, which contains both elements of the traditional approach to exergy calculation and new provisions related to the use of ecological and physiological models of stand growth dynamics

Keywords: *exergy, entropy density, entropy production and flux, stand dynamics model, Scots pine, Pinus sylvestris L., European spruce, Picea abies L., Siberian pine, Pinus sibirica Du Tour, Quercus robur, Common oak, Betula pendula Roth, Sagebrush birch.*

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

Acknowledgements: the author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

For citation: Lisitsyn V. I. (2024). 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. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal]. Vol. 14, No. 3 (55), pp. 23-36 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2>.

Received 27.08.2024. **Revised** 15.09.2024. **Accepted** 18.09.2024. **Published online** 11.11.2024

Введение

Эксергия определяется как максимальное количество работы, которое может выполнить си-

стема, когда она приведена в равновесие с окружающей средой (в эталонное состояние) Jorgensen, S.E.; Svirezhev, Y.V. (2004)¹, Nielsen, S et al (2020) [1]. В экологии используется определение эксергии, где за

¹ Jorgensen S.E., Svirezhev Y.V. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems; Elsevier: Oxford, UK, 2004; p. 366.

эталонное состояние принимается равновесие компонентов системы при той же температуре и давлении, которыми обладает экосистема благодаря присутствию жизни. Эксергия была введена в качестве определителя состояния, структуры и функции экосистемы. Эту величину можно представить в двух ипостасях: первая энергия, накопленная в экосистеме, вторая – ее деградация и образования энтропии. Применение понятия эксергии в экологии - это фактически перевод дарвиновского принципа «выживания наиболее приспособленных» в термодинамику. Наиболее приспособленная экосистема - та, которая способна наиболее эффективным образом использовать и накапливать потоки энергии и материалов. Структура (организм, популяция, биоценоз или экосистема) наиболее приспособлена тогда, когда она работает с наибольшей термодинамической эффективностью, оптимально используя наложенные градиенты, что приводит к наибольшей эксергии.

Важно понять, что именно это качество концепции эксергии, а не ее измеримость, является наиболее полезным для экологов. Энтропия и эксергия не могут быть измерены для экосистем, хотя в науке необходимо иметь возможность проводить точные измерения. В экологии приближения дают приблизительную картину объекта исследования, поэтому все теоретические расчеты имеют модельный характер. Системное моделирование, в частности, приближает реальность, а не дублирует ее или воспроизводит в точности, поскольку это невозможно из-за высокой сложности экосистем. Эксергия (экоэнергия) дает приблизительную, относительную меру того, насколько далека экосистема от термодинамического равновесия и, следовательно, насколько она развита. Такая оценка важных целостных свойств экосистемы важна в экологии лесов, а также в лесопромышленности. Надо отметить, что концепция экоэнергии успешно применяется не только для объяснения экологических проблем¹, Nielsen S. et al. (2020) [1], A. Piernik, A. Nienartowicz

et al. (2023) [2], она используется как индикатор здоровья экономических систем (см. например, Hai Qi et al. (2023) [3], M. Ahmadi et al (2022) [14], L.G. Carmona et al. (2021) [16], X. Huang, (2022) [17], R.F. Mosquim et al (2021) [18], M.H. Noorani et al., (2023) [19], D.A. Pacheco-Rojas et al. (2022) [20],) и, наконец, концепцию эксергии предлагается использовать в качестве одного из важнейших показателей развития общества в целом Trancossi M., Pascoa J., Catellani T. (2023) [4, 5], A. Biondi (2022) [15], Z. Meng et al. (2022) [21].

В работе D. Seidel, C. Ammer (2023) [6] отмечается, что применение термодинамической теории в исследованиях лесных экосистем имеет большой потенциал для значимой интерпретации связи между структурной сложностью лесов и адаптивностью лесов. Мы предполагаем, что более высокая структурная сложность положительно связана с большими фотосинтетическими возможностями леса, что, в свою очередь, связано с оптимизацией термодинамических процессов и, следовательно, с повышенным поглощением эксергии, накоплением эксергии и, в конечном итоге, с повышенной адаптивностью экосистемы

Уравнение для расчета эксергии было предложено Jørgensen S.E. (1996)²:

$$E = RT_0 \sum_{i=1}^n \left[c_i \ln \left(\frac{c_i}{c_{i,eq}} \right) - (c_i - c_{i,eq}) \right], (1)$$

где E – эксергия, Дж; R – газовая постоянная, Дж/(МольК); T₀ – температура окружающей среды, К; c_i – концентрация компонента i, Моль; c_{i,eq} – концентрация того же компонента в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой. Моль; n – число компонентов. Этот подход позволил рассчитать эксергию живых организмов в предположении, что в качестве эталонного (равновесного) состояния выбирается детрит, т.е. «мертвое» неорганическое питательное вещество, тепловое содержание которого принято равным 18,7 кДж/г. Метод расчета эксергии различных организмов дан в работах Bendoricchio G., Jørgensen S.E. (1997)³ и Silow E.A. et al. (2011).

¹Jørgensen, S.E. Does the intermediate disturbance hypothesis comply with thermodynamics? / S.E. Jørgensen, J. Padišák // *Hydrobiologia*. – 1996. – Vol. 323. – P. 9–21.

²Bendoricchio, G.; Jørgensen, S.E. Exergy as goal function of ecosystems dynamic. *Ecol. Model.* 1997, 102, 5–15.

³Silow, E.A. Eco-exergy use for ecosystem health assessment / E.A. Silow, A.V. Mokry, S.E. Jørgensen // *International Journey of Exergy*, Paris, 17th June 2011; Paris Ouest University. – Paris, 2011. – 23 p.

В рамках этого метода производится расчет индекса эксергии β_i , по формуле

$$\frac{E}{RT_0} = \sum_i \beta_i C_i, \quad (2)$$

где T_0 – температура окружающей среды, C_i – биомасса, выраженная в виде концентрации данной компоненты i , $R=8,31$ Дж/(моль К) – универсальная газовая постоянная, β_i – индекс эксергии i – той компоненты. Для детрита значение индекса эксергии равно 1.

Индекс β_i также позволяет дать иную интерпретацию эксергии, которая была введена Bendoricchio G.; Jorgensen S.E (1997) для рассмотрения качественного состояния экосистем. Вводится новая величина, которая называется удельной эксергией (используют также и другой термин – структурная эксергия или нормализованная эксергия) с помощью следующего соотношения:

$$Ex_{\text{spec}} = \sum_i \beta_i c_i / c_{\text{tot}} \quad (3)$$

Как видно, выражение (2) делится на общую биомассу c_{tot} системы и, следовательно, это выражение показывает, как эксергия распределяется между компонентами системы. При этом индекс β_i дает новую интерпретацию эксергии, которая была введена Bendoricchio, G.; Jorgensen, S.E (1997) для рассмотрения качественного состояния экосистем. Выясняется смысл введения удельной (структурной) эксергии, если этот индекс мал, то получаем большую биомассу в сочетании с низкой эксергией, что указывает на не оптимальность системы. Когда индекс увеличивается, то имеется низкая биомасса высокого качества, т.е. в системе, где ресурсы, даже если они невелики, хорошо повышают качество системы. Используя вышеизложенный подход, а также анализируя геномную структуру «живых» организмов, были определены весовые коэффициенты β для ряда известных организмов, в том числе и для растительного мира Nielsen, S et al (2020) [1]. Однако, расчеты эксергии для конкретных лесных древостоев не были произведены. (По крайней мере, автору неизвестны подобные расчеты).

Цель работы – разработать метод расчета эксергии, именно, для лесных экосистем, который

должен быть более простыми и наглядным и не содержать сложный геномный анализ объектов лесных экосистем и, используя предложенный метод расчета эксергии, рассчитать на основе известных коэффициентов β_i эксергии следующих древостоев: а) хвойных – *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour; б) лиственных – Береза повислая (*Betula pendula* Roth), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.).

Предложенный в нашей работе метод определения эксергии лесных массивов базируется на эколого-физиологической модели (ЭФМ), разработанной Лисицыным В И и др. (2022) [7], модифицированный Лисицыным В И и др. (2024) [8].

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Объект: хвойные древостои те же, что и в работе [8], лиственные – Береза повислая (*Betula pendula* Roth), Дуб обыкновенный (*Quercus robur*).

Предмет: табличные данные общей продуктивности биомассы и числа деревьев на гектар в древостоях указанных видов из работ А.З. Швиденко и др. (2008) [9], данные по расчету кумулятивных сумм эмпирического максимального производства энтропии (ЕМЕР) из работы Paul C. Stoy (2014)¹.

Теоретические предпосылки

Теоретической базой данного исследования являются методы неравновесной термодинамики, развитые для описания свойств лесных экосистем, в плане использования эксергетического подхода для оценки состояния лесных массивов.

1. Определение эксергии

В настоящей работе мы используем выражение для эксергии, приведенное в работе Wall G. (1986)²:

$$E = S(T - T_0) - V(p - p_0) + \sum_i (\mu_i - \mu_{i0}) n_i, \quad (4)$$

где E – эксергия, S – энтропия, T – температура, T_0 – температура при термодинамическом равновесии (в нашем случае температура окружающей среды), V – объем, p – давление, p_0 – давление при термодинамическом равновесии, μ_i – химический

¹The Role of Vegetation on the Ecosystem Radiative Entropy Budget and Trends Along Ecological Succession Paul C. Stoy., Hua Lin, Kimberly. Novick, Mario B. S. Siqueira, Jehn-Yih Juang. *Entropy* 2014, 16, 3710-3731; doi:10.3390/e16073710.

²Wall, G. Exergy – A Usefull Concept; Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden, 1.

потенциал, μ_{i0} – химический потенциал при термодинамическом равновесии, n_i – количество молей различных химических элементов.

Из уравнения (4) следует, что $E=0$ при равновесии ($T=T_0$, $p=p_0$, $\mu_i=\mu_{i0}$).

Если экосистема стремится к равновесию со средой, не совершая никакой работы ($dW = 0$), то эксергия изменяется от E до 0, а полная энтропия изменяется от S^{tot} до S_{eq}^{tot} (eq означает равновесие). Для эксергии имеем

$$E = T_0(S_{eq}^{tot} - S^{tot}). \quad (5)$$

Если рассматривается экосистема при температуре и давлении окружающей среды, то из (4) получаем

$$E = \sum_i (\mu_i - \mu_{i0}) n_i. \quad (6)$$

На основе уравнения (16) Jorgensen S.E.; Svirezhev Y.V. (2004) было получено основное соотношение (1).

Мы в качестве исходного уравнения будем использовать уравнение (5) в интерпретации Evans, R.B. (1969)¹:

$$Ex = T \cdot I, \quad (7)$$

где T – абсолютная температура, I – термодинамическая информация систем

$$I = (S_{eq} - S_{state}), \quad (8)$$

где S_{eq} – энтропия при термодинамическом равновесии (максимальная энтропия), S_{state} – фактическое энтропийное состояние системы.

2. Способ расчета энтропии равновесного состояния экосистемы через весовой коэффициент С. Йоргенсена β

Для расчета эксергии по формуле (7) необходимо определить три физические величины – абсолютную температуру окружающей среды T , максимальную энтропию при равновесном термодинамическом состоянии S_{eq} , энтропию фактического энтропийного состояния S_{state} .

Согласно данным из «Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год»², средняя температура по России в 2020 году была равна $T_0 \approx 280$ К. Это значение температуры выбрано нами для расчета как еловых, так и

лиственных древостоев на территории Российской Федерации (РФ).

Значение энтропии при термодинамическом равновесии найдем из уравнений (7) и (8):

$$S_{eq} = \frac{Ex}{T_0} + S_{state} \quad (9)$$

Для максимального значения S_{eq}^{max} имеем

$$S_{eq}^{max} = \frac{Ex}{T_0} + \Delta S_{eq}, \quad (10)$$

где $\Delta S_{eq} \ll S_{eq}^{max}$.

Для ΔS_{eq} выберем следующую оценку:

$$\Delta S_{eq} = \min(S_{state}) \quad (11)$$

В качестве минимального значения энтропии для данного древостоя выберем наименьшее значение фактического энтропийного состояния для древостоя в зависимости от бонитета. Отклонение от «истинного» значения S_{eq}^{max} будет в этом случае минимальным и не окажет существенного влияния на расчет эксергии древостоя в зависимости от бонитета. Например минимальное значение S_{state} для древостоя сосны 16 бонитета, как следует из табл. 2, равно 19,85 Дж/К/г, что, конечно, значительно меньше соответствующего значения $S_{eq}^{max} = 2023 \frac{Дж}{К \cdot г}$. При таком алгоритме определения возможна и другая нормировка эксергии, например на минимальное значение фактического энтропийного состояния по лиственным породам или по всем породам, для которых возможно получение фактического энтропийного состояния. Именно относительные значения эксергии позволят судить о качестве древостоя. Значение эксергии для растительного покрова определится, используя формулу (2)

$$Ex = \beta 18,7 \text{ кДж/г.}$$

Для выбора значения коэффициента β растительного покрова проанализируем три альтернативные теории расчета:

1) Метод С Йоргенсена [1], который использует генетическую структуру растительности. Он дает широкий интервал значений индекса эксергии β – от 30 до 90.

2) Оценка эксергии из глобального углеродного цикла [1]. $\beta = 30,4$.

¹Evans, R.B. A Proof that Essergy is the Only Consistent Measure of Potential Work (for Chemical Systems); Hayer School of Engineering Dartmouth College: Hanover, NH, USA, 1969. [Google Scholar].

²Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет, – Москва, 2021. – 104 с.

3) Из расчетов по Московской модели биосферы Svirezhev Yu.M. et al. (1985)¹ $\beta = 28,9$.

Исходя из этих данных для β выбираем значение, равное 30, т. е. $\beta = 30$. В этом случае $E_x = 30 \cdot 18,7 \text{ кДж/г} = 561 \text{ кДж/г}$. Это значение эксергии в соответствии с вышесказанным и постулировалось для минимального значения энтропии.

3. Текущее энтропийное состояние древостоя S_{state} и его метод нахождения

Наиболее трудоемким и вместе с тем оригинальным является нахождение фактического энтропийного состояния S_{state} .

Для этого мы модернизировали метод, предложенный в нашей работе [10], посвященной нахождению минимального положительного значения производства энтропии согласно принципу Glansdorff P.; Prigogine I. (1971)². В нашей работе [10] основной целью было доказательство соответствия принципа Глансдорфа, Пригожина для лесных экосист, т. е. достижение минимального положительного значения производства энтропии исследуемого древостоя, и все расчеты носили модельный характер, причем физические величины выражались в относительных единицах. Переход к традиционным единицам не рассматривался, так как в этой работе было важным получить минимальное значение производства энтропии, а не его абсолютное значение в применяемой нами системе единиц (отличие от СИ состоит в выборе единицы времени в годах, площади в гектарах). хотя приведение всех единиц в систему СИ потребовало бы отдельного исследования. В начале вернемся к трактовке понятия производства энтропии в современной литературе. Мы в работе [10] и в настоящей работе придерживаемся интерпретации, предложенной авторами в работе [1]. Как известно, общее изменение энтропии открытой системы, находящейся вдали от состояния термодинамического равновесия dS , состоит из внешнего экзогенного вклада из окружающей среды $d_e S = (q_{\text{in}}^S - q_{\text{out}}^S)$, где q_{in}^S и q_{out}^S – внутренний и внешний приток и отток энтропии) и $d_i S$ – внутренний эндогенный вклад, обусловленный процессами внутри

системы, который всегда должен быть положительным в соответствии со вторым законом термодинамики. т.е.:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (12)$$

$d_i S$ и $d_e S$ называются производством энтропии и потоком энтропии, соответственно [1]. Такое различие соответствует и постановке, и дальнейшему решению проблеме о минимуме производства энтропии. В соответствии с нашим подходом производство энтропии внутри экосистемы пропорционально биомассе древостоя, а поток энтропии пропорционален площади древостоя, т.е.

$$\frac{d_i S}{dt} = \alpha M \text{ и } \frac{d_e S}{dt} = bF \quad (13)$$

Причем в уравнениях (13) $\alpha(t)$ является функцией времени, а b – постоянная величина. В работе [10] эта величина полагалась равной 1, что как указывалось выше не повлияло на положение минимума удельного производства энтропии. В настоящей работе важно получить абсолютное значение текущего энтропийного состояния системы, поэтому необходимо, во-первых, привести все физические единицы к системе единиц, которая соответствует применяемому в практическом лесоводстве единицам измерения и во-вторых, значение коэффициента b в уравнениях (13) соответствовало его физическому содержанию.

¹Svirezhev, Yu.M., Krapivin, V.F., Tarko, A.M., 1985. Modelling of the main biosphere cycles. In: Malone, T.F. and Roederer, J.G. (Eds.), Global Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 298–313.

²Glansdorff, P.; Prigogine, I. Thermodynamics of Structure, Stability and Fluctuations; Wiley Interscience: New York City, NY, USA, 1971.

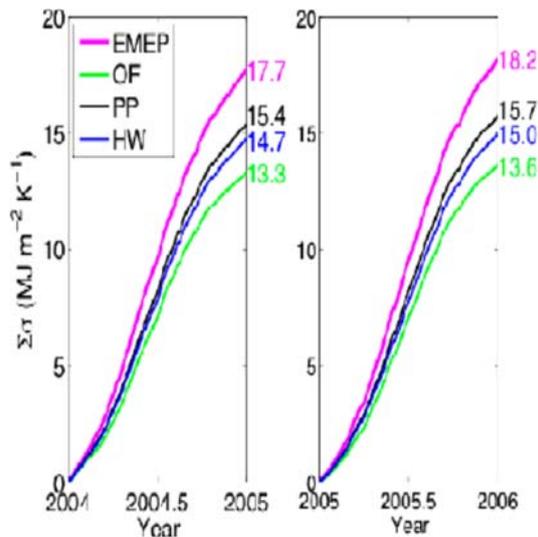


Рисунок 1. Кумулятивные суммы эмпирического максимального производства энтропии (ЕМЕР) и наблюдаемого производства энтропии (σ) в экосистемах старого поля (OF), посаженной сосны (PP) и лиственного леса (HW) Duke Forest в 2004 (слева) и 2005 годах

Из работы: The Role of Vegetation on the Ecosystem Radiative Entropy Budget and Trends Along Ecological Succession Paul C. Stoy, Hua Lin, Kimberly. Novick, Mario B. S. Siqueira, Jehn-Yih Juang. *Entropy* **2014**, *16*, 3710-3731; doi:10.3390/e16073710 [9] (см. также работу [16])

Для определения постоянной b , которая характеризует потоки в систему высококачественной энергии и оттоку энергии низкого качества воспользуемся результатами работы Paul C. Stoy (2014)¹ (см. также работу О.Куричева et al [11]), где последовательно изложен способ экспериментального определения этих потоков (кстати они в цитированных работах определены как производство энтропии, трактовка которого по нашему мнению отличается от приведенной выше). Нас интересует так называемое «эмпирическое максимальное производство» энтропии (ЕМЕР)¹, полученного в работе Paul C. Stoy (2014)¹. На рис. 1 приведены кумулятив-

ные суммы эмпирического максимального производства энтропии (ЕМЕР) и наблюдаемого производства энтропии (σ) (В данном абзаце мы сохраняем терминологию работы Paul C. Stoy (2014)¹, оставляя за собой право в трактовке физических величин). Наблюдаемые производства энтропии σ относятся к конкретным исследуемым в работе Paul C. Stoy (2014)¹ древостоям, поэтому мы не можем ими воспользоваться в наших расчетах. Тогда как расчеты σ_{EMER} определяются географической широтой местности и представляют собой чистую коротковолновую радиацию, $Q_{S,net}$, полученную в течение 2004 и 2005 годов

При оценке максимальной радиационной энтропии, которую может произвести экосистема, в работе [9] предполагается, что член $Q_{S,net}$ равен $Q_{S,in}$ – потоку тепла в систему.

Эмпирическое максимальное производство энтропии (ЕМЕР) рассчитывается по формуле

$$\sigma_{EMER} = \sigma_{QS,max} = Q_{S,in} \left(\frac{1}{T_{air}} - \frac{1}{T_{sun}} \right) \quad (14)$$

где σ_{EMER} – эмпирическое максимальное производство энтропии, которое приблизительно равно $\sigma_{QS,max}$, а в свою очередь $\sigma_{QS,max}$ – максимальное значение σ_{QS} ($\sigma_{QS,max}$) $\sigma_{QS} = Q_{S,net} \left(\frac{1}{T_{surf}} - \frac{1}{T_{sun}} \right)$,

T_{air} – температура воздуха,

T_{sun} – температура поверхности Солнца, приближенно равная 5780 К,

T_{surf} – радиометрическая температура поверхности, рассчитанная с помощью уравнения Стефана-Больцмана.

Как отмечается в работе Paul C. Stoy (2014), различие в данных по указанным годам незначительно, что видно из представленного рисунка, поэтому наше предположение о том, что коэффициент является постоянной величиной вполне оправдано. Рассчитаем среднее значение потока энтропии, аппроксимируя зависимость на рисунке прямой линией, это дает следующее значение потока:

$$\sigma_{EMER} = 9 \frac{\text{МДж}}{\text{К м}^2 \text{год}} \quad (15)$$

¹The Role of Vegetation on the Ecosystem Radiative Entropy Budget and Trends Along Ecological Succession Paul C. Stoy, Hua Lin, Kimberly. Novick, Mario B. S. Siqueira, Jehn-Yih Juang. *Entropy* **2014**, *16*, 3710-3731; doi:10.3390/e16073710.

В пользу нашей интерпретации величины σ_{EMER} свидетельствует размерность, потому что поток измеряется в представленных единицах $-\frac{\text{МДж}}{\text{К м}^2\text{год}}$.

Исходя из уравнений (13), получаем для анализа коэффициента b , который, как видно из формулы (13), имеет смысл потока энтропии, следующее выражение:

$$b = \frac{d_e S}{dt} \frac{1}{F} \quad (16)$$

Согласно теории размерностей имеем

$$[b] = \left[\frac{d_e S}{dt} \frac{1}{F} \right] = \frac{[S]}{[t][F]} = \frac{[\text{Энергия}]}{[\text{Кельвин}][t][F]}, \quad (17)$$

где [Энергия] – размерность энергии k_1 – МДж,

[t] – размерность времени k_2 – годы,

[F] – размерность площади k_3 – м².

Сравнение выражений (15) и (26) дает для константы b следующее выражение:

$$b = 9 \frac{k_1}{k_2 k_3} \frac{\text{МДж}}{\text{К м}^2\text{год}}$$

Значения коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 определяются следующим образом:

- 1) $k_1 = 1$;
- 2) $k_2 = 10$ лет – это временной интервал в таблицах продуктивности [9];
- 3) k_3 находим из связи площади поверхности древостоя и биомассы, применяемой нами в работах

$$F = gM^q.$$

С помощью метода [10] мы получаем не только минимальное значение производства энтропии $\alpha(t)$ в момент времени, соответствующий максимальной величине биомассы (точка стационарного режима роста древостоя), но и значение энтропии в этот момент времени, т.е. S_{state} . Подробное изложение метода дается в работе [10].

Сбор данных

Для разработки нового способа расчета эксергии использовались, как и в работе [8], наборы данных [9], обозначенных как предмет исследования, для: словых древостоев тот же набор, что и в работе [8], для лиственных древостоев следующие:

- 1) березового древостоя *Betula pendula* Roth – с. 657 и с. 379 соответственно в работе [8];

- 2) дубового древостоя *Quercus robur* – с. 639 в работе [8];

- 3) данные из рис. 1 взяты из работы Paul C. Stoy (2014)¹.

Анализ данных

Расчеты проводили в соответствии с программой «Термодинамическое обоснование модели», в которую отдельными блоками входили программы расчета динамики роста древостоев по эколого-физиологической модели (ЭФМ), основанной на термодинамическом подходе [17], программа расчета возраста физиологической спелости по методу, предложенному в [18], блок статистики, включающий расчет критерия эффективности Нэша-Сатклиффа² NSE , расчет среднеквадратичного отклонения и относительной ошибки расчета характеристик древостоев. Более подробно расчеты характеристик древостоя описаны в работе [18], где приведены расчеты жвойных древостоев. В работе [19] дан расчет по модели ЭФМ добовых древостоев, а в работе [20] – березовых древостоев.

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 га⁻¹.

Результаты

В табл. 1-5 приведены результаты расчетов по программе «Термодинамическое обоснование модели», В них для каждого древостоя в зависимости от бонитета рассчитывались значения постоянной b в МДж/К/м²/год, фактическое значение плотности энтропии S_{state} в Дж/К/г, абсолютное значение эксергии E_x в кДж/г, относительное значение эксергии по отношению к максимальному в процентах % (за максимальное принималось значение равное 561 кДж/г). Кроме того, приведены рассчитанные значения биомассы древостоя M_{max} в тоннах на гектар.

¹The Role of Vegetation on the Ecosystem Radiative Entropy Budget and Trends Along Ecological Succession Paul C. Stoy., Hua Lin, Kimberly, Novick, Mario B. S. Siqueira, Jehn-Yih Juang. *Entropy* 2014, 16, 3710-3731; doi:10.3390/e16073710.

²Nash 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).

Таблица 1

Расчет эксергии древостоев *P. abies* по уровням бонитета

Table 1

Calculation of exergy of *Picea abies* (L.) H.Karst. stands by forest site class

Бонитет Site class	M _{max} (т/га)	b (МДж/К/м ² /год)	σ _{state} (Дж/К/г)	Ех (кДж/г)	Ех/Ех _{max} (%)
1	424	0,2470	31,00	561	100
2	332	0,3132	43,18	557,6	99,4
3	250	0,4156	63,43	551,9	98,4
4	175	0,6003	110,08	538,9	96,1
5	112	0,9505	272,95	433,3	97,9

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 2

Расчет эксергии древостоев *P. sylvestris* по уровням бонитета

Table 2

Calculation of exergy of *P. sylvestris* stands by forest site class

Бонитет Site class	M _{max} (т/га)	b (МДж/К/м ² /год)	σ _{state} (Дж/К/г)	Ех (кДж/г)	Ех/Ех _{max} (%)
1б	524,1	0,1545	19,85	561	100
1а	450,4	0,1896	31,49	557,7	99,4
1	380,4	0,2468	41,38	555,0	98,9
2	314,0	0,3306	45,03	539,5	98,7
3	253,3	0,4822	64,19	548,6	97,8

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 3

Расчет эксергии древостоев *P. sibirica* по уровням бонитета

Table 3

Calculation of exergy of *Pinus sibirica* Du Tour stands by forest site class

Бонитет Site class	M _{max} (т/га)	b (МДж/К/м ² /год)	σ _{state} (Дж/К/г)	Ех (кДж/г)	Ех/Ех _{max} (%)
2	473,4	0,1515	32,57	561	100
3	394,2	0,2064	52,65	555,4	99,0
4	310,3	0,2709	75,65	548,9	97,8
5	229,8	0,3753	114,87	538,0	95,9

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 4

Расчет эксергии древостоев *Betula pendula* Roth по уровням бонитета

Table 4

Calculation of exergy of *Betula pendula* Roth stands by forest site class

Бонитет Site class	M_{max} (т/га)	b (МДж/К/м ² /год)	σ_{state} (Дж/К/г)	E_x (кДж/г)	$E_x/E_{x,max}$ (%)
1с	328	0,06758	10,84	561	100
1б	283	0,07468	12,47	560,5	99,9
1а	242	0,08718	18,69	558,8	99,6
1	202	0,10452	26,45	556,6	99,2
2	167	0,12587	37,04	553,7	98,7
3	138	0,125594	52,34	549,4	97,9

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 5

Расчет эксергии дубовых древостоев *Quercus robur* по уровням бонитета

Table 5

Calculation of exergy of oak stands of *Quercus robur* by forest site class

Бонитет Site class	M_{max} (т/га)	b (МДж/К/м ² /год)	σ_{state} (Дж/К/г)	E_x (кДж/г)	$E_x/E_{x,max}$ (%)
1б	937,4	0,07763	12,58	561	100
1а	841,2	0,08485	14,91	560,3	99,9
1	744,7	0,09799	20,25	558,9	99,6
2	631,4	0,11752	28,25	556,6	99,2
3	516,3	0,15213	46,92	551,4	98,3
4	596,3	0,20248	78,18	542,6	96,7
5	264,9	0,24615	103,50	535,5	95,5

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Подробное обсуждение расчета параметров ЭФМ, точности результатов расчета по указанным древостоям приведено в работах [8, 12, 13].

Обсуждение

В работе [8] нами было высказано предположение о необходимости расчета эксергии, как важного показателя оптимальности экосистемы.

В связи с этим, укажем на важное отличие метода расчета производства энтропии, развитого в работе [10], от его модификации в этой работе. Как указывалось выше, работа [10] была посвящена доказательству того факта, что принцип Пригожина работает в лесной экосистеме, тогда как в настоящей работе достижение минимального значения производства энтропии в определенный момент времени используется для определения значения плотности

энтропии σ_{state} в момент времени, при котором биомасса насаждения достигает максимального значения и наступает стационарный режим в лесной экосистеме.

Абсолютные значения эксергии мало отличаются друг от друга для древостоев в зависимости от класса бонитета, однако такая зависимость довольно существенна для плотности энтропии. Обе эти зависимости имеют нелинейный характер, причем если эксергия монотонно убывает, то плотность энтропии, наоборот возрастает в три более раз, что характеризует уменьшение термодинамической «организованности» с ростом бонитета.

В целом зависимость эксергии от бонитета древостоя носит монотонный характер, выраженный в уменьшении эксергии с ростом бонитета. Об

этом же свидетельствует и рост плотности энтропии с ростом бонитета. Такая зависимость вполне ожидаема, так как бонитет характеризует условия произрастания, которые при этом росте ухудшаются, хотя при малых бонитетах зависимость эксергии от бонитета довольно слабая. Интересно сравнить плотность энтропии при одинаковых бонитетах различных древостоев. В линейке из пяти древостоев наибольшей «термодинамической эффективностью» обладает дубовый древостой, а замыкает эту зависимость еловый древостой для одинаковых классов бонитета. Абсолютные значения и эксергии и плотности древостоев у ели и сосны практически одинаковы, что подчеркивает их биологическую близость. В целом лиственные древостои показывают более высокие значения эксергии по сравнению с еловыми, следовательно, они являются более хорошо организованными, и они поэтому должны быть лучше адаптированы к изменению климата. В связи с этим понятно повсеместное использование лиственных древостоев в качестве основных пород на «карбоновых полигонах».

Выводы

1. Разработан метод получения термодинамических характеристик (эксергии и плотности энтропии) лесных экосистем, использующий принцип Пригожина минимального производства энтропии в лесных экосистемах.

2. Предложенный метод применен для расчета плотности энтропии и эксергии трех хвойных и двух лиственных лесобразующих пород, произрастающих в различных регионах России.

3. Проблему расчета эксергии древостоев безусловно необходимо углубить, рассмотрев вопросы биоразнообразия в контексте производства энтропии.

4. В целом монотонное изменение термодинамических характеристик древостоев от класса бонитета свидетельствует о необходимости сохранения бонитетной шкалы оценки древостоев, несмотря на известную критику такой классификации.

5. В работе сделан важный вывод о том, что лиственные древостои являются более приспособленными к изменениям внешних факторов, в частности к изменению климата.

Список литературы

1. Nielsen, S.; Müller, F.; Marques, J.; Bastianoni, S.; Jørgensen, S. Thermodynamics in Ecology – An Introductory Review. *Entropy* **2020**, *22*, 820. [CrossRef] [PubMed]
2. A. Piernik, A. Nienartowicz, E. Buonocore, P.P. Franzese. Measuring natural capital value and ecological complexity of lake ecosystems *Ecological Modelling*, 482, 110401 – August 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110401>.
3. Hai Qi, Zhiliang Dong, Xinshang et al. You Extended exergy accounting for assessing the sustainability of agriculture: A case study of Hebei Province, China, June 2023, *Ecological Indicators* 150:110240, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110240.
4. Trancossi, M., Pascoa, J., Catellani, T. (2023). Exergy, ecology and democracy - concepts of a vital society or a proposal for an exergy tax 30 years after - Part 1: Generalities. *Thermal Science*. **27** (2 Part B): 1337–1353. doi:10.2298/TSCI220907019T. S2CID 256672399.
5. Trancossi, M., Pascoa, J., Catellani, T. (2023). Exergy, ecology and democracy - concepts of a vital society or a proposal for an exergy tax 30 years after - Part 2: Exergy and UN sustainable development goals. *Thermal Science*. **27** (3 Part B): 2359–2375. doi:10.2298/TSCI220907020T. S2CID 256687017.
6. Seidel Dominik, Ammer Christian. Towards a causal understanding of the relationship between structural complexity, productivity, and adaptability of forests based on principles of thermodynamics // *Forest Ecology and Management*. 2023; 544:121238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121238>.
7. 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>.

8. 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>.
9. 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. – DOI: <https://doi.org/10/34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.
10. Lisitsyn, V.I.; Matveev, N.N. Entropy Production Using Ecological and Physiological Models of Stand Growth Dynamics as an Example. *Forests* **2022**, *13*, 1948. <https://doi.org/10.3390/f13111948>.
11. O. Kuricheva, V. Mamkin, R. Sndelersky, J. Puzachenko, A. Varlagin and J. Kurbatova. Radiative entropy production along the paludification gradient in the Southern taiga, *Entropy*, 2017, 19,43, doi:10.3390/e19010043.
12. 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.
13. Моделирование динамики роста березовых древостоев / Лисицын В.И., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Внукова С.В. // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы X Всероссийской научно-технической конференции, 22-24 мая 2024 г. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 166-169.
14. Ahmadi M., Keyhani A., Rosen M.A. et al. Towards sustainable net-zero districts using the extended exergy accounting concept. *Renewable Energy*. 2022; 197: 747-764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.142>.
15. Biondi, A. A contribution to the search for a thermodynamics-based sustainability indicator: Extended Exergy Analysis of the Italian system (1990–2012) and comparison with other indicators, *Energy Volume 244, Part B*, 1 April 2022, 123100, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123100>.
16. Carmona L.G., Whiting K., Wiedenhofer D. et al. Resource use and economic development: an exergy perspective on energy and material flows and stocks from 1900 to 2010, *Resources, Conservation and Recycling Volume 165*, February 2021, 105226, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105226>.
17. X. Huang, C. Feng, J. Qin, X. Wang, T. Zhang. Measuring China's agricultural green total factor productivity and its drivers during 1998–2019, *Sci. Total Environ.*, 829 (2022), Article 154477, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154477>.
18. Mosquim R.F., Eduardo C., Mady K. Design, performance trends, and exergy efficiency of the Brazilian passenger vehicle fleet: 1970–2020. *Journal of Cleaner Production*, Volume 290, 25 March 2021, 125788, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125788>.
19. Noorani M.H., Asakereh A., Siahpoosh M.R. Investigating cumulative energy and exergy consumption and environmental impact of sesame production systems, a case study, *International Journal of Exergy (IJEX)*, Vol. 42, No. 1, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113618>.
20. Pacheco-Rojas D.A., Leon-De-Los-Santos G., Martín-Del-Campo C. Exergy analysis of the Mexican energy sector, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 53, Part B, October 2022, 102540, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102540>.
21. Z. Meng, P. Jin, X. Wu, B. Zhang, J. Gao. An improved extended exergy accounting method for assessing the sustainability of the Chinese society, *Journal of Cleaner Production*, Volume 354, 20 June 2022, 131739, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131739>.

References

1. Nielsen, S.; Müller, F.; Marques, J.; Bastianoni, S.; Jørgensen, S. Thermodynamics in Ecology—An Introductory Review. *Entropy* **2020**, *22*, 820. [CrossRef] [PubMed]
2. A. Piernik, A. Nienartowicz, E. Buonocore, P.P. Franzese. Measuring natural capital value and ecological complexity of lake ecosystems *Ecological Modelling*, 482, 110401 - August 2023 <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110401>.

3. Hai Qi, Zhiliang Dong, Xinshang et al., You Extended exergy accounting for assessing the sustainability of agriculture: A case study of Hebei Province, China, June 2023, *Ecological Indicators* 150:110240, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110240.
4. *Trancossi, M., Pascoa, J., Catellani, T. (2023). "Exergy, ecology and democracy - concepts of a vital society or a proposal for an exergy tax 30 years after - Part 1: Generalities". Thermal Science. 27 (2 Part B): 1337–1353. doi:10.2298/TSCI220907019T. S2CID 256672399.*
5. *Trancossi, M., Pascoa, J., Catellani, T. (2023). "Exergy, ecology and democracy - concepts of a vital society or a proposal for an exergy tax 30 years after - Part 2: Exergy and UN sustainable development goals". Thermal Science. 27 (3 Part B): 2359–2375. doi:10.2298/TSCI220907020T. S2CID 256687017.*
6. Dominik Seidel, Christian Ammer. Towards a causal understanding of the relationship between structural complexity, productivity, and adaptability of forests based on principles of thermodynamics, *Forest Ecology and Management*, Vol.544, September 15, 2023, 121238, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121238>.
7. Lisitsyn, V.I. Modelling the dynamics of the growth course of forest stands on the basis of the thermodynamic approach / V.I. Lisitsyn, M.V. Drapalyuk, N.N. Matveev // *Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniye. Forestry journal*. 2022; 3 (387): 213-225. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>.
8. Lisitsyn V.I. Growth dynamics of coniferous stands of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour: a modified model / V.I. Lisitsyn, T.P. Novikova, A.I. Novikov // *Forest Engineering Journal*. - 2024. - T. 14. - № 2 (54). - С. 54-69. - Bibliography: pp. 64-68 (35 names). - DOI: <https://doi.org/10/34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.
9. Tables and models of growth and productivity of plantations of the main aeso-forming species of Northern Eurasia : normative and reference materials / A. Z. Shvidenko, D. G. Shchepashchenko, S. Nilson, Y. I. Buluy. - 2nd ed., supplement. M., 2008: 886. Access mode: <https://www.elibrary.ru/fqdwk>.
10. Lisitsyn, V.I.; Matveev, N.N.. Entropy Production Using Ecological and Physiological Models of Stand Growth Dynamics as an Example. *Forests* 2022, 13, 1948. <https://doi.org/10.3390/f13111948>.
11. O.Kuricheva, V.Mamkin, R.Sndelersky, J.Puzachenko, A.Varlagin and J/Kurbatova, Radiativ entropy production along the paludification gradient in the Soutern taiga, *Entropy*, 2017, 19,43, doi:10.3390/e19010043.
12. Application of ecological and physiological modelling to describe growth dynamics of oak stands / V. I. Lisitsyn, N. N. Matveev, N. S. Kamalova, N. Yu. I. Lisitsyn, N. N. Matveev, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova, S. V. Vnukova // *Forests of Russia: politics, industry, science, education : proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference, 24-26 May 2023 - St. Petersburg, 2023. - C. 283-286.*
13. Modelling the growth dynamics of birch stands / Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Evsikova N.Y., Kamalova N.S., Vnukova S.V. // *Forests of Russia: politics, industry, science, education : proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference, 22-24 May 2024 - Saint-Petersburg, 2024, - P. 166-169. 166-169.*
14. M Ahmadi, A Keyhani, M A. Rosen et al., Towards sustainable net-zero districts using the extended exergy accounting concept,, *Renewable Energy* Volume 197, September 2022, Pages 747-764, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.142> M Ahmadi, A Keyhani, M A. Rosen et al., Towards sustainable net-zero districts using the extended exergy accounting.
- 15 A Biondi, A contribution to the search for a thermodynamics-based sustainability indicator: Extended Exergy Analysis of the Italian system (1990–2012) and comparison with other indicators, *Energy* Volume 244, Part B, 1 April 2022, 123100, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123100>.
- 16 L G Carmona ^{a, d}, K Whiting ^b, D Wiedenhofer et al., Resource use and economic development: an exergy perspective on energy and material flows and stocks from 1900 to 2010, *Resources, Conservation and Recycling* Volume 165, February 2021, 105226, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105226>.
- 17 X. Huang, C. Feng, J. Qin, X. Wang, T. Zhang, Measuring China's agricultural green total factor productivity and its drivers during 1998–2019, *Sci. Total Environ.*, 829 (2022), Article 154477, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154477>.

18 R F Mosquim, C Eduardo, K Mady, Design, performance trends, and exergy efficiency of the Brazilian passenger vehicle fleet: 1970–2020, *Journal of Cleaner Production*, Volume 290, 25 March 2021, 125788, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125788>.

19 M H Noorani; A Asakereh; M R Siahpoosh, Investigating cumulative energy and exergy consumption and environmental impact of sesame production systems, a case study, *International Journal of Exergy (IJEX)*, Vol. 42, No. 1, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113618>.

20 D.A. Pacheco-Rojas, G. Leon-De-Los-Santos, C. Martín-Del-Campo. Exergy analysis of the Mexican energy sector, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 53, Part B, October 2022, 102540, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102540>.

21 Z. Meng, P. Jin, X. Wu, B. Zhang, J. Gao. An improved extended exergy accounting method for assessing the sustainability of the Chinese society, *Journal of Cleaner Production*, Volume 354, 20 June 2022, 131739, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131739>

Сведения об авторе

✉ *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, 394087, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: viktor-lisicyn@yandex.ru.

Information about the author

✉ *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>, e-mail: viktor-lisicyn@yandex.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author