

**ВЛИЯНИЕ ГЕОГРАФИИ РЕГИОНА НА КАЧЕСТВО СОСНОВОГО
ДРЕВОСТОЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭКСЭРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**
INFLUENCE OF REGIONAL GEOGRAPHY ON THE QUALITY OF PINE STAND FROM
THE POINT OF THE EXERGETIC APPROACH VIEW

Лисицын В.И., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Lisitsyn V.I., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Матвеев Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Matveev N.N., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Полумиско А.А., аспирант, преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Polumisko A.A., Postgraduate student, College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе проведено исследование влияния географического расположения регионов Евразии и типологии леса на расчет эксергии и энтропии сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Фактический материал был взят из таблиц хода роста (ТХР), представленных в монографиях В.А. Усольцева. Установлено, что рейтинг регионов по значению эксергии древостоев возглавляют регионы Центра Европейской части России и Белоруссия. Получено, что значение энтропии, в среднем приходящееся на одно дерево, имеет такую же тенденцию в следовании регионов, что и рейтинг по эксергии, но с небольшими отклонениями. Указано, что необходимо проведение дальнейших исследований, а также уточнение существующих ТХР и разработка новых ТХР для других пород насаждений, находящихся в разных условиях произрастания.

Ключевые слова: регионы Евразии, энтропия, эксергия, бонитет, таблица хода роста, эколого-физиологическая модель.

Abstract. In this paper we investigated the influence of geographical location of Eurasian regions and forest typology on the calculation of entropy and exergy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). The actual material was taken from the growth progress tables (GTR) presented in the monographs of V.A. Usoltsev. It has found that the rating of regions by the value of stand exergy is headed by the regions of the Centre of the European part of Russia and Belarus. It has obtained that the entropy value per tree has the same tendency in the regions as the exergy ranking, but with small deviations. It is indicated that it is necessary to carry out further research, as well as to refine the existing GTRs and develop new GTRs for other species of plantations under different growing conditions.

Keywords: Eurasian regions, entropy, exergy, bonitet, growth progress table, ecological-physiological model.

В недавней работе [1] нами разработан метод расчета эксергии лесных экосистем, базирующийся на эколого-физиологической модели (ЭФМ) динамики роста древостоев. В настоящее время нет необходимости доказывать важность эксергетического подхода как показателя качества древостоя, который характеризует способность древостоя к адаптации в условиях изменчивости климата на Земле, в том числе на территории Евразии [2]. В работе [1] был произведен расчет эксергии древостоев разных бонитетов в разных условиях произрастания. Для расчета эксергии в качестве эмпирических данных были взяты общие таблицы хода роста (ТХР), представленные в работах А.З. Швиденко и др. [3].

В представляемой работе поставлена задача выявить, как географическое положение древостоя влияет на его эксергию и энтропию, т.е. на экологическую устойчивость древостоя в условиях изменяющегося климата. Для этого в отличие от работы [1] мы использовали данные местных (локальных) ТХР для сосновых насаждений первого бонитета. Многочисленные экспериментальные данные по ним представлены в монографиях В.А. Усольцева [4, 5]. Кроме указанной выше цели работы, мы попытались установить, как распределяется эксергия по следующим крупным регионам Евразии: а) Центральная часть Европы и Европейской части России; б) Урал и Северная часть Европейской России; в) Сибирь и Казахстан.

Для исследования было взяты экспериментальные данные насаждений сосны 1-го бонитета из 25 регионов Евразии. Ранее нами показано, что показатель скорости расхода ресурса в балансовом уравнении Берталанффи ЭФМ [1] определяет бонитет насаждения, и он одинаков для всех насаждений сосны 1-го бонитета. В данной работе рассматривается зависимость значений эксергии насаждения Ex , энтропии насаждения, энтропия, приходящейся на одно дерево σ_0 , от региона произрастания.

Результаты проведенного исследования систематизированы в таблице 1. В столбцах таблицы 1, начиная со 2-го, в порядке возрастания приведены следующие данные:

2 – регион произрастания;

3 – особенности произрастания насаждения, вид ТХР древостоя, автор ТХР, год публикации;

4 – энтропия, приходящаяся на одно дерево, σ_0 (Дж/К/г/Н);

5 – энтропии насаждения σ (Дж/К/г);

6 – эксергия насаждения E_x (кДж/г);

7 – относительное значение энтропии $E_x/E_{x_{max}}$ (%);

8 – число деревьев на гектар $N(t_{max})$ (1/га), полученное в результате расчета по ЭФМ для значения времени, когда биомасса насаждения достигает максимального значения t_{max} .

В 1-м столбце таблицы 1 приведено рейтинговое место, определяемое по значению эксергии насаждения, там же в скобках дано рейтинговое место по значению эксергии, приходящейся в среднем на одно дерево.

Таблица 1 – Эксергия древостоя E_x , энтропия древостоя σ , энтропия, приходящаяся на одно дерево σ_0 , относительное значение энтропии $E_x/E_{x_{max}}$, число деревьев на гектар $N(t_{max})$, полученное в результате расчета по ЭФМ для значения времени, когда биомасса насаждения достигает максимального значения t_{max}

№ п/п	Регион	Особенности древостоя, автор, год публикации	σ_0 , Дж/К/г/Н	σ , Дж/К/г	E_x , кДж/г	$E_x/E_{x_{max}}$, %	$N(t_{max})$, 1/га
1	2	3	4	5	6	7	8
1(2)	Северо- Германская низменность	Нормальные сосняки, Schwarach, 1896, цит. по Орлову, 1928	0,1303	27,41	561	100	210
2(1)	Приангарье	Модальные сосняки, чернично- зеленомошный тип, Супринович, 1976	0,1017	38,91	557,8	99,4	383
3(7)	Курганская обл.	Сомкнутые сосняки, Г.А. Ходот, 1967	0,1907	48,05	555,2	98,9	226
4(3)	Средний Урал	Сосняки Припышминских боров, Чудников, Козловский, 1955	0,1516	57,01	552,7	98,5	769
5(5)	Московская обл.	Сомкнутые сосняки, Козловский, 1967г	0,1656	57,29	552,6	98,5	346
6(14)	Германия	Нормальные сосняки (при умеренном разреживании), Wiedemann, Schober, 1957	0,2799	58,37	552,3	98,5	209
7(4)	Воронежская обл. и др. обл. ЦЧР	Максимально продуктивные сосняки, Кирюков и др., 1982	0,1597	64,59	550,6	98,1	404

8(9)	Карелия и Мурманская обл.	Нормальные сосняки	0,2065	64,98	550,5	98,1	315
9(19)	Европейская Россия	Южная тайга, смешанные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,4569	68,72	549,4	97,9	150
10(21)	Белоруссия	Модальные сосняки, орликовый и черничный тип, Багинский, 1984	0,4946	70,02	549,1	97,9	135
11(13)	Белоруссия	Нормальные сосняки, орликовый, мшистый и черничный типы, Багинский, 1984	0,2643	71,74	548,6	97,8	271
12(15)	Северо-Восток Европейской России (Коми)	Сомкнутые сосняки, Огородов, 1967	0,2975	72,03	548,5	97,8	242
13(10)	Швеция	Южная тайга, Нормальные сосняки, Maas, 1911, цит. по Орлову, 1928	0,2165	72,24	548,4	97,8	334
14(12)	Южное Зауралье, бассейн реки Тавда	Майниково-брусничный тип	0,2510	77,46	547,0	99,0	252
15(8)	Казахский мелкосопочник	Нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,1955	79,05	545,5	97,4	405
16(11)	Архангельская обл.	Сомкнутые сосняки с березой, Неволин, 1967	0,2203	84,88	544,9	97,1	385
17(18)	СНГ	Нормальные сосняки, Загреев, 1993	0,4075	96,98	541,5	96,5	236
18(20)	Средний Урал	Сомкнутые сосняки, Милованович, 1967	0,4675	97,35	541,4	96,5	208
19(21)	Германия	Нормальные сосняки умеренного прореживания, E. Gehrhardt, 1921	0,4903	98,82	541,0	96,4	202

20(17)	Средний Урал	Нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,3989	109,8	537,9	95,9	276
21(24)	Центральный район Европейской России	Смешанные сосняки, Моисеев, 1971	0,7925	115,1	552,4	95,6	157
22(22)	Западная Сибирь	Средняя и южная тайга, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,4979	119,4	535,2	95,4	240
23(16)	Казахстанское Прииртышье	Ленточные боры, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,3681	126,8	533,7	95,0	344
24(23)	Центральная и восточная Сибирь	Тажная лесостепная подзона, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	0,6101	133,5	531,3	94,7	219
25(25)	Карелия и Мурманская обл.	Модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1,0514	210,6	509,7	90,9	200

Как видно из таблицы 1, лидирующее положение в рейтинге отдельных регионов по значению эксергии занимают древостои Германии и Центральной и Восточной Сибири, далее, чередуясь между собой, расположились регионы Центра Европейской части России, Урала, севера Европейской части России, Сибири и Казахстана. Если рассматривать типы ТХР в рейтинге, то более «успешными» будут нормальные сосняки по сравнению с другими типами ТХР. Картина распределения регионов в рейтинге по значению энтропии, которая приходится в среднем на одно дерево, в целом, подобна первому рейтингу, но есть исключения. Эти исключения объясняются тем фактом, что максимальное значение биомассы насаждения достигается при разном количестве деревьев на гектар, поэтому более плотные сосняки будут иметь меньшее значение эксергии, и, следовательно, они будут менее адаптированы к изменению внешних условий. Как и ожидалось, абсолютные значения эксергии довольно близки к максимальному значению 561 кДж/г. Для растительности (флоры) приводится значение индекса эксергии $\beta = 30$ [1], а в другом источнике дается значительный интервал индекса β (от 30 до 90) [6], что, конечно, затрудняет расчет абсолютных значений эксергии. Для задач, связанных с определением уровня адаптации древостоев к изменяющимся условиям, вполне достаточно относительных значений эксергии, а крупные регионы, в целом, необходимо ранжировать по среднему балльному индексу. Значения баллов даны в таблицах 2а, 2б, 2в соответственно.

Таблица 2а – Рейтинговые очки регионов Центральной России и Европы

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	Рейтинговые очки
1	Московская обл.	Сомкнутые сосняки, Козловский, 1967	21
2	Воронежская обл. и др. обл. ЦЧР	Максимально продуктивные сосняки, Кирюков, 1982	19
3	Белоруссия	Модальные сосняки, орликовый и черничные типы, Багинский, 1984	16
4	Европейская Россия, Южная тайга	Смешанные леса, модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	17
5	Белоруссия	Нормальные сосняки, орликовый, мшистый и черничный типы, Багинский, 1984	15
6	СНГ	Нормальные сосняки, Загреев, 1993	8
7	Швеция	Нормальные сосняки, Maas, 1911, цит. по Орлову, 1928	13
8	Северо- Германская низменность	Нормальные сосняки, Schwappach, 1896, цит. по Орлову 1928	26
9	Германия	Нормальные сосняки при умеренном разреживании, Wiedemann, Schober, 1957	20
10	Германия	Нормальные сосняки умеренного прореживания, Gehrhardt, 1921	7

Таблица 2б – Рейтинговые очки регионов Севера Европейской России и Урала

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	Рейтинговые очки
1	Средний Урал	Нормальные сосняки, Швиденко и др, 1996	6
2	Средний Урал	Сосняки припышминских боров, Чудников, Козловский и др., 1955	22
3	Северо-Восток Европейской России (Коми)	Сомкнутые сосняки, Огородов, 1967	14
4	Архангельская обл.	Сомкнутые сосняки с березой, Неволин, 1967	10
5	Карелия и Мурманская обл.	Модальные сосняки, Швиденко и др., 1996	1
6	Карелия и Мурманская обл.	Нормальные сосняки, 1996	18
7	Средний Урал	Сомкнутые сосняки, Милованович, 1967	9

Таблица 2в – Рейтинговые очки регионов Сибири (РФ) и Казахстана

№ п/п	Регион	Тип древостоя, автор, год получения	Рейтинговые очки
1	Казахстан	Казахский мелкосопочник, нормальные сосняки	11
2	Западная Сибирь	Средняя и южная тайга, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	4
3	Курганская область	Сомкнутые сосняки, Г.А. Ходот, 1967	23
4	Южное Зауралье	Бассейн реки Тавда, майниково-брусничный тип, Гаврилов, 1975	12
5	Приангарье	Модальные сосняки, чернично-зеленомошный тип, Суприянович, Семечкин, 1976	24
6	Центральная и Восточная Сибирь	Таежная лесостепная зона, Швиденко и др., 1996	2
7	Казахстанское Прииртышье	Ленточные боры, нормальные сосняки, Швиденко и др., 1996	3

В заключение приводим выводы, предложения и пожелания по дальнейшему изучению качества древостоев.

1. Лидирующее положение в балльном рейтинге регионов занимают Центр Европейской части России, Белоруссия и Западная Европа, далее расположились Север Европейской части России и Урала, Сибирь и Казахстан.

2. Рейтинг регионов по значению эксергии возглавляют насаждения Северо-Германской низменности с данными ТХР 1896 года.

3. Рейтинг регионов по значению энтропии, приходящейся в среднем на одно дерево, имеет зависимость, подобную рейтингу значений эксергии древостоев, с небольшими изменениями, характеризующими разную плотность насаждений.

4. Абсолютные значения эксергии довольно близки к ее максимальному значению, но поскольку для оценки устойчивости экосистемы важны относительные характеристики, сделанные на такой основе выводы вполне справедливы.

Для более общих заключений необходимо проводить аналогичные исследования для других бонитетов сосновых древостоев, а также для других пород. Вывод об адаптации древостоев к изменяющимся климатическим условиям был бы значительно весомее при наличии эмпирических ТХР, полученных приблизительно в одно время и построенных по одному методу.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ВГЛТУ, выделенного в 2025 г. на проект «Влияние условий произрастания древесной растительности на термодинамические характеристики древостоев»; руководитель – профессор Матвеев Н.Н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2.
2. Лебедев, А.В. Динамическая модель роста и производительности сосновых древостоев (*Pinus sylvestris* L.) Унженской низменности / А.В. Лебедев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 3(55). – С. 127-151. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
3. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных есообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашченко, С. Нильсон, Ю.И. Булуй. – 2-е издание, дополненное. – Москва : Федеральное агентство лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, 2008. – 886 с.
4. Усольцев, В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В.А. Усольцев. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 762 с.
5. Усольцев, В.А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии : [монография : электронная база данных] / В.А. Усольцев ; Российская академия наук, Уральское отделение, Ботанический сад. – 4-е дополненное электронное издание. – Екатеринбург, 2023. – <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
6. Thermodynamics in Ecology – An Introductory Review / S. Nielsen, F. Müller, J. Marques, S. Bastianoni, S. Jørgensen // Entropy. – 2020. – No. 8(22). – P. 820. – DOI : <https://doi.org/10.3390/e22080820>.

REFERENCES

1. Lisitsyn, V.I. 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 / V.I. Lisitsyn // Forestry Engineering Journal. – 2024. – Vol. 14, No. 3 (55). – P. 23-36. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.3/2.
2. Lebedev, A.V. Dynamic model of growth and productivity of pine stands (*Pinus sylvestris* L.) of the Unzha Lowland / A.V. Lebedev // Forestry Engineering Journal. – 2024. – V. 14, No. 3(55). – P. 127-151. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/8>.
3. Tables and models of the growth and productivity of plantings of the main forest-forming species of Northern Eurasia: normative and reference materials / A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepashchenko, S. Nilson, Yu.I. Buluy. – 2nd edition, supplemented. – Moscow: Federal Forestry Agency of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 2008. – 886 p.

4. Usoltsev, V.A. Forest phytomass of Northern Eurasia: standards and elements of geography / V.A. Usoltsev. – Ekaterinburg: Publishing house of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. – 762 p.
5. Usoltsev, V.A. Biomass and primary production of Eurasian forests: [monograph: electronic database] / V.A. Usoltsev; Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Botanical Garden. – 4th supplemented electronic edition. – Ekaterinburg, 2023. – <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452>.
6. Thermodynamics in Ecology – An Introductory Review / S. Nielsen, F. Müller, J. Marques, S. Bastianoni, S. Jørgensen // Entropy. – 2020. – No. 8(22). – P. 820. – DOI : <https://doi.org/10.3390/e22080820>.