

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ВТОРОСТЕПЕННЫХ (ПОБОЧНЫХ) ДРЕВЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ И ОБЪЕКТОВ В ДРЕВОСТОЯХ

MODELING THE GROWTH DYNAMICS OF SECONDARY WOODY PLANTINGS AND OBJECTS IN FOREST STANDS

Лисицын В.И., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени 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 имени 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 имени 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 имени 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

Внукова С.В., кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Vnukova S.V., PhD in Physics and Mathematics, Acting Head of the Electrical Engineering, Thermal Engineering and Hydraulics Department, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Рассмотрен вопрос о применении биомассы отходов лесохозяйственной деятельности в виде подлеска и ветвей в качестве сырья для производства гранул – пеллет в качестве возобновляемого биотоплива. Для исследования динамики роста элементов биомассы древостоя – подлеска (подроста) и ветвей применена эколого-физиологическая модель. Показано, что эколого-физиологическая модель может быть использована для оценки количества отходов лесохозяйственной деятельности в лесных насаждениях. В качестве

примера для расчета динамики роста биомассы древостоя использовалось порослевое дубовое насаждение первого бонитета для Центрально-Черноземного района Европейской России.

Ключевые слова: возобновляемое биотопливо, пеллеты, порослевое дубовое насаждение, эколого-физиологическая модель, подлесок, подрост, сучья.

Abstract. The article examines the using of forestry waste biomass (undergrowth and branches) as a feedstock for the production of pellets as a renewable biofuel. The ecological-physiological model has used to study the growth dynamics of stand biomass elements-undergrowth (young growth) and branches. It has shown that the ecological-physiological model can be used to estimate the amount of forestry waste in forest stands. A coppice oak stands of the first quality class in the Central Black Earth Region of European Russia have used as an example to calculate the growth dynamics of stand biomass.

Keywords: renewable biofuel, pellets, oak coppicing, ecological-physiological model, undergrowth, young growth, branches.

Для максимального использования биомассы в энергетических целях существуют различные варианты ее преобразования в биотопливо с помощью процессов термохимической конверсии, один из которых – производство из побочных продуктов древесины гранул – пеллет [1], что способствует снижению зависимости от ископаемых видов топлива. В настоящее время пеллеты считаются перспективным эффективным экологически чистым возобновляемым источником энергии и представляют собой вид продукции из древесины в форме прессованных гранул цилиндрической формы небольшого размера, производимых из отходов от основной продукции деревопереработки (опилок, щепы, обрезов, некондиционных лесоматериалов), размельченных до состояния порошка. В настоящей работе предлагается в качестве сырья для пеллет использовать побочные типы биомассы, включающие фитомассу ветвей и нижних ярусов растительности (напочвенный покров, подрост, подлесок) в виде отпада, образующегося в процессе роста древостоя. Например, в дубовых древостоях первого бонитета отпад достигает максимального значения в возрасте древостоя 50 лет и равен 3,3 т/(га·год) при единичной полноте. При уменьшении полноты до 0,4 отпад возрастает до 4,4 т/(га·год) [2].

Данные для величины биологической продуктивности, приведенные в монографиях В. А. Усольцева [3, 4], и сведения о биомассе отпада древостоя в зависимости от полноты и бонитета для побочных видов насаждения из работы А. З. Швиденко [2] позволяют обоснованно предполагать, что каждые пять лет возможно использование этих видов как сырья для производства пеллет. Так, на основе таблиц хода роста дубового древостоя первого бонитета [3] можно заключить, что для древостоев, достигших возраста 50 лет, величина отпада за пять лет составляет от 16,5 т/га до 22 т/га, это соответствует 5 %-6,5 %. Входящий в отпад сухостой подлеска и ветвей, который вполне можно использовать для производства гранул – пеллет, за 5 лет будет равен 2,15 т/га – 2,77 т/га. Кроме ветвей и подлеска можно использовать для производства пеллет и ствольную древесину, которая вышла из сортамента.

В таблице 1 (согласно принятой классификации и градации (ГОСТ 3243-88)) представлены значения удельной объемной теплоты сгорания (объемной теплотворности q)

дров, изготовленных из различных пород древесины, величина которой влияет на эффективность биотоплива.

Таблица 1 – Объемная теплотворность дров при влажности древесины 20 % [5]

Порода дерева	Объемная удельная теплотворная способность дров, МДж/м ³
береза	5816-9379
бук	5276-8931
ясень	5874-9186
граб	6925-8994
ильм	5368-9802
вяз	5368-9802
клен	6293-9534
дуб	6400-10170
лиственница	4539-9241
сосна	5368-8918
ольха	4698-7302
ель	4472-8265
кедр	5493-9366
пихта	4472-8265
осина	4195-7239
липа	4380-7432
тополь	3515-5736
ива	4723-7704

Сравнительный анализ средней величины q (см. рисунок 1) показывает, что максимальное количество тепла выделяется при сгорании дров, изготовленных из древесины граба и дуба. Поскольку в России преимущественный ареал произрастания граба – это юг и запад европейской части, то в Центрально-Черноземном регионе (ЦЧР) целесообразно рассматривать в качестве перспективного сырья для производства пеллет древесину дуба.

В работах [6, 7] была представлена эколого-физиологическая модель (ЭФМ) динамики роста древостоев для оценки биомассы насаждения в целом. С помощью этой модели исследовалась динамика прироста древостоев с учетом различных пород и бонитетов (условий произрастания). В результате было убедительно показано, что ЭФМ хорошо описывает динамику количественных характеристик прироста древостоев, а параметры модели имеют ясный физический смысл и конкретное лесоводческое содержание. Поскольку систематические данные по моделированию динамики роста биомассы побочных продуктов лесохозяйственной деятельности (ветвей, подроста, подлеска) в настоящее время практически отсутствуют, то в приведенном исследовании предлагается применить ЭФМ для решения этой проблемы.

Известно, что порослевые насаждения дуба вырастают гораздо быстрее нежели семенные, что важно для ускорения процессов возобновления биоресурсов. Поэтому в работе в качестве объекта исследования были выбраны порослевые древостои дуба ЦЧР России.

Таким образом, целью настоящего исследования является использование эколого-физиологической модели для оценки динамики биомассы побочных продуктов порослевых дубовых насаждений ЦЧР России.

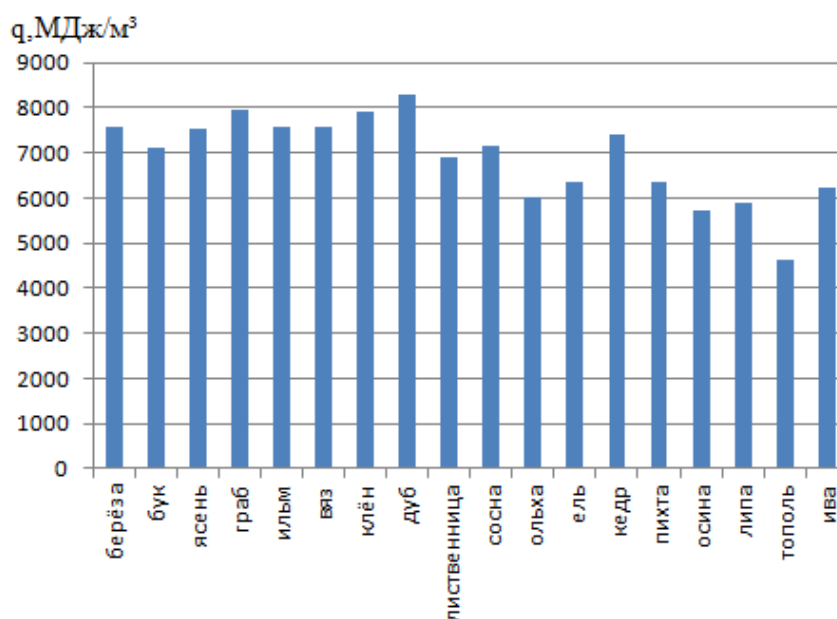


Рисунок 1 – Средняя величина объемной теплотворности q (МДж/м³) древесины различных пород

Исходные данные о биологической продуктивности сомкнутых порослевых дубовых насаждений в лесостепи ЦЧР Европейской России были взяты из монографии В. А. Усольцева [3] и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Динамика роста биомассы сомкнутых порослевых насаждений дуба в лесостепи ЦЧР Европейской России (N – число деревьев на гектар, M1 – биомасса подлеска в тоннах на гектар, M2 – биомасса ветвей (листьев) в тоннах на гектар)

Возраст древостоя, лет	N, дер./га	M1, т/га	M2, т/га
10	9675	0,63	7,7
15	4648	0,97	11,8
20	3002	1,24	16,3
25	2145	1,49	20,8
30	1556	1,74	25,3
35	1225	1,95	29,5
40	982	2,16	33,5
45	823	2,33	37,0
50	698	2,50	40,4
55	604	2,66	43,7
60	529	2,82	46,9
65	466	2,98	50,0
70	419	3,13	52,8
75	381	3,26	55,5
80	348	3,38	58,2
85	321	3,51	60,5
90	298	3,64	62,5
95	279	3,76	64,5
100	264	3,84	66,4

В ЭФМ для описания динамики роста используются 4 параметра, подлежащие определению в процессе оптимизации [6, 7]. При этом выражающий связь биомассы с поверхностью особи аллотропический параметр модели q и дающий удельную скорость расхода ресурса в уравнении Бергаланффи [8] параметр r в ЭФМ приобретают еще и лесоводческий смысл: q является индексом породы, r – индексом бонитета нахождения. Варьируемые параметры m_{∞} и N_{∞} определяются величиной биомассы отдельной особи и числом деревьев на гектар при максимально возможном времени исследования древостоя. В результате вычислительного эксперимента для выбранного порослевого древостоя индекс породы оказался равным $q = 0,74$, а индекс $r = 0,05$, что соответствует первому бонитету насаждения. В таблице 3 представлены параметры ЭФМ, полученные для расчета динамики роста биомассы подлеска и ветвей, и величины критерия Нэша-Сатклиффа [9], который обычно используется в экологических моделях. Если значения этого критерия отрицательны, то модель не пригодна для применения, если они превышают 0,9, то можно говорить о высокой точности соответствия модели эмпирическим данным.

Таблица 3 – Значения параметров ЭФМ для биомассы подлеска и биомассы ветвей и значения критерия Нэша-Сатклиффа ME_N , ME_M и ME_m

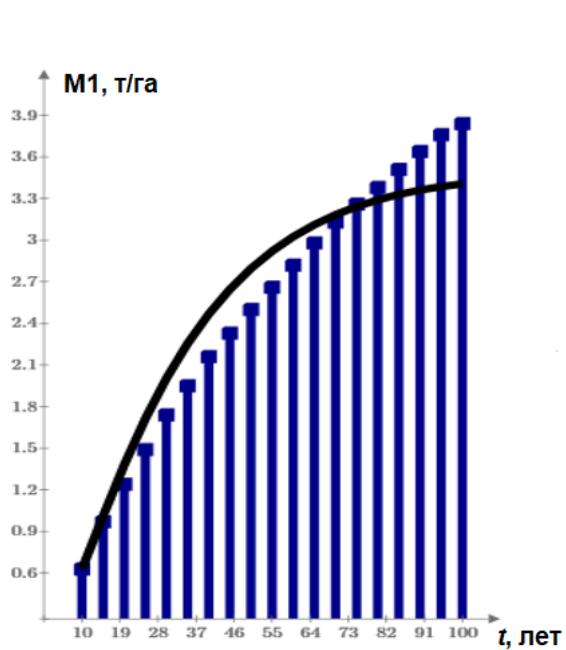
Вид, используемой в расчетах биомассы	q	r	m_{∞} , тонн	N_{∞} , дер./га	ME_N	ME_M	ME_m
Ветви	0,74	0,05	0,79	73	0,9603	0,9406	0,9994
Подлесок	0,74	0,05	0,045	69	0,9613	0,9366	0,9996

Результаты расчетов для динамики биомассы подлеска $M1$ и биомассы ветвей $M2$ (в тоннах на га) по ЭФМ представлены сплошными кривыми на рисунках 2а и 2б в сравнении с эмпирическими данными, которые обозначены синими прямыми с прямоугольниками на концах. Аналогичные зависимости были получены для полной биомассы указанного древостоя и опубликованы в материалах Международного лесного форума [10].

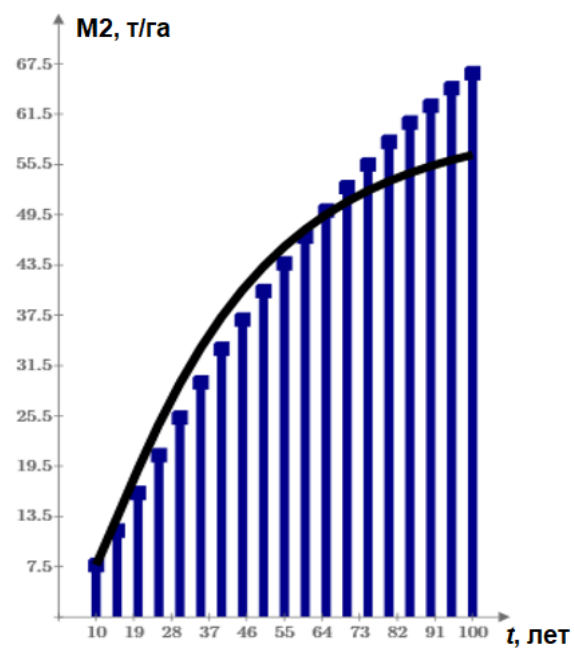
На рисунке 3 показаны эмпирическая (обозначена синими прямыми с прямоугольниками на концах) и рассчитанная по ЭФМ (сплошная кривая) зависимости от времени для числа N деревьев на гектар.

Соответствие модельных (сплошных) кривых динамики приходящейся на 1 дерево биомассы подлеска $m1$ и биомассы ветвей $m2$ (в тоннах) эмпирическим данным (синие прямые с прямоугольниками на концах) представлено на рисунках 4а и 4б.

Совпадение значений параметров ЭФМ q и r для полной биомассы насаждения, биомассы ветвей и биомассы подлеска свидетельствует о том, что у них одинаковая динамика роста. Поэтому оценка фитомассы фрагментов насаждения, приведенная в начале работы вполне обоснована и фитомассу подлеска и ветвей вполне можно использовать в качестве возобновляемого сырья для производства пеллет.



а)



б)

Рисунок 2 – Динамика биомассы подлеска $M1$ (а) и биомассы ветвей $M2$ (б)

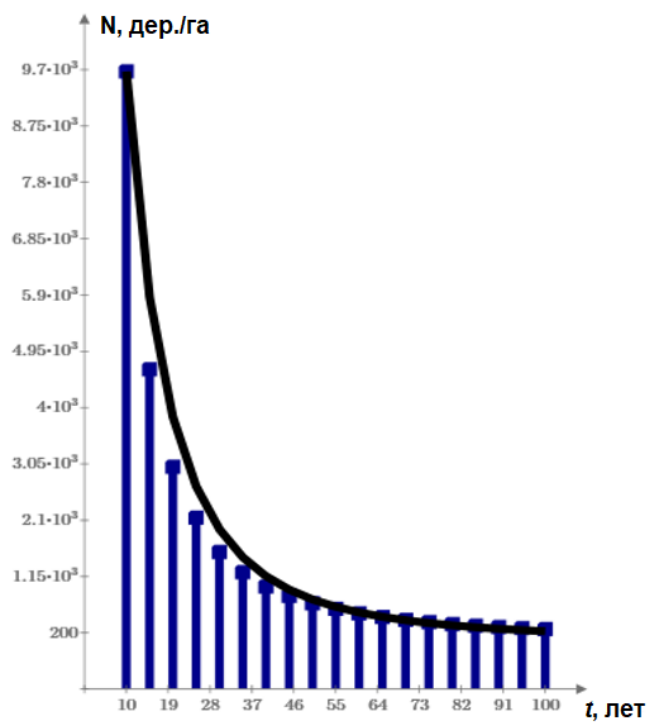


Рисунок 3 – Зависимость числа деревьев на гектар от времени

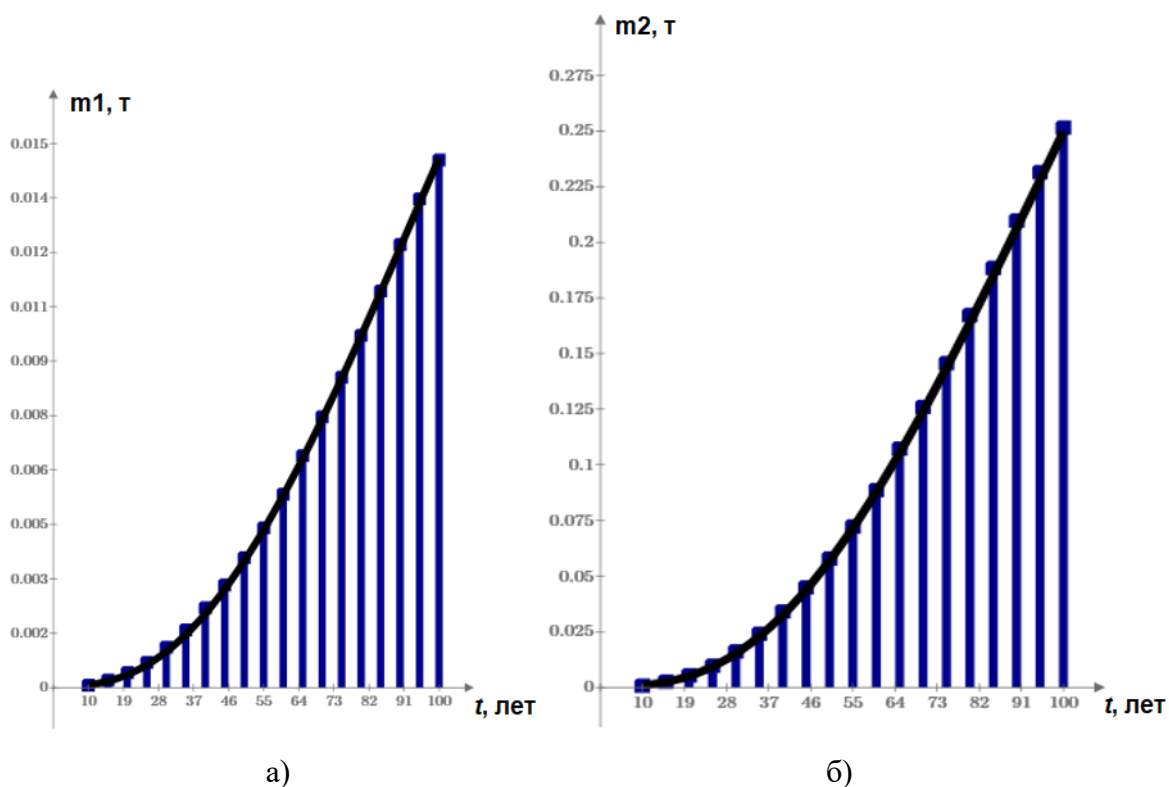


Рисунок 4 – Динамика приходящейся на 1 дерево биомассы подлеска m_1 (а) и биомассы ветвей m_2 (б)

В заключении можно сделать следующие выводы.

1. Эколого-физиологическая модель может быть применена не только для исследования динамики роста полной биомассы древостоев дуба, но и для описания динамики роста подвидов биомассы: подлеска, ветвей и т. д.
2. Фрагменты полной биомассы имеют динамику роста, аналогичную полной биомассе насаждения, что выражается в одинаковых значениях индексов породы и индексов бонитета насаждения.
3. При оптимальном ведении лесохозяйственных мероприятий без ущерба для функционирования лесных насаждений возможно получать в качестве сырьевой базы отходы лесопользования в виде ветвей, подлеска (подроста).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шведов, Д. К. Характеристики зажигания и горения пеллетированных топлив из биомассы / Д. К. Шведов, В. В. Дорохов, Г. С. Няшина // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XXVIII Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященного 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева и 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова, Томск, 01-05 апреля 2024 года. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 233-234.
2. Таблицы и модели роста и биологической продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) /

А. З. Швиденко, Д. Г. Щепашенко, С. Нильсон, Ю. И. Булуй; Изд. 2-е. – Москва: Рослесхоз, Международный институт прикладного системного анализа, 2008. – 886 с.

3. Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии / В. А. Усольцев. – Екатеринбург: Издательство УрО РАН, 2002. – 763 с.

4. 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. – URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (дата обращения: 05.03.2026).

5. Инженерный справочник. Таблицы DPVA.ru. – URL: <https://dpva.ru/guide/guidephysics/guidephysicsheatandtemperature/comnustionenergy/woodwetdrycombustion/> (дата обращения: 05.03.2026).

6. 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). – С. 213-225.

7. 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.

8. Bertalanffy, L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts / L. von Bertalanffy. – Vieweg, Braunschweig, 1953. – 60 p.

9. Nash, J. E. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles / J. E. Nash, J. V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, Iss. 3. – P. 282-290.

10. Особенности эколого-физиологического (аналитического) моделирования насаждений дуба (*Quercus*) на примере локальных таблиц хода роста в плане возобновления лиственных лесов / В. И. Лисицын, Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова, Н. С. Камалова // Лесное хозяйство в условиях глобальных вызовов: новые парадигмы устойчивого развития. Forestry – 2025 : материалы Международного лесного форума, приуроченного к празднованию 95-летия ВГЛТУ, Воронеж, 30 сентября 2025 г. / отв. ред. Яковенко Н. В. ; ВГЛТУ. – Воронеж, 2025. – С. 90-99.

REFERENCES

1. Shvedov, D. K. Ignition and combustion characteristics of pelletized biomass fuels / D. K. Shvedov, V. V. Dorokhov, G. S. Nyashina // Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the XXVIII International Youth Scientific Symposium named after Academician M.A. Usov, dedicated to the 125th anniversary of the birth of Academician of the USSR Academy of Sciences, Professor K.I. Satpayev and the 130th anniversary of the birth of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences, Professor F.N. Shakhov, Tomsk, April 1-5, 2024. – Tomsk : National Research Tomsk Polytechnic University, 2024. – P. 233-234.

2. Tables and models of growth and biological productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (regulatory and reference materials) / A. Z. Shvidenko, D. G. Shchepaschenko, S. Nilsson, Yu. I. Buluy; 2nd Ed. – Moscow : Rosleskhoz, International Institute for Applied System Analysis, 2008. – 886 p.

3. Usoltsev, V. A. Forest phytomass in Northern Eurasia: standards and geographic elements / V. A. Usoltsev. – Ekaterinburg: Publishing house of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. – 763 p.
4. 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. – URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (date of access: 05.03.2026)
5. Engineering Handbook. Tables DPVA.ru. – URL: <https://dpva.ru/guide/guidephysics/guidephysicsheatandtemperature/comnustionenergy/woodwetdrycombustion/> (date of access: 05.03.2026)
6. Lisitsyn, V. I. Modeling the dynamics of tree stand growth based on the thermodynamic approach / V. I. Lisitsyn, M. V. Drapalyuk, N. N. Matveev // News of higher educational institutions. Forestry journal. – 2022. – No. 3(387). – P. 213-225.
7. Comparative analysis of the Northern Eurasia regions coniferous forest stands within the framework of the ecological-physiological model / V. I. Lisitsyn, N. N. Matveev, N. Yu. Evsikova, N. S. Kamalova // Forestry Engineering journal. – 2025. – Vol. 15, No. 4(60). – P. 146-161.
8. Bertalanffy, L. von. Biophysik des Fließgleichgewichts / L. von Bertalanffy. – Vieweg, Braunschweig, 1953. – 60 p.
9. Nash, J. E. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles / J. E. Nash, J. V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, Iss. 3. – P. 282-290.
10. Features of ecological and physiological (analytical) modeling of oak (*Quercus*) plantations using the example of local growth tables in terms of deciduous forest restoration / V. I. Lisitsyn, N. N. Matveev, N. Yu. Evsikova, N. S. Kamalova // Forestry in the context of global challenges: new paradigms of sustainable development. Forestry – 2025: materials of the International Forestry Forum dedicated to the celebration of the 95th anniversary of VSTU, Voronezh, September 30, 2025 / ed. Yakovenko N. V.; VSTU. – Voronezh, 2025. – P. 90-99.