



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 662.81

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-171-180

Комплексный термический анализ торрефиката из древесины лиственницы

А.А. Громов[✉], аспирант; ResearcherID: [LQK-6780-2024](https://orcid.org/0009-0000-0575-8820),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

М.С. Иванов, аспирант; ResearcherID: [NGS-2813-2025](https://orcid.org/0009-0002-9507-5496),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9507-5496>

П.Д. Алексеев, зав. лаб.; ResearcherID: [KBA-5698-2024](https://orcid.org/0000-0003-0468-2101),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0468-2101>

П.А. Марьяндышев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [E-7880-2016](https://orcid.org/0000-0002-3880-8289),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; gromov.a@edu.narfu.ru[✉], ivanov_ms@vk.com, p.alekseev@narfu.ru, p.marjandyshhev@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.08.25 / Одобрена после рецензирования 08.11.25 / Принята к печати 11.11.25

Аннотация. Производство торрефиката – это стратегически важное направление для диверсификации продукции лесного комплекса РФ. Торрефикат получают термохимическим преобразованием биомассы в среде с ограниченным содержанием кислорода. Преимущества торрефиката по сравнению с исходной биомассой – это высокие энергетическая плотность, гидрофобность и устойчивость к биологическому разложению. Цель исследования – комплексный термический анализ энергетического потенциала и характеристик термодеструкции торрефицированного биотоплива из древесины лиственницы. Приведена характеристика торрефиката, его элементный и компонентный состав, содержание оксидов металлов. Пиролитическая газовая хроматография-масс-спектрометрия идентифицировала основные органические соединения в составе пиролизных паров при 5 температурных режимах обработки (от 200 до 600 °С с шагом 100 °С). Методами термогравиметрии и дифференциальной термогравиметрии в инертной (аргон) и воздушной средах при скорости нагрева 10 °С/мин установлены температурные диапазоны процессов потери массы влаги и горения топлива и коксового остатка. Выход высококалорийных компонентов и наибольшее тепловыделение наблюдаются в интервале температур 400–500 °С. Установлено, что торрефикация позволяет получить топливо с повышенной энергетической эффективностью и улучшенными топливными характеристиками в сопоставлении с цельной древесиной. Результаты имеют практическую значимость для оценки перспектив использования торрефиката в качестве высококалорийного твердого биотоплива для энергетической утилизации на биотопливных котельных в Арктическом регионе и дают основу для исследований в данном направлении.



Ключевые слова: древесина лиственницы, лесопромышленный комплекс, торрефикат, газохроматография, пиролиз, термогравиметрия

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

Благодарности: Использовано научное оборудование центра коллективного пользования «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Громов А.А., Иванов М.С., Алексеев П.Д., Марьяндышев П.А. Комплексный термический анализ торрефиката из древесины лиственницы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 171–180. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-171-180>

Original article

Comprehensive Thermal Analysis of Torrefied Larch Wood

Anton A. Gromov[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [LQK-6780-2024](https://orcid.org/0009-0000-0575-8820),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0575-8820>

Michael S. Ivanov, Postgraduate Student; ResearcherID: [NGS-2813-2025](https://orcid.org/0009-0002-9507-5496),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9507-5496>

Pavel D. Alekseev, Head of Laboratory; ResearcherID: [KBA-5698-2024](https://orcid.org/0000-0003-0468-2101),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0468-2101>

Pavel A. Maryandyshev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [E-7880-2016](https://orcid.org/0000-0002-3880-8289),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3880-8289>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia;
gromov.a@edu.narfu.ru[✉], ivanov_ms@vk.com, p.alekseev@narfu.ru,
p.maryandyshev@narfu.ru

Received on August 10, 2025 / Approved after reviewing on November 8, 2025 / Accepted on November 11, 2025

Abstract. The production of torrefied biomass is a strategically important area for diversifying the Russian forestry sector's product range. Torrefied biomass is produced by the thermochemical biomass conversion in an oxygen-limited environment. High energy density, hydrophobicity, and resistance to biological degradation are among the advantages of torrefied biomass over raw biomass. The research is aimed at carrying out a comprehensive thermal analysis of the energy potential and thermal degradation parameters of torrefied biofuel produced from larch wood. The paper presents the characteristics of torrefied biomass, its elemental and compositional structure, and its metal oxide content. Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry determined the main organic compounds present in pyrolysis vapors at five different temperature settings (ranging from 200 to 600 °C with a 100 °C step) during processing. The temperature ranges for moisture loss and the combustion of fuel and coke residue were determined using thermogravimetry and differential thermogravimetry in an inert (argon) and air atmosphere at a heating rate of 10 °C/min. The release of high-calorie components and the greatest heat release occur in the 400–500 °C temperature range. It has been found that torrefaction produces a fuel with higher energy efficiency and improved fuel properties compared to solid wood. The results have practical significance for assessing the potential of torrefied biomass as a high-

calorific-value solid biofuel for energy recovery at biofuel boiler plants in the Arctic region and provide a basis for further research in this area.

Keywords: larch wood, forest industry complex, torrefied biomass, gas chromatography, pyrolysis, thermogravimetry

Funding: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FSRU-2024-0007.

Acknowledgments: The Core Facility Center “Arktika” at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov provided the scientific equipment for the research.

For citation: Gromov A.A., Ivanov M.S., Alekseev P.D., Maryandyshev P.A. Comprehensive Thermal Analysis of Torrefied Larch Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 171–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-171-180>

Введение

Лесопромышленный комплекс – один из основных секторов экономики Северо-Западного региона [4]. В число направлений производства здесь входит изготовление древесных гранул (пеллет). В «Стратегии лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» прогнозировался рост рынка и увеличение доли экспорта пеллет. Однако за 4 года производство пеллет снизилось с 1164 тыс. т в 2021 г. до 299 тыс. т в 2024 г. Ранее они поставлялись в страны Европейского союза (ЕС) для обеспечения топливом крупных энергетических станций, но в связи с ограничениями поставок в страны ЕС из-за санкций произошел разрыв глобальных логистических цепочек между производителем и конечным потребителем и в настоящее время идет переориентация на азиатские рынки. Региону необходимы проекты, направленные на создание продуктов с высокой добавленной стоимостью [2, 4, 5].

Представляет интерес производство древесного торрефицированного брикета. Торрефикат изготавливают путем термохимического преобразования биомассы (торрефикацией или медленным пиролизом) в среде с ограниченным содержанием кислорода. Преимущества торрефиката перед исходной биомассой заключаются в высокой энергетической плотности, гидрофобности и устойчивости к биологическому разложению [7].

Технологии получения торрефиката приведены в специализированной литературе и классифицированы по типу реактора, способу нагрева и используемому теплоносителю [3, 6, 14, 16–18]. В большинстве исследований в качестве исходного материала берут щепу, опилки и сельскохозяйственные отходы, которые затем подвергают грануляции. Это значительно сокращает время нагрева сырья, но усложняет процесс грануляции из-за необходимости добавления связующих веществ и увеличенного износа пресс-грануляторов [20]. Альтернативой является торрефикация измельченной биомассы с последующим брикетированием или грануляцией уже полученного биоугля, что снижает износ оборудования [11]. При использовании готовых древесных пеллет требования к конструкции реактора возрастают. Необходимо учитывать механическую прочность пеллет и минимизировать количество подвижных элементов в реакторе [20].

Пиролитическая газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС) эффективна в процессе изучения пиролиза биомассы и необходима для опре-

деления фундаментальных механизмов термического разложения лигноцеллюлозного комплекса, изучения кинетики процессов и оптимизации режимов термообработки для получения продукта с заданными свойствами [10, 19]. С помощью пиролитической ГХ-МС анализируют химический состав и распределение продуктов пиролиза и механизмы их разложения. Продукты пиролиза делятся на категории: алифатические соединения, ароматические углеводороды, фенолы, фураны, альдегиды, кислоты, кетоны, ангидросахара и азотсодержащие гетероциклические соединения. Распределение продуктов пиролиза зависит от типа биомассы и условий эксперимента. Для торрефикации, протекающей в диапазоне температур 200–300 °С, характерно преимущественное образование твердого продукта с сохранением структуры сырья, в то время как жидкие и газообразные продукты являются побочными [8, 9]. Многоступенчатый подход с короткими температурными интервалами предоставляет подробную информацию о продуктах на каждом этапе, что помогает лучше понять механизмы разложения при различных температурах [10]. Это особенно важно для разработки многостадийных процессов, например, комбинирующих торрефикацию и последующий пиролиз для максимального выхода целевых продуктов [15].

Производство торрефиката представляет собой стратегически важное направление для диверсификации продукции лесного комплекса РФ. Реализация комплексного подхода требует фундаментальных исследований процессов термического разложения, разработки эффективного оборудования и оценки экономической целесообразности [12].

Целью данной работы является изучение процессов термического разложения торрефицированного брикета из древесины лиственницы методами пиролитической ГХ-МС, термогравиметрии и дифференциальной термогравиметрии.

Объекты и методы исследования

В качестве исходной пробы принят торрефицированный брикет из древесины лиственницы (далее – проба). Формирование объединенных проб, их сокращение, измельчение и деление выполнены в соответствии с ГОСТ Р 50801–95, 55660–2013, 52917–2008, 55661–2013.

Результаты теплотехнического анализа пробы следующие: зольность – 0,60 %; влажность – 3,50 %; содержание летучих веществ – 83,31 %; низшая теплота сгорания – 18,20 МДж/кг. Установлено, что проба имеет низкую зольность, а низшая теплота сгорания соответствует древесным пеллетам [1].

Определение элементного состава пробы проводили на автоматизированном анализаторе Euro EA-3000. Элементный анализ основан на высокотемпературном сжигании пробы в присутствии кислорода при температуре 980 °С с последующим газохроматографическим разделением и детектированием продуктов сгорания при помощи высокочувствительного катарометрического детектора.

Рентгенофлуоресцентную спектроскопию пробы проводили на анализаторе EDX-8000. Результаты рентгенофлуоресцентной спектроскопии исследуемой пробы сведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав пробы в пересчете на сухую массу
Sample composition calculated with reference to dried substance

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
C	52,50	Na	0,133
O	40,70	Mg	0,050
H	6,24	Cu	0,003
S	0,017	Al	0,014
Fe	0,019	Mn	0,012
K	0,050	Zn	0,001
Ca	0,146	P	0,019
Si	0,029	N	<0,1

Термогравиметрический анализ провели на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter. Прибор объединяет в себе дифференциальный сканирующий калориметр теплового потока и термомикровесы с разрешением в диапазоне 1 мкг. Для нагревания используют высокотемпературную печь с нагревательным элементом из карбида кремния (SiC), позволяющим достигать температуры 1550 °С.

Эксперименты выполнены в динамическом режиме – камеру во время измерения постоянно продували либо воздухом, либо аргоном (99,995 %) со скоростью 20 мл/мин. Камеры термовесов продували потоком защитного газа (аргона). В инертной среде перед началом эксперимента из камеры полностью откачивали воздух до вакуума давлением 10⁻² мбар, затем проводили выпуск аргона. Цикл откачка–выпуск повторили 2 раза.

Навеску пробы массой 5 мг поместили в тигель из Al₂O₃. Измерения провели при нагревании от 40 до 800 °С при скорости нагрева 10 °С/мин. В качестве образца сравнения использован пустой тигель. Управление системой, сбор и обработку данных осуществляли с помощью программного обеспечения Netzsch-Proteus.

Пиролитическую ГХ-МС выполнили на приборе GCMS-QP2010Plus, оборудованном пиролизером EGA/PY-3030D. Масса пробы для пиролитической ГХ-МС – 296 мкг. Навеска пробы подвержена разложению в среде азота с использованием пиролизера EGA/PY-3030D (Frontier Lab) с криоловушкой.

Пиролиз проведен в газовой среде (азот), режим работы – Single Shot (однократный пиролиз), шаг температуры при измерениях – 100 °С, диапазон – 200–600 °С. Начальная температура нагрева – 30 °С.

С целью определения влияния температуры на выход и свойства продуктов пиролиза выполнены эксперименты при постоянной температуре с использованием 1 пробы и ее последовательным нагревом до заданных температур.

Условия хроматографирования: колонка капиллярная HP-5MS, диаметр – 0,25 мм, толщина неподвижной фазы – 0,25 мкм, длина колонки – 30 м, ввод пробы с делением потока – 1:100, температура устройства ввода – 280 °С, газ-носитель – гелий, управление потоком газа – постоянное давление, скорость прохождения потока через колонку – 1 мл/мин.

Температурную программу термостата начинали с 30 °С, удерживали в течение 5 мин, далее повышали со скоростью 5 °С/мин до 200 °С. Температуру сопряжения с масс-детектором – 280 °С, температура ионного источника –

230 °С, энергия ионизации – 70 эВ, напряжение на детекторе – 0,9 кВ (по результатам автонастройки), масс-детектор работал в режиме сканирования масс-спектра (TIC Scan) в диапазоне 15–600 а.е.м.

На хроматограммах в виде пиков отображены выделяемые в процессе пиролиза компоненты [10]. В работе приведены компоненты, идентифицированная относительная площадь пиков которых составила более 0,31 %. Идентификация продуктов пиролиза осуществлена сравнением полученных масс-спектров Wiley-2010 и Nist-2011. Критерием положительной идентификации принята степень совпадения с библиотечным спектром 80 %. Также использовали приведенные в литературе параметры [13] по времени удерживания и масс-спектрам продуктов пиролиза растительных компонентов. Для оценки содержания идентифицированных компонентов применяли площадь пиков по полному ионному току.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены термограммы в виде кривых ТГ и ДТГ, полученные в инертной и воздушной средах, характеризующие ход процесса термического разложения и окисления пробы.

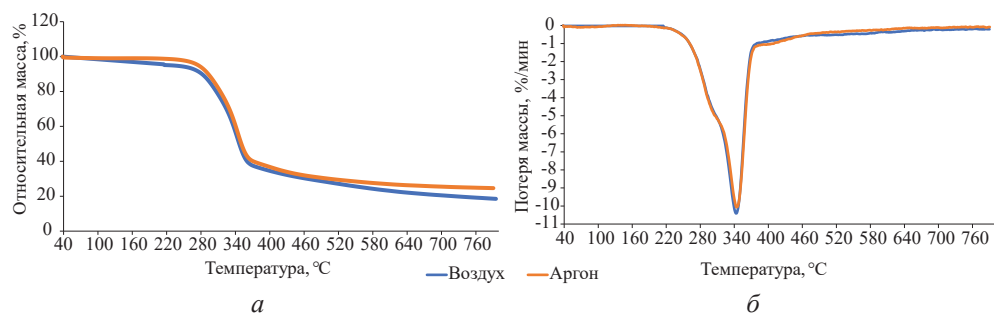


Рис. 1. Термограммы изменения массы пробы (а) и скорости потери массы пробы (б) при скорости нагрева 10 °С/мин в инертной и воздушной средах

Fig. 1. Thermograms showing changes in sample mass (a) and the rate of mass loss (b) at a heating rate of 10 °C/min in inert and air media

При ТГ и ДТГ в инертной и воздушной средах выделили 3 основных зоны. Диапазон температур 40–220 °С характеризуется потерей массы влаги. Диапазон температур 220–445 °С – выходом летучих веществ, образец теряет до 67 % массы. Точка экстремума выхода летучих веществ в среде приходится на 344 °С, в воздушной – на 343 °С. Диапазон наиболее активного выхода летучих веществ – 300–380 °С. Третья зона – 445 °С и выше – для этой зоны свойствен выход остатка летучих веществ и горение коксового остатка. Остаточная масса пробы при термическом разложении в инертной среде – 24,6 %, в воздушной – 18,5 %.

Хроматограммы пробы по полному ионному току представлены на рис. 2. Они позволяют качественно оценить выделяемые при пиролизе вещества, не давая возможности говорить о точных объемах выделяемых при пиролизе веществ.

При нагреве образца до 200 °С обнаружили 2 компонента: воду и диоксид углерода. Доминирует вода, что говорит о потере массы влаги, а присутствие CO_2 указывает на начало процесса термического разложения.

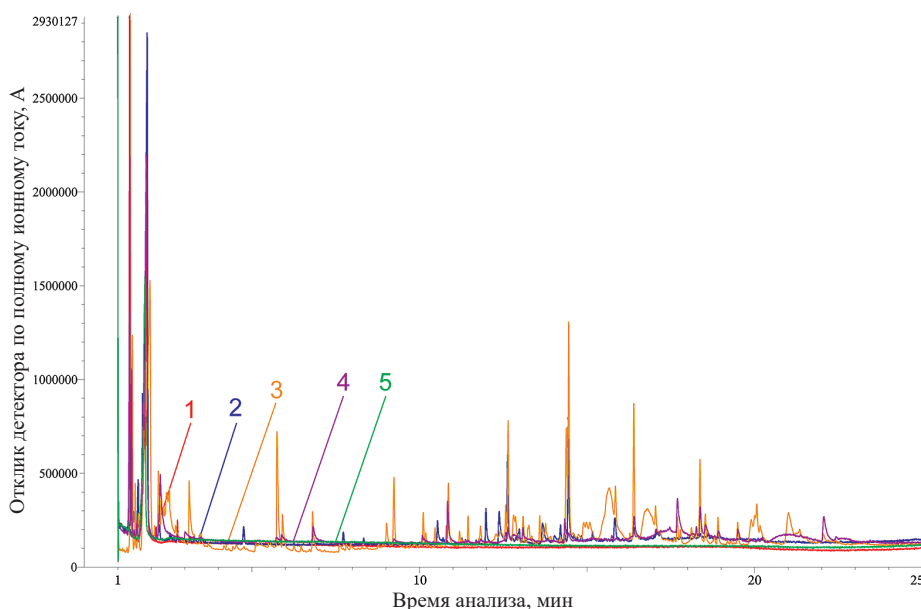


Рис. 2. Ионные хроматограммы пробы при различных температурах, °С:
1 – 200; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600

Fig. 2. Ion chromatograms of the sample at various temperatures, °C:
1 – 200; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600

При температуре 300 °С выявили 4 основных активных компонента: воду, диоксид углерода, уксусную кислоту и 2-бутанон. Нагрев образца до 300 °С сопровождается началом выделения летучих компонентов. Образование уксусной кислоты и 2-бутанона свидетельствует о деструктивных процессах в органической матрице. Появление данных соединений также указывает на начальную стадию процесса пиролиза, термическое разложение сложных полимеров, начало разложения биополимеров (целлюлозы и лигнина). Происходит термохимическое разложение, в результате которого образуются более сложные летучие соединения. Начинается разложение легковоспламеняющихся компонентов: сахаров и летучих соединений.

При температуре 400 °С в пробе выявили следующие компоненты: воду, диоксид углерода, 2-оксопропаналь (метилглиоксаль), креозол, 2-оксопропановую кислоту (метиловый эфир), 2-метокси-4-винилфенол, 2-метоксифенол, дибутилэтиламин, 1,2-циклопентандион, гидроксиэтаналь.

Выделение 2-оксопропанала свидетельствует о разложении углеводов. Креозола и 2-метоксифенола – лигнина и фенольных соединений. Наличие гидроксиэтанола свидетельствует об активном расщеплении сахаров и альдегидов.

При температуре пиролиза 500 °С обнаружили 7 основных пиков: воду, ацетон, креозол, 2-метоксифенол, 3-метилфенол, метанол, 2-метилфенол. Встречаются и другие фенольные соединения, такие как диметилфенолы, ароматические углеводороды, производные фурана. На данной стадии завершается выход летучих веществ и начинается образование угля.

Для линии на хроматограмме, соответствующей температуре 600 °С, свойственны 3 основных пика: вода, диоксид углерода и бензол. На данном этапе пиролиза образуется уголь с высокой плотностью. Большая часть летучих веществ уже удалена, что подтверждается меньшим количеством пиков

выделяемых веществ. С продолжением пиролиза увеличивается доля угля в образце.

Химический состав продуктов пиролиза по основным пикам на хроматограммах приведен в табл. 2.

Таблица 2

**Химический состав основных продуктов пиролиза пробы
(площади пиков на хроматограмме), %
Chemical composition of the main pyrolysis products of the sample
(peak areas on the chromatogram), %**

Вещество	Химический состав при температуре, °С				
	200	300	400	500	600
Диоксид углерода	0,77	12,85	7,37	1,35	1,24
Вода	99,23	32,90	12,68	54,25	94,20
Уксусная кислота	—	7,75	1,79	—	—
2-бутанон	—	7,12	0,23	—	—
2-оксопропаналь	—	—	7,14	—	—
Креозол	—	0,44	4,46	6,98	—
Метил 2-оксопропаноат	—	—	3,13	—	—
2-метокси-4-винилфенол	—	1,25	2,71	0,77	—
2-метоксифенол	—	0,58	2,24	4,47	—
Дибутилэтиламин	—	—	1,52	—	—
1,2-циклопентандион	—	—	1,54	—	—
Гидроксиэтаналь	—	—	1,68	—	—
Ацетон	—	—	—	7,08	—
3-метилфенол	—	—	—	3,51	—
Метанол	—	—	—	2,69	—
2-метилфенол	—	—	—	2,29	—
Бензол	—	—	—	0,31	2,02

Заключение

Приведены результаты термического разложения торрефицированного брикета из древесины лиственницы.

Методами термогравиметрии и дифференциальной термогравиметрии установили 3 стадии разложения образца древесины, характерные для биотоплив. Определен температурный диапазон наибольшего тепловыделения, сопровождаемого активным выходом летучих веществ: от 300 до 380 °С. Остаточная масса образца – 24,6 % в инертной и 18,5 % в воздушной средах.

Методом пиролитической газовой хроматографии-масс-спектрометрии определили состав продуктов пиролиза. Установлено, что при температуре процесса 200 °С наблюдается потеря влаги, в диапазоне от 300 до 500 °С – активное выделение альдегидов, эфиров и фенолов, а при 600 °С образуется уголь.

Доказано, что торрефицированный брикет из древесины лиственницы имеет хорошую реакционную и теплотворную способность и может быть рекомендован для эффективного применения в топочных устройствах котельных агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185.
Lyubov V.K., Tsyornyatov I.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 172–185. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>
2. Мураев И.Г., Сушко О.П. Диверсификация экспорта лесного комплекса Архангельской области // Арктика и Север. 2025. № 58. С. 47–64.
Muraev I.G., Sushko O.P. Export Diversification of the Arkhangelsk Oblast's Forestry Complex. *Arktika i Sever* = Arctic and North, 2025, no. 58, pp. 47–64. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2025.58.47>
3. Самойлова Ю.В., Сорокина К.Н., Пармон В.Н. Биоуголь из микроводорослей: подходы к получению и свойства // Катализ в промышленности. 2024. Т. 24, № 3. С. 83–90.
Samoylova Y.V., Sorokina K.N., Parmon V.N. Biochar from Microalgae: Production and Properties. *Kataliz v promyshlennosti*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 83–90. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18412/1816-0387-2024-3-83-90>
4. Терентьева В.Д. Перспективы развития лесопромышленного комплекса РФ в условиях санкций // Бизнес. Образование. Право. 2022. № 3(60). С. 203–208.
Terenteva V.D. Prospects for the Development of the Timber Industry of the Russian Federation in the Conditions of Sanctions. *Business. Education. Law*, 2022, no. 3(60), pp. 203–208. (In Russ.). <https://doi.org/10.25683/VOLBI.2022.60.378>
5. Шишелов М.А., Стыров М.М. Адаптация лесного комплекса Республики Коми к санкционному давлению // Проблемы прогнозирования. 2024. № 5. С. 191–202.
Shishelov M.A., Styrov M.M. Adaptation of the Forest Complex of the Komi Republic to Sanctions Pressure. *Studies on Russian Economic Development*, 2024, vol. 35, no. 5, pp. 745–752. <https://doi.org/10.1134/S107570072470028X>
6. Alias A.B., Wan Azlina W.A.K.G. Char and Biochar Production: Technology, Applications, and Major Challenges. *Char-based Composites*. Ed. by W.A.K.G. Wan Azlina, S.M. Sapuan, M.M. Harussani. Woodhead Publishing, 2025, pp. 33–47.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15403-4.00002-2>
7. Bergman P.C., Boersma A.R., Zwart R.W.R., Kiel J.H.A. *Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations*. The Netherlands, 2005. 75 p.
8. Chen W.-H., Peng J., Bi X.T. A State-of-the-Art Review of Biomass Torrefaction, Densification and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 44, pp. 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
9. Chen W.-H., Ye S.-C., Sheen H.-K. Hydrothermal Carbonization of Sugarcane Bagasse via Wet Torrefaction in Association with Microwave Heating. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 118, pp. 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.101>
10. Hao J., Xu F., Yang D., Wang B., Qiao Y., Tian Y. Analytical Pyrolysis of Biomass Using Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, vol. 208, art. 115090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115090>
11. Krylova A.Yu., Gorlov E.G., Shumovskii A.V. Production of Biocoal by the Pyrolysis of Biomass. *Solid Fuel Chemistry*, 2019, vol. 53, pp. 369–376.
<https://doi.org/10.3103/S0361521919060107>
12. Krylova A.Y., Zaitchenko V.M. Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Review. *Solid Fuel Chemistry*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 91–103.
<https://doi.org/10.3103/S0361521918050056>
13. Lin S.Y., Dence C.W. *Methods in Lignin Chemistry*. Berlin, Springer, 1992. 578 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-74065-7>
14. Liu Z., Zhang F.-S. Removal of Lead from Water Using Biochar's Prepared from Hydrothermal Liquefaction of Biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 167, iss. 1-3, pp. 933–939. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.085>

15. Liu Z., Zhang F.-S., Wu J. Characterization and Application of Chars Produced from Pinewood Pyrolysis and Hydrothermal Treatment. *Fuel*, 2010, vol. 89, iss. 2, pp. 510–514. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.042>

16. Safarian S. Performance Analysis of Sustainable Technologies for Biochar Production: A Comprehensive Review. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, pp. 4574–4593. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.111>

17. Seow Y.X., Tan Y.H., Mubarak N.M., Kansedo J., Khalid M., Ibrahim L.M., et al. A Review on Biochar Production from Different Biomass Wastes by Recent Carbonization Technologies and Its Sustainable Applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, iss. 1, art. 107017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107017>

18. van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A., Ptasinski K.J. Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: A Review. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35, iss. 9, pp. 3748–3762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>

19. Wang S., Dai G., Yang H., Luo Z. Lignocellulosic Biomass Pyrolysis Mechanism: A State-of-the-Art Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, vol. 62, pp. 33–86. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>

20. Yildiz M.J., Wurzer C., Robinson T., Wietecha J., Mašek O. Biochar from Pellets: Influence of Binders and Pyrolysis Temperature on Physical Properties of Pyrolyzed Pellets. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, vol. 43, art. e01327. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01327>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest