



Научная статья

УДК 630.81:536.662

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-179-188

Теплотворная способность деструктурированной стволовой древесины ели *Picea abies* (L.)

О.Н. Тюкавина¹✉, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

С.А. Васькин², канд. с.-х. наук, вед. инженер; ResearcherID: [AHB-7358-2022](https://orcid.org/0000-0001-6160-5140),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6160-5140>

Д.Ю. Корепин², инженер; ResearcherID: [KYR-2226-2024](https://orcid.org/0009-0003-0063-3879),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0063-3879>

П.А. Феклистов³, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

В.И. Мелехов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

С.С. Макаров⁴, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru✉, v.melekhov@narfu.ru

²Филиал ФБУ «Рослесозащита» – «Центр защиты леса Архангельской области», ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; serzh.vaskin.2015@mail.ru, korepin.mitya@yandex.ru

³Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; pfeklistov@yandex.ru

⁴Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; s.makarov@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 13.09.24 / Одобрена после рецензирования 08.12.24 / Принята к печати 11.12.24

Аннотация. Популярность биоэнергетики в свете развития зеленой экономики и стремления к достижению углеродной нейтральности производств возрастает. В связи с этим рассматриваются различные виды энергетического сырья, его свойства и возможности утилизации отходов. Цель исследования заключается в оценке теплотворной способности древесины ели, поврежденной дереворазрушающими грибами. Для измерения теплотворной способности стволовой древесины ели применяли автоматизированный бомбовый калориметр АБК-1В. Отдельно из древесины, коры и сучков прессовали пеллеты, высушивали их в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Пеллеты сжигали в абсолютно сухом состоянии. Массу золы определяли как разницу между массой тигеля с остатками после сжигания образца в калориметрической бомбе и массой пустого тигеля. Теплотворная способность здоровой древесины ели составляет 20 180–20 232 Дж/г.

© Тюкавина О.Н., Васькин С.А., Корепин Д.Ю., Феклистов П.А., Мелехов В.И., Макаров С.С., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

В поперечном сечении ствола ели теплотворная способность изменяется в диапазоне от 18 900 до 21 700 Дж/г. Наименьшие значения характерны для предраневой зоны деструктированной древесины. Древесина, поврежденная коррозионной гнилью, отличается меньшей теплоемкостью по сравнению со здоровой на 1,5–6,2 % (18 926–19 868 Дж/г). Теплотворная способность древесины, поврежденной деструктивной гнилью, превышает показатель для здоровой древесины на 1,5–10,5 % (20 487–22 301 Дж/г). С увеличением стадии деструктивной гнили древесины ели ее теплотворная способность возрастает. Теплотворную способность пеллет из деструктированной древесины ели можно оценить по их внешнему виду. Желтая и пестрая окраска прессованного сырья указывают на значимо меньшую теплотворную способность по сравнению с пеллетами бурого и оранжевого цветов. Зольность деструктированной древесины разных типов находится на одном уровне. Зольность древесины, поврежденной коррозионной гнилью 3-й стадии, значимо больше, чем у здоровой древесины и древесины предшествующих стадий разложения на 96–129 %. У коры поврежденных гнилью стволов ели теплотворная способность находится на уровне теплотворной способности здоровой древесины, а зольность выше в 3 раза. У сучка теплотворная способность больше показателя здоровой древесины на 7 %, а зольность остается на одном уровне.

Ключевые слова: теплотворная способность, ель, древесина, ствол, коррозионная гниль, деструктивная гниль

Благодарности: Исследование выполнено в рамках госзадания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёва УрО РАН (№ госрегистрации 125021902596-8).

Для цитирования: Тюкавина О.Н., Васькин С.А., Корепин Д.Ю., Феклистов П.А., Мелехов В.И., Макаров С.С. Теплотворная способность деструктированной стволовой древесины ели *Picea abies* (L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 179–188. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-179-188>

Original article

Calorific Value of the Degraded Stem Wood of Spruce *Picea abies* (L.)

Olga N. Tyukavina¹✉, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Sergey A. Vaskin², Candidate of Agriculture, Leading Engineer; ResearcherID: [AHB-7358-2022](https://orcid.org/0000-0001-6160-5140), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6160-5140>

Dmitriy Yu. Korepin², Engineer; ResearcherID: [KYR-2226-2024](https://orcid.org/0009-0003-0063-3879), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0063-3879>

Pavel A. Feklistov³, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAC-2377-2020](https://orcid.org/0000-0001-8226-893X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8226-893X>

Vladimir I. Melekhov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

Sergey S. Makarov⁴, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.tukavina@narfu.ru✉, v.melekhov@narfu.ru

²Federal Forestry Agency – the Federal Budgetary Institution “Russian Center of Forest Health”, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; serzh.vaskin.2015@mail.ru, korepin.mitya@yandex.ru



³N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Nikolskiy, 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; pfeklistov@yandex.ru

⁴Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; s.makarov@rgau-msha.ru

Received on September 13, 2024 / Approved after reviewing on December 8, 2024 / Accepted on December 11, 2024

Abstract. The popularity of bioenergy is increasing in the light of the development of the green economy and the desire to achieve carbon neutrality in production. In this regard, various types of energy raw materials, their properties and waste disposal possibilities are being considered. The purpose of the study has been to assess the calorific value of spruce wood damaged by wood-destroying fungi. An automated ABK-1B bomb calorimeter has been used to measure the calorific value of spruce stem wood. Separately, pellets have been pressed from wood, bark and knots and dried in a drying cabinet at a temperature of 105 °C. The pellets have been burned in a completely dry state. The ash weight has been determined as the difference between the weight of the crucible with residues after combustion of the sample in a calorimeter bomb and the weight of the empty crucible. The calorific value of healthy spruce wood is 20,180–20,232 J/g. In the cross section of the spruce stem, the calorific value varies in the range from 18,900 to 21,700 J/g. The lowest values are typical for the pre-edge zone of the degraded wood. Wood damaged by corrosive rot has a lower heat capacity compared to healthy wood by 1.5–6.2 % (18,926–19,868 J/g). The calorific value of wood damaged by destructive rot exceeds that of healthy wood by 1.5–10.5 % (20,487–22,301 J/g). As the stage of destructive rot of spruce wood increases, its calorific value grows. The calorific value of pellets from degraded spruce wood can be estimated by their appearance. The yellow and mottled colors of the pressed raw material indicate a significantly lower calorific value compared to pellets of brown and orange colors. The ash content of degraded wood of different types is at the same level. The ash content of wood damaged by stage 3 corrosive rot is significantly higher than that of healthy wood and wood at previous stages of decomposition by 96–129 %. The calorific value of the bark of spruce stems damaged by rot is at the level of the calorific value of healthy wood, and the ash content is 3 times higher. The calorific value of a knot is 7 % higher than that of healthy wood, while the ash content remains at the same level.

Keywords: calorific value, spruce, wood, stem, corrosive rot, destructive rot

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration no. 125021902596-8).

For citation: Tyukavina O.N., Vaskin S.A., Korepin D.Yu., Melekhov V.I., Feklistov P.A., Makarov S.S. Calorific Value of the Degraded Stem Wood of Spruce *Picea abies* (L.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 179–188. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-179-188>

Введение

В целях достижения глобальных стратегических целей охраны окружающей среды в области снижения выбросов углерода изучаются различные виды сырья и методы при изготовлении пеллет, их качество и возможность утилизации отходов [15–17, 19, 20]. В этом направлении разрабатываются экологически устойчивые подходы к управлению лесными экосистемами как

важнейшими источниками биоэнергии [18]. Интенсивность переработки древесного сырья и второстепенных лесных ресурсов является показателем экономической эффективности и устойчивости лесопромышленного комплекса. В рамках зеленой экономики и направления производств к углеродной нейтральности возникает необходимость преобразования древесной биомассы, нерентабельной низкосортной неликвидной древесины в экологически чистый источник энергии, например, в пеллеты или брикеты. Это позволит своевременно проводить уход за молодняками, разрабатывать гари и горельники, ветровалы.

На 2024 г. в лесном фонде Архангельской области зафиксировано 42,1 тыс. га ослабленных и погибших насаждений [1]. Площади горельников и гарей в засушливый сезон могут достигать до 80 тыс. га [11]. Усыхающие и усохшие леса, неразработанные горельники и гари пожароопасны, являются источниками распространения патогенных организмов. Ослабленные по разным причинам деревья, особенно ель, повреждаются насекомыми, поражаются дереворазрушающими грибами [4, 9]. К распространенным видам биотрофных грибов на ели относятся еловая губка, гетеробазидион мелкопоровый, еловый комлевой трутовик, климакоцистис северный, трутовик Швейница, виды рода опенок, реже отмечается корневая губка [10]. Установлено, что в северотаежных ельниках Архангельской области встречаемость корневой губки составляет 27 %, еловой губки – 48 %, трутовика Швейница – 23 % [2]. Пеструю коррозионную гниль вызывают корневая губка и еловая губка; деструктивную трещиноватую гниль – трутовик Швейница и окаймленный трутовик [2]. Дровяная древесина часто теряет свои полезные свойства в результате грибных заболеваний [25]. В связи с этим возникает необходимость оценить качество деструктированной древесины как сырья для биоэнергетики.

Цель исследования – изучение теплотворной способности древесины ели, поврежденной дереворазрушающими грибами.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено в северо-таежном лесном районе, Архангельском, Березняковском и Плесецком лесничествах. Объект исследования – стволовая древесина ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.), пораженная дереворазрушающими грибами. Образцы древесины (21 шт.) отбирали с пней на вырубке, сухостоя, ветровальных и растущих деревьев независимо от их возраста и диаметра ствола. Выбирали 3 дерева, стволы которых поражены еловой губкой (*Phellinus chrysoloma* (Fr.) Donk) с большой площадью деструкции (65–75 %) и средним диаметром 28 см. Спил брали в поперечном сечении в средней части ствола.

Оценку теплотворной способности проводили в 3-кратной повторности [13] с применением автоматизированного бомбового калориметра АБК-1В. Из древесины, коры, сучков по отдельности прессовали пеллеты, высушивали их в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Пеллеты сжигали в абсолютно сухом состоянии. Массу золы определяли как разницу между массой тигеля с остатками после сжигания образца в калориметрической бомбе и массой пустого тигеля.

Результаты исследования и их обсуждение

Теплотворная способность здоровой древесины ели составляет около 20 200 Дж/г. Развитие пестрой ядровой гнили 2-й стадии, вызванной еловой губкой (*Porodaedalea chrysoloma* (Fr.) Fiasson et Niemelä), приводит к снижению теплотворной способности стволовой древесины по сравнению со здоровой древесиной на 2,8–6,4 % ($t = 4,4\text{--}10,0$ при $t_{st} = 3,2$ и $p = 0,99$) (табл. 1). В поперечном сечении ствола деструктированная древесина различается по теплотворной способности. Наименьший показатель отмечается вблизи раневого кольца. Отличие от соседних зон составляет 2,8–3,7 % – ниже по сравнению с соседней деструктированной зоной ($t = 4,6\text{--}5,3$ при $t_{st} = 3,2$ и $p = 0,99$). Данная зона характеризуется меньшим количеством светлых ячеек в пестрой ячеистой гнили. Ее пониженная теплотворная способность может быть обусловлена активностью мицелия дереворазрушающего гриба. Согласно В. Рипачек [7], О.Н. Тюкавиной, Ф.А. Кунникову, А.Е. Кошелевой [14], зона активного роста мицелия характеризуется повышенным содержанием азота, что способствует снижению теплотворной способности [22].

Таблица 1

Характеристика поперечного сечения ствола ели
с ядровой коррозионной гнилью 2-й стадии

The characteristics of the cross-section of a spruce stem with stage 2 heartwood rot

Показатель	Зона деструкции ствола				Здоровая древесина	Кора	Сучок
	центральная часть	средняя часть	предраневая зона	раневое кольцо			
Теплотворная способность, Дж/г	19 116±34	19 468±44	18 923±93	19 649±126	20 232±37	20 268±58	21 731±39
Зольность, %	0,44±0,11	0,56±0,13	1,42±0,35	1,39±0,20	0,63±0,18	1,94±0,15	0,63±0,02

Наибольшей теплотворной способностью характеризуется сучок – $21\,731 \pm 39$ Дж/г. Теплотворная способность коры находится на уровне здоровой древесины. Как правило, кора обладает более высокой теплотворной способностью по сравнению с древесиной за счет повышенного содержания смолы, лигнина, экстрактивных веществ [6, 12, 24]. Однако в процессе хранения содержание древесных смол уменьшается и кора наиболее подвержена деструкции, поэтому теплотворная способность этой части дерева обусловлена сроком хранения [3, 5].

При оценке качества сырья для биоэнергетики учитывают не только теплотворную способность, но и зольность. Зольность топливного ресурса обуславливает его теплотворную способность и влияет на эффективность работы оборудования [21]. При этом закономерности изменения теплотворной способности и зольности определяются видом фракции и расположением ее в дереве, различаясь между собой [26]. Для коры характерна повышенная зольность – больше показателя для древесины в 3 раза. Зольность древесины в основном изменяется от 0,44 до 0,63 %. Однако отмечают рост зольности в раневом кольце древесины и предраневой зоне. Превышение значения деструктированной древесины составляет 2,5–3 раза ($t = 2,7\text{--}3,2$ при $t_{st} = 2,2$ и $p = 0,95$), здоровой древесины – 2,2 раза ($t = 2,4$ при $t_{st} = 2,2$ и $p = 0,95$).

Древесина, поврежденная коррозионной гнилью, характеризуется меньшей теплоемкостью по сравнению со здоровой на 1,5–6,2 % ($t = 2,2\text{--}7,9$ при

$t_{st} = 2,1$ и $p = 0,95$) (табл. 2). Наибольшее различие отмечается для 2-й стадии гнили древесины. Теплотворная способность древесины с деструктивной гнилью превышает показатель для здоровой древесины на 1,5–10,5 % ($t = 2,3$ – $15,2$ при $t_{st} = 2,1$ и $p = 0,95$). Самое значительное различие зафиксировано при 3-й стадии гнили древесины. Следовательно, с увеличением стадии деструктивной гнили древесины ее теплотворная способность возрастает. На сокращение теплотворной способности древесины при коррозионной гнили и возрастание при деструктивной гнили по сравнению со здоровой древесиной указывали авторы [17, 25]. Это явление обусловлено изменением содержания лигнина на единицу массы деструктированной древесины. В первом случае оно сокращается, а во втором – увеличивается. С повышением содержания лигнина теплотворная способность древесины возрастает [8, 23].

Таблица 2

Характеристика древесины ели разного типа деструкции
The characteristics of spruce wood of different types of destruction

Показатель	Здоровая древесина	Стадии гнили					
		коррозионной			деструктивной		
		1	2	3	1	2	3
Теплотворная способность, Дж/г	20 180±108	19 868±87	18 926±115	19 758±133	20 487±80	21 330±128	22 301±88
Зольность, %	0,55±0,08	0,46±0,02	0,48±0,03	0,48±0,03	0,46±0,01	0,50±0,04	0,58±0,05

Дисперсионный анализ подтверждает влияние типа и стадии гнили на теплотворную способность древесины. Влияние стадии коррозионной гнили на теплотворную способность древесины значимое высокое, стадии деструктивной гнили – значимое очень высокое (табл. 3).

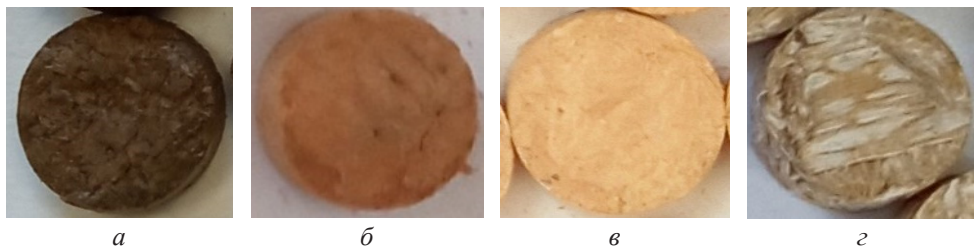
Таблица 3

Влияние типа и стадии гнили древесины ели, окраски пеллет на их теплотворную способность
The influence of the type and stage of spruce wood rot and the color of pellets on their calorific value

Дисперсия	Значение дисперсии	Число степеней свободы	Варианса	Критерий Фишера		Влияние фактора с ошибкой
				фактический	стандартный при 5%-м уровне значимости	
Коррозионная гниль						
Факториальная	10 336 495	3	3 445 498,4	17,3	2,8	0,55±0,03
Случайная	8 384 835	42	199 638,9			
Общая	18 721 331	46	—			
Деструктивная гниль						
Факториальная	22 158 929	3	7 386 309,5	63,3	3,0	0,86±0,01
Случайная	3 614 743	31	116 604,6			
Общая	25 773 672	35	—			
Окраска пеллет						
Факториальная	53 682 441	3	17 894 147,1	33,4	2,8	0,71±0,02
Случайная	21 463 635	40	536 590,9			
Общая	75 146 077	44	—			

Во всех случаях отмечается тенденция увеличения зольности древесины с возрастанием стадии деструкции. Зольность древесины, поврежденной коррозийной гнилью 3-й стадии, значительно отличается от здоровой и от предшествующих стадий гниения на 96–129 % ($t = 3,5\text{--}4,6$ при $t_{st} = 2,8\text{--}2,9$ и $p = 0,99$).

Теплотворную способность спрессованного сырья можно оценить по внешнему виду. Чем темнее окраска пеллет из деструктированной древесины, тем выше их теплотворная способность (см. рисунок). Значимого различия в теплотворной способности деструктированной древесины бурого и оранжевого цветов не отмечается. Между пеллетами из древесины желтого и оранжевого цветов различие в теплотворной способности составляет 8,2 % ($t = 5,2$ при $t_{st} = 2,8$ и $p = 0,99$). Наименьшей теплотворной способностью характеризуются пеллеты из древесины, поврежденной пестрой ямчатой коррозийной гнилью. Различие в теплотворной способности между пеллетами желтого и пестрого цветов составляет 5,7 % ($t = 3,7$ при $t_{st} = 2,8$ и $p = 0,99$). Влияние цвета пеллет из деструктированной древесины ели на их теплотворную способность по результатам дисперсионного анализа характеризуется как значимое высокое.



Влияние цвета пеллет из деструктированной древесины ели на их теплотворную способность, Дж/г: *а* – бурый, $21\,555 \pm 250$; *б* – оранжевый, $21\,889 \pm 200$; *в* – желтый, $20\,222 \pm 247$; *г* – пестрый, $19\,127 \pm 162$

The effect of the color of pellets from degraded spruce wood on their calorific value, J/g:
a – brown, $21\,555 \pm 250$; *б* – orange, $21\,889 \pm 200$; *в* – yellow, $20\,222 \pm 247$;
г – mottled, $19\,127 \pm 162$

Деструктированная древесина ели независимо от типа и стадии гнили является хорошим энергетическим материалом, т. к. ее средняя теплотворная способность превышает или равна 19 000 Дж/г [16].

Заключение

Теплотворная способность здоровой древесины ели составляет 20 180–20 232 Дж/г. В поперечном сечении ствола ели показатель изменяется в диапазоне от 18 900 до 21 700 Дж/г. Наименьшие значения характерны для предраневой зоны деструктированной древесины. У коры поврежденных гнилью стволов ели теплотворная способность находится на уровне теплотворной способности здоровой древесины, а зольность выше в 3 раза. Теплотворная способность сучка превышает показатель здоровой древесины на 7 %, а зольность остается на одном уровне. Древесина, поврежденная коррозийной гнилью, характеризуется меньшей на 1,5–6,2 % теплоемкостью по сравнению со здоровой. Теплотворная способность древесины с деструктивной гнилью превышает показатель для здоровой древесины на 1,5–10,5 %. С увеличением стадии деструктивной гнили теплотворная способность древесины возрастает. Теплотворную способ-

ность пеллет из деструктированной древесины ели можно оценить по внешнему виду. Желтая и пестрая окраска прессованного сырья указывают на значительно меньшую теплотворную способность по сравнению с пеллетами бурого и оранжевого цветов. Деструктированная древесина ели независимо от типа и стадии гнили – это хороший энергетический материал, с теплотворной способностью 19 000 Дж/г или больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доклад. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2023 год / отв. ред. Э.В. Шашин. Архангельск: 2024. 505 с.
Report: Environmental Status and Protection in the Arkhangelsk Region in 2023. Ed. by E.V. Shashin. Arkhangelsk, 2024. 505 p. (In Russ.).
2. Коптев С.В. Фаутиность северотаежных ельников // Изв. вузов. Лесн. журн. 1992. № 2. С. 20–26.
Koptev S.V. Fautiness of North Taiga Spruce Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1992, no. 2, pp. 20–26. (In Russ.).
3. Кулак М.И., Федоренчик А.С., Леонов Е.А. Прогнозирование хранения запасов топлива в условиях лесоэнергетических терминалов // Наука и инновации. 2012. № 7(113). С. 69–72.
Kulak M.I., Fedorenchik A.S., Leonov E.A. Forecasting the Storage of Fuel Reserves in Forest Energy Terminals. *Nauka i innovatsii* = Science and Innovations, 2012, no. 7(113), pp. 69–72. (In Russ.).
4. Лебедев А.В., Иванова Э.А. Патология ели в древостоях разного состава // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 3. С. 47–50.
Lebedev A.V., Ivanova E.A. Spruce Pathology in the Stands of Different Composition. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2001, no. 3, pp. 47–50. (In Russ.).
5. Леонов Е.А., Клоков Д.В., Гарабазхиу А.А., Духовник А.А. Влияние сроков хранения древесного сырья и топливной щепы на их теплотворную способность // Тр. БГТУ. 2020. Сер. 1, № 2. С. 186–191.
Leonov E.A., Klokov D.V., Garabazhiu A.A., Dukhovnik A.A. Influence of the Wood Raw Materials and Fuel Chips Storage Terms on Their Heating Ability. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2020, series 1, no. 2, pp. 186–191. (In Russ.).
6. Остроухова Л.А., Федорова Т.Е., Онучина Н.А., Левчук А.А., Бабкин В.А. Определение количественного содержания экстрактивных веществ из древесины, корней и коры деревьев хвойных видов сибиря: лиственницы (*Larix sibirica* L.), сосны (*Pinus sylvestris* L.), пихты (*Abies sibirica* L.), ели (*Picea obovata* L.) и кедра (*Pinus sibirica* Du Tour.) // Химия растит. сырья. 2018. № 4. С. 185–195.
Ostroukhova L.A., Fedorova T.E., Onuchina N.A., Levchuk A.A., Babkin V.A. Determination of the Quantitative Content of Extractives from Wood, Roots and Bark of Coniferous Trees in Siberia: Larch (*Larix sibirica* L.), Pines (*Pinus sylvestris* L.), Fir (*Abies sibirica* L.), Spruce (*Picea obovata* L.) and Cedar (*Pinus sibirica* Du Tour.). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 4, pp. 185–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018044245>
7. Рипачек В. Биология дереворазрушающих грибов. М.: Лесн. пром-сть, 1967. 276 с.
Ripachek V. *Biology of Wood-Destroying Fungi*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1967. 276 p. (In Russ.).
8. Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Тхань Б.Д., Асеева Р.М. Тепловыделение при горении древесины // Лесн. вестн. 2003. № 5. С. 74–79.
Serkov B.B., Sivenkov A.B., Than' B.D., Aseeva R.M. Heat Release during Wood Combustion. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2003, no. 5, pp. 74–79. (In Russ.).
9. Стороженко В.Г. Состояние и пораженность дереворазрушающими грибами коренных ельников подзоны северной тайги // Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 6. С. 153–158.

Storozhenko V.G. The Condition and Scope of Damage by Wood-Attacking Fungi in North Taiga Pristine Spruce Forests. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* = Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2013, no. 6, pp. 153–158. (In Russ.).

10. Стороженко В.Г., Засадная В.А. Структура древесного отпада девственных ельников северной и южной тайги Европейской части России // Сиб. лесн. журн. 2019. № 2. С. 64–73.

Storozhenko V.G., Zasadnaya V.A. Structure of Woody Debris of Virgin Spruce Forests of the Northern and Southern Taiga in the European Part of Russia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal Forest Science, 2019, no. 2, pp. 64–73. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15372/SJFS20190206>

11. Тюкавина О.Н. Направления использования сосновых горельников // Лесная наука современности: материалы VI Мелеховских науч. чтений, посвящ. 115-летию со дня рождения выдающегося ученого-лесоведа, акад. Ивана Степановича Мелехова. Архангельск: САФУ, 2020. С. 62–69.

Tyukavina O.N. Directions for the Use of Pine Burnt Wood. *Modern Forest Science: Proceedings of the VI Melekhov Scientific Readings Dedicated to the 115th Anniversary of the Birth of the Outstanding Scientist-Forester, Academician Ivan Stepanovich Melekhov*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2020, pp. 62–69. (In Russ.).

12. Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Мелехов В.И., Неверов Н.А. Теплотворная способность фракций надземной фитомассы культур сосны обыкновенной в условиях Северо-таежного лесного района // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 2. С. 27–33.

Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Melekhov V.I., Neverov N.A. Calorific Value of Aerial Phytomass Fractions of Scots Pine in North Taiga Forest Region. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 27–33. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2024-2-27-33>

13. Тюкавина О.Н., Корепин Д.Ю. Теплотворная способность стволов ели при поражении их еловой губкой // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. С. 210–212.

Tyukavina O.N., Korepin D.Yu. Calorific Value of Spruce Trunks when They are Affected by a Spruce Sponge. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg, St. Petersburg State Forestry University Publ., 2024, pp. 210–212. (In Russ.).

14. Тюкавина О.Н., Кунников Ф.А., Коселева А.Е. Влияние гнили на распределение минеральных элементов в древесине тополя бальзамического // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2016. № 214. С. 105–119.

Tyukavina O.N., Kunnikov F.A., Kosheleva A.E. The Influence of Rot on the Distribution of Mineral Elements in Balsam Poplar Wood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2016, no. 214, pp. 105–119. (In Russ.).

15. Apraku S.E., Shen Y. Biomass Pellet Fuel Production and Utilization in Ghana: A Review. *ACS Sustainable Resource Management*, 2024, vol. 1, iss. 4, pp. 586–603.

<https://doi.org/10.1021/acssusresmgmt.3c00121>

16. Gendek A., Aniszewska M., Owoc D., Tamelová B., Malat'ák J., Velebil J., Krilek J. Physico-Mechanical and Energy Properties of Pellets Made from Ground Walnut Shells, Coniferous Tree Cones and Their Mixtures. *Renewable Energy*, 2023, vol. 122, pp. 248–258.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.122>

17. Gendek A., Piętko J., Aniszewska M., Malat'ák J., Velebil J., Tamelová B., Krilek J., Moskalik T. Energy Value of Silver Fir (*Abies alba*) and Norway Spruce (*Picea abies*) Wood Depending on the Degree of its Decomposition by Selected Fungal Species. *Renewable Energy*, 2023, vol. 215, art. no. 118948. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118948>

18. Gonçalves A.C., Malico I., Sousa A.M.O. Energy Production from Forest Biomass: An Overview. *Forest Biomass – From Trees to Energy*, IntechOpen, 2021, pp. 1–23. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93361>
19. Sui H., Chen J., Cheng W., Zhu Y., Zhang W., Hu J., Jiang H., Shao J., Chen H. Effect of Oxidative Torrefaction on Fuel and Pelletizing Properties of Agricultural Biomass in Comparison with Non-Oxidative Torrefaction. *Renewable Energy*, 2024, vol. 226, art. no. 120423. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120423>
20. He H., Wang W., Sun Y., Sun W., Wu K. From Raw Material Powder to Solid Fuel Pellet: A State-of-the-Art Review of Biomass Densification. *Biomass and Bioenergy*, 2024, vol. 186, art. no. 107271. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107271>
21. Krajnc N. *Wood Fuels Handbook*. Pristina, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. 31 p.
22. Librenti I., Ceotto E., Di Candilo M. Biomass Characteristics and Energy Contents of Dedicated Lignocellulose Crops. *Proceedings of the Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. Italy, Venice, 2010. 8 p.
23. Nasser R.A., Aref I.M. Fuelwood Characteristics of Six Acacia Species Growing Wild in the Southwest of Saudi Arabia as Affected by Geographical Location. *BioResources*, 2014, vol. 9, iss. 1, pp. 1212–1224. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1212-1224>
24. Petráš R., Mecko J., Kukla J., Kuklová M., Krupová D., Pástor M., Raček M., Pivková I. Energy Stored in Above-Ground Biomass Fractions and Model Trees of the Main Coniferous Woody Plants. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 22, art. no. 12686. <https://doi.org/10.3390/su132212686>
25. Piętko J., Gendek A., Malaťák J., Velebil J., Moskalik T. Effects of Selected White-Rot Fungi on the Calorific Value of Beech Wood (*Fagus sylvatica* L.). *Biomass and Bioenergy*, 2019, vol. 127, art. no. 105290. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105290>
26. Zeng W.-s., Tang S.-z., Xiao Q.-h. Calorific Values and Ash Contents of Different Parts of Masson Pine Trees in Southern China. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25, pp. 779–786. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0525-3>

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