

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ КУЛЬТУРФИТОЦЕНОЗОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА

Д.Н. Клевцов, О.Н. Тюкавина, Н.Р. Сунгурова

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

d.klevtsov@narfu.ru

Рассмотрена биоэнергетическая продуктивность искусственных сосновых насаждений. Установлено, что в 30-летних искусственных сосновых ценозах наименьшее количество связанной древесным ярусом энергии наблюдается в лишайниковом типе условий местопроизрастания (443,1 ГДж/га), наибольшее — в черничном (1915,1 ГДж/га). В культурфитоценозах брусничного типа леса биоэнергетическая продуктивность занимает промежуточное положение (1210,7 ГДж/га). Показано, что наибольшей относительной величины аккумулированная энергия достигает в таком компоненте надземной фитомассы, как древесина ствола. По данной фракции варьирование наблюдается от 50,2 % в лишайниковом типе условий местопроизрастания до 65,8 % — в черничном, в расчете от общего запаса фитомассы лесных культур. Установлено, что второстепенное положение относительно данного показателя занимает древесная зелень. Доля энергетической продуктивности хвои в общей надземной фитомассе снижается при улучшении лесорастительных условий. Определено примерно равное соотношение депонирования энергии в исследованных типах сосняков искусственного происхождения фракциями коры и живых ветвей (7,2...11,7 %), а наименьшая доля аккумулированной энергии приходится на фракцию сухих сучьев (5,3...7,0 %).

Ключевые слова: биоэнергетическая продуктивность, лесные культуры, сосна обыкновенная, лесорастительные условия

Ссылка для цитирования: Клевцов Д.Н., Тюкавина О.Н., Сунгурова Н.Р. Сравнительный анализ биоэнергетической продуктивности культурфитоценозов сосны обыкновенной европейского севера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 4. С. 15–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-15-20

Общеизвестно, что источником энергии для растительных организмов служит солнечная радиация, поглощаемая зелеными частями растений при фотосинтезе. В растительной клетке, содержащей хлоропласты, происходят первичное аккумулирование энергии, полученной с солнечными лучами, и синтез органических соединений. Для понимания эффективности деятельности первого трофического уровня фитоценозов недостаточно оценить действие фотоавтотрофного компонента лесных экосистем лишь в количественных характеристиках образованной фитомассы. Целесообразно данные о фитомассе выражать через количество запасаемой в ней энергии.

Значимость такого подхода обусловлена повышенным вниманием научного сообщества и бизнеса во многих странах мира в последние десятилетия к вопросам использования древесной биомассы в энергетических целях. На глобальном уровне признается, что рациональное и устойчивое лесопользование должно основываться на комплексном и системном подходе к организации хозяйственной деятельности при обязательном соблюдении экологических требований. Значительному экономическому успеху арендаторов лесных участков помимо заготовки и обработки древесины может способствовать организация и наращивание производств с использованием от-

ходов лесозаготовки и деревообработки для биоэнергетических целей. Данная переориентация в хозяйствовании способствует более эффективному использованию биоресурсного потенциала лесов и обеспечению экологического баланса.

Достаточные запасы древесного сырья, по мнению А.А. Мартынюка [1], позволяют переориентировать теплоснабжение в различных субъектах Российской Федерации с нефтепродуктов на биотопливо. Годичный прирост фитомассы на Земле эквивалентен 20...30 млрд т условного топлива и превышает показатели добычи нефти. Согласно мнению ученых, фитомасса наиболее значимый экологически чистый возобновляемый источник энергии после солнечной энергии [2]. Растительную биомассу считают «благородным» источником энергии, поскольку фитомассу и продукты ее биodeградации при сгорании рассматривают как часть природного карбонового цикла. Образующий при сгорании углекислый газ не относится к парниковым газам. Поэтому мировая научная общественность рассматривает растительную биомассу как перспективный энергетический ресурс [3–8]. Лесная биоэнергетика сглаживает энергозависимость, когда предприятия находятся на удалении от мест добычи газа, нефти, каменного угля. Кроме того, организация производств по комплексному энергетическому

использованию древесных отходов способствует решению социально-экономических проблем населения (особенно проживающего в удаленных районах), и прежде всего, предотвращает миграционные процессы, увеличивает количество рабочих мест [9].

В пеллетном производстве экономически оправданно использование отходов лесозаготовительной, деревообрабатывающей промышленности и отходов от переработки низкосортной древесины. Пеллеты и брикеты востребованы в качестве источника энергии в Китае, Европе, Северной Америке. Использование пеллетного топлива не требует модернизации традиционных угольных котельных и в условиях тенденции повышения цен на природные энергоносители будет расширяться, в частности в коммунальном хозяйстве [10].

Для получения биоэнергии используют пеллеты из опилок сосны [11–13], а также ее коры [14] и хвои [15]. Опилки сосны вводят в состав биомассы для производства пеллет, брикетов для улучшения их физических, механических и энергетических свойств [16–19].

Цель работы

Цель работы — сравнение биоэнергетической продуктивности культур сосны обыкновенной, произрастающих в различных экологических условиях Балтийско-Белозерского лесного района таежной лесорастительной зоны Европейского Севера России.

Материалы и методы

Исследования были проведены в таежной лесорастительной зоне европейской части России (Балтийско-Белозерский лесной район, Вологодская обл.). Объектами исследования служили чистые по составу участки 30-летних производственных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), которые созданы методом посева семян на свежих незадернелых вырубках со слабой степенью захламленности в лишайниковом, брусничном и черничном типах лесорастительных условий. Древостои характеризуются существенными различиями по биопродукционному процессу. Обработка почвы на исследованных участках культурфитоценозов сосны обыкновенной с дренированными почвами заключалась в основном в измельчении и перемешивании подстилки с минеральными горизонтами на глубину до 15 см. Работы проводились вручную с помощью лопат и мотыг.

Полевым работам предшествовали камеральные работы по изучению документальных материалов и рекогносцировочное исследование подобранных искусственных сосновых насаждений. На этих подобранных участках культур про-

водили закладку временных пробных площадей и сбор данных в ходе проведения наблюдений и измерений на них. Исследование изучаемых культурфитоценозов сосны обыкновенной опиралось на методические разработки В.В. Огиевского, А.А. Хирова [20], Н.Н. Соколова [21], А.Р. Родина, М.Д. Мерзленко [22].

Первоначально на временных пробных площадях устанавливали лесоводственно-таксационные параметры искусственных сосняков. Затем в пределах всего диапазона варьирования размеров деревьев на пробной площади отбирали по 10 модельных деревьев, которые должны соответствовать определенным критериям (не иметь пороков в развитии кроны, быть без признаков повреждения стволов и по прочим дендрометрическим характеристикам). После отбора и валки каждое модельное дерево отдельно исследовали весовым способом с помощью электронного безмена с точностью ± 50 г по компонентам надземной фитомассы (живым ветвям, древесной зелени, сухим сучьям, коре и древесине ствола).

Таксационная характеристика изученных сосняков искусственного происхождения представлена в табл. 1.

Исходя из теплотворной способности и запаса органики в фракционном составе надземной фитомассы исследованных искусственных сосняков был проведен расчет количественных показателей связанной солнечной энергии. Для выявления закономерностей формирования надземной фитомассы и заключенной в ней энергии в исследуемых культурфитоценозах сосны полевые пофракционные весовые данные обрабатывали с помощью математических методов. При этом использовался регрессионный метод определения запасов фитомассы лесных насаждений, который считается достаточно точным

Т а б л и ц а 1

Характеристика таксационных показателей 30-летних искусственных сосновых насаждений состава 10С по типам лесорастительных условий при первоначальной густоте 4000 посевных мест/га

Characteristics of the taxation indicators of 30-year-old artificial pine plantations with a composition of 10С by types of forest growing conditions with an initial density of 4000 sowing places/ha

Тип лесорастительных условий	Класс бонитета	Относительная полнота	Запас древесины, м ³ /га	Средние	
				диаметр, см	высота, м
Лишайниковый	V	0,9	40	3,7	4,4
Брусничный	III	1,0	106	6,2	8,6
Черничный	II	1,0	139	9,5	10,4

Т а б л и ц а 2

**Калорийность (ккал/кг) надземных компонентов сосны обыкновенной
согласно данным разных авторов**
Caloric content (kcal/kg) of aboveground components of Scots pine in studies by different authors

Фракции фитомассы	Теплотворная способность				Среднее значение
	По Н.П. Курбатскому [23]	По А.А. Молчанову [24]	По В.П. Дадыкину, Н.В. Кононенко [25]	По Н.И. Казмирову и др. [26]	
Хвоя	5226	5210	–	5148	5195
Древесина ствола	–	4921	4809...5024	4870	4903
Кора ствола	4825	4815	–	4887	4842
Ветви	4927	–	–	4990	4959

Т а б л и ц а 3

**Биоэнергетическая продуктивность (ГДж/га) исследованных
30-летних сосновых культурфитоценозов**
Bioenergetic productivity (GJ/ha) of the studied 30-year-old homogeneous pine stands

Тип лесорастительных условий	Компоненты надземной фитомассы											
	Ствол				Крона				Сухие сучья		Всего	
	древесина		кора		ветви		древесная зелень					
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Лишайниковый	222,3	50,2	52,0	11,7	40,2	9,1	105,1	23,7	23,5	5,3	443,1	100
Брусничный	699,4	57,8	128,8	10,6	118,1	9,8	184,9	15,3	79,5	6,5	1210,7	100
Черничный	1259,3	65,8	139,1	7,2	170,2	8,9	212,6	11,1	134,0	7,0	1915,1	100

Примечание. 1 — фактическое значение, 2 — относительное значение.

и универсальным, поскольку позволяет выявить регрессионную зависимость компонентов фитомассы модельных деревьев от их диаметра. В ходе камеральной обработки исходных эмпирических данных применяли программы Microsoft Office Excel и специализированную программу Curve Expert 1.3.

Результаты и обсуждение

Теплотворную способность (калорийность) фракций надземной фитомассы исследованных культурфитоценозов сосны обыкновенной определяли по литературным данным. При этом провели анализ результатов, полученных исследователями по данному направлению в разных районах страны (табл. 2).

В ходе анализа литературных данных были выведены средние показатели теплотворной способности различного горючего материала. Так, для хвои, древесины, коры и ветвей они составляют 5195, 4903, 4842 и 4959 ккал/кг соответственно.

Аккумулированная различными компонентами надземной фитомассы искусственных сосновых молодняков энергия значительно изменяется по типам лесорастительных условий (табл. 3).

Высокая вариабельность биоэнергетической продуктивности изученных культурфитоценозов

сосны обыкновенной, на наш взгляд, объясняется производительностью их древостоев. Для выявления влияния типа лесорастительных условий на биоэнергетическую продуктивность сосновых молодняков искусственного происхождения выполнен сравнительный анализ исследуемых объектов одинакового возрастного состояния (30 лет). В результате проведенной оценки можно отметить, что наименьшее количество аккумулированной древостоем 30-летних сосновых культурфитоценозов энергии наблюдается в лишайниковом типе условий местопроизрастания (443,1 ГДж/га), наибольшее — в черничном типе лесорастительных условий (1915,1 ГДж/га). В искусственно созданном сосняке брусничном биоэнергетическая продуктивность характеризуется промежуточным положением (1210,7 ГДж/га).

Структура аккумулированной компонентами надземной фитомассы энергии исследованных нами сосновых насаждений искусственного происхождения обусловлена различными экологическими условиями их произрастания. Наибольшей относительной величины аккумулированная энергия достигает в таком компоненте надземной фитомассы, как древесина ствола. По данной фракции варьирование наблюдается от 50,2 % в лишайниковом типе условий местопроизрастания

до 65,8 % — в черничном, относительно общего запаса надземной фитомассы древесного яруса исследованных культурфитоценозов. К.С. Бобкова [27], исследуя сосновые фитоценозы средней тайги, установила подобную тенденцию, отмечая, что общее количество накапливаемой энергии в древесине ствола колеблется в пределах 57...65 %, в древесной зелени — 4...5 %, в ветвях — 4...7 %, в коре ствола — 5...6 %.

Второстепенное положение по относительной энергетической продуктивности занимает компонент надземной фитомассы — древесная зелень. Доля аккумулированной энергии по данной фракции надземной фитомассы уменьшается от наименее продуктивного сосняка лишайникового (23,7 %) к более производительному сосняку черничному (11,1 %). Такое распределение биоэнергетических запасов в древостоях исследуемых сосняков объясняется общими закономерностями продуцирования органики в разных экологических условиях, когда ассимиляционный аппарат и скелетная часть деревьев меняют пропорции в связи с бонитетом. Примерно в равном соотношении депонируют энергию в исследованных типах сосняков искусственного происхождения фракции коры и живых ветвей (7,2...11,7 %). Наименьшая доля аккумулированной древесным ярусом сосновых культурфитоценозов энергии по всем типам условий местопроизрастания приходится на фракцию сухих сучьев (5,3...7,0 %).

Выводы

С улучшением условий произрастания биоэнергетическая продуктивность компонентов надземной фитомассы древесного яруса искусственно созданных ценозов сосны обыкновенной возрастает. Структура аккумулированной разными фракциями фитомассы энергии также обусловлена лесотипологическими условиями. Полученные в ходе проведенных исследований результаты целесообразно применять при расчете запасов горючих материалов в древостое сосновых молодняков для обоснования правильного выбора дозы огнегасящих химических средств и воды на тушение, а также для разработки комплекса профилактических противопожарных мероприятий. Установлен биоэнергетический потенциал фракций надземной фитомассы древостоев, который экономически и экологически обоснованно можно вовлекать в энергетическое использование. Данные выполненных исследований пригодны для интерпретации распределения компонентов надземной фитомассы в качестве составляющих энергетической емкости лесных биогеоценозов, а также для реализации природоохранных проектов и исследований.

Список литературы

- [1] Мартынюк А.А. Оценка возможности использования древесной биомассы для теплоснабжения в целях перехода от нефтепродуктов на местные возобновляемые виды топлива // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2016, № 5. С. 33–37.
- [2] Бабич Н.А., Любов В.К. Энергетический потенциал среднетаежных сосняков-черничников искусственного происхождения // География Европейского Севера. Архангельск: Изд-во Педагогического государственного университета, 2002. С. 194–200.
- [3] Писаренко А.И., Страхов В.В. О некоторых современных задачах лесного сектора России // Лесное хозяйство, 2006. № 4. С. 5–7.
- [4] Berndes G., Hansson J. Bioenergy expansion in the EU: Cost-effective climate change mitigation, employment creation and reduced dependency on imported fuels // Energy Policy, 2007, no. 35(12), pp. 5965–5979.
- [5] Björheden R. Drivers behind the development of forest energy in Sweden // Biomass & Bioenergy, 2006, no. 30, pp. 289–295.
- [6] IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation // Intergovernmental Panel on Climate Change. 2011. URL: <https://www.ipcc.ch/2011/06/28/special-report-on-renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation-srren/> (дата обращения 25.12.2020)
- [7] Sandström F., Petersson H., Kruys N., Ståhl G. Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. in boreal forests of Sweden // Forest Ecology and Management, 2007, no. 243(1), pp. 19–27.
- [8] Ximenes F.d.A., George B.H., Cowie A., Williams J., Kelly G. Greenhouse Gas Balance of Native Forests in New South Wales, Australia // Forests, 2012, no. 3(3), pp. 653–683.
- [9] Melin Y. Impacts of stumps and roots on carbon storage and bioenergy use in a climate change context // Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå SLU: Service/Repro, Uppsala, 2014, 74 p.
- [10] Рошупкин В.П. Ресурсы лесного фонда — в энергетике // Биоэнергетика, 2005. № 1. С. 6–7.
- [11] Bergstrom D., Israelsson S., Ohman M., Dahlqvist S.A., Gref R., Boman C., Wasterlund I. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets // Fuel Processing Technology, 2008, v. 89, iss. 12, pp. 1324–1329.
- [12] Charis G., Danha G., Muzenda E. Characterizations of Biomasses for Subsequent Thermochemical Conversion: A Comparative Study of Pine Sawdust and *Acacia Tortilis* // Processes, 2020, v. 8, iss. 5, p. 546.
- [13] Li W.Z., Bu W.J., Jiang Y., Guo W.W., Wang Y., Yin X.L. Co-pelletization of edible fungi cultivation residue and pine sawdust: The optimal variable combinations // Environmental Progress & Sustainable Energy, 2020, v. 39, iss. 4, p. 13384.
- [14] Anerud E., Routa J., Bergstrom D., Eliasson L. Fuel quality of stored spruce bark — Influence of semi-permeable covering material // Fuel, v. 279, p. 118467.
- [15] Mandal S., Kumar G.V.P., Bhattacharya T.K., Tanna H.R., Jena P.C. Briquetting of Pine Needles (*Pinus roxburgii*) and Their Physical, Handling and Combustion Properties // Waste and Biomass Valorization, 2019, v. 10, iss. 8, pp. 2415–2424.
- [16] Boschetti W.T.N., Lopes A.D.P., Ribeiro R.A., Reyes R.Q., Carneiro A.D.O. Kraft lignin as an additive in pine and eucalyptus particle composition for briquette production // Revista Arvore, 2019, v.43, iss. 2, p. 430201.

- [17] Carrillo-Parra A., Contreras-Trejo J.C., Pompa-Garcia M., Pulgarin-Gamiz M.F., Rutiaga-Quinones J.G., Pamanes-Carrasco G., Ngangyo-Heya M. Agro-Pellets from Oil Palm Residues // Pine Sawdust Mixtures: Relationships of Their Physical, Mechanical and Energetic Properties, with the Raw Material Chemical Structure // Applied Sciences-Basel, 2020, v.10, iss. 18, p. 6383.
- [18] Martinez C.L.M., Sermiyagina E., Carneiro A.D.O., Vakkilainen E., Cardoso M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil // Biomass & Bioenergy, 2019, v.123, pp. 70–77.
- [19] Nunez-Retana V.D., Rosales-Serna R., Prieto-Ruiz J.A., Wehenkel C., Carrillo-Parra A. Improving the physical, mechanical and energetic properties of Quercus spp. wood pellets by adding pine sawdust // Peerj, 2020, v.8, p. 9766.
- [20] Огиевский В.В., Хиров А.А. Обследование и исследование лесных культур. Л.: Изд-во Лесотехнической академии, 1967. 50 с.
- [21] Соколов Н.Н. Методические указания к дипломному проектированию по таксации пробных площадей. Архангельск: Редакционно-издательский отдел Архангельского лесотехнического института, 1978. 44 с.
- [22] Родин А.Р., Мерзленко М.Д. Методические рекомендации по изучению лесных культур старших возрастов. М.: Изд-во Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук имени В.И. Ленина, 1983. 36 с.
- [23] Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
- [24] Молчанов А.А. Продуктивность органической массы в лесах различных зон. М.: Наука, 1971. 276 с.
- [25] Дадыкин В.П., Кононенко Н.В. О теплотворной способности органического материала древесных растений // Лесоведение, 1975. № 2. С. 30–37.
- [26] Казимиров Н.И., Волков А.Д., Зябченко С.С. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.
- [27] Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1987. 156 с.

Сведения об авторах

Клевцов Денис Николаевич — канд. с.-х. наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии Высшей школы естественных наук и технологий, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, d.klevtsov@narfu.ru

Тюкавина Ольга Николаевна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии Высшей школы естественных наук и технологий, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, o.tukavina@narfu.ru

Сунгурова Наталья Рудольфовна — д-р с.-х. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Высшей школы естественных наук и технологий, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, nsungurova@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.02.2021.

Принята к публикации 15.03.2021.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SCOTS PINE HOMOGENEOUS STANDS BIOENERGETIC PRODUCTIVITY IN EUROPEAN NORTH

D. N. Klevtsov, O. N. Tyukavina, N. R. Sungurova

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

o.tukavina@narfu.ru

The bioenergetic productivity of artificial pine stands is considered. It was found that in 30-year-old artificial pine coenoses, the lowest amount of energy associated with the tree layer is observed in the lichen type of growing conditions (443,1 GJ/ha), the highest — in the blueberry (1915,1 GJ/ha). Bioenergetic productivity occupies an intermediate position (1210,7 GJ/ha) in the cranberry-type forest culture phytocenoses. It is shown that the accumulated energy reaches the highest relative value in such a component of aboveground phytomass as trunk wood. For this fraction, the variation is observed from 50.2% in the lichen type of growing conditions to 65.8% in the blueberry type, based on the total stock of phytomass of forest crops. It is established that the secondary position relative to this indicator is occupied by woody greens. The share of the energy productivity of needles in the total aboveground phytomass decreases with the improvement of forest growing conditions. An approximately equal ratio of energy deposition in the studied types of artificial pine forests by the fractions of bark and live branches (7,2...11,7%) was determined, and the smallest share of accumulated energy falls on the fraction of dry branches (5,3...7,0 %).

Keywords: bioenergetic productivity; forest culture; scots pine; forest growing conditions

Suggested citation: Klevtsov D.N., Tyukavina O.N., Sungurova N.R. *Sravnitel'nyy analiz bioenergeticheskoy produktivnosti kul'tur fitotsenozov sosny obyknovennoy evropeyskogo severa* [Comparative analysis of Scots pine homogeneous stands bioenergetic productivity in European North]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 15–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-4-15-20

References

- [1] Martynuk A.A. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya drevesnoy biomassy dlya teplosnabzheniya v tselyakh perekhoda ot nefteproduktov na mestnye vozobnovlyаемые виды топлива* [Evaluation of the possibility of using wood biomass for heat supply in order to switch from petroleum products to local renewable fuels]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2016, no. 5, pp. 33–37.
- [2] Babich N.A., Lyubov V.K. *Energeticheskiy potentsial srednetazhnykh sosnyakov-chernichnikov iskusstvennogo proiskhozhdeniya* [Energy potential of Middle taiga pine-blueberry trees of artificial origin]. Geografiya Evropeyskogo Severa [Geography of the European North]. Arkhangelsk: Pedagogical State University Publishing House, 2002, pp. 194–200.
- [3] Pisarenko A.I., Strakhov V.V. *O nekotorykh sovremennykh zadachakh lesnogo sektora Rossii* [About some modern tasks of the forest sector of Russia]. Lesnoe khozyaystvo [Forestry], 2006, no. 4, pp. 5–7.
- [4] Berndes G., Hansson J. Bioenergy expansion in the EU: Cost-effective climate change mitigation, employment creation and reduced dependency on imported fuels. *Energy Policy*, 2007, no. 35(12), pp. 5965–5979.
- [5] Björheden R. Drivers behind the development of forest energy in Sweden. *Biomass & Bioenergy*, 2006, no. 30, pp. 289–295.
- [6] IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2011. Available at: <https://www.ipcc.ch/2011/06/28/special-report-on-renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation-srren/> (accessed 25.12.2020).
- [7] Sandström F., Petersson H., Kruys N., Ståhl G. Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. in boreal forests of Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2007, no. 243(1), pp. 19–27.
- [8] Ximenes F.d.A., George B.H., Cowie A., Williams J., Kelly G. Greenhouse Gas Balance of Native Forests in New South Wales, Australia. *Forests*, 2012, no. 3(3), pp. 653–683.
- [9] Melin Y. Impacts of stumps and roots on carbon storage and bioenergy use in a climate change context/ Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå SLU: Service/Repro, Uppsala, 2014, 74 p.
- [10] Roshchupkin V. *Resursy lesnogo fonda — v energetiku* [Resources of the forest fund-in power engineering]. *Bioenergetika* [Bioenergetika], 2005, no. 1, pp. 6–7.
- [11] Bergstrom D., Israelsson S., Ohman M., Dahlqvist S.A., Gref R., Boman C., Wasterlund I. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*, 2008, v. 89, iss. 12, pp. 1324–1329.
- [12] Charis G., Danha G., Muzenda E. Characterizations of Biomasses for Subsequent Thermochemical Conversion: A Comparative Study of Pine Sawdust and *Acacia Tortilis*. *Processes*, 2020, v. 8, iss. 5, p. 546.
- [13] Li W.Z., Bu W.J., Jiang Y., Guo W.W., Wang Y., Yin X.L. Co-pelletization of edible fungi cultivation residue and pine sawdust: The optimal variable combinations. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2020, v. 39, iss. 4, p. 13384.
- [14] Anerud E., Routa J., Bergstrom D., Eliasson L. Fuel quality of stored spruce bark - Influence of semi-permeable covering material. *Fuel*, v. 279, p. 118467.
- [15] Mandal S., Kumar G.V.P., Bhattacharya T.K., Tanna H.R., Jena P.C. Briquetting of Pine Needles (*Pinus roxburgii*) and Their Physical, Handling and Combustion Properties. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, v. 10, iss. 8, pp. 2415–2424.
- [16] Boschetti W.T.N., Lopes A.D.P., Ribeiro R.A., Reyes R.Q., Carneiro A.D.O. Kraft lignin as an additive in pine and eucalyptus particle composition for briquette production. *Revista Arvore*, 2019, v.43, iss. 2, p. 430201.
- [17] Carrillo-Parra A., Contreras-Trejo J.C., Pompa-Garcia M., Pulgarin-Gamiz M.F., Rutiaga-Quinones J.G., Pamanes-Carrasco G., Ngangyo-Heya M. Agro-Pellets from Oil Palm Residues / Pine Sawdust Mixtures: Relationships of Their Physical, Mechanical and Energetic Properties, with the Raw Material Chemical Structure. *Applied Sciences-Basel*, 2020, v.10, iss. 18, p. 6383.
- [18] Martinez C.L.M., Sermiyagina E., Carneiro A.D.O., Vakkilainen E., Cardoso M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. *Biomass & Bioenergy*, 2019, v.123, pp. 70–77.
- [19] Nunez-Retana V.D., Rosales-Serna R., Prieto-Ruiz J.A., Wehenkel C., Carrillo-Parra A. Improving the physical, mechanical and energetic properties of *Quercus* spp. wood pellets by adding pine sawdust. *PeerJ*, 2020, v.8, p. 9766.
- [20] Ogievskiy V.V., Khironov A.A. *Obsledovanie i issledovanie lesnykh kul'tur* [Survey and research of forest cultures]. Leningrad: Publishing House of the Forestry Academy, 1967, 50 p.
- [21] Sokolov N.N. *Metodicheskie ukazaniya k diplomnomu proektirovaniyu po taksatsii probnykh ploshchadey* [Methodological guidelines for diploma design on the taxation of sample plot]. Arkhangelsk: Editorial and Publishing Department of the Arkhangelsk Forestry Institute, 1978, 44 p.
- [22] Rodin A.R., Merzlenko M.D. *Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu lesnykh kul'tur starshikh vozrastov* [Methodological recommendations for the study of forest cultures of older ages]. Moscow: Publishing House of the All-Union Academy of Agricultural Sciences named after V. I. Lenin, 1983, 36 p.
- [23] Kurbatskiy N.P. *Tekhnika i taktika tusheniya lesnykh pozharov* [Technique and tactics of extinguishing forest fires]. Moscow: Goslesbumizdat, 1962, 154 p.
- [24] Molchanov A.A. *Produktivnost' organicheskoy massy v lesakh razlichnykh zon* [Productivity of organic mass in forests of different zones]. Moscow: Nauka [Science], 1971, 276 p.
- [25] Dadykin V.P., Kononenko N.V. *O teplotvornoy sposobnosti organicheskogo materiala drevesnykh rasteniy* [On the calorific value of the organic material of woody plants]. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1975, no. 2, pp. 30–37.
- [26] Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zybchenko S.S. *Obmen veshchestv i energii v osnovnykh lesakh Evropeyskogo Severa* [Metabolism and energy in the pine forests of the European North]. Leningrad: Nauka [Science], 1977, 304 p.
- [27] Bobkova K.S. *Biologicheskaya produktivnost' khvoynykh lesov Evropeyskogo Severo-Vostoka* [Biological productivity of coniferous forests of the European North-East]. Leningrad: Nauka [Science], 1987, 156 p.

Authors' information

Klevcov Denis Nikolaevich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, d.klevtsov@narfu.ru

Tyukavina Olga Nikolaevna — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, o.tukavina@narfu.ru

Sungurova Natal'ya Rudol'fovna — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nsungurova@yandex.ru

Received 26.02.2021.

Accepted for publication 15.03.2021.