

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8>

УДК 674.81



Методика для оценки степени биоразлагаемости пластиков на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления связующих веществ

Артём В. Артёмов✉, artemovav@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>

Анна С. Ершова, ershovaas@m.usfeu.ru <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>

Алексей Е. Шкуро, shkuroae@m.usfeu.ru <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>

Виктор Г. Бурындин, buryndinv@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

В настоящее время разработаны и применяются технологии по трансформации биомассы лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления синтетических связующих в композиционные материалы различной номенклатуры применений. Для таких материалов получил определенное распространение собирательный термин «Пластик», или, сокращенно, ПБС. Существующие методы испытаний для определения степени биоразлагаемости не применимы для ПБС. Оценка биоразлагаемости ПБС позволила выявить ряд морфологических признаков и эксплуатационных показателей (далее критериев), при помощи которых возможно выполнять экспресс-оценку и определять степень биоразлагаемости ПБС на основе различного пресс-сырья. Была разработана балльно-рейтинговая система оценки степени биоразлагаемости ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья по выявленным пяти основным критериям при выдержке 85 суток в почво-грунте. Предложенная балльная система была апробирована на образцах ПБС на основе различного пресс-сырья: опилки сосны, березы и лиственницы, растительные остатки борщевика и конопли технической, шелуха пшеницы и листовой опад. Полученные результаты испытаний ПБС были обработаны согласно предложенной методике оценки и был определен возможный потенциал биодegradации исследуемых материалов. В общем аспекте материалы на основе ПБС можно характеризовать как материалы с высоким потенциалом к биодеструкции. Наиболее потенциальным к биоразложению можно рассматривать ПБС на основе сосны и листового опада, которые максимально деструктируют в почво-грунте за 85 суток. Установленные индивидуальные степени биоразлагаемости ПБС на основе различного лигноцеллюлозосодержащего сырья были интерпретированы в рамках ранее полученных результатов по исследованию свойств самого исходного сырья. Таким образом, был сделан вывод о том, что степень биоразлагаемости ПБС обуславливается свойствами самого исходного растительного сырья в условиях идентичной пьезотермической обработки при получении материала.

Ключевые слова: пластик, древесные отходы, растительные отходы, биоразлагаемость, методика, признаки, экспресс-оценка, балльная система

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Методика для оценки степени биоразлагаемости пластиков на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления связующих веществ / А. В. Артёмов, А. С. Ершова, А. Е. Шкуро, В. Г. Бурындин // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 134–150. – Библиогр.: с. 146–149 (28 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8>.

Поступила 17.11.2023. Пересмотрена 22.01.2024. Принята 12.02.2024. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article

Methodology for assessing the degree of biodegradability of plastics based on lignocellulose-containing raw materials without resins

Artyom V. Artyomov✉, artemovav@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>

Anna S. Ershova, ershovaas@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>

Aleksey E. Shkuro, shkuroae@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>

Victor G. Buryndin, buryndinv@g@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

Abstract

Currently, technologies have been developed and implemented to transform the biomass from lignocellulose-containing raw materials (including wood), without the addition of synthetic binders, into composite materials with various applications. For these materials, the common term resinless "plastic", or abbreviated PWR, has become somewhat popular. The current test methods for determining the extent of biodegradation are not suitable for PWR. This facilitates determining the degree of biodegradability of PWR based on various pressing materials. A scoring-rating system was developed to assess the degree of biodegradability of PWR based on lignocellulosic raw materials, using the identified 5 main criteria when aged 85 days in the soil. The proposed scoring system was tested on samples of PWR derived from various pressing materials, including pine, birch, and larch sawdust, vegetative residues of knotweed and industrial hemp, wheat bran, and deciduous litter. The test results of PWR were processed using the proposed evaluation methodology, helping determine the potential for biodegradation of the investigated materials. In general, PWR-based materials can be characterized as materials with a high potential for biodegradation. The most potential for biodegradation can be considered PWR based on pine and leaf litter, which degrade as much as possible in the soil in 85 days. The established individual degrees of biodegradability of PWR based on various lignocellulosic raw materials were interpreted in the context of previously obtained results regarding the properties of the original raw materials. Thus, a conclusion was drawn that the degree of biodegradability of PWR is influenced by the properties of the original plant raw material under identical piezothermal treatment conditions during material production.

Keywords: *plastic, wood waste, plant waste, biodegradability, methodology, signs, express assessment, point system*

Funding: this research received no external funding

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest

For citation: Artyomov A. V., Ershova A. S., Shkuro A. E., Buryndin V. G. (2024). Methodology for assessing the degree of biodegradability of plastics based on lignocellulose-containing raw materials without resins. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No.1 (53), pp. 134-150 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8>.

Received 17.11.2023. *Revised* 22.01.2024. *Accepted* 12.02.2024. *Published online* 20.03.2024.

Введение

В настоящее время в РФ экологическая безопасность страны объявлена частью национальной безопасности, стратегией которой является максимальное вовлечение отходов производства и потребления в хозяйственный оборот в качестве вторичных ресурсов с целью получения отечественной и импортозамещенной продукции [1-3]. Такой подход в решении проблемы по минимизации отходов является актуальным во всем мире и экологически ориентированным [4-6]. Как и любая продукция, продукция на основе вторичных ресурсов должна соответствовать основному природоохранному критерию: в конце жизненного цикла оказывать минимальное воздействие на окружающую среду. Данному требованию в полном объеме могут соответствовать материалы на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья в виде отходов (биомассы) лиственной и хвойной древесины и однолетних растений [7-9].

В настоящее время разработаны и применяются технологии по трансформации биомассы лигноцеллюлозосодержащего сырья без добавления синтетических связующих в композиционные материалы различной номенклатуры применений [10, 11]. Для таких материалов получил определенное распространение собирательный термин «Пластик», или, сокращенно, ПБС». Несмотря на различные подходы в получении ПБС, неизменными условиям остаются – это пьезотермическая обработка лигноцеллюлозо-содержащего сырья в герметизированном пространстве. При таких условиях происходит трансформация лигнин-углеводного комплекса за счет реакций поликонденсации и полимеризации, с помощью которых происходит образование сшитого и монолитного материала [12, 13].

Однако, материалы на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без специальной обработки подвержены биологической деструкции [14, 15]. Данный недостаток можно рассматривать и как достоинство – потенциал к биоразложению материалов. Естественная деструкция ПБС с сочетанием требуемых эксплуатационных свойств позволяет использовать экологически ориентированный подход по внедрению данных материалов.

В настоящее время имеются разнообразные методы испытаний материалов на биостойкость (грибостойкость) и биоразрушение. Большая часть методов – это определение воздействия различных микроорганизмов и грибов на устойчивость материалов к их воздействию. В большинстве случаев, критерием выступает визуальная оценка. Кроме того, рядом методов используется оценка по изменению физико-механических свойств (например, изменение массы, прочностных показателей и т.д.) [16].

Отмечается [17], что наиболее распространенный способ оценки биодegradации по степени изменения массы образцов в процессе испытаний, является неуниверсальным.

Авторы работы [18] делают вывод о том, что более 40 % общего объема биоповреждений материалов и конструкций связано с деятельностью микроорганизмов. При этом отмечают, что большое разнообразие методов исследований биодegradации связано с широким кругом биологических организмов, являющихся агентами биоразрушений самих объектов биоповреждений.

Для древесно-полимерных композитов (ДПК) в работе [19] была выполнена (совместная с ПБС на основе древесной муки и шелухи пшеницы) оценка биоразложения по результатам 21 суток выдержки в активном грунте. Активный грунт соответствовал ГОСТ 9.060-75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Ткани. Метод лабораторных испытаний на устойчивость к микробиологическому разрушению». Авторами было выделено 15 критериев лабораторной и визуальной оценки морфологических изменений структуры образцов. После завершения исследований по результатам полученных данных был выбран диапазон баллов для экспресс-оценки потенциала биоразложения полимерных материалов и композитов на основе древесного и растительного сырья.

Кроме того, авторы отмечают, что материалы ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья сильно подвержены биологическому разрушению в активном грунте в течение 3 недель. По истечению данного срока, большинство образцов ПБС были не пригодны для испытаний на биоразлагаемость, в частности невозможно было определить морфологические характеристики [19].

Одним из лабораторных методов оценки биоразлагаемости полимерных материалов является имитация естественных почвенных условий. Исследуемые образцы помещают в почву определенного биохимического состава, с постоянными показателями температуры и влажности в течение опыта. Скорость биодеструкции оценивают по динамике изменения во времени свойств образцов, состава почвы, содержание микрофлоры и проч. [20].

Таким образом, учитывая высокую естественную деструкцию лигноцеллюлозосодержащих материалов в условиях активного грунта, испытания ПБС на биоразложение целесообразно проводить при выдержке в почво-грунте. Согласно ГОСТ Р 54530-2011 "Ресурсосбережение. Упаковка. Требования, критерии и схема утилизации упаковки посредством компостирования и биологического разложения" процесс компостирования биоразлагаемой упаковки должен продолжаться не более 85 сут.

При этом требуется единый подход по оценке показателя биоразлагаемости материалов на основе ПБС, который должен обладать универсальностью и оперативностью в условиях естественной деструкции при повышенной биологической активности испытываемой среды.

На основании выполненного анализа научных и экспериментальных данных, были выявлены основополагающие признаки (критерии) морфологического изменения образцов ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья при испытаниях на биоразлагаемость:

1. Деструкция материала.
2. Расслоение (разбухание) материала по толщине.
3. Деформация материала.
4. Пигментация лицевой поверхности материала.
5. Микробиологическое поражение материала

Данные критерии обладают оперативностью и доступностью, требуют минимальных затрат времени и наличие простейшего лабораторного оборудования (весы, толщиномер, микроскоп, штангенциркуль).

Цель данной работы – обоснование принятых основных критериев оценки биоразлагаемости ПБС

на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья по отношению к почво-грунту сроком не более 85 сут выдержки в нем.

Кроме того, требуется апробация предложенной системы балльной оценки степени биоразложения ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья по основным принятым критериям.

Материалы и методы

В качестве исходного пресс-материала для получения ПБС были рассмотрены следующее лигноцеллюлозосодержащее сырьё:

- опилки сосны, лиственницы, березы от деревообработки хвойных и лиственных пород древесины;
- плодовые оболочки культурных сельскохозяйственных растений (шелуха пшеницы);
- недревесные растительные остатки – биомасса борщевика, костра конопли технической, листовая опад березы.

Исследуемое лигноцеллюлозосодержащее сырьё размельчалось и фракционировалось.

Для выполнения исследований из лигноцеллюлозосодержащего сырья был изготовлен ПБС методом горячего компрессионного прессования в виде образцов-дисков диаметром 90 мм и толщиной 3 мм в закрытых пресс-формах. Режимы изготовления образцов: давление прессования – 40 МПа, температура прессования 180 °С (для древесного пресс-сырья) и 160 °С (для остального растительного пресс-сырья), продолжительность прессования – 10 мин, продолжительность охлаждения под давлением – 10 мин, продолжительность кондиционирования в комнатных условиях – 24 ч. Влажность пресс-материала – 12 %. Фракционный состав пресс-сырья – 0,7 мм.

После кондиционирования проводилось определение физико-механических свойств образцов (согласно ГОСТ 4648-2014, ГОСТ 4670-91).

Испытание на биоразложение осуществлялось путем экспозиции образцов ПБС в виде квадратов 20 x 20 мм в почво-грунте (в качестве почво-грунта был принят грунт для рассады с добавлением компоста по ТУ 0392-001-59264059-03). Исследуемые ПБС помещались в контейнер с грунтом на глубину от 5 см в горизонтальном положении. После

внесения образцов в почво-грунт, для оценки биологической активности почвенной среды производилось его засеивание семенами трав. Для засеивания использовалась травосмесь, используемая для биологического этапа рекультивации нарушенных земель.

Время выдержки образцов в почво-грунте при комнатной температуре (20±2 °С) и влажности грунта 60±5 % составляло 85 сут.

Общая экспресс-оценка биоразлагаемости изучаемых материалов выполнялась с помощью балльной системы. Количество баллов – 5. Минимальный балл – 1, максимальный – 5 (при большом массиве однородных материалов возможно выставления дробного балла в зависимости от рейтинга).

В случае невозможности произведения оценки, например, образец был не пригоден для испытаний или разрушился в ходе испытаний – количество баллов принимался равным 5.

Формула расчета общего балла с целью оценки степени биоразложения и биоразлагаемости материала будет соответствовать среднеарифметическому значению суммы всех баллов критериев (1):

$$B = \frac{D+P+Dф+П+М}{5}, \quad (1)$$

где D – количество баллов, принятых по критерию деструкции материала;

P – количество баллов, принятых по критерию расслоения (разбухания) материала по толщине;

Dф – количество баллов, принятых по критерию деформации материала;

П – количество баллов, принятых по критерию пигментации лицевой поверхности материала;

М – количество баллов, принятых по критерию микробиологического поражения материала.

D – is the number of points taken according to the criterion of destruction of the material;

P – is the number of points taken according to the criterion of stratification (swelling) of the material in thickness;

Df – the number of points taken according to the criterion of deformation of the material;

P – the number of points taken according to the criterion of pigmentation of the front surface of the material;

M – is the number of points taken according to the criterion of microbiological damage of the material.

Диапазон баллов для экспресс-оценки потенциала биоразложения ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья представлен в табл. 1.

Таблица 2

Оценка степени биоразложения

Table 2

Assessment of the biodegradability of the material

Общий балл Total point	Степень биоразложения Degree of biodegradation	Оценка биоразлагаемости материала Assessment of the biodegradability of the material
1	МИНИМАЛЬНАЯ MINIMUM	Материал практически не подвержен биологической деструкции (ограниченный) The material is almost not subject to biological destruction (limited)
2	НИЗКАЯ LOW	Малоспособный материал к биодеструкции Low-capacity material for biodegradation
3	УМЕРЕННАЯ MODERATE	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал Moderate and/or partial biodegradable material
4	ВЫСОКАЯ HIGH	Материал с высоким потенциалом биодеструкции Material with high biodegradation potential
5	МАКСИМАЛЬНАЯ MAXIMUM	Полностью биоразлагаемый материал Fully biodegradable material

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Оценка степени биоразложения по принятым морфологическим признакам осуществлялась независимыми наблюдателями ($n = 5$).

Полученные результаты балльно-рейтинговой оценки по каждому рассматриваемому материалу от каждого наблюдателя были подвергнуты статистической обработке на выявление грубых промахов и определения интервала доверительной вероятности.

Для выявления маркерных морфологических признаков, обуславливающих приоритетную направленность процесса биоразложения исследуемых пластиков, в работе применялась радиальная графическая гистограмма. Используемая визуализация позволяла отобразить изменение используемых

показателей на двухмерной диаграмме, где каждому принятому морфологическому признаку соответствовал отдельный луч [21].

Для оценки влияния принятых показателей (критериев) биоразложения друг на друга, выполнялся корреляционный анализ результатов эксперимента и выходных факторов эксперимента [21].

Результаты

Результаты определения физико-механических свойств ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья после проверки на грубые промахи измерений (по Q-критерию [21]) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья

Table 2

Physico-mechanical properties of PWR based on lignocellulose-containing raw materials

Физико-механические свойства Physical and mechanical properties	Исходное сырьё Raw materials						
	Опилки сосны Sawdust pine	Опилки березы Sawdust birch	Опилки лиственницы Sawdust larch	Листовой опад Leaf litter	Биомасса борщевика Biomass of hogweed	Костра конопля Hemp stalk	Шелуха пшеницы Wheat husk
	Обозначение пластика Plastic designation						
	ДПс WPp	ДПб WPb	ДПл WPl	РПл PPl	РПб PPh	РПк PPhs	РПп PPwh
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	1038	1035	1123	1089	1025	1001	1059
Модуль упругости при изгибе (по прогибу образца-диска), МПа Modulus of elasticity at bending (by deflection of the sample disk), МПа	1211	885	1484	1155	1226	1110	1182
Прочность при изгибе, МПа Bending strength, МПа	11,9	5,0	8,9	5,2	9,8	7,8	11,3
Твердость по Бринеллю, МПа Brinell hardness, МПа	38,3	19,0	17,6	4,4	28,9	14,6	33,9

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

По данным табл. 2 был сделан вывод о том, что исследуемый материал на основе ПБС обладал требуемыми и необходимыми физико-механическими свойствами. Результаты испытаний на фи-

зико-механические свойства данных материалов являлись подтверждением образования материала на основе ПБС (именно пластиков, а не спрессованных

брикетов), тем самым давали основание для выполнения оценки на биоразлагаемость с получением достоверных результатов.

Шкалы оценки с целью применения предлагаемых критериев для определения степени биоразложения ПБС принимались следующие:

1. Деструкция материала (разрушение, потеря массы): оценивается визуальное разрушение образцов и/или оценка по потере массы (рис. 1).

Максимальное значение баллов: разрушение и/или максимальная потеря массы, минимальный балл – отсутствие разрушения и/или минимальная убыль массы. Баллы определяются в соответствии со степенью разрушения (потери массы): от 70 до 100 % – 5 баллов, от 50 до 69 % – 4 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, от 10 до 29 % – 2 балла, от 1 до 9 % – 1 балл.

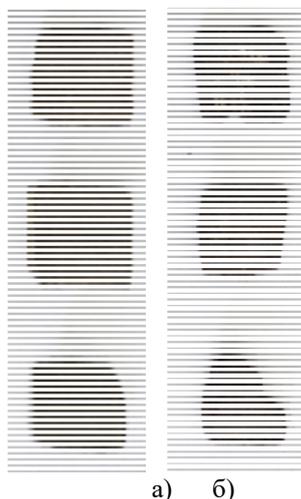


Рисунок 2. Деструктивные изменения с потерей массой образцов на примере РПл: а) исходное состояние, б) после испытания на биоразложение (4,9 баллов)

Figure 2. Destructive changes with loss of mass of samples on the example of PPl: initial state, b) after the biodegradation test (4.9 points)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

2. Расслоение / разбухание материала по толщине (появление трещин, полостей / увеличение ли-

нейных размеров): оценивается наличие расслоений, появлений трещин и полостей образцов по толщине / изменение толщины образцов (рис. 2).

Максимальное значение баллов при наибольшем количестве расслоений / максимальных значениях толщины, минимальный балл – минимальное количество расслоений / минимальное значение разбухания. Баллы проставляются в соответствии со степенью разбухания: от 0 до 9 % – 1 балл, от 10 до 29 % – 2 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, 50 до 69 % – 4 балла, от 70 % и более – 5 баллов.

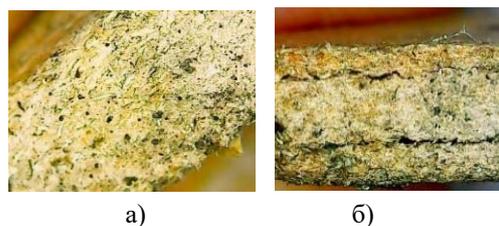


Рисунок 2. Изменения по толщине с расслоением образцов на примере ДПл (фрагмент): а) исходное состояние, б) после испытания на биоразложение (2,9 баллов)

Figure 2. Changes in thickness with stratification of samples using the example of a WPI (fragment): а) initial state, б) after the biodegradation test (2.9 points)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

3. Деформация материала (изменение формы, коробление, искривление): оценивается наличие изменений и появлений дефектов лицевой поверхности образцов, а также формоизменений внешнего вида (рис. 3).

Максимальное значение баллов при наибольшем количестве дефектов, минимальный балл – минимальное количество дефектов. Баллы проставляются в соответствии со степенью и площадью повреждения образцов: от 70 до 100 % – 5 баллов, от 50 до 69 % – 4 балла, от 30 до 49 % – 3 балла, от 10 до 29 % – 2 балла, от 0 до 9 % – 1 балл.

Таблица 3

Результаты оценки по балльной системе принятых критериев степени биоразложения ПБС

Table 3

The results of assessing the degree of biodegradation of WPC based on the adopted scoring criteria.

Образец пластика Plastic sample	Средний балл по критерию оценки Average score according to the assessment criterion					Коэффициент вариации, % Variation coefficient, %				
	Д D	Р S	Дф Df	П P	М M	Д D	Р S	Дф Df	П P	М M
	Наблюдения (n=5) Observations (n=5)					Выборка (n=5) Samples (n=5)				
ДПс WPr	4,9	4,1	4,2	5,0	5,0	0,8	1,3	1,2	0,5	0,4
ДПб WPb	1,8	2,0	4,9	1,0	1,1	4,3	1,9	1,0	2,4	4,1
ДПл WPl	1,0	2,9	3,2	4,2	3,8	3,8	2,9	1,6	0,9	2,4
РПл RPPl	4,9	5,0	5,0	4,8	3,1	0,5	0,5	0,0	0,8	1,3
РПб RPb	1,8	4,9	3,9	1,9	2,3	2,1	1,0	1,9	1,3	3,3
РПк RPks	1,9	4,9	2,2	2,1	3,9	3,6	2,0	3,1	2,6	4,9
РПп RPwh	4,0	3,1	3,0	4,2	4,9	1,2	3,1	0,0	0,6	1,2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

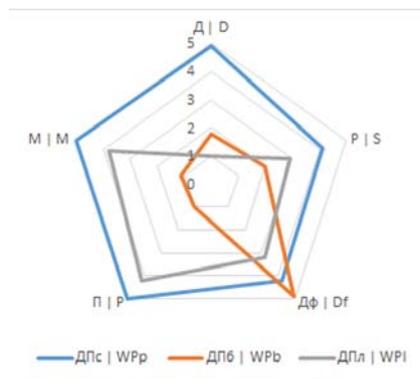


Рисунок 6. Маркерные морфологические признаки биоразлагаемости ПБС на основе древесного сырья

Figure 6. Marker morphological signs of biodegradability of PWR based on wood raw materials

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ рис. 6 говорит, что для ПБС на основе сосновых опилок проявляются все характерные признаки биологической деструкции. Т.е. выделение какого-то характерного маркерного критерия для ПБС на данном типе сырья весьма затруднителен, так деструкция проходит по всем направлениям принятых показателей.

Для ПБС на основе опилок лиственницы в процессе биологического воздействия характерно проявляется пигментация, которая вызывается вероятнее всего гнилостными процессами, протекающие на поверхности материала. Лиственница обладает

стойкостью к гниению, благодаря смоле и камеди пропитывающей дерево [22]. Таким образом, процесс микробиологического повреждения протекает только на поверхности самого материала, вызывая в первую очередь изменения его цветовой окраски. Еще одним характерным признаком является – деформация, которая типична для самой древесины лиственницы [23].

Образцы ПБС на основе опилок березы в рамках выполненных исследований показали самые наименьшие значения принятых критериев. Это позволяет говорить о том, что данные материалы проявляют антибактериальную и антигрибковую активность из-за содержания в пресс-сырье коры березы [24]. Маркерным показателем, по которому можно судит о протекающих процессах биодеструкции, для данных пластиков является его деформация. Деформирование образцов связано с высокой способностью водопоглощения. Именно избыточная влага почвенного субстрата вызывала процессы механической деформации исследуемого материала [25].

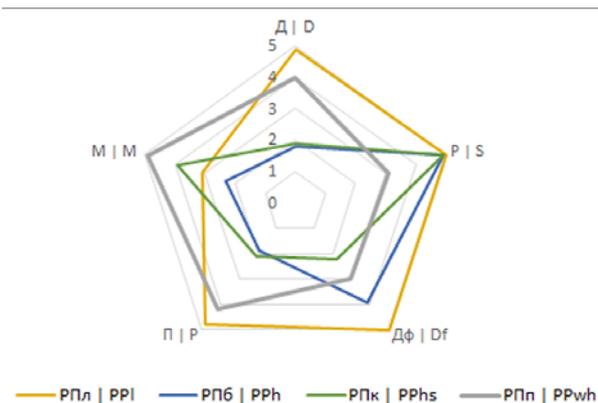


Рисунок 7. Маркерные морфологические признаки биоразлагаемости ПБС на основе недревесного растительного сырья

Figure 7. Marker morphological features of the biodegradability of non-wood plant-based WPC

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Согласно представленным данным на рис. 7, для ПБС на биомассы листового опада по аналогии с ПБС на основе опилок сосны проявляются все характерные признаки биологической деструкции. Т.е. выделение какого-то характерного маркерного критерия для ПБС на данном типе сырья весьма затруднителен, так деструкция проходит по всем направлениям принятых показателей.

Образцы ПБС на основе биомассы борщевика и конопли технической проявляют одинаковый уровень биологической деструкции, но достигаются различным подходом. Так, для данных материалов характерно первоначальное максимальное разбухание, которое инициирует для ПБС на основе биомассы борщевика дальнейшую деструкцию и проявляется в виде деформации. Для ПБС на основе ко-

стры конопли, первоначальное разбухание сопровождается дальнейшим микробиологическим повреждением, проявляющимся в виде омыления и ослизнения. Такое поведение данных образцов ПБС объясняется токсичностью борщевика для микроорганизмов из-за большого содержания в своём составе фуранокумаринов [26]. В свою очередь, для культуры конопли технической характерно высокое содержание эфирного конопляного масла [27], которое подвержено окислению до низкомолекулярных соединений, в т.ч. и до свободных жирных кислот [28], и, возможно, по этой причине сопровождается процессами омыления.

Для пластиков на основе шелухи пшеницы проявляются основные признаки, подтверждающие активность процесса деструкции, которые сопровождаются интенсивным изменением окраски и наличием признаков микробиологического поражения – области распространения плесневых грибов [19].

Общий анализ маркерных морфологических признаков биоразлагаемости ПБС на основе различного растительного сырья (древесного и недревесного) показывают, что сам процесс деструкции данных материалов зависит в первую очередь от исходных свойств лигноцеллюлозосодержащего пресс-сырья, которое и будет обуславливать этот потенциал получаемого на его основе ПБС.

Предложенная общая экспресс-оценка биоразлагаемости изучаемых материалов с помощью балльной системы позволяет дать общую оценку биоразлагаемости ПБС на основе различного сырья и для данных материалов в целом вне зависимости от исходного пресс-сырья (табл. 4).

Оценка биоразлагаемости ПБС на основе различного сырья

Table 4

Assessment of the biodegradability of PWR based on various raw materials

Материал Material	Общий балл Total point	Маркерные критерии биоразлагаемости (по приоритетности) Marker criterion of biodegradability	Оценка биоразлагаемости Assessment of the biodegradability
ДПс WPr	4,6	1. Пигментация лицевой поверхности материала 2. Микробиологическое поражение материала 3. Деструкция материала 4. Деформация материала 5. Расслоение / разбухание материала по толщине	Полностью биоразлагаемый материал Fully biodegradable material
ДПб WPb	2,2	1. Деформация материала	Малоспособный материал к биодеструкции Low-capacity material for biodegradation
ДПл WPl	3,0	1. Пигментация лицевой поверхности материала 2. Микробиологическое поражение материала 3. Деформация материала	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал Moderate and/or partial biodegradable material
РПл RPl	4,6	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Деформация материала 3. Деструкция материала 4. Пигментация лицевой поверхности материала 5. Микробиологическое поражение материала	Полностью биоразлагаемый материал Fully biodegradable material
РПб RPh	3,0	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Деформация материала	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал Moderate and/or partial biodegradable material
РПк RPhs	3,0	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Микробиологическое поражение материала	Умеренный и/или частичный биоразлагаемый материал Moderate and/or partial biodegradable material
РПп RPwh	3,8	1. Микробиологическое поражение материала 2. Пигментация лицевой поверхности материала 3. Деструкция материала	Материал с высоким потенциалом биодеструкции Material with high biodegradation potential
Для всех видов ПБС For all types of PWR	3,5	1. Расслоение / разбухание материала по толщине 2. Деформация материала 3. Микробиологическое поражение материала 4. Пигментация лицевой поверхности материала 5. Деструкция материала	Материал с высоким потенциалом биодеструкции Material with high biodegradation potential

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Общие маркерные показатели для ПБС, которые в первую очередь будут обуславливать биологическое разрушение материалов на их основе отображены на рис. 8.



Рисунок 8. Общие маркерные морфологические признаки, обуславливающие биоразлагаемость материалов на основе ПБС

Figure 8. Common marker morphological features that determine the biodegradability of PWR-based materials

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Основываясь на выявленных маркерных признаках биоразлагаемости ПБС на основе древесного и недревесного растительного сырья и имеющихся литературных данных, можно предположить общую последовательность протекающей деструкции при экспозиции в почво-грунте. На начальном этапе происходит насыщение материала водой, содержащаяся в почвенном субстрате, что сопровождается его расслоением и деформацией. Через образовавшиеся свищи на поверхности материала, во внутренние полости материала происходит распространение биологических агентов, присущих почвенной среде. При этом, из-за высокой удельной поверхности исследуемого материала пластика происходит концентрирование области биологического поражения на этой поверхности материала, что приводит к соответствующим поверхностным изменениям, которые характеризуются изменением окраски. На последнем этапе, по совокупности выявленных деструктурирующих изменений, происходит окончательное разрушение материала, сопровождающееся изменением его физических и химических свойств.

Результаты корреляционного анализа выходных факторов эксперимента представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа выходных факторов эксперимента

Table 5

Results of the correlation analysis of the output factors of the experiment.

Критерий Criterion	Д D	Р S	Дф Df	П P	М M
Д D	1,00				
Р S	0,31	1,00			
Дф Df	0,37	-0,13	1,00		
П P	0,69	0,19	0,05	1,00	
М M	0,49	0,22	-0,53	0,76	1,00

Данные табл. 7 указывают на наличие сильной связи между выходными факторами эксперимента (критериями) «Микробиологическое поражение материала» и «Пигментация лицевой поверхности материала», а также между критериями «Пигментация лицевой поверхности материала» и «Деструкция материала». Между факторами «Деструкция материала» и «Микробиологическое поражение материала» обнаружено наличие корреляционной связи средней силы. Корреляция факторов «Микробиологическое поражение материала» и «Деформация материала» также характеризуется средней силой и отрицательным знаком.

Установленные закономерности между изучаемыми критериями свидетельствуют о их множественных взаимосвязях и косвенно подтверждают предлагаемый механизм протекающей деструкции ПБС по отношению к почво-грунту.

Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы по оценке биоразлагаемости ПБС на основе различного сырья и апробации предложенной системы балльной оценки степени биоразложения ПБС:

1. Для ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья возможно применение пяти основных критериев для выполнения экспресс-оценки с целью определения биоразлагаемости исследуемого материала при выдержке 85 суток в почво-грунте.

2. Наиболее потенциальным к биоразложению можно рассматривать ПБС на основе сосны и листового опада, которые максимально деструктируют в почво-грунте за 85 суток.

3. В общем аспекте материалы на основе ПБС можно характеризовать как материалы с высоким потенциалом к биодеструкции.

4. Значения коэффициентов вариации по каждому принятому критерию оценки биоразлагаемости исследуемых материалов на основе ПБС из лигноцеллюлозосодержащего сырья составляет не более 5 %, т.е совокупность значений каждого признака (критерия) является однородной и все предлагаемые критерии обладают существенными признаками.

5. Предлагаемая балльная система по степени биоразложения применима для экспресс-оценки ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья без учета специальной обработки исходного пресс-сырья (химическая, физическая и биологическая модификация) и готового материала (термическая закатка, обработка гидрофобизаторами и антисептиками), которые могут повлиять и изменять биоразлагаемые свойства исследуемого материала.

Список литературы

1. Хейфец Б. А., Чернова В. Ю. Система оценки эффективности и мониторинга результатов политики импортозамещения. Экономика региона. 2019; 15 (4): 1266-1278. <https://doi.org/10.17059/2019-4-23>.
2. Медведев С. О., Зырянов М. А., Мохирев А. П. Эффективность лесной отрасли России по федеральным округам: портфельный анализ. Креативная экономика. 2023; 17(2): 713-730. <https://doi.org/10.18334/ce.17.2.117198>.
3. Полянская О. А., Тамби А. А., Михайлова А. Е. Развитие лесопромышленного комплекса Российской Федерации: проблемы и перспективы. Петербургский экономический журнал. 2020; 4: 65-74. <https://doi.org/10.24411/2307-5368-2020-10039>.
4. Daria M., Krzysztof L., Jakub M. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production. 2020; 268: 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122129>.
5. Sabirova G., Safin R., Mukhametzyanov S., Galyavetdinov N. Transition to biodegradable composites as a method for solving environmental problems. E3S Web of Conferences, Saint-Petersburg, 23–26 ноября 2020 года. Saint-Petersburg, 2020: 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022101004>.
6. Nassar M. M. A., Alzebdeh K. I., Pervez T., Al-Hinai N., Munam A. J. Appl. Polym. Sci. 2021; e51284. URL: wileyonlinelibrary.com/journal/app 2021.
7. Бурындин В. Г., Вураско А. В., Глухих В. В. [и др.] Получение полимерных материалов из вторичного лигноцеллюлозного сырья. – Екатеринбург, 2022. 188 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49176994>.
8. Adamcová D., Zloch V., Vaverková M. D. [et al.]. Research of the biodegradability of degradable/biodegradable plastic material in various types of environments / Scientific Review Engineering and Environmental Sciences. 2017; 26(1): 3-14. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.1.01>.
9. Сусоева И. В., Вахнина Т. Н., Ибрагимов А. М. Оценка ресурсного потенциала использования пылевидных лигноцеллюлозных отходов для производства строительных композиционных материалов. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019; 3(381): 37-41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41547117>.
10. Просвириков, Д. Б. Моделирование свойств древесно-композиционных материалов методом параметрической идентификации. Системы. Методы. Технологии. 2020; 4 (48): 107-118. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-107-118>.
11. Ермолин В. Н., Баяндин М. А., Намятов А. В., Острякова В. А. Структурно-механические свойства гидродинамически активированной древесной массы в аддитивных технологиях // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023; 2 (392):1 21-131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>.

12. Artemov A. V., Buryndin V. G., Krivonogov P. S. et al. An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Obtaining Plastic in Closed Molds. *Polym. Sci. Ser.* 2023; 16: 278–284. <https://doi.org/10.1134/S1995421223020028>.
13. Бурьиндин В. Г., Бельчинская Л. И., Савиновских А. В. [и др.] Изучение получения древесных и растительных пластиков без связующих в присутствии катализаторов типа полиоксометаллатов. *Лесотехнический журнал*. 2018; 8. 1(29): 128-134. https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfc1e37185.35527284.
14. Pekhtasheva E. L., Raikova E. Yu., Chalykh T. I. [et al.] Biodegradation of polycapromamide textile materials. *Bulgarian Chemical Communications*. 2022; 54 (B2): 66-70. <https://doi.org/10.34049/bcc.54.B2.0509>.
15. Веревкин А. Н., Кононов Г. Н., Сердюкова Ю. В., Зайцев В. Д. Биодegradация древесины ферментными комплексами дереворазрушающих грибов. *Лесной вестник*. 2019; 23(5): 95-100. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-95-100>.
16. Кряжев Д. В., Смирнов В. Ф., Смирнова О. Н. [и др.] Анализ методов оценки биостойкости промышленных материалов (критерии, подходы). *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2013; 2(1): 118-124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19066914>.
17. Попов А. А. Биоразлагаемые полимерные композиции на основе полиолефинов. Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2021; 63 (6): 384-399. <https://doi.org/10.31857/S2308112021060092>.
18. Остроух О. В., Игнатенко А. В., Болтовский В. С. Анализ биостойкости древесины и защитных покрытий. *Материалы, технологии, инструменты*. 2012; 17 (4): 43-47.
19. Glukhikh V., Buryndin P., Artyemov A. [et al.] Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential. *Foods and Raw Materials*. 2020; 8(1): 149–154. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-149-154>.
20. Ермолович О. А., Макаревич А. В., Гончарова Е. П., Власова Г. М. Методы оценки биоразлагаемости полимерных материалов. 2005; 4: 47-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9567085>.
21. Математическое планирование экспериментов и анализ их результатов с применением компьютерных программ : учебное пособие / В. В. Глухих, А. Е. Шкуро, А. В. Артемов [и др.]. – Екатеринбург, 2023. – 104 с. – ISBN 978-5-94984-864-7. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53945028>.
22. Чубинский М. А., Чаузов К. В. Исследование свойств древесины лиственницы и лиственничных строительных материалов // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2016; 215: 255-265. <https://doi.org/21266/2079-4304.2016.215.255-265>.
23. Глухих В. Н., Охлопкова А. Ю., Сивцев П. В. Исследование коробления и численное моделирование деформации пиломатериалов из древесины лиственницы даурской под действием начальных напряжений ствола дерева // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2018; 222: 188-201. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.188-201>.
24. Судакова И. Г., Гарынцева Н. В., Иванов И. П. [и др.]. Выделение и применение суберина из бересты коры березы. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2012; 5 (2): 168-177. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18065356>.
25. Гельфанд Е. Д., Мелехов В. И., Потыкалова М. В. Механическая деформация древесины как средство увеличения влагопоглощающей способности. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2008; 4: 15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11927105>.
26. Есбатыр А. Е., Корулькин Д. Ю. Выделение кумаринов для использования в фармацевтической промышленности. *Вестник Казахского национального медицинского университета*. 2016; 4: 328-330. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32403920>.
27. Дубровин М. С. Применение технической конопли в производстве широкого спектра продукции различного назначения. *International Agricultural Journal*. 2022; 65 (2). https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_2_30.
28. Белопухов С. Л., Байбеков Р. Ф., Жарких О. А. Химический состав масла из семян конопли сорта Сурская. *Вестник науки*. 2019; 9 (18): 57-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39252411>.

References

1. Kheifets B. A., Chernova V. Yu. A system for evaluating the effectiveness and monitoring the results of the import substitution policy. *The economy of the region*. 2019;15(4):1266-1278. <https://doi.org/10.17059/2019-4-23>
2. Medvedev S. O., Zyryanov M. A., Mohirev A. P. Efficiency of the Russian forest industry by federal districts: portfolio analysis. *Creative economy*. 2023; 17(2): 713-730. <https://doi.org/10.18334/ce.17.2.117198>
3. Polyanskaya O. A., Tambi A. A., Mikhailova A. E. Development of the timber industry complex of the Russian Federation: problems and prospects. *St. Petersburg Economic Journal*. 2020; 4: 65-74. <https://doi.org/10.24411/2307-5368-2020-10039>
4. Daria M., Krzysztof L., Jakub M. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 268: 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122129>.
5. Sabirova G., Safin R., Mukhametzyanov S., Galyavetdinov N. Transition to biodegradable composites as a method for solving environmental problems. *E3S Web of Conferences*, Saint Petersburg, November 23-26, 2020. Saint-Petersburg, 2020: 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022101004>.
6. Nassar M. M. A., Alzebdeh K. I., Pervez T., Al-Hinai N., Munam A. J. *Appl. Polym. Sci.* 2021; e51284. URL: wileyonlinelibrary.com/journal/app2021.
7. Buryndin V. G., Vurasko A. V., Glukhikh V. V. [et al.] Production of polymer materials from secondary lignocellulose raw materials. Yekaterinburg, 2022. 188 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49176994>.
8. Adamcová D., Zloch V., Vaverková M. D. [et al.]. Research of the biodegradability of degradable/biodegradable plastic material in various types of environments / *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*. 2017; 26(1): 3-14. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.1.01>.
9. Susoeva I. V., Vakhnina T. N., Ibragimov A. M. Assessment of the resource potential of using pulverized lignocellulose waste for the production of building composite materials. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2019; 3(381): 37-41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41547117>.
10. Prosvirnikov D. B. Modeling the properties of wood composite materials by parametric identification method. *The system. Methods. Technologies*. 2020; 4 (48): 107-118. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-107-118>.
11. Ermolin V. N., Bayandin M. A., Namyatov A. V., Ostryakova V. A. Structural and mechanical properties of hydrodynamically activated wood pulp in additive technologies // *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*. 2023; 2 (392): 121-131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>.
12. Artemov A. V., Buryndin V. G., Krivonogov P. S. et al. An Investigation of Complexes of Lignin Found in Plant Raw Materials as a Natural Binder in Obtaining Plastic in Closed Molds. *Polym. Sci. Ser.* 2023; 16: 278-284. <https://doi.org/10.1134/S1995421223020028>.
13. Buryndin V. G., Belchinskaya L. I., Savinovskikh A. V. [et al.] Study of the production of wood and vegetable plastics without binders in the presence of catalysts such as polyoxometallates. *Forestry journal*. 2018; 8. 1(29): 128-134. https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfc1e37185.35527284.
14. Pekhtasheva E. L., Raikova E. Yu., Chalykh T. I. [et al.] Biodegradation of polycapramide textile materials. *Bulgarian Chemical Communications*. 2022; 54 (B2): 66-70. <https://doi.org/10.34049/bcc.54.B2.0509>.
15. Verevkin A. N., Kononov G. N., Serdyukova Yu. V., Zaitsev V. D. Biodegradation of wood by enzyme complexes of wood-destroying fungi. *Forest Bulletin*. 2019; 23(5):95-100. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-5-95-100>.
16. Kryazhev D. V., Smirnov V. F., Smirnova O. N. [et al.] Analysis of methods for assessing the biostability of industrial materials (criteria, approaches). *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*. 2013; 2 (1): 118-124. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19066914>.
17. Popov A. A. Biodegradable polymer compositions based on polyolefins. *High molecular weight compounds. Series A*. 2021; 63 (6): 384-399. <https://doi.org/10.31857/S2308112021060092>.

18. Ostroukh O. V., Ignatenko A. V., Boltovsky V. S. Analysis of biostability of wood and protective coatings. *Materials, technologies, tools*. 2012; 17(4): 43-47.
19. Glukhikh V., Buryndin P., Artyemov A. [et al.] Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential. *Foods and Raw Materials*. 2020; 8(1): 149-154. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-149-154>.
20. Ermolovich O. A., Makarevich A. V., Goncharova E. P., Vlasova G. M. Methods for assessing the biodegradability of polymer materials. 2005; 4: 47-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9567085>.
21. Glukhikh V. V., Shkuro A. E., Artyomov A. V. [et al.] Mathematical planning of experiments and analysis of their results using computer programs : a textbook. Yekaterinburg, 2023; 104 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53945028>.
22. Chubinsky M. A., Chauzov K. V. Investigation of the properties of larch wood and larch building materials. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2016; 215: 255-265. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.215.255-265>.
23. Glukhikh V. N., Okhlopko A. Yu., Sivtsev P. V. Study of warping and numerical modeling of deformation of sawn timber from Daurian larch wood under the action of initial stresses of the tree trunk. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2018; 222: 188-201. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.188-201>.
24. Sudakova I. G., Garyntseva N. V., Ivanov I. P. [et al.]. Isolation and application of suberin from birch bark bark. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*. 2012; 5 (2): 168-177. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18065356>.
25. Gelfand E. D., Melekhov V. I., Potykalova M. V. Mechanical deformation of wood as a means of increasing moisture absorption capacity. *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2008; 4: 15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11927105>.
26. Esbatyr A. E., Korulkin D. Y. Isolation of coumarins for use in the pharmaceutical industry. *Bulletin of the Kazakh National Medical University*. 2016; 4: 328-330. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32403920>.
27. Dubrovin M. S. The use of technical cannabis in the production of a wide range of products for various purposes. *International Agricultural Journal*. 2022; 65 (2). https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_2_30.
28. Belopukhov S. L., Baibekov R. F., Zharkikh O. A. Chemical composition of hemp seed oil of the Surskaya variety. *Bulletin of Science*. 2019; 9 (18): 57-59. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39252411>.

Сведения об авторах

✉ *Артёмов Артём Вячеславович* – кандидат техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>, e-mail: artemovav@m.usfeu.ru.

Ершова Анна Сергеевна – ассистент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>, ershovaas@m.usfeu.ru.

Шкуро Алексей Евгеньевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru.

Буриндин Виктор Гаврилович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>, buryndinvg@m.usfeu.ru.

Information about the authors

✉ *Artyom V. Artyomov* – can. sci. (techn), Associate Professor, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>, e-mail: artemovav@m.usfeu.ru.

Anna S. Ershova – assistant, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-6248-0028>, ershovaas@m.usfeu.ru.

Aleksey E. Shkuro – Dr. sci. (techn), Associate Professor, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, <https://orcid.org/0000-0002-0469-2601>, shkuroae@m.usfeu.ru.

Victor G. Buryndin – Dr. sci. (techn), professor, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>, buryndinv@m.usfeu.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author