

УДК 676.1.054.1

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ХВОЙНОЙ БИОДЕГРАДИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

© А.Ю. Вититнев^{1*}, М.А. Баяндин¹, Н.В. Смертин¹, С.Н. Казизин¹, Е.А. Тюткова^{1,2}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия, sanekvititnev@yandex.ru

² Институт леса им. В.Н. Сукачева – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036, Россия

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке степени биодеструкции древесины пихты сибирской (*Abies Sibirica*) с течением периода после гибели до 19-20 лет после поражения короедом (*Polygraphus proximus* Blandford) методом ИК-Фурье спектроскопии. Установлено, что при биодеструкции древесины протекают процессы увеличения относительной доли лигнина и его окисления. Проведен сравнительный анализ размерно-качественных характеристик волокнистого полуфабриката, его составляющих фракций при использовании размольной гарнитуры фибриллирующего воздействия и механоактивировании частиц бурой гнили в диспергаторе роторно-пульсационного типа. Это позволило установить физико-химические изменения древесины в процессе ее биодеструкции, эффективные способы подготовки полуфабрикатов в зависимости от степени деструкции древесины, композиционный состав полуфабриката при замещении доли волокнистых компонентов механоактивированными частицами бурой гнили, обеспечивающих улучшение структуры и связи компонентов (на 15–35%) плитного материала, повышение его прочностных (на 10%) и водостойких (на 15–35%) свойств, не применяя дополнительных гидрофобных и связующих добавок, при соответствии требований ГОСТ 4598-2018 плиты полутвердые НТ.

Ключевые слова: биодegradированная древесина, процесс размола, механоактивация, физико-механические свойства, древесноволокнистые плиты.

Для цитирования: Вититнев А.Ю., Баяндин М.А., Смертин Н.В., Казизин С.Н., Тюткова Е.А. Получение композиционных плитных материалов из хвойной биодegradированной древесины // Химия растительного сырья. 2026. №1. Online First. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117983>.

Введение

Производство древесноволокнистых плит является одним из самых динамично развивающихся отраслей промышленности [1]. Основным источником сырья является балансовая здоровая древесина и технологическая щепка хвойных и лиственных пород. Для обеспечения требований к физико-механическим свойствам плит к сырью предъявляются сравнительно жесткие требования: по геометрическим размерам частиц, содержанию коры, гнили и минеральных компонентов [2], что во многом ограничивает лесосырьевую базу. Помимо этого, ситуация усугубляется тем, что современные изменения климата приводят к существенным изменениям в лесных насаждениях. В умеренных и северных широтах Сибирского федерального округа РФ наблюдаются инвазии полиграфа усурийского, приводящие к гибели древостоев мозаичного характера, последующей их биодеструкции при воздействии дереворазрушающих грибов, что создает ограничения переработки, связанные с низкими физико-механическими свойствами и изменения состава древесинного вещества. Одним из критериев пригодности сырья, является влажность древесины [3], которая должна быть выше предела насыщения клеточных стенок. Такая влажность в зависимости от природно-климатических условий может сохраняться после гибели деревьев не более 3–5 лет [3]. При переработке древесины с более низкой влажностью не обеспечивается возможность получения размерных и качественных характеристик древесных волокон [4]. В то же время ряд исследователей [5] сходятся во мнении, что одним из эффективных методов подготовки древесины для получения древесноволокнистых плит является

* Автор, с которым следует вести переписку.

биологическая активация. Особый интерес вызывает воздействие грибов, образующих бурые гнили, которые позволяют снизить затраты энергии на процесс размола [5], обеспечив улучшение (на 60%) влагостойких свойств плит средней плотности сухого способа производства, в сравнении с плитами, полученными из здоровой древесины. Ввиду большой длительности процесса ферментативной обработки и высоких дополнительных затрат, биологическая модификация в настоящее время пока малоперспективна для промышленного производства, поэтому альтернативным эффективным решением является вовлечение древесины, подвергнутой биологическому воздействию грибов в естественных природных условиях [5].

Проведенные в работе [6] исследования указывают на то, что размол в дисковой мельнице древесины из погибших древостоев на 2-й и 3-й стадиях развития гнилей позволяет получать твердые древесноволокнистые плиты с высокими показателями механических свойств, но низкой водостойкости. Существующим решением данной проблемы является введение в состав древесных масс ароматических веществ, таких как фенолоформальдегидные смолы, парафин, лигнин и его производные [7, 8]. При этом известно, что на крайних стадиях развития бурых гнилей лигнин претерпевает существенные изменения, такие как окисление, деметилирование, что обуславливает увеличение доли фенольных гидроксидов, которые могут участвовать в процессах поликонденсации лигнина [9]. Ввиду низкой прочности и отсутствия целостной структуры древесины на крайних стадиях биодеструкции подготовка кондиционных волокон из нее при традиционной технологии в дисковых мельницах нецелесообразна. В работе [10] разработан способ гидродинамической обработки древесины на крайних стадиях биодеструкции при получении мелкодисперсной древесной массы и возможность получения из нее водостойких плит средней плотности методом горячего прессования. Такие свойства гидродинамически обработанной массы из древесины на крайних стадиях биодеструкции при образовании бурой гнили указывают на возможность ее использования при получении древесноволокнистых плит для улучшения их свойств взамен синтетических смол.

Цель настоящего исследования – разработать состав древесноволокнистых плит средней плотности из биодеградированной древесины с учетом физико-химических изменений ее компонентов.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья для подготовки волокнистого полуфабриката (основы) при получении древесноволокнистых плит (ДВП) использовалась щепка, полученная механическим способом из древесины пихты сибирской с периодом гибели 8–14 лет после поражения короедом (*Polygraphus proximus* Blandford) на участке древостоя в Емельяновском районе Красноярского края, с последующей выработкой термомеханической массы в приближенных условиях производства ДВП [6] на базе лаборатории кафедры МАПТ СибГУ им. М.Ф. Решетнева при использовании научно обоснованной конструкции размольной гарнитуры фибриллирующего воздействия [6, 11]. Установленные параметры процесса размола: рабочий зазор между дисками составлял $z=0.1$ мм, концентрация древесноволокнистой массы $c=3.6\%$.

Исходным сырьем для подготовки механоактивированных частиц являлись отходы сортирования щепы, фракция 0 (поддон), получаемые из древесины пихты сибирской крайней с периодом гибели 19–20 лет после поражения короедом (*Polygraphus proximus* Blandford) в том же районе [6]. Ввиду значительной степени биодеструкции древесины при получении технологической щепы характерен большой выход некондиционной мелкой фракции (до 65–70%) в соответствии с ГОСТ 15815-1983 «Щепка технологическая. Технические условия». Обработка и механоактивация частиц без их предварительной подготовки проводилась на лабораторном диспергаторе роторно-пульсационного типа [12, 13], где рабочими органами являются ротор и статор. В роторе по окружности расположены резонансные камеры (резонаторы), а в статоре – отверстия – конфузур. При вращении ротора происходит периодическое перекрытие выходных отверстий резонаторов, что обеспечивает воздействие на обрабатываемые частицы двойного (прямого и обратного) гидравлического удара пульсирующего характера при прерывании потока суспензии с заданной частотой вращения ротора (2950 мин⁻¹). При совпадении собственной частоты резонаторов с частотой следования импульсов давления в камерах происходит многократное увеличение амплитуды, гидродинамические процессы в установке сопровождаются развитой турбулентностью, что способствует хорошей степени гомогенизации обрабатываемых частиц. Отходы сортирования щепы разбавлялись водопроводной водой до содержания их в водной среде по а.с.в. 6% и подвергались последующей обработке при циркуляции суспензии в диспергаторе в течение 10 мин.

Для оценки состояния степени биодеструкции древесины и вида гнили использовали ИК-спектроскопию с преобразованием Фурье с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра «VERTEX 80V» (Bruker Optics, Германия) в спектральном диапазоне от 7000 до 400 см^{-1} . Спектральное разрешение 0.4 см^{-1} ; воспроизводимость волнового числа $\pm 0.05 \text{ см}^{-1}$. Концентрация образца в таблетках была постоянной – 1.5 мг/100 мг КВг и было выполнено 64 сканирования. Измельченный материал помещали в пресс-форму. Анализ спектров осуществляли в программной среде «OPUS». Взвешивание образцов для анализа проводили на лабораторных весах XFR-125E (Vibra, Япония). Необработанные ИК-спектры корректировали по базовой линии (нулевое поглощение при 822, 1815, 1860, 2350 и 3800 см^{-1}) и нормировали по максимуму поглощения в 3417 см^{-1} . ИК-спектры второй производной были получены с использованием алгоритма Савицкого-Голея (степень полинома 3, 11 точек данных). Интерпретация полос поглощения основывалась на литературных данных [14–18].

При подготовке волокнистого полуфабриката (основы), а также механоактивированных частиц бурой гнили (добавки) проводилась оценка их размерно-качественных характеристик (степень помола – °ШР (ДС); водоудерживающая способность, $W_{уд}$; фракционный состав – крупная (Вк), средняя (Вс), мелкая (Вм) фракции; средняя длина – L_a и диаметр – d_a волокон, их отношение L_a/d_a), согласно известным методикам [6, 11, 19–22].

Фракционный состав механоактивированных частиц (Вс, V_{M1} , V_{M2} , V_{M3} , $V_{ф(б)}$, $V_{M(a)}$, $V_{M(б)}$, %). Фракционирование частиц проводилось аналогичным образом [19–22], однако преимущественное образование в общей массе фракций мелочи в виде фибриллплазмы группы Б ($V_{ф(б)}$), мельштофф группы А ($V_{M(a)}$) и Б ($V_{M(б)}$) и мелких волокон (V_{M1-III}), имеющих различные размерные особенности и, соответственно, функционал в образовании структуры волокнистого материала, отличаясь от традиционных представлений по распределению группы мелкой фракции древесной массы [19–21], что связано с изменениями сырья ввиду деструктивного состояния, способа его обработки, потребовало анализа и оценки при разделении мелкой фракции на дополнительные категории (V_{M1} , V_{M2} , V_{M3}).

Составление композиции волокнистого полуфабриката и механоактивированных частиц бурой гнили, последующий отлив древесноволокнистого ковра, его холодная подпрессовка (до относительной влажности 78–80%) и горячее прессование плит производились в лабораторных условиях на базе лаборатории СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, при всех прочих равных условиях. Проклейка древесноволокнистой массы не осуществлялась, были исключены гидрофобные добавки и связующие смолы. Горячее прессование плит осуществлялось в лабораторном прессе марки LabPro 1000 при заданной температуре нагревательных плит равной 195 °С, с использованием сетчатого поддона на основании и глянцевого листа на поверхности, в соответствии с технологией производства ДВП мокрым способом [2, 11, 19–21]. Необходимое количество древесноволокнистой массы для получения одного образца плиты составляло 60 ± 1 г а.с.в. Образцы ДВП изготавливались диаметром 200 мм при толщине – 2.5 ± 0.3 мм. Для последующих испытаний физико-механических свойств готовые образцы распиливались на необходимые размеры, согласно требованиям ГОСТ [23]. На основании многочисленных предварительных экспериментальных исследований выбран режим горячего прессования для получения композиционных материалов средней плотности (табл. 1).

Оценку физико-механических свойств (предел прочности при статическом изгибе ($\sigma_{изг}$) и при растяжении перпендикулярно к пласти (σ_p^I), модуль упругости (E), плотность (ρ), разбухание по толщине за 2 ч (h_{a2}) и 24 ч (h_{a24})) готовых образцов композиционных плитных материалов выполняли стандартными методами, разработанными для «контроля качества продукции и проведения производственного процесса», согласно ГОСТ 10633-2018 [23], ГОСТ 10636-2018 [24]. Классификация образцов плит по физико-механическим свойствам выполнялась, согласно ГОСТ 4596-2018 [25].

В настоящей работе для решения поставленных задач на основании многочисленных предварительных исследований был спланирован и реализован однофакторный эксперимент по изменению состава волокнистого полуфабриката путем замещения его волокон механоактивированными частицами от 10% до 50% для установления механизма структурообразования при получении композиционного плитного материала и особенностей изменений его физико-механических свойств [26].

Таблица 1. Режим горячего прессования

Температура, $t_{пр}$, °С	Удельное давление (отжим), $P_{уд}$, МПа/время, сек	Сброс до давления (0.8 МПа), сек	Удельное давление (сушка), $P_{уд}$, МПа	Время цикла, $t_{вр}$, сек.
195	1.5/10	30	0.8/410	450

Статистическая обработка результатов эксперимента осуществлялась в соответствии с теорией математической статистики, согласно известным методикам [27], с применением программы Microsoft Excel 2007 и пакета программ STATISTICA – 6 с использованием метода Квази-Ньютона, что подтверждает надежность полученных результатов исследований. Полученные математические модели адекватны при доверительной вероятности 95–99%. Величина достоверности аппроксимации составила $0.971 \leq R^2 \leq 0.997$. Оценка значимости коэффициентов проводилась в соответствии с методикой [26, 27], с помощью t-критерия Стьюдента. Проверка моделей с помощью F-критерия Фишера показала их адекватность.

Результаты и обсуждение экспериментальных исследований

На рисунке 1 представлены спектры (рис. 1а) исследуемых образцов древесины пихты сибирской, а также рассчитанные вторые производные (рис. 1б), разделенные на два диапазона: валентные колебания ОН и СН в области $3900\text{--}2700\text{ см}^{-1}$ и область «отпечатков пальцев» в диапазоне $1800\text{--}800\text{ см}^{-1}$.

Полосы, наблюдаемые в области $3900\text{--}2700\text{ см}^{-1}$ (рис. 1а) относятся к валентным колебаниям групп СН. В спектре эталонного образца и образца «12 лет» наблюдалась широкая полоса около 3408 см^{-1} , тогда как в спектре древесины «19 лет» этот максимум был смещен в область более низких волновых чисел, что отражает изменения в структуре водородных связей древесины в процессе биodeградации [28]. Кроме того, интенсивность полос при 2924 см^{-1} и при 2955 см^{-1} увеличивается давности гибели деревьев. Данные полосы относятся к растяжению ароматических СН- групп лигнина и увеличение интенсивностей полос означает, что после воздействия дереворазрушающих грибов часть целлюлозы и гемицеллюлоз удаляется и происходит деметоксилирование лигнина с образованием новых структур.

При сравнении спектральных характеристик всех исследованных образцов полоса при 1654 см^{-1} (область «отпечатков пальцев»), относящаяся к сопряженным колебаниям связи С=О групп Ph-(С=О)- (лигнина), увеличивается с давностью гибели древесины, что обусловлено увеличением количества карбонильных групп при развитии грибковой инфекции. Кроме того, изменения частоты и интенсивности пиков С=О в ИК-спектре могут указывать на окисление и модификацию лигнина в результате деятельности грибковой инфекции. Ароматические валентные колебания лигнина при 1251 см^{-1} , относящиеся к гваяциловому кольцу, и валентные колебания связи С-О лигнина и ксилана уменьшаются по сравнению со спектром эталонной древесины пихты. В то же время интенсивность полосы при 1504 см^{-1} , относящаяся к валентным колебаниям связи С=С замещенного ароматического кольца (лигнина), увеличивается в образце «12 лет», а с увеличением давности гибели дерева интенсивность полосы снижается. Резкое снижение интенсивности полосы при 1459 см^{-1} выявлено в образцах «12 лет» и «19 лет» по отношению к эталону. Интенсивность полосы при 1251 см^{-1} остается практически неизменной в процессе биодеструктивных процессов древесины пихты. Полосы при 1221 и 1251 см^{-1} показывают отклик С-О связи в сирингиловом и гваяциловом кольце. Увеличение их интенсивности свидетельствует об окислительных процессах, происходящих в лигнине в результате воздействия грибковой инфекции, что приводит к его относительному обогащению и образованию коричневого кубического остатка.

На рисунке 2 представлены волокнистый полуфабрикат после второй ступени размола (а) и механоактивированные частицы крайних стадий развития бурой гнили (б), подготовленные из погибшей древесины пихты сибирской и используемые в качестве основы (период после гибели 8–14 лет), добавки (период после гибели 19–20 лет) для получения плитного материала средней плотности.

Анализируя результаты предыдущих исследований [6] и данные, представленные в таблице 2, можно отметить, что при подготовке волокнистого полуфабриката из древесины пихты (период после гибели 8–14 лет), фибриллирующее воздействие размольной гарнитуры при повышении концентрации древесноволокнистой массы при размоле до 3.6% способствует увеличению прироста степени помола до с 38 до 50 ДС. Ослабленная структура межклеточных связей погибшей древесины способствует эффективному разрушению волокон в продольном направлении, их фибриллированию в процессе интенсивного истирания пучков волокон и грубых волокон (рис. 2а). В результате выравнивается фракционность полуфабриката, в общей массе повышается содержание тонких и длинных, гибких фибриллированных волокон средней фракции при некотором уменьшении крупной и мелкой фракции. Наряду с выполнением армирующей функции крупных и наполнителя мелких волокон значения их показателей L_a , d_a , L_a/d_a характеризуют функциональное участие в связеобразовании структуры композиционного материала [11, 19–21]. В целом улучшение размерно-качественных характеристик полуфабриката обеспечивает получение экологичного материала средней плотности 730 кг/м^3 без использования гидрофобных добавок и связующих смол.

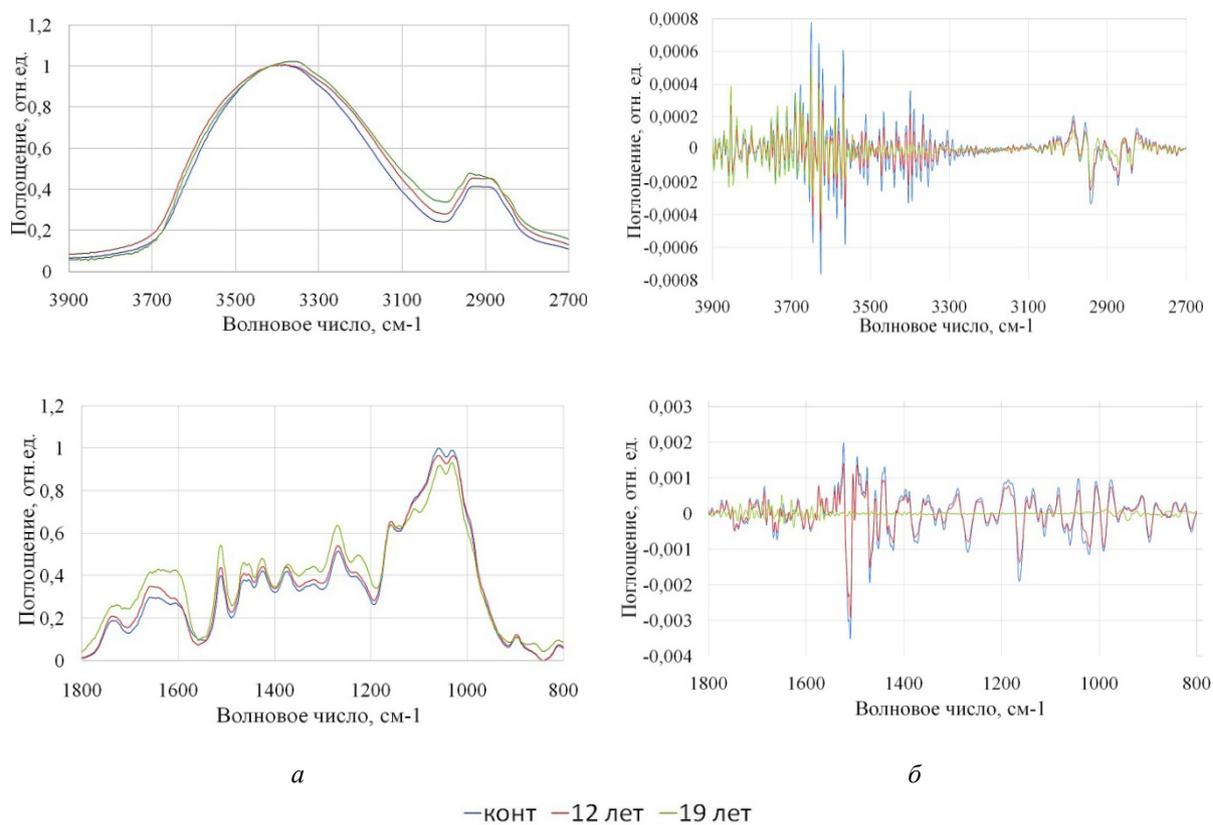


Рис. 1. ИК-спектры (а) и спектры второй производной (б) образцов биодegradированной древесины пихты в области 3900–2700 и 1800–800 см⁻¹

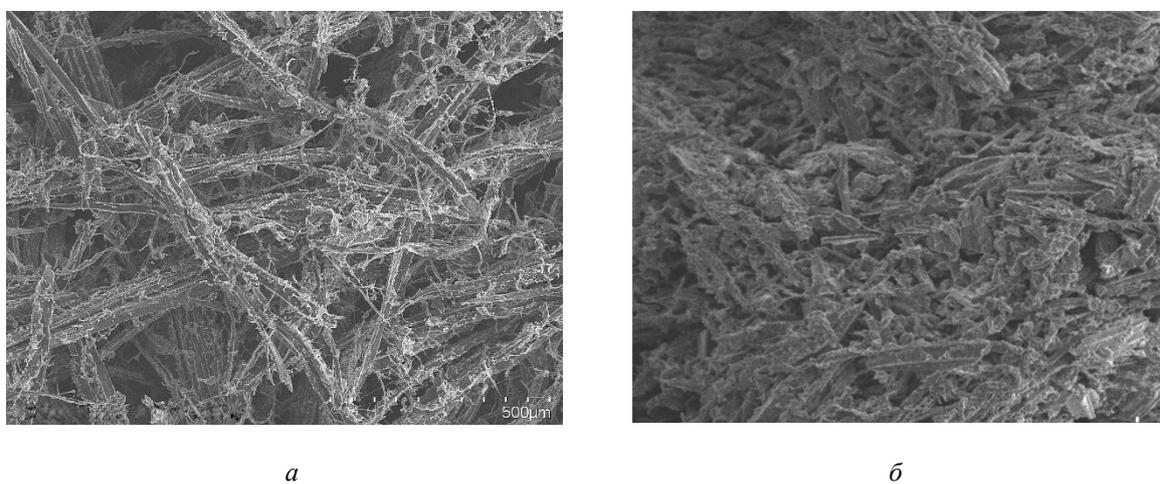


Рис. 2. Микроскопический снимок (увеличение ×100 крат) волокнистого полуфабриката после второй ступени размола (а) и механоактивированных частиц бурой гнили (б)

Таблица 2. Показатели волокнистого полуфабриката и свойства древесноволокнистой плиты

Размерно-качественные показатели волокнистого полуфабриката													
W, %	°ШР (ДС)	Вк, %			Вс, %			Вм, %			L _a , мм	d _a , мм	L _a /d _a
		L _a , мм	d _a , мм	L _a /d _a	L _a , мм	d _a , мм	L _a /d _a	L _a , мм	d _a , мм	L _a /d _a			
125	15(50)	10			69			21			4	0.07	80
		7.6	0.25	36	4.4	0.05	93	1,2	0,03	57			
Физико-механические свойства ДВП													
σ _{изг} , МПа		σ _{pII} , МПа		E, МПа		h _{a2} , %		h _{a24} , %		ρ, кг/м ³			
27		0.5		2922		26		29.6		730			

Из данных таблицы 3 и рисунка 2 следует, что качественные показатели и состав механоактивированных частиц бурой гнили (рис. 2б) значительно отличается от волокнистого полуфабриката (рис. 2а, табл. 2), в общей массе преобладает доля мелкой фракции и мелочи при небольшом содержании средней фракции. Однако для $\approx 30\%$ частиц мелкой фракции ($V_{МI}$ и $V_{МII}$) отличительным от традиционных представлений является высокое значение показателя отношения длины к диаметру, что характеризует участие и способность частиц к связеобразованию в композиционном материале, аналогично функционалу средней фракции волокнистого полуфабриката [11, 19–21]. Таким образом, стоит отметить, что доля механоактивированных частиц $\approx 30\%$ выполняет функцию наполнителя-связующего, а остальная доля частиц бурой гнили с высоким содержанием лигнина играет преимущественно роль наполнителя, что подтверждается значениями физико-механических показателей материала, характеризующегося относительной его хрупкостью, но обладающего высокой прочностью межволоконных связей и стабильностью размеров, улучшенными влагостойкими свойствами (табл. 3). Согласно представлениям различных исследований [29, 30], лигнин обладает гидрофобными свойствами, при этом участвует в связеобразовании при повышенной температуре, образуя дополнительный сшивки полимерной матрицы, взаимодействуя по функциональным группам.

Анализируя зависимости на рисунке 3, можно отметить, что при добавке механоактивированных частиц бурой гнили в состав волокнистого полуфабриката до 10–30% улучшаются прочностные и влагостойкие свойства композиционного материала. Происходит увеличение жесткости и упругости, прочности при изгибе материала (на 10%), внутренних связей между волокнами (на 15–35%), при некотором повышении плотности его структуры (на 3–6%), значительно уменьшается разбухание по толщине (на 15–35%).

Таблица 3. Показатели механоактивированных частиц бурой гнили и свойства древесноволокнистой плиты

W, %		Размерно-качественные показатели механоактивированных частиц																				L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм	L ₀₃ /d ₀₃			
		B _C , %			B _{MI} , %			B _{MII} , %			B _{MIII} , %			B _{Ф(Б)} , %			B _{M(A)} , %			B _{M(Б)} , %							
		L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм	L ₀₃ /d ₀₃	L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм	L ₀₃ /d ₀₃	L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм	L ₀₃ /d ₀₃	L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм	L ₀₃ /d ₀₃	L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм	L ₀₃ /d ₀₃	L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм	L ₀₃ /d ₀₃	L ₀₃ , мм	d ₀₃ , мм				L ₀₃ /d ₀₃		
186	75	5			37			7			14			4			20			13			0.6	0.05	24		
		2.1	0.03	101	0.5	0.11	7	1	0.05	21	0.9	0.02	65	0.09	0.005	17	0.13	0.018	8	0.33	0.013	27					
Физико-механические свойства ДВП																											
σ _{изг} , МПа						σ _p ^{II} , МПа						E, МПа						h _{a2}				h _{a24}				ρ	
20						0.9						2445						4				11				800	

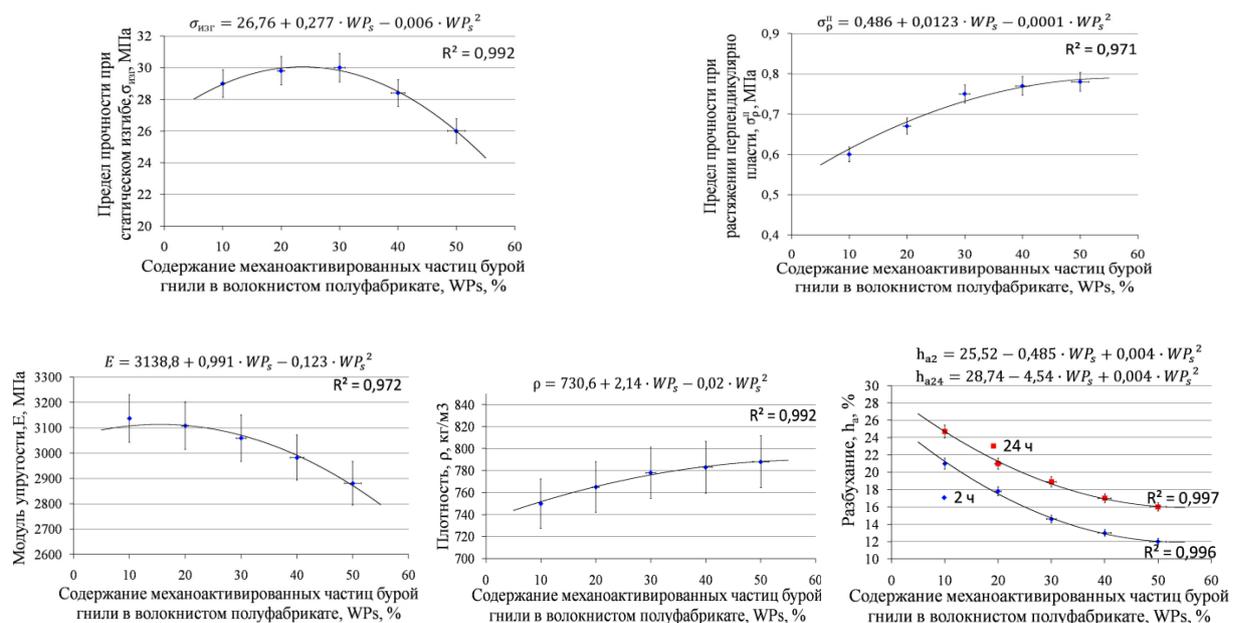


Рис. 3. Зависимость физико-механических свойств композиционного материала от изменения доли механоактивированных частиц в общей массе волокнистого полуфабриката

Улучшение прочностных и влагостойких свойств композиционного материала обусловлено увеличением доли мелких однородных частиц бурой гнили, которые заполняют матрицу волокнистого объемного каркаса материала, встраиваясь в пористую его структуру [19–21]. В результате при дальнейшем пьезотермическом воздействии в процессе горячего прессования взаимодействие биodeградированного лигнина (в виде мелких частиц бурой гнили) по активным функциональным группам [29, 30] с волокнами и лигнином, содержащимся в них, обеспечивает увеличение удельной контактной поверхности между волокнами при образовании дополнительной кристаллической структуры.

При дальнейшем увеличении в общей массе доли мелких частиц бурой гнили тенденция улучшения водостойкости сохраняется, однако повышается хрупкость материала, снижается его упругость и прочность при изгибе. Это связано с предельным уменьшением доли содержания в общей массе тонких и длинных с высоким отношением показателя L/d фибриллированных волокнистых компонентов, соответственно, средней длиной составляющих, обеспечивающих гибкость и прочность структуры.

Выводы

Процесс биодеструкции древесины пихты сибирской под воздействием дереворазрушающих грибов в естественных условиях сопровождается увеличением относительного содержания лигнина и его окислением.

Размол древесины погибших деревьев с использованием гарнитуры оригинальной конструкции позволяет получать волокнистый полуфабрикат с высокой степенью однородности фракционного состава древесных масс.

Активированная гидродинамическим способом древесина деревьев с давностью гибели 19–20 лет имеет мелкодисперсный фракционный состав с высокой межфазной поверхностью, что позволяет использовать ее в качестве активного компонента (связующего) при получении полутвердых ДВП.

Композиция из волокон древесины с давностью гибели деревьев 8–14 лет и маханоактивированных гидродинамическим способом частиц древесины, пораженной бурой гнилью, давностью гибели деревьев 19–20 лет в соотношении 70 на 30% позволяет получить полутвердые ДВП с высокими физико-механическими свойствами, которые соответствуют действующим стандартам.

Высокие механические свойства и водостойкость плит из биodeградированной древесины обуславливают возможность их применения в мебели, строительстве, в том числе в условиях повышенной влажности.

Благодарности

Выражаем благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за поддержку в проведении исследований.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов» проекта «Исследование закономерностей процессов биодеструкции древесины погибших древостоев для разработки научно-обоснованных подходов получения новых функциональных материалов» (FEFE-2024-0032).

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Zhang D., Zhang A., Xue L. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism // Wood Sci Technol. 2015. Vol. 49. Pp. 661–679. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0728-6>.
2. Мерсов Е.Д. Производство древесно-волоконистых плит: учеб. пособие. М., 1989. 232 с.
3. Barrette J., Thiffault E., Saint-Pierre F., Wetzel S., Duchesne I., Krigstin S. Dynamics of dead tree degradation and shelf-life following natural disturbances: can salvaged trees from boreal forests ‘fuel’ the forestry and bioenergy sectors? // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2015. Vol. 88(3). Pp. 275–290.

4. Lewis K., Thompson D., Hartley I., Pasca S. Wood decay and degradation in standing lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm.) killed by mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins: Coleoptera). Natural Resources Canada, Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper 2006-11. Victoria, BC, Canada, 2006. 26 p.
5. Kerner I., Khne G., Pecina H. Unsterile Fermentation von Hackschnitzeln-eine Holzbehandlungsmethode für die Faserplattenherstellung // Holz Roh Werkst. 2001. Vol. 59. Pp. 334–341.
6. Vititnev A., Kazitsin S. Using Siberian Fir (*Abies sibirica*) dead wood in wood fiberboard production // BioResources. 2025. Vol. 20(3). Pp. 5315–5330. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.5315-5330>.
7. Camlibel O., Akgul M. Mechanical and physical properties of medium density fibreboard with calcite additive // Wood Research. 2020. Vol. 65 (2). Pp. 231–244.
8. Shu B., Ren Q., Hong L., Xiao Z., Lu X., Wang W., Zheng J. Effect of steam explosion technology main parameters on moso bamboo and poplar fiber // Journal of Renewable Material. 2021. Vol. 9(3). Pp. 585–597.
9. Bagley S.T., Richter D.L. Biodegradation by Brown Rot Fungi // Industrial Applications. The Mycota. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002. Pp. 327–341.
10. Bayandin M., Ermolin V., Kazitsin S., Eliseev S., Smertin N., Strekaleva T. Production of binder-free boards from biodegraded *Abies sibirica* wood // Acta Facultatis Xylogiae Zvolen. 2025. Vol. 67 (1). Pp. 75–88.
11. Вититнев А.Ю. Совершенствование процесса размола волокнистых полуфабрикатов в производстве древесноволокнистых плит: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2019. 152 с.
12. 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). С. 121–131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>.
13. Казицин С.Н. Получение древесных плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 132 с.
14. Perez S., Mazeau K. Conformations, structures, and morphologies of celluloses // Polysaccharides II – Structural Diversity and Functional Versatility. Marcel Dekker, New York, 2005. Pp. 41–68.
15. Kondo T. Hydrogen bonds in cellulose and cellulose derivatives // Polysaccharides II – Structural Diversity and Functional Versatility. Marcel Dekker, New York, 2005. Pp. 69–98.
16. Nishiyama Y., Sugiyama J., Chanzy H., Langan P. Crystal structure and hydrogen bonding system in cellulose Ia from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction // J. Am. Chem. Soc. 2003. Vol. 125. Pp. 14300–14306.
17. Popescu C.-M., Popescu M.-C., Singurel Gh., Vasile C., Argyropoulos D.S., Willfor S. Spectral characterization of eucalyptus wood // Appl. Spectrosc. 2007. Vol. 61. Pp. 1168–1177.
18. Pandey K.K., Theagarajan K.S. Analysis of wood surfaces by diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic (PAS) Fourier transform infrared spectroscopic techniques // HolzRohWerkst. 1997. Vol. 55. Pp. 383–390.
19. Зырянов М.А., Чистова Н.Г. Производство древесноволокнистых плит при одноступенчатом размолу щепы // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2013. №6. С. 115–119.
20. Чистова Н.Г. Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит: дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 2010. 415 с.
21. Ласкеев П.Х. Производство древесной массы. М., 1967. 581 с.
22. Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps – ranking of pulps may shift // Nord. Pulp Pap. Res. J. 2018. Vol. 33(3). Pp. 468–481.
23. ГОСТ 10633-2018. Плиты древесно-стружечные и древесно-волокнистые. Общие правила подготовки и проведения физико-механических испытаний. М., 2018. 14 с.
24. ГОСТ 10636-2018. Плиты древесно-стружечные и древесно-волокнистые. Метод определения предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти плиты. М., 2018. 7 с.
25. ГОСТ 4598-2018. Плиты древесноволокнистые мокрого способа производства. Технические условия. М., 2018. 15 с.
26. Пижурич А.А. Основы научных исследований. М., 2005. 305 с.
27. Боровиков В.П., Боровиков И.П. STATISTICA. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М., 1998. 605 с.
28. Zikeli F., Vettraino A.M., Biscontri M., Bergamasco S., Palocci C., Humar M., Romagnoli M. Lignin Nanoparticles with Entrapped Thymus pp. Essential Oils for the Control of Wood-Rot Fungi // Polymers. 2023. Vol. 15. 2713. <https://doi.org/10.3390/polym15122713>.
29. Gürsoy S., Ayrlmis N. Effect of Lignin Modification of Recycled and Fresh Wood Fibers on Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Fiberboard // Forests. 2023. Vol. 14. 2007. <https://doi.org/10.3390/f14102007>.
30. Domínguez-Robles J. et al. Approaching a new generation of fiberboards taking advantage of self lignin as green adhesive // International journal of biological macromolecules. 2017. Vol. 108. Pp. 927–935. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.005>.

Поступила в редакцию 7 октября 2025 г.

После переработки 24 ноября 2025 г.

Принята к публикации 23 декабря 2025 г.

Vititnev A.Yu.^{1*}, Bayandin M.A.¹, Smertin N.V.¹, Kazitsin S.N.¹, Tyutkova E.A.^{1,2} PRODUCTION OF COMPOSITE BOARD MATERIALS FROM BIODEGRADED CONIFEROUS WOOD

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ave. Krasnoyarskii rabochii, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia, sanekvititnev@yandex.ru

² Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Centre «Krasnoyarsk Science Centre SB RAS», Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russia

This paper presents the results of experimental studies assessing the degree of biodegradation of Siberian fir (*Abies Sibirica*) wood over a period of up to 19–20 years after bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) infestation using Fourier-transform IR spectroscopy. It was established that wood biodegradation is accompanied by an increase in the relative proportion of lignin and its oxidation. A comparative analysis of the dimensional and qualitative characteristics of the fiber semi-finished product and its constituent fractions was conducted using a fibrillating milling set and mechanical activation of brown rot particles in a rotary-pulsation disperser. This made it possible to establish the physicochemical changes in wood during its biodegradation, effective methods for preparing semi-finished products depending on the degree of wood destruction, the composition of the semi-finished product when replacing the proportion of fibrous components with mechanically activated particles of brown rot, providing an improvement in the structure and connection of the components (by 15–35%) of the board material, an increase in its strength (by 10%) and water-resistant (by 15–35%) properties, without the use of additional hydrophobic and binding additives, while complying with the requirements of GOST 4598-2018 semi-hard boards NT.

Keywords: biodegraded wood, refining process, mechanical activation, physical and mechanical properties, fiberboard.

For citing: Vititnev A.Yu., Bayandin M.A., Smertin N.V., Kazitsin S.N., Tyutkova E.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, Online First. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprn.20260117983>.

References

- Zhang D., Zhang A., Xue L. *Wood Sci. Technol.*, 2015, vol. 49, pp. 661–679. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0728-6>.
- Mersov Ye.D. *Proizvodstvo drevesno-voloknistykh plit: ucheb. posobiye*. [Production of wood-fiber boards: textbook]. Moscow, 1989, 232 p. (in Russ.).
- Barrette J., Thiffault E., Saint-Pierre F., Wetzel S., Duchesne I., Krigstin S. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2015, vol. 88(3), pp. 275–290.
- Lewis K., Thompson D., Hartley I., Pasca S. *Wood decay and degradation in standing lodgepole pine (Pinus contorta var. latifolia Engelm.) killed by mountain pine beetle (Dendroctonus ponderosae Hopkins: Coleoptera)*. *Natural Resources Canada, Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper 2006-11*. Victoria, BC, Canada, 2006, 26 p.
- Kerner I., Khne G., Pecina H. *Holz Roh Werkst*, 2001, vol. 59, pp. 334–341.
- Vititnev A., Kazitsin S. *BioResources*, 2025, vol. 20(3), pp. 5315–5330. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.5315-5330>.
- Camlibel O., Akgul M. *Wood Research*, 2020, vol. 65 (2), pp. 231–244.
- Shu B., Ren Q., Hong L., Xiao Z., Lu X., Wang W., Zheng J. *Journal of Renewable Material*, 2021, vol. 9(3), pp. 585–597.
- Bagley S.T., Richter D.L. *Industrial Applications. The Mycota*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002, pp. 327–341.
- Bayandin M., Ermolin V., Kazitsin S., Eliseev S., Smertin N., Strekaleva T. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2025, vol. 67 (1), pp. 75–88.
- Vititnev A.Yu. *Sovershenstvovaniye protsessa razmola voloknistykh polufabrikatov v proizvodstve drevesno-novoloknistykh plit: dis. ... kand. tekhn. nauk*. [Improving the process of grinding fibrous semi-finished products in the production of wood-fiber boards: diss. ... Cand. of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 2019, 152 p. (in Russ.).
- Yermolin V.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2023, no. 2 (392), pp. 121–131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>. (in Russ.).
- Kazitsin S.N. *Polucheniye drevesnykh plit bez svyazuyushchikh veshchestv iz mekhanoaktivirovannykh drevesnykh chastits: dis. ... kand. tekhn. nauk*. [Production of wood boards without binders from mechanically activated wood particles: diss. ... Cand. of Technical Sciences]. Yekaterinburg, 2018, 132 p. (in Russ.).
- Perez S., Mazeau K. *Polysaccharides II – Structural Diversity and Functional Versatility*. Marcel Dekker, New York, 2005, pp. 41–68.
- Kondo T. *Polysaccharides II – Structural Diversity and Functional Versatility*. Marcel Dekker, New York, 2005, pp. 69–98.
- Nishiyama Y., Sugiyama J., Chanzy H., Langan P. *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, vol. 125, pp. 14300–14306.
- Popescu C.-M., Popescu M.-C., Singurel Gh., Vasile C., Argyropoulos D.S., Willfor S. *Appl. Spectrosc.*, 2007, vol. 61, pp. 1168–1177.
- Pandey K.K., Theagarajan K.S. *HolzRohWerkst*, 1997, vol. 55, pp. 383–390.
- Zyryanov M.A., Chistova N.G. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 115–119. (in Russ.).
- Chistova N.G. *Pererabotka drevesnykh otkhodov v tekhnologicheskom protsesse polucheniya drevesnovoloknistykh plit: dis. ... dokt. tekhn. nauk*. [Processing of wood waste in the technological process of producing wood fiber boards: diss. ... doc. tech. Sci.]. Krasnoyarsk, 2010, 415 p. (in Russ.).
- Laskeyev P.Kh. *Proizvodstvo drevesnoy massy*. [Production of wood pulp]. Moscow, 1967, 581 p. (in Russ.).
- Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 2018, vol. 33(3), pp. 468–481.

* Corresponding author.

23. GOST 10633-2018. *Plity drevesno-struzhechnyye i drevesno-voлокnistyye. Obshchiye pravila podgotovki i provedeniya fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy.* [GOST 10633-2018. Particleboards and wood fiberboards. General rules for preparing and conducting physical and mechanical tests]. Moscow, 2018, 14 p. (in Russ.).
24. GOST 10636-2018. *Plity drevesno-struzhechnyye i drevesno-voлокnistyye. Metod opredeleniya predela proch-nosti pri rastyazhenii perpendikulyarno k plasti plity.* [GOST 10636-2018. Particleboards and wood fiberboards. Method for determining the tensile strength perpendicular to the board face]. Moscow, 2018, 7 p. (in Russ.).
25. GOST 4598-2018. *Plity drevesnovoloknistyye mokrogo sposoba proizvodstva. Tekhnicheskiye usloviya.* [GOST 4598-2018. Wet-process fiberboards. Specifications]. Moscow, 2018, 15 p. (in Russ.).
26. Pizhurin A.A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy.* [Fundamentals of scientific research]. Moscow, 2005, 305 p. (in Russ.).
27. Borovikov V.P., Borovikov I.P. *STATISTICA. Statisticheskiy analiz i obrabotka dannykh v srede Windows.* [STATISTICA. Statistical analysis and data processing in the Windows environment]. Moscow, 1998, 605 p. (in Russ.).
28. Zikeli F., Vettrano A.M., Biscontri M., Bergamasco S., Palocci C., Humar M., Romagnoli M. *Polymers*, 2023, vol. 15, 2713. <https://doi.org/10.3390/polym15122713>.
29. Gürsoy S., Ayırlım N. *Forests*, 2023, vol. 14, 2007. <https://doi.org/10.3390/f14102007>.
30. Domínguez-Robles J. et al. *International journal of biological macromolecules*, 2017, vol. 108, pp. 927–935. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.005>.

Received October 7, 2025

Revised November 24, 2025

Accepted December 23, 2025

Сведения об авторах

Вититнев Александр Юрьевич – кандидат технических наук, sanekvititnev@yandex.ru

Баяндин Михаил Андреевич – кандидат технических наук, доцент, mihailbayandin@yandex.ru

Смертин Николай Витальевич – аспирант, kolya.smertin@mail.ru

Казицин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, sergeikaz060890@yandex.ru

Тюткова Екатерина Александровна – кандидат биологических наук, katewood@inbox.ru

Information about authors

Vititnev Alexander Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, sanekvititnev@yandex.ru

Bayandin Mikhail Andreevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, mihailbayandin@yandex.ru

Smertin Nikolay Vitalyevich – graduate student, kolya.smertin@mail.ru

Kazitsin Sergey Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, sergeikaz060890@yandex.ru

Tyutkova Ekaterina Aleksandrova – Candidate of Biological Sciences, katewood@inbox.ru