



Изменение химического состава древесины сухостойной пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) разной давности гибели, нарушенной полиграфом уссурийским (*Polygraphus proximus* Blandford) по данным ИК-Фурье спектроскопии

Екатерина А. Артемихина^{1,2}✉, tyukatie@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>
Сергей В. Жила^{1,2}, getgain@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>
Юрий В. Данилюк^{1,2}, ura_danilyk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>
Сергей Г. Елисеев², s-555s@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>
Михаил А. Баяндин², mihaibayandin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, 660036, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, г. Красноярск, 660037, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Российская Федерация

Темнохвойные лесные экосистемы Сибири подвергаются систематическому воздействию комплекса биотических и абиотических стрессоров, включая массовые вспышки насекомых-ксилофагов, в частности деградация темнохвойных лесов, обусловлена инвазией уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford). В данном исследовании представлен подход к изучению древесины из нарушенных инвайдером насаждений пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) методом инфракрасной-Фурье спектроскопии. Полученные нами результаты указывают на явную динамику устойчивости компонентов древесины пихты сибирской из нарушенных полиграфом уссурийским древостоев во времени. Установлено, что гемицеллюлозы и аморфная целлюлоза выявили высокую скорость деструкции в сухостойных образцах пятилетней давности гибели, на что указывали снижение интенсивностей полос поглощения при 1024 и 892 см⁻¹. Ароматический скелет лигнина (1504 см⁻¹) выявил стабильность в образцах с десятилетней давностью гибели, тем не менее выявлено продолжающееся во времени окисление и модификация лигнина, о чем свидетельствует пик полосы при 1655 см⁻¹. Следовательно, деструкция сухостойной древесины пихты сибирской носит каскадный характер, в котором сначала подвергаются деструкции легкодоступные углеводы, затем кристаллическая целлюлоза, а после происходит модификация и окисление лигнина. Таким образом, применение инфракрасной-Фурье спектроскопии позволяет диагностировать ранние стадии биодеструкции древесины, а также прогнозировать поведение древесинного вещества в процессах его переработки.

Ключевые слова: пихта сибирская, ИК-Фурье спектроскопия, полиграф уссурийский, климатический тренд

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта № FEFE-2024-0032 «Исследование закономерностей процессов биодеструкции древесины погибших древостоев для разработки научно-обоснованных подходов получения новых функциональных материалов».

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Изменение химического состава древесины сухостойной пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) разной давности гибели, нарушенной полиграфом уссурийским (*Polygraphus proximus* Blandford), по данным ИК-Фурье спектроскопии / Е. А. Артемихина, С. В. Жила, Ю. В. Данилюк, С. Г. Елисеев, М. А. Баяндин // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 2 (62). – С. 18–32. – Библиогр.: с. 26–31 (45 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/2>.

Поступила 09.02.2026. **Пересмотрена** 13.04.2026. **Принята** 15.05.2026. **Опубликована онлайн** 26.06.2026

Article

Using FTIR spectroscopy to detail wood chemistry of Ussuri bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) - invaded Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) trees

Ekaterina A. Artemikhina^{1,2}✉, tyukatie@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>

Sergey V. Zhila^{1,2}, getgain@mail.ru  <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>

Yuriy V. Danilyuk^{1,2}, ura_danilyk@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>

Sergey G. Eliseev², s-555s@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

Mikhail A. Bayandin², mihailbayandin@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

¹Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, 660036, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, 31, Russian Federation

Abstract

Multiple research studies have reported dark-needled forest ecosystems of the world suffer from a number of biotic and abiotic influences including outbreaks of xylophages, in particular of bark beetles. The combination of climate change and bark beetle infestations is playing a significant role in the widespread decline of dark coniferous forests, raising concerns about the future viability of this species in some regions of the world. This paper focuses on approaches to studying Siberian fir (*Abies sibirica*) stands invaded by Ussuri bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford). This study presents an approach to studying wood from invaded Siberian fir stands using Fourier-transform infrared spectroscopy. Our results indicate clear dynamics in the stability of Siberian fir wood components from stands disturbed by the Ussuri bark beetle. Hemicelluloses and amorphous cellulose were found to exhibit high rates of degradation in dead wood samples five years after their death, as indicated by decreased absorption band intensities at 1024 and 892 cm⁻¹. The aromatic lignin skeleton (1504 cm⁻¹) was stable in dead wood samples ten years after their death. However, continued oxidation and modification of lignin was detected over time, as evidenced by the band peak at 1655 cm⁻¹. Consequently, the degradation of dead Siberian fir wood is cascade-like, with readily accessible carbohydrates first degraded, followed by crystalline cellulose, and then lignin modification and oxidation. Thus, the use of Fourier-transform infrared spectroscopy allows us to determine the age of tree death, diagnose the early stages of wood biodegradation, and predict the behavior of wood material during processing.

Keywords: *Siberian fir, FTIR spectroscopy, Ussuri polygraph, climate trend*

Funding: The work was performed as part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the implementation of the project “Studying the patterns of biodegradation of wood from dead stands in order to develop scientifically robust approaches for obtaining new functional materials” by the team of the Biorefining of Forest Resources research laboratory (№ FEFE-2024-0032)

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Artemikhina E. A., Zhila S. V., Danilyuk Yu. V., Eliseev S. G., Bayandin M. A. (2026) Using FTIR spectroscopy to detail wood chemistry of Ussuri bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) - invaded Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) trees. Forestry Engineering journal, Vol. 16, No. 2 (62), pp. 18-32 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.2/2>.

Received 09.02.2026.

Revised 13.04.2026.

Accepted 15.05.2026. **Published online** 26.06.2026

Введение

Пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), выступая доминантом темнохвойных лесных массивов Сибири, формирует основу уникальных бореальных экосистем, выполняющих фундаментальные средообразующие функции и играющих важнейшую роль в регулировании климатических процессов на обширных территориях [1, 2]. В последние десятилетия эти насаждения подвергаются беспрецедентному по своей интенсивности и масштабам комплексу

негативных воздействий, среди которых особую угрозу представляют биотические факторы, в частности инвазивные вспышки массового размножения стволовых вредителей, усиливающиеся на фоне климатических трансформаций [3-5]. Исследования последних лет свидетельствуют о прогрессирующей дестабилизации темнохвойных формаций под влиянием как абиотических, так и антропогенных факторов, что проявляется в нарушении их

структурно-функциональной организации и снижении устойчивости [6-10].

Процессы массового усыхания и последующего отпада деревьев в темнохвойных лесах, подвергшихся биотическому воздействию, инициируют глубокую трансформацию вертикальной и горизонтальной структуры древесного полога [6]. Подобные нарушения закономерно приводят к частичной или полной утрате насаждениями своих базовых биосферных функций, среди которых особое значение имеют водоохранная (регулирование стока и качества вод), средообразующая (поддержание микроклимата и условий местообитания) и углерододепонирующая (долговременная секвестрация углерода в фитомассе) [7, 10, 11].

Особое место среди деструктивных факторов занимает чужеродный для сибирских экосистем вид – уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus* Blandford) [12], инвазия которого из регионов Восточной Азии приобрела характер масштабного природного бедствия [13]. За относительно короткий период с начала XXI столетия этот агрессивный стволовой вредитель не только расширил свой ареал на тысячи километров к западу от естественных границ обитания, но и сформировал устойчивые очаги массового размножения на значительной части ареала пихты сибирской [11]. Согласно современным данным, *P. proximus* представляет серьезную угрозу для пихтовых лесов не только в Сибири, но и в европейской части России, включая Средний Урал, где его присутствие впервые зафиксировано в 2023 году на территории природного парка «Оленьи ручьи» [14]. Дендрохронологический анализ показывает, что вредитель может присутствовать в насаждениях на протяжении как минимум двух десятилетий до момента обнаружения, вызывая постепенное, но неуклонное усыхание деревьев [5, 11].

Одним из наиболее значимых последствий деградации древостоев выступает коренная перестройка пожарного режима в экосистемах [15]. В нарушенных насаждениях происходит накопление мертвой древесины и как следствие, увеличение освещенности под пологом леса инициируют смену напочвенного покрова, что качественно изменяет структуру горючих материалов на поверхности почвы [16, 17]. Согласно количественным оценкам, запасы живого напочвенного покрова в насаждениях, нарушенных инвазией *P. proximus*, могут более чем в два раза превышать аналогичные показатели, по сравнению с ненарушенными [16, 18]. Накопление крупных древесных остатков (валежа) и сухостойных деревьев, в нарушенных *P. proximus* темнохвойных насаждениях, формирует непрерывный по вертикали и горизонтали

проводниковый слой, способный поддерживать низовые пожары и создающий условия для перехода огня в кроны [18].

Процессы, инициируемые атакой *P. proximus*, не ограничиваются гибелью древостоя. Вслед за отмиранием деревьев запускаются сложные механизмы биодеструкции древесинного вещества, которые продолжаются в сухостойной древесине на протяжении многих лет. Традиционные методы диагностики степени и типа поражения (визуальные, весовые) часто не способны выявить начальные стадии деградации, особенно при «бурой гнили», когда потеря прочности значительно опережает потерю массы [19]. Это создает серьезные проблемы как для оценки санитарного состояния лесов, так и для прогнозирования качества и поведения древесины в процессах ее промышленной переработки.

Современные представления о механизмах деструкции древесины грибами бурой гнили свидетельствуют о сложном двухстадийном процессе. На начальном этапе преобладает неферментативное окисление с участием высокореактивных гидроксильных радикалов, генерируемых в ходе реакции Фентона [20, 21]. Этот механизм обеспечивает деполимеризацию и модификацию полисахаридов и лигнина без глубокой ферментативной деградации последнего [22, 23]. Лигнин и кристаллическая целлюлоза сохраняются, поскольку грибам-деструкторам не хватает ключевых гидролитических и окислительных ферментов (например, целлюбогидролаз, литических полисахаридных монооксигеназ, мультимедных оксидаз и пероксидаз) [23]. Каскадный характер этих процессов и их временная динамика в отношении сухостойной древесины хвойных пород в условиях южно-таежных экосистем Сибири остаются недостаточно изученными.

Для интерпретации химических изменений и быстрого определения степени деградации древесины широко применяется метод инфракрасной Фурье-спектроскопии (ИКФС), зарекомендовавший себя как эффективный инструмент изучения химии разложения, требующий минимальной подготовки образца [24-26]. Метод позволяет не только идентифицировать грибную инфекцию на ранних стадиях [27], но и проследить модификацию основных полимерных компонентов клеточной стенки – целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина [28-30].

Целью данного исследования являлось выявление закономерностей трансформации химического состава древесины сухостойной пихты сибирской в зависимости от давности гибели темнохвойного насаждения, подвергшегося инвазии *P. proximus*, с применением метода ИК-Фурье спектроскопии

для интерпретации процессов биодеструкции и оценки степени деградации древесинного вещества.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Исследования охватили деградирующие пихтовые леса Козульского лесничества, расположенные в ключевой орографической зоне – на стыке Среднесибирской равнины и отрогов Восточного Саяна (водораздел Оби и Енисея). В ходе исследования нами было заложено две пробные площади (ПП-1, ПП-2) с разной степенью деградации древесного полога (рис. 1).

Исследуемые пробные площади (ПП) разделены по степени давности воздействия *P. proximus*. На ПП-1 (56°10'с.ш. и 92°12'в.д.),

здесь усыхание пихты составило до 50 %, ПП-2 характеризовалась более значительным усыханием древесного полога – до 95 % (56°11'с.ш. и 91°55'в.д.). Исследуемые древостои пихты сибирской (*A. sibirica*) являются одноярусными, средневозрастными (120–130 лет), III класса бонитета, со средними таксационными показателями: диаметр 18–22 см, высота 20–25 м, полнота 0,5–0,7. Хорошо развитый подлесок представлен спиреей, рябиной и малиной.

Дизайн эксперимента

Для определения жизненного состояния исследуемых насаждений на ПП проведено обследование древостоев в соответствии с общепринятыми таксационными методиками, с использованием современного оборудования [31].

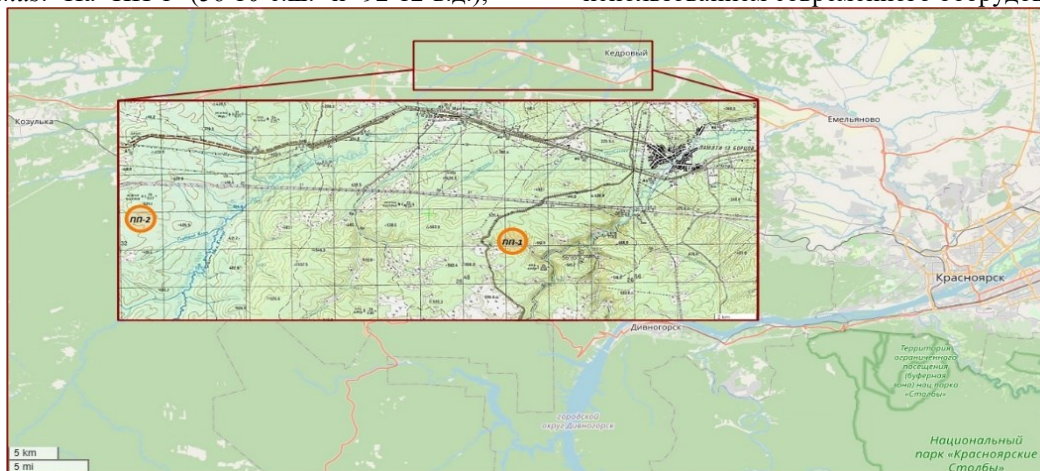


Рисунок 1. Расположение пробных площадей (ПП-1 и ПП-2)

Figure 1. Study area

Источник: карты OpenStreetMap

Source: OpenStreetMap

На каждой пробной площади закладывалось 4-5 круговых площадок (радиусом 15 м) на которых проводились работы по учету отпада деревьев (оценено не менее 200 деревьев), после вспышки *P. proximus*. Для оценки жизненного состояния деревьев *A. sibirica* использовалась стандартизированная методика визуальной оценки состояния крон, разработанная в рамках Международной кооперативной программы по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests) [32, 33]. Данная методология является общепринятым стандартом для исследований лесных экосистем в Европе и широко применяется в российских работах [34–36]. Согласно протоколу ICP Forests, выделяют следующие классы дефолиации [32]: класс 0 (здоровые деревья): дефолиация 0–10%, нормальная окраска кроны, отсутствие видимых повреждений; класс 1 (ослабленные деревья): дефолиация >10–25%, незначительное изменение окраски хвои, единичные повреждения; класс 2

(сильно ослабленные деревья): дефолиация >25–60%, выраженное изменение окраски хвои, наличие признаков заселения стволовыми вредителями; класс 3 (усыхающие деревья): дефолиация >60–<100%, преимущественно сухая или некротизированная хвоя, активное заселение ксилофагами; класс 4 (сухостой): дефолиация 100%. В рамках данного класса дополнительно выделяли свежий сухостой текущего года (хвоя полностью сухая, но сохраняющаяся на ветвях) и старый сухостой прошлых лет (хвоя отсутствует, наблюдается осыпание коры и начальные стадии деструкции древесины).

В ходе исследований жизненного состояния темнохвойных насаждений, подвергшихся воздействию *P. proximus*, был выполнен отбор древесных кернов с использованием возрастного бурава Häglof (диаметр 5,15 мм) с модельных деревьев пихты *A. sibirica* (далее по тексту Класс 4). Отбор проб проводился на высоте 1,3 м от уровня земли. Для установления возраста гибели модельных деревьев

Класса 4 проведена их перекрестная датировка (100 кернов) с использованием 30 кернов из деревьев Класса 0 пихты сибирской, произрастающих на тех же пробных площадях, что и деревья Класса 4. Таким образом, все исследуемые деревья произрастали в идентичных условиях (схожий тип почвы, рельеф и микроклимат в пределах ограниченного участка древостоя). Вышеуказанный факт гарантирует, что выявление наличия / отсутствия наблюдаемых различий в спектральных характеристиках между образцами будет обусловлено исключительно временем, прошедшим после гибели дерева. Обработку и анализ кернов производили в программе CooRecorder 9.3.1, построение и перекрестное датирование в программе CDendro 9.3.1. Древесно-кольцевые статистики вычисляли с помощью пакета dplR.

На основе таксации и категорий жизненного состояния методом перекрёстной датировки сухостойной древесины определены годы гибели пихты сибирской на пробных площадях ПП-1 и ПП-2. Деревья Класса 4 разделены на две группы по давности гибели: до 5 лет (ПУ-5, предельный год — 2018) и до 10 лет (ПУ-10) (по 5 деревьев в каждой). Контрольную группу образцов (5 деревьев) представляли деревья пихты, которые не были подвергнуты атаке *P. proximus* (Контроль).

ИКФС

Образцы древесины измельчалась в древесный порошок на криомельнице IQ MILL-2070 (Frontier, Япония). Для выявления изменений в лигно-углеводной матрице *A. sibirica* на молекулярном уровне был применен метод инфракрасной-Фурье спектроскопии (ИКФС). Метод является полезным инструментом для изучения химических процессов при воздействии грибов-деструкторов на древесину [25, 26]. Для снятия инфракрасных (ИК) спектров были использованы следующие условия: образцы древесины *A. sibirica* (1,5 мг) были помещены в матрицу KBr (100 мг) с последующим снятием спектров при помощи инфракрасного Фурье-

спектрометра «VERTEX 80V» (Bruker Optics, Германия). Спектральное разрешение 0,4 см⁻¹; воспроизводимость волнового числа ±0,05 см⁻¹, спектральный диапазон от 7000 до 400 см⁻¹. Спектры получены. Анализ спектров осуществляли в программном обеспечении «OPUS» с применением векторной нормализации.

Молекулярно-генетический анализ образцов древесины *A. sibirica* был выполнен в Центре защиты леса Красноярского края, филиал ФБУ «Российский центр защиты леса», Отдел оценки состояния лесных ресурсов генетическими методами.

Статистическая обработка данных

Статистические тесты были выполнены в R (v.4.4.1), значимость была определена при $p\text{-value} < 0,05$. Для анализа и визуализации данных нами были использованы пакеты «tidyverse», «permuco» и «RVAideMemoire». Для сравнения каждой группы друг с другом был проведен попарный PERMANOVA с помощью функции pairwise.adonis2 из пакета «pairwiseAdonis», число перестановок 100000, для устранения эффекта множественных сравнений применена поправка Бенджамин-Хохберга. По результатам теста между каждой парой обнаружены значимые отличия ($p\text{-value} < 0,01$). Для проверки равенства внутригрупповых дисперсий был проведен PERMDISP (analysis of multivariate homogeneity of group dispersions (variances) с помощью функции betadisper пакета «vegan». По результатам теста значимых отличий между группами не обнаружено ($p\text{-value} = 0,63$), можно сделать вывод что значимые результаты, полученные PERMANOVA, отражают различия в положениях центроидов групп.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены результаты комплексного молекулярно-генетического анализа с применением секвенирования и видоспецифической полимеразной цепной реакции (ПЦР).

Таблица 1

Результаты комплексной молекулярно-генетической диагностики образцов древесины пихты сибирской в зависимости от давности инвазии полиграфом уссурийским

Table 1

Results of complex molecular genetic diagnostics of Siberian fir wood samples depending on the duration of Ussuri bark beetle invasion

Образец / Sample	Давность гибели, лет / Age of death of fir stands, year	Выявленные рода или виды доминирующих биодеструкторов / Identified genera or species of dominant biodegrading fungi
<i>P. proximus</i>	5	<i>Hymenochaete cruenta</i> , <i>Graphilbum microcarpum</i> , <i>Kirschsteiniotelia</i> sp. <i>Fomitopsis pinicola</i> , <i>Phialophora</i> sp., <i>Leptodontidium beauverioides</i> , <i>Ganoderma lucidum</i> , <i>Armillaria mellea</i> s. l., <i>Inonotus</i> sp., <i>Phellinus</i> sp., <i>Fomes fomentarius</i> .

	10	Trichoderma sp., Inonotus sp., Phellinus sp., Fomitopsis pinicola.
Контроль / Control	-	Cladosporium sp.

Из представленных в таблице 1 данных установлено, что в первые 5 лет после гибели древесины сухостойных деревьев пихты сибирской в насаждениях, поврежденных полиграфом уссурийским, заселяется большим количеством родов и видов деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибов – 11 ед. При этом, подавляющее большинство родов и видов грибов, содержащихся в исследованных пробах древесины, относятся к дереворазрушающим грибам, вызывающим белую гниль. К 10-летней давности гибели вследствие потери влаги древесиной сухостойных деревьев разнообразие видов миксообщества сокращается почти в 3 раза и представлено в основном трутовиками.

ИКФС является полезным методом для изучения химии разложения древесины, а также для анализа требуется минимальная подготовка образца. Метод позволяет анализировать малые количества образца (несколько миллиграмм) и широко используется для идентификации грибной инфекции [24, 29]. Полосы поглощения исследуемых образцов были изучены в области

«отпечатков пальцев» (1800-800 см⁻¹), т.к. эта область является сложной и характеристичной спектральной областью ИК-спектра. На рисунке 2 представлены полученные нами средние ИК спектры для контрольных образцов и для образцов из нарушенных полиграфом насаждений в диапазоне «отпечатков пальцев». В таблице 2 представлены максимальные значения полос поглощения для исследованных образцов *A. sibirica*.

Основные полосы соответствуют валентным колебаниям карбонильной группы (C=O) в гемицеллюлозах при 1738 см⁻¹, лигнину при 1655, 1594, 1504, 1264 и при 1238 см⁻¹ и углеводам при 1451, 1372, 1175, 1107, 1024 и при 892 см⁻¹ [28, 30, 37-39].

Для уменьшения размерности и визуализации данных был проведен анализ главных компонент (PCA). Первая и вторая главные компоненты объяснили 68,3 % и 17,8 % вариации данных соответственно, то есть 86,1 % суммарно (рис. 3).

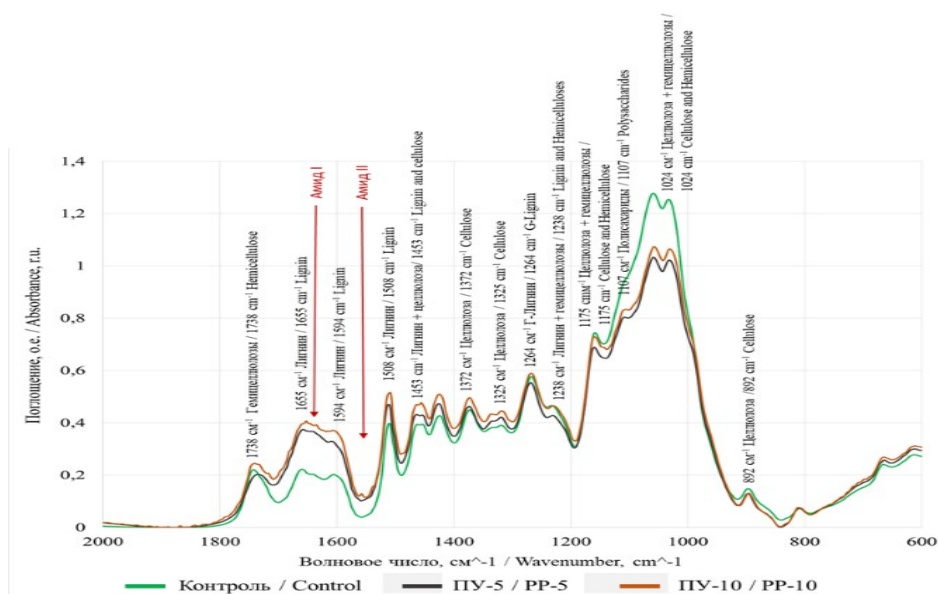


Рисунок 2. Средние ИК спектры для образцов *A. sibirica* в спектральном диапазоне 1800-800 см⁻¹
Figure 2. Mid-IR spectra for *A. sibirica* samples in 1800-800 cm⁻¹

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Основные полосы ИК-спектров в области отпечатков пальцев в древесинном веществе *A. sibirica*

Table 2

Main bands of IR spectra in the fingerprint region of woody substance of *A. sibirica*

Волновое число, см ⁻¹ / Wavenumber, cm ⁻¹	Поглощение, о.е. (относительные единицы) / Absorption, r.u. (relative units)		
	Контроль / Control	ПУ-5 / PP-5	ПУ-10 / PP-10
1738	2,284 ± 0,227	1,93 ± 0,582	2,416 ± 0,045
1655	2,216 ± 0,121	3,678 ± 0,108	4,162 ± 0,150
1652	—	—	3,902 ± 0,292
1594	2,182 ± 0,196	3,276 ± 0,269	3,61 ± 0,123
1542	—	—	0,143 ± 0,134
1504	3,81 ± 0,200	4,622 ± 0,106	5,216 ± 0,095
1461	3,832 ± 0,306	4,326 ± 0,245	4,826 ± 0,254
1372	4,354 ± 0,166	4,554 ± 0,230	4,846 ± 0,183
1325	3,864 ± 0,172	4,32 ± 0,211	4,382 ± 0,126
1264	5,708 ± 0,395	6,472 ± 0,121	7,496 ± 0,391
1238	4,392 ± 0,204	5,288 ± 0,076	5,654 ± 0,217
1175	7,376 ± 0,137	6,728 ± 0,238	7,346 ± 0,160
1107	9,322 ± 0,108	8,192 ± 0,129	8,342 ± 0,076
892	1,454 ± 0,143	0,734 ± 0,132	0,724 ± 0,135

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

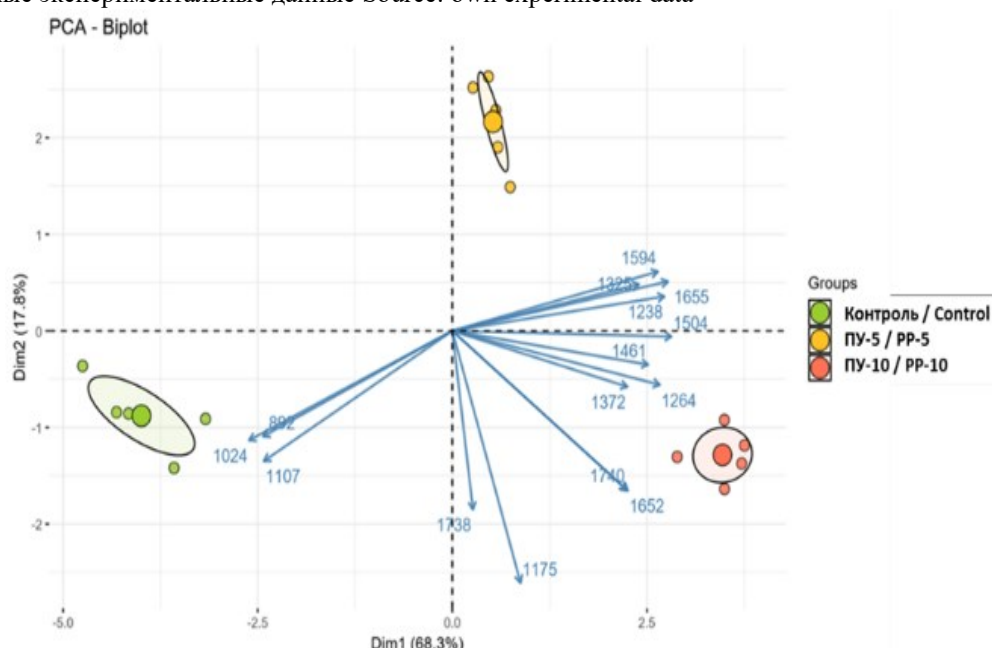


Рисунок 3. Данные, полученные методом ИКФС в пространстве главных компонент для исследуемых образцов *A. sibirica*

Figure 3. Data obtained by the FTIR method in the principal component space for the studied *A. sibirica* samples

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

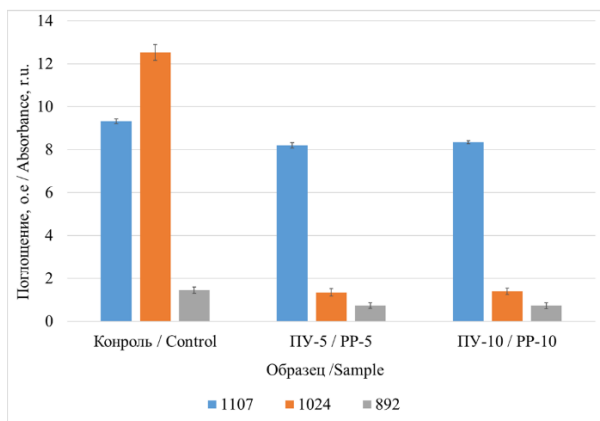
Для определения переменных, вносящих наибольший вклад в разделение данных групп, был проведен анализ SIMPER (Similarity Percentages) в евклидовых расстояниях, при помощи функции `simper` из пакета “`vegan`”. По результатам анализов можно установить, что при поражении полиграфом происходит значимое уменьшение интенсивности ИК полос при 1024,

892 и 1107 см⁻¹, и со временем появляются полосы при 1652 см⁻¹, что связано с развитием грибковой инфекции. Также, наблюдается значимый рост интенсивности ИК полос при 1655, 1504, 1264, 1594, 1325 см⁻¹. Таким образом, спектры образцов категории «Контроль» и спектры образцов, отобранных из нарушенных полиграфом насаждений, различались в полосах поглощения

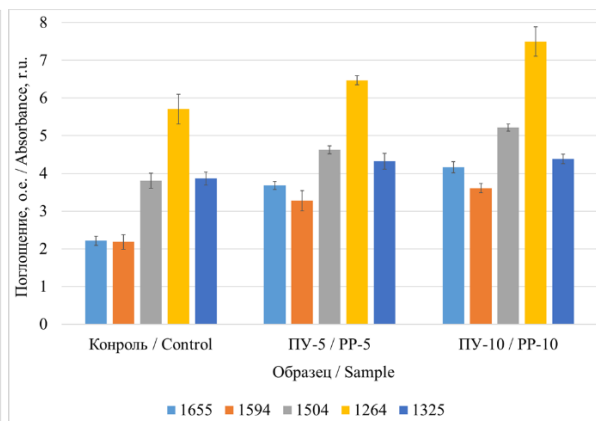
при 1655, 1504, 1264, 1594, 1325, 1594, 1024, 1107, 895 см^{-1} . и при 1655 см^{-1} . Кроме того, в образцах пихты, отобранных из насаждений, нарушенных полиграфом обнаружены маркерные полосы поглощения (1652 при 1542 см^{-1}), характерные грибам-деструкторам, которые вызывают инфекцию [27]. В образцах ПУ-5 полос поглощения, которые соответствуют Амиду I и Амиду II выявить нам не удалось (табл. 2, рис. 2).

На рисунке 4 представлены спектральные различия для образцов древесины пихты, отобранных из насаждений разной давности гибели. Как видно из рисунка 4 относительная

интенсивность полос, которые связаны с лигнином, а именно полосы поглощения при 1655, 1594, 1504, 1264, 1325 см^{-1} были сильнее, чем в контрольном образце (рис. 4 б). Полосы, связанные с углеводной компонентой при 1107, 1024, 892 см^{-1} были слабее, чем в контроле (рис. 4 а). С увеличением давности гибели насаждения интенсивность полос поглощения, которые соответствуют ароматической компоненте возрастает, а интенсивность полос поглощения, соответствующих углеводной компоненте, продолжает уменьшаться.



а)



б)

Рисунок 4. Распределение максимальных значений ИК полос поглощения, соответствующих углеводной компоненте (а) и ароматической компоненте (б), модифицированных в результате деятельности грибов-деструкторов
Figure 4. Distribution of maximum values, obtained by FTIR spectroscopy corresponding to carbohydrate component (a) and aromatic component (b) modified by various rot fungi

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

При снижении интенсивностей пиков, приписываемых углеводной компоненте на фоне возрастания интенсивностей пиков, соответствующих ароматической компоненте, происходит преимущественная деградация целлюлозы и гемицеллюлозы и модификация и/или накопление фрагментов лигнина [40, 41]. И, как видно из рисунка 4 а, процесс входит в активную фазу уже в первые 5 лет и непрерывно продолжается до достижения десятилетней давности гибели темновойного насаждения. Пик при полосе поглощения 1024 см^{-1} соотносится к валентным колебаниям С-О и деформационным колебаниям О-Н в целлюлозах и гемицеллюлозах [37] и резкое снижение интенсивности данного пика доказывает деструкцию углеводного комплекса. Продолжающееся снижение интенсивности пика при 892 см^{-1} (деформационные колебания атома

водорода в гликозидной связи в целлюлозе и гемицеллюлозах) [28] подтверждает деструктивные изменения, происходящие в целлюлозном комплексе на протяжении возрастающей давности гибели темновойного насаждения, и свидетельствует о деполимеризации целлюлозы, в частности. Кроме того, в образцах ПУ-5, выявлено снижение интенсивности пика при 1107 см^{-1} (валентные колебания С-О-С в пиранозном кольце целлюлозы) [37, 39], что указывает на прямое следствие деструкции углеводной компоненты. Таким образом, деструкция углеводного комплекса свидетельствует о глубоких изменениях на молекулярном уровне, что ведет к потере целлюлозного матрикса.

Полоса при 1325 см^{-1} имеет смешенное происхождение и относится к целлюлозе (С-Н колебания в целлюлозе) и к лигнину (С-О связь сиригильного кольца) [42, 43]. Небольшое увеличение интенсивности данной полосы в образцах ПУ-5 и ПУ-10 по сравнению с контрольными образцами (рис. 4 б) может быть обусловлено накоплением лигнина при одновременной деструкции углеводного комплекса (рис. 4 а), что и приводит к увеличению интенсивности пика при 1325 см^{-1} , который отражает модификации в целлюлозе и в лигнине.

Поскольку метод ИКФС является полуколичественным [42], то разрушение

полисахаридов привело к увеличению интенсивности полос при 1655, 1594, 1504 и 1264 см⁻¹. Интенсивности полос в образцах ПУ-5 и ПУ-10 увеличивалось по мере увеличения давности гибели насаждения, которое было нарушено полиграфом уссурийским. Таким образом, был выявлен относительных рост полос, соответствующих лигнину. Лигнин – это сложный полимер, в основном состоящий из фенилпропановых единиц, содержащих ароматические кольца, которые являются ключевой структурной особенностью лигнина и способствуют его жесткости [44]. Рост интенсивности полосы при 1655 см⁻¹ (валентные колебания сопряженных карбонильных групп (C=O) и / или колебания углерод-углеродных двойных связей (C=C) в ароматических структурах) указывает на модификацию лигнина с использованием окислительного деградиационного пути с образованием хинонов, сопряженных кетонов [45], которые, по-видимому, и повышают интенсивность в этой области. Рост интенсивности полос при 1504 см⁻¹ (валентные колебания углерод-углеродных связей (C=C) в ароматических кольцах лигнина), 1594 см⁻¹ (валентным колебаниям углерод-углеродных связей (C=C) в ароматических кольцах лигнина с существенным вкладом деформационных колебаний связей C-H в метиленовых (-CH₂-) и метоксильных (-O-CH₃) группах, связанных с ароматическим ядром), 1264 см⁻¹ (лигнин гваяцильного типа) связан с начальным этапом модификации лигнина, поскольку в образцах из темнохвойного насаждения десятилетней давности гибели не наблюдали спада интенсивности полос поглощения, относящиеся к лигнину. Следовательно, в образцах сухостойной древесины из нарушенных полиграфом уссурийским темнохвойных насаждений, в течении десяти лет после гибели деревьев происходят процессы, связанные с селективной деструкцией углеводного комплекса (аморфная часть целлюлозы и гемицеллюлозы) и началом накопления и модификации лигнина, что может быть вызвано секрецией гидролитических ферментов, которые продуцируют грибы, вызывающие бурую гниль. В литературе отмечено, что грибы бурой гнили активно разрушают углеводный комплекс для дальнейшего использования в качестве источника питания, но не разрушают лигнин полностью, а модифицируют его [22, 42]. Дереворазрушающие

грибы бурой гнили в большинстве случаев являются возбудителями процессов разложения древесины хвойных пород в бореальных лесах и разлагают холоцеллюлозу посредством эволюционно выработанного ступенчатого механизма, который заключается в биохимически контролируемом ферментативным образованием высокореактивных гидроксильных радикалов посредством реакции Фентона. По мнению исследователей, реакция Фентона является основной причиной гниения древесины [20, 21]. Образующиеся гидроксильные радикалы атакуют все полимеры, но из-за структурных особенностей делают это селективно. Лигнин и кристаллическая целлюлоза сохраняются, поскольку грибам-деструкторам не хватает ключевых гидролитических и окислительных ферментов (например, целлобиогидролаз, литических полисахаридных монооксигеназ, мультимедных оксидаз и пероксидаз) [23].

Выводы

В данном исследовании представлен подход к изучению пихтовых насаждений, подвергшихся атаке полиграфом уссурийским. Полученные нами результаты указывают на явную динамику устойчивости компонентов древесины пихты сибирской из нарушенных полиграфом уссурийским древостоев во времени. Гемицеллюлозы и аморфная целлюлоза выявили высокую скорость деструкции в сухостойных образцах пятилетней давности гибели, на что указывали снижение интенсивностей полос поглощения при 1024 и 892 см⁻¹. Ароматический скелет лигнина (1504 см⁻¹) выявил стабильность в образцах с десятилетней давностью гибели, тем не менее выявлено продолжающееся во времени окисление и модификация лигнина, о чем свидетельствует пик полосы при 1655 см⁻¹.

Следовательно, деструкция сухостойной древесины пихты сибирской носит каскадный характер, в котором сначала подвергаются деструкции легкодоступные углеводы, затем кристаллическая целлюлоза, а после происходит модификация и окисление лигнина. Таким образом, применение ИК-Фурье спектроскопии позволяет не только определять давность гибели насаждения, диагностировать ранние стадии биодеструкции древесины, а также прогнозировать поведение древесинного вещества в процессах его переработки.

Список литературы

1. Дюкарев А.Г., Копысов С.Г., Кривец С.А., Пац Е.Н., Чернова Н.А. Опыт и первые результаты комплексных биогеоэкологических исследований в темнохвойных лесах юга таежной зоны Западной Сибири. Сибирский лесной журнал. – 2024. – № 3. – С. 11-24. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240303>.

2. Shestakova T.A., Rogers B.M., Mackey B., Hugh S., Norman P., Kukavskaya E.A. Tracking ecosystem stability across boreal Siberia. *Ecological Indicators*. 2024; 169: 112841. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112841>.
3. Selikhovkin A.V., Drenkhan R., Mandelshtam M., Musolin D. Invasions of insect pests and fungal pathogens of woody plants into the northwestern part of European Russia. *Earth Sciences*. 2020; 65(2): 263-283. – DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.203>.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964> (дата обращения: 15.04.2026).
5. Kerchev I.A., Bisirova E.M., Krivets S.A. Effect of the Four-Eyed Fir Bark Beetle Invasion on the Species Composition and Structure of the Siberian Fir Stem Pest Complex. *Contemporary Problems of Ecology*. 2022; 15(3): 270-281. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425522030076>.
6. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. Climate-driven conifer mortality in Siberia. *Global Ecology and Biogeography*. 2020; 30(2): 543-2556. – DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.13243>.
7. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Shushpanov A.S., Dvinskaya M.L. Climate-Induced Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) Mortality in the Siberian Mountains. *Mountain Landscapes in Transition*. 2021: 403-416. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16.
8. Sultson S.M., Goroshko A.A., Verkhovets S.V., Mikhaylov P.V., Ivanov V.A., Demidko D.A., Kulakov S.S. Orographic Factors as a Predictor of the Spread of the Siberian Silk Moth Outbreak in the Mountainous Southern Taiga Forests of Siberia. *Land*. 2021; 10: 115. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land10020115>.
9. Демидко Д.А., Ефременко А.А., Баранчиков Ю.Н. История массовых размножений сибирского шелкопряда в восточных предгорьях кузнецкого алатау: дендрохронологическая реконструкция // Сибирский лесной журнал. – 2023. – № 1. – С. 98-110. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230109>.
10. Demidko D.A., Goroshko A.A., Slinkina O.A., Mikhaylov P.V., Sultson S.M. The Role of Forest Stands Characteristics on Formation of Exterior Migratory Outbreak Spots by the Siberian Silk Moth *Dendrolimus sibiricus* (Tschetv.) during Population Collapse. *Forests*. 2023; 14(6): 1078. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061078>.
11. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Волкова Е.С., Астапенко С.А., Ефременко А.А., Косилов А.Ю., Кудрявцев П.П., Кузнецова Ю.П., Пономарев В.И., Потапкин А.Б., Тараскин Е.Г., Титова В.В., Шилоносов А.О., Баранчиков Ю.Н. Обзор современного вторичного ареала полиграфа уссурийского (*Polygraphus proximus* Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Российской Федерации // Российский журнал биологических инвазий. – 2024. – № 1. – С. 49-69. – DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-1-49-69>.
12. EPPO Global Database. *Polygraphus proximus* (POLGPR). Categorization. 2026. – URL: <https://gd.eppo.int/taxon/POLGPR/categorization> (дата обращения: 15.04.2026).
13. Kirichenko N.I., Rudoi V.V., Efremenko A.A., Petrov A.V., Baranchikov Y.N. First record of the invasive bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Republic of Kazakhstan. *Acta Biologica Sibirica*. 2023; 9: 1003-1022. – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10199570>.
14. Ponomarev V.I., Tolkach O.V., Klobukov G.I., Efremenko A.A., Pashenova N.V., Demidko D.A., Kirichenko N.I., Baranchikov Y.N. The potential threats posed by the invasive bark beetle *Polygraphus proximus* (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) to a natural park in the Middle Urals (Russia). *Acta Biologica Sibirica*. 2024; 10: 661-675. – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12672511>.
15. Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*. 2021; 50: 1953-1974. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>.
16. Бакшеева Е.О., Головина А.Н., Морозов С.А. Лесовосстановление и пожарная опасность в пихтовых древостоях, поврежденных полиграфом уссурийским. Хвойные бореальной зоны. – 2021. – Т. XXXIX, № 6. – С. 443-450.
17. Иванова Г.А., Кукавская Е.А., Безкоровайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Тарасов П.А. Воздействие пожаров на светлохвойные леса Нижнего Приангарья. *Наука*. – 2022. – 204 с.
18. Жила С.В., Фурьев И.В., Ковалева Н.М. Оценка запасов лесных горючих материалов в пихтовых древостоях, нарушенных полиграфом уссурийским, в Красноярском крае. *Сибирский лесной журнал*. – 2023. – № 6. – С. 76-84. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230608>.
19. Brischke C., Alfredsen G. Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020; 104: 3781-3795. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10479-1>.

20. Anderson C.E., Zhang J., Markillie L.M., Mitchell H.D., Chrisler W.B., Gaffrey M.J., Orr G., Schilling J.S. Capturing an early gene induction event during wood decay by the brown rot fungus *Rhodonia placenta*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2022; 88: e00188-22. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00188-22>.
21. Mattila H.K., Österman-Udd J., Mali T., Lundell T. Basidiomycota Fungi and ROS: genomic perspective on key enzymes involved in generation and mitigation of reactive oxygen species. *Frontiers in Fungal Biology*. 2022; 3: 837605. – DOI: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.837605>.
22. Hage H., Rosso M.N. Evolution of fungal carbohydrate-active enzyme portfolios and adaptation to plant cell-wall polymers. *Journal of Fungi*. 2021; 7: 185. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7030185>.
23. Schrader L., Brischke C., Trautner J. Microbial decay of wooden structures: actors, activities and means of protection. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2025; 109: 59. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-025-13443-z>.
24. Girometta C., Dondi D., Baiguera R.M., Bracco F., Branciforti D.S., Buratti S., Lazzaroni S., Savino E. Characterization of mycelia from wood-decay species by TGA and IR spectroscopy. *Cellulose*. 2020; 27: 6133-6148. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03208-4>.
25. Tryjarski P., Gawron J., Andres B., Obiedzińska A., Lisowski A. FTIR Analysis of Changes in Chipboard Properties after Pretreatment with *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. *Energies*. 2022; 15(23): 9101. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15239101>.
26. Qi J., Li F., Jia L., Zhang X., Deng S., Luo B., Zhou Y., Fan M., Xia Y. Fungal Selectivity and Biodegradation Effects by White and Brown Rot Fungi for Wood Biomass Pretreatment. *Polymers*. 2023; 15(8): 1957. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15081957>.
27. Gupta B.S., Jelle B.P., Gao T. In vitro cell composition identification of wood decay fungi by Fourier transform infrared spectroscopy. *Royal Society Open Science*. 2022; 9(2): 201935. – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.201935>.
28. Báder M., Németh R., Sandak J. FTIR analysis of chemical changes in wood induced by steaming and longitudinal compression. *Cellulose*. 2020; 27: 6811-6829. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03131-8>.
29. Tintner J., Spangl B., Reiter F., Smidt E., Grabner M. Infrared spectral characterization of the molecular wood decay in terms of age. *Wood Science and Technology*. 2020; 54: 313-327. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01160-x>.
30. Wittner N., Slezsák J., Broos W., Geerts J., Gergely S., Vlaeminck S.E., Cornet I. Rapid lignin quantification for fungal wood pretreatment by ATR-FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta*. 2023; 285: 121912. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121912>.
31. Нагимов З.Я., Шевелина И.В., Нагимов В.З., Артемьева И.Н. Лесотаксационные измерения: учебное пособие. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург. – 2021. – 95 с.
32. Eichhorn J., Roskams P., Potocic N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletkovic I., Schroeck H-W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wulff S. Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2020; 49.
33. Schwärzel K., Seidling W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. Strategy and Implementation of ICP Forests. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2022; 12.
34. Alekseev A., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforchin I., Chernikhovsky D., Chernov I. Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS-technologies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507(1): 012001. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012001>.
35. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V., Dmitrieva A.A. Pine needles and soil as bioindicators of forest ecosystems in the anthropogenically disturbed areas of the Baikal region. *BIO Web of Conferences*. 2024; 93: 01003. – DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301003>.
36. Narykova A.N., Plotnikova A.S., Akhmetova G.V., Danilova M.A., Kuznetsova A.I. Geospatial modeling of carbon stocks in forest litter in the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus (Leningrad Oblast). *Eurasian Soil Science*. 2025; 58: 131. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600484>.
37. Sharma V., Yadav J., Kumar R., Tesarova D., Ekielski A., Mishra P.K. On the rapid and non-destructive approach for wood identification using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Vibrational Spectroscopy*. 2020; 110: 103097. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103097>.
38. Griffin J.N., Santos G.M., Nguyen L.D., Rodriguez D.R.O., Pereira L., Jaén-Barrios N., Assis-Pereira G., Barreto N.O., Brandes A.F.N., Barbosa A.C., Groenendijk P. Demystifying the tropics: FTIR characterization of pantropical woods and their α -cellulose extracts for past atmospheric ^{14}C reconstructions. *Science of The Total Environment*. 2024; 949: 175010. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175010>.
39. Yadav A., Sharma S., Singh V., Kapoor M., Singh R. Forensic identification and differentiation of some protected timber species using ATR-FTIR spectroscopy and chemometrics. *Frontiers in Analytical Science*. 2024; 4: 1508509. – DOI: <https://doi.org/10.3389/frans.2024.1508509>.

40. Bhardwaj N., Kumar B., Agrawal K., Verma P. Current perspective on production and applications of microbial cellulases: a review. *Bioresources and Bioprocessing*. 2021; 8: 95. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00447-6>.
41. Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. Fungal ligninolytic enzymes and their application in biomass lignin pretreatment. *Journal of Fungi*. 2023; 9: 780. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9070780>.
42. High K.E., Penkman K.E.H. A review of analytical methods for assessing preservation in waterlogged archaeological wood and their application in practice. *Heritage Science*. 2020; 8: 83. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00422-y>.
43. Kumari D., Singh R. Rice straw structure changes following green pretreatment with petha wastewater for economically viable bioethanol production. *Scientific Reports*. 2022; 12: 10443. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14627-7>.
44. Ez-Zahraoui S., Hassani F.Z.S.A., Achaby M.El., Qaiss A.K., Bouhfid R. Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites. In: *Natural Fiber Composites* (ed.). Woodhead Publishing. 2023; 3-29. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00004-1>.
45. Hasegawa N., Sugiyama M., Igarashi K. Random forest machine-learning algorithm classifies white- and brown-rot fungi according to the number of the genes encoding Carbohydrate-Active enzyme families. *Applied and Environmental Microbiology*. 2024; 90: e00482-24. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00482-24>.

References

1. Dyukarev A.G., Kopysov S.G., Krivets S.A., Pats E.N., Chernova N.A. *Opyt i pervye rezul'taty kompleksnykh biogeotsenologicheskikh issledovaniy v temnokhvoynnykh lesakh yuga taezhnoy zony Zapadnoy Sibiri. Sibirskiy lesnoy zhurnal*. [Experience and first results of complex biogeocenological studies in dark coniferous forests of the southern taiga zone of Western Siberia]. *Siberian Forestry Journal*, 2024; 3: 11-24. (In Russ.) – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240303>.
2. Shestakova T.A., Rogers B.M., Mackey B., Hugh S., Norman P., Kukavskaya E.A. *Tracking ecosystem stability across boreal Siberia*. *Ecological Indicators*. 2024; 169: 112841. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112841>.
3. Selikhovkin A.V., Drenkhan R., Mandelshtam M., Musolin D. *Invasions of insect pests and fungal pathogens of woody plants into the northwestern part of European Russia*. *Earth Sciences*. 2020; 65(2): 263-283. – DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.203>.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
5. Kerchev I.A., Bisirova E.M., Krivets S.A. *Vliyanie invazii poligrafa ussuriyskogo na vidovoy sostav i strukturu kompleksa stvolovykh vrediteley pikhty sibirskoy. Sovremennyye problemy ekologii*. [Effect of the Four-Eyed Fir Bark Beetle Invasion on the Species Composition and Structure of the Siberian Fir Stem Pest Complex]. *Modern environmental problems*, 2022; 15(3): 270-281. (In Russ.) – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425522030076>.
6. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. *Climate-driven conifer mortality in Siberia*. *Global Ecology and Biogeography*. 2020; 30(2): 543-2556. – DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.13243>.
7. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Shushpanov A.S., Dvinskaya M.L. *Climate-Induced Fir (Abies sibirica Ledeb.) Mortality in the Siberian Mountains. In: Schickhoff U., Singh R., Mal S. (eds.) Mountain Landscapes in Transition. Sustainable Development Goals Series*. Cham: Springer. 2021: 403-416. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16.
8. Sultson S.M., Goroshko A.A., Verkhovets S.V., Mikhaylov P.V., Ivanov V.A., Demidko D.A., Kulakov S.S. *Orographic Factors as a Predictor of the Spread of the Siberian Silk Moth Outbreak in the Mountainous Southern Taiga Forests of Siberia*. *Land*, 2021; 10: 115. – DOI: <https://doi.org/10.3390/land10020115>.
9. Demidko D.A., Efremenko A.A., Baranchikov Yu.N. *Istoriya massovykh razmnzheniy sibirskogo shelkopryada v vostochnykh predgor'yakh Kuznetskogo Alatau: dendrokronologicheskaya rekonstruktsiya. Sibirskiy lesnoy zhurnal*. [History of Siberian silk moth outbreaks in the eastern foothills of the Kuznetsk Alatau: dendrochronological reconstruction]. *Siberian Forestry Journal*, 2023; 1: 98-110. (In Russ.) – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230109>.
10. Demidko D.A., Goroshko A.A., Slinkina O.A., Mikhaylov P.V., Sultson S.M. *The Role of Forest Stands Characteristics on Formation of Exterior Migratory Outbreak Spots by the Siberian Silk Moth Dendrolimus sibiricus (Tschetv.) during Population Collapse*. *Forests*. 2023; 14(6): 1078. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061078>.
11. Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Astapenko S.A., Efremenko A.A., Kosilov A.Yu., Kudryavtsev P.P., Kuznetsova Yu.P., Ponomarev V.I., Potapkin A.B., Taraskin E.G., Titova V.V., Shilonosov A.O., Baranchikov Yu.N. *Obzor sovremennogo vtorichnogo areala poligrafa ussuriyskogo (Polygraphus proximus Blandford, 1894) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) v Rossiyskoy Federatsii. Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy*. [Overview of the current secondary range of the four-eyed fir bark beetle (Polygraphus

- proximus Blandford, 1894) in the Russian Federation]. Russian Journal of Biological Invasions, 2024; 1: 49-69. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-1-49-69>.
12. EPPO Global Database. *Polygraphus proximus* (POLGPR). Categorization. 2026. – URL: <https://gd.eppo.int/taxon/POLGPR/categorization> (accessed: 15.04.2026).
 13. Kirichenko N.I., Rudoi V.V., Efremenko A.A., Petrov A.V., Baranchikov Y.N. *First record of the invasive bark beetle Polygraphus proximus Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the Republic of Kazakhstan*. Acta Biologica Sibirica. 2023; 9: 1003-1022. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10199570>.
 14. Ponomarev V.I., Tolkach O.V., Klobukov G.I., Efremenko A.A., Pashenova N.V., Demidko D.A., Kirichenko N.I., Baranchikov Y.N. *The potential threats posed by the invasive bark beetle Polygraphus proximus (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) to a natural park in the Middle Urals (Russia)*. Acta Biologica Sibirica. 2024; 10: 661-675. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12672511>.
 15. Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. *Wildfires in the Siberian taiga*. Ambio. 2021; 50: 1953-1974. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>.
 16. Baksheeva E.O., Golovina A.N., Morozov S.A. *Lesovosstanovlenie i pozharnaya opasnost' v pikhtovykh drevostoyakh, povrezhdennykh poligrafom ussuriyskim*. Khvoynye boreal'noy zony. [Reforestation and fire hazard in fir stands damaged by the four-eyed fir bark beetle]. Conifers of the boreal zone, 2021; XXXIX(6): 443-450. (In Russ.).
 17. Ivanova G.A., Kukavskaya E.A., Bezkorovaynaya I.N., Bogorodskaya A.V., Zhila S.V., Ivanov V.A., Kovaleva N.M., Krasnoshchekova E.N., Tarasov P.A. *Vozdeystvie pozharov na svetlokhvoynye lesa Nizhnego Priangar'ya* [Impact of fires on light coniferous forests of the Lower Angara region]. Novosibirsk: Nauka, 2022. 204 p. (In Russ.).
 18. Zhila S.V., Furyaev I.V., Kovaleva N.M. *Otsenka zapasov lesnykh goryuchikh materialov v pikhtovykh drevostoyakh, narushennykh poligrafom ussuriyskim, v Krasnoyarskom krae*. Sibirskiy lesnoy zhurnal. [Estimation of forest fuel loads in fir stands disturbed by the four-eyed fir bark beetle in Krasnoyarsk Krai]. Siberian Forestry Journal. 2023; 6: 76-84. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20230608>.
 19. Brischke C., Alfredsen G. *Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay*. Applied Microbiology and Biotechnology. 2020; 104: 3781-3795. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10479-1>.
 20. Anderson C.E., Zhang J., Markillie L.M., Mitchell H.D., Chrisler W.B., Gaffrey M.J., Orr G., Schilling J.S. *Capturing an early gene induction event during wood decay by the brown rot fungus Rhodonia placenta*. Applied and Environmental Microbiology. 2022; 88: e00188-22. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00188-22>.
 21. Mattila H.K., Österman-Udd J., Mali T., Lundell T. *Basidiomycota Fungi and ROS: genomic perspective on key enzymes involved in generation and mitigation of reactive oxygen species*. Frontiers in Fungal Biology. 2022; 3: 837605. – DOI: <https://doi.org/10.3389/ffunb.2022.837605>.
 22. Hage H., Rosso M.N. *Evolution of fungal carbohydrate-active enzyme portfolios and adaptation to plant cell-wall polymers*. Journal of Fungi. 2021; 7: 185. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7030185>.
 23. Schrader L., Brischke C., Trautner J. *Microbial decay of wooden structures: actors, activities and means of protection*. Applied Microbiology and Biotechnology. 2025; 109: 59. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-025-13443-z>.
 24. Girometta C., Dondi D., Baiguera R.M., Bracco F., Branciforti D.S., Buratti S., Lazzaroni S., Savino E. *Characterization of mycelia from wood-decay species by TGA and IR spectroscopy*. Cellulose. 2020; 27: 6133-6148. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03208-4>.
 25. Tryjarski P., Gawron J., Andres B., Obiedzińska A., Lisowski A. *FTIR Analysis of Changes in Chipboard Properties after Pretreatment with Pleurotus ostreatus (Jacq.) P. Kumm.* Energies. 2022; 15(23): 9101. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15239101>.
 26. Qi J., Li F., Jia L., Zhang X., Deng S., Luo B., Zhou Y., Fan M., Xia Y. *Fungal Selectivity and Biodegradation Effects by White and Brown Rot Fungi for Wood Biomass Pretreatment*. Polymers. 2023; 15(8): 1957. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15081957>.
 27. Gupta B.S., Jelle B.P., Gao T. *In vitro cell composition identification of wood decay fungi by Fourier transform infrared spectroscopy*. Royal Society Open Science. 2022; 9(2): 201935. – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.201935>.
 28. Báder M., Németh R., Sandak J. *FTIR analysis of chemical changes in wood induced by steaming and longitudinal compression*. Cellulose. 2020; 27: 6811-6829. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03131-8>.
 29. Tintner J., Spangl B., Reiter F., Smidt E., Grabner M. *Infrared spectral characterization of the molecular wood decay in terms of age*. Wood Science and Technology. 2020; 54: 313-327. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01160-x>.
 30. Wittner N., Slezsák J., Broos W., Geerts J., Gergely S., Vlaeminck S.E., Cornet I. *Rapid lignin quantification for fungal wood pretreatment by ATR-FTIR spectroscopy*. Spectrochimica Acta. 2023; 285: 121912. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121912>.
 31. Nagimov Z.Ya., Shevelina I.V., Nagimov V.Z., Artemyeva I.N. *Lesotaksatsionnye izmereniya. Uchebnoe posobie*. [Forest Inventory Measurements. Tutorial]. 2021; 95 (In Russ.).

32. Eichhorn J., Roskams P., Potocic N., Timmermann V., Ferretti M., Mues V., Szepesi A., Durrant D., Seletkovic I., Schroeck H-W., Nevalainen S., Bussotti F., Garcia P., Wulff S. *Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents*. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2020; 49.
33. Schwärzel K., Seidling W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. *Strategy and Implementation of ICP Forests*. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Thünen Institute of Forest Ecosystems. 2022; 12.
34. Alekseev A., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforhin I., Chernikhovsky D., Chernov I. *Analysis of the tree stands health status in the near border area of Russia and Finland based on the regular grid of sample plots and GIS-technologies*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 507(1): 012001. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012001>.
35. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V., Dmitrieva A.A. *Pine needles and soil as bioindicators of forest ecosystems in the anthropogenically disturbed areas of the Baikal region*. BIO Web of Conferences. 2024; 93: 01003. – DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301003>.
36. Narykova A.N., Plotnikova A.S., Akhmetova G.V., Danilova M.A., Kuznetsova A.I. *Geospatial modeling of carbon stocks in forest litter in the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus (Leningrad Oblast)*. Eurasian Soil Science. 2025; 58: 131. (In Russ.). – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229325600484>.
37. Sharma V., Yadav J., Kumar R., Tesarova D., Ekielski A., Mishra P.K. *On the rapid and non-destructive approach for wood identification using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods*. Vibrational Spectroscopy. 2020; 110: 103097. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103097>.
38. Griffin J.N., Santos G.M., Nguyen L.D., Rodriguez D.R.O., Pereira L., Jaén-Barrios N., Assis-Pereira G., Barreto N.O., Brandes A.F.N., Barbosa A.C., Groenendijk P. *Demystifying the tropics: FTIR characterization of pantropical woods and their α -cellulose extracts for past atmospheric ^{14}C reconstructions*. Science of The Total Environment. 2024; 949: 175010. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175010>.
39. Yadav A., Sharma S., Singh V., Kapoor M., Singh R. *Forensic identification and differentiation of some protected timber species using ATR-FTIR spectroscopy and chemometrics*. Frontiers in Analytical Science. 2024; 4: 1508509. – DOI: <https://doi.org/10.3389/frans.2024.1508509>.
40. Bhardwaj N., Kumar B., Agrawal K., Verma P. *Current perspective on production and applications of microbial cellulases: a review*. Bioresources and Bioprocessing. 2021; 8: 95. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00447-6>.
41. Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. *Fungal ligninolytic enzymes and their application in biomass lignin pretreatment*. Journal of Fungi, 2023; 9: 780. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9070780>.
42. High K.E., Penkman K.E.H. *A review of analytical methods for assessing preservation in waterlogged archaeological wood and their application in practice*. Heritage Science. 2020; 8: 83. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-020-00422-y>.
43. Kumari D., Singh R. *Rice straw structure changes following green pretreatment with petha wastewater for economically viable bioethanol production*. Scientific Reports. 2022; 12: 10443. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14627-7>.
44. Ez-Zahraoui S., Hassani F.Z.S.A., Achaby M.El., Qaiss A.K., Bouhfid R. *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites*. In: Natural Fiber Composites (ed.). Woodhead Publishing. 2023: 3-29. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00004-1>.
45. Hasegawa N., Sugiyama M., Igarashi K. *Random forest machine-learning algorithm classifies white- and brown-rot fungi according to the number of the genes encoding Carbohydrate-Active enzyme families*. Applied and Environmental Microbiology. 2024; 90: e00482-24. – DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00482-24>.

Сведения об авторах

✉ **Артемихина Екатерина Александровна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: tyukatie@gmail.com.

Жила Сергей Викторович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории лесной пирологии, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: getgain@mail.ru.

Данилюк Юрий Владимирович – старший лаборант лаборатории физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В.Н. Сукачева, Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, ул. Академгородок, д. 50, стр. 28, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: ura_danilyk@mail.ru.

Елисеев Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», проспект им. газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, e-mail: s-555s@yandex.ru.

Баяндин Михаил Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», проспект им. газеты Красноярский рабочий, д. 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>, e-mail: mihaibayandin@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Ekaterina A. Artemikhina* – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Physicochemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Separate Division of the FRC KSC SB RAS, st. Akademgorodok 50, building 28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: tyukatie@gmail.com.

Sergey V. Zhila – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Pyrology, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Separate Division of the FRC KSC SB RAS, st. Akademgorodok 50, building 28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: getgain@mail.ru.

Yury V. Danilyuk – Senior Laboratory Assistant, Laboratory of Physicochemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – Separate Division of the FRC KSC SB RAS, st. Akademgorodok 50, building 28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: ura_danilyk@mail.ru.

Sergey G. Eliseev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Scientific Laboratory Biorefining of Forest Resources, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy avenue, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, e-mail: s-555s@yandex.ru.

Mikhail A. Bayandin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Scientific Laboratory Biorefining of Forest Resources, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy avenue, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>, e-mail: mihaibayandin@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding author