

Научная статья

УДК 630.43:58.02:543.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-4-63-76

Пирогенное воздействие на свойства древесины сосны в северной подзоне тайги

А.А. Красикова^{1✉}, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAH-5816-2020](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-2026>

*М.А. Гусакова*¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-5528-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2937-2604>

*Н.А. Неверов*¹, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [P-5590-2015](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

*М.В. Сурсо*¹, д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр.; ResearcherID: [J-2197-2018](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

*С.С. Хвиюзов*¹, канд. хим. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAH-9795-2020](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-2378>

К.Г. Боголицын^{1,2}, д-р хим. наук, гл. науч. сотр., проф.; ResearcherID: [AAA-6432-2019](#),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-0483>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврёрова УрО РАН, г. Архангельск, Россия; ann.krasikova@gmail.com[✉], maria_gusakova@mail.ru, na-neverov@yandex.ru, surso@fciactic.ru, khviyuzov.s@yandex.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия; k.bogolitsin@narfu.ru

Поступила в редакцию 11.04.25 / Одобрена после рецензирования 03.07.25 / Принята к печати 05.07.25

Аннотация. Леса севера европейской части России хорошо изучены во многих аспектах, однако вопрос влияния пожаров на качество древесины остается раскрытым недостаточно. В ответ на воздействие пирогенного фактора у высших растений формируются специфические реакции аналогично действию климатических стресс-факторов различной природы. Целью работы стало изучение химического состава, свойств и особенностей структуры постпирогенной древесины сосны северной тайги, а также оценка потенциала использования такой древесины в технологиях биорефайнинга. Сосна обыкновенная является хорошим модельным объектом для проведения исследования как типичный представитель светлохвойных лесов, в наибольшей степени подверженных пожарам. Для оценки изменений основных компонентов древесной ткани применялся комплекс физико-химических методов. Отмечена термическая деструкция компонентов древесины (целлюлозы и лигнина) в среднем на 10–13 % под воздействием пирогенной нагрузки, а также снижение содержания углерода и водорода в древесных тканях в наиболее поврежденной пожаром комлевой части жизнеспособных деревьев на 16 и 17 % при увеличении содержания кислорода на 16 %. Выявлено, что тепловое воздействие на ткани стволов сосны обыкновенной во время низового пожара вызывает изменения не только компонентного состава, но и структуры тканей. Отмечено снижение, а затем резкое усиление радиального роста у поврежденных жизнеспособных деревьев спустя несколько лет после пожара. Показано, что древесина поврежденных низовым пожаром средней интенсивности деревьев, отобранная на высоте 1,3 м и выше, по компонентному составу и физико-химическим свойствам не отличается от

контрольных образцов древесины, не подвергавшихся пирогенному воздействию, и может использоваться в качестве сырья в целлюлозно-бумажном производстве.

Ключевые слова: постпирогенная древесина, ядровая древесина, заболонь, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris*, низовой пожар, ИК-спектроскопия

Финансирование: Исследование проведено в рамках госзадания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН.

Благодарности: Использовано оборудование ЦКП НО КТ РФ-Арктика (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН).

Для цитирования: Красикова А.А., Гусакова М.А., Неверов Н.А., Сурсо М.В., Хвиюзов С.С., Боголицын К.Г. Пирогенное воздействие на свойства древесины сосны в северной подзоне тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 4. С. 63–76.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-63-76>

Original article

Pyrogenic Impact on the Properties of Pine Wood in the Northern Taiga Subzone

Anna A. Krasikova^{1✉}, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAH-5816-2020](https://orcid.org/0000-0001-6040-2026), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-2026>

Maria A. Gusakova¹, Candidate of Engineering, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAB-5528-2019](https://orcid.org/0000-0002-2937-2604), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2937-2604>

Nikolay A. Neverov¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [P-5590-2015](https://orcid.org/0000-0002-0161-0738), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0161-0738>

Mikhail V. Surso¹, Doctor of Agriculture, Chief Research Scientist;

ResearcherID: [J-2197-2018](https://orcid.org/0000-0001-7482-9848), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9848>

Sergey S. Khviyuzov¹, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAH-9795-2020](https://orcid.org/0000-0002-4810-2378), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-2378>

Konstantin G. Bogolitsyn^{1,2}, Doctor of Chemistry, Chief Research Scientist, Prof.;

ResearcherID: [AAA-6432-2019](https://orcid.org/0000-0002-4055-0483), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4055-0483>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia; ann.krasikova@gmail.com[✉], mariya_gusakova@mail.ru, na-neverov@yandex.ru, surso@fciaarctic.ru, khviyuzov.s@yandex.ru

²Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia; k.bogolitsyn@narfu.ru

Received on April 11, 2025 / Approved after reviewing on July 3, 2025 / Accepted on July 5, 2025

Abstract. The forests of the north of European Russia have been well studied in many respects; however, the impact of wildfires on wood quality remains insufficiently understood. In response to pyrogenic stress, higher plants develop specific reactions similar to those triggered by various types of climatic stressors. The research aimed at examining the chemical composition, properties, and structural features of post-pyrogenic wood of northern taiga pine, as well as assessing the potential for using such wood in biorefining technologies. The Scots pine is a good target species for research as a typical representative of light coniferous forests, which are most susceptible to wildfires. A set of physicochemical methods was used to assess changes in the wood tissue main components. We observed thermal degradation of wood components (cellulose and lignin) due to pyrogenic stress (by 10–13 % in average), as well as a decrease in carbon and hydrogen content (by 16 and 17 %, respectively) in wood tissues in

the most fire-damaged butt end of viable trees, along with a 16 % increase in oxygen content. Thermal exposure to the tissues of Scots pine trunks during a ground fire has been found to cause changes not only in the tissue composition but also in the tissue structure. A decrease, followed by a sharp increase in radial growth, was observed in damaged but viable trees several years after the fire. It has been shown that wood of trees damaged by a moderate-intensity ground fire, harvested at a height of 1.3 m and above, does not differ in its chemical composition and physicochemical properties from reference samples of wood that were not exposed to fire stress. Such wood can be used as raw material in the pulp and paper industry.

Keywords: post-pyrogenic wood, core wood, sapwood, Scots pine, *Pinus sylvestris*, ground fire, IR spectroscopy

Funding: The research was carried out within the framework of the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Acknowledgements: The equipment of the Center for Collective Use of Scientific Equipment (FECIAR UB RAS) was used in the research.

For citation: Krasikova A.A., Gusakova M.A., Neverov N.A., Surso M.V., Khviyuzov S.S., Bogolitsyn K.G. Pyrogenic Impact on the Properties of Pine Wood in the Northern Taiga Subzone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 4, pp. 63–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-4-63-76>

Введение

Происходящие во время роста и развития растений природно-климатические или антропогенно-техногенные процессы оказывают воздействие на растительные объекты и приводят к активизации окислительного стресса, проявляющегося в трансформации компонентного химического состава, функционализации отдельных высокоактивных соединений, нарушении жизненного биоцикла.

В ответ на действие климатических стресс-факторов различной природы у высших растений формируются как специфические (увеличение содержания антиоксидантов), так и неспецифические (прооксидантно-антиоксидантные равновесия) адаптивные реакции, зависящие от видоспецифичности растительного организма и от природы и интенсивности стресс-фактора. Окислительный стресс, сопровождающий множество био- и абиотических воздействий, нейтрализуется ответной реакцией антиокислительной системы защиты, что является одним из важных механизмов адаптации растений к изменениям условий среды [20].

Из множества стрессовых состояний следует особое внимание уделить воздействию пирогенного фактора, недостаточно полно изученного для лесов бореальной зоны. Лесные пожары являются одним из наиболее часто встречаемых разрушительных факторов и ежегодно охватывают несколько миллионов гектаров [22, 24]. В наибольшей степени подвержены пожарам суходольные местообитания светлохвойных насаждений с преобладанием сосны и лиственницы [2], что обусловлено их высокой природной пожарной опасностью [3]. Наиболее распространенными являются низовые лесные пожары, на долю которых приходится 97–98 % общего количества лесных пожаров [6].

Следствием пожаров является значительное изменение не только экологических условий на горях, но и самой древесины при пожарах невысокой степени интенсивности. После несильного низового пожара, как правило, остаются слабонарушенные участки гари [15, 16]. Исследования влияния пожаров

на строение, состав и свойства древесины хвойных лесов немногочисленны [10, 13]. Технические качества древесины, подвергшейся воздействию пожара, сильно зависят от вида пожара и времени рубки после пожара. Низовой пожар с высотой пламени до 0,5 м, только снизу опаливший стволы деревьев, незначительно влияет на состояние древостоев, и есть большая вероятность их сохранения [14]. Учитывая важность таких исследований, необходимо, однако, отметить, что однозначной связи между химическим составом древесины, свойствами ее компонентов и воздействием на них процессов, происходящих во время и после пожаров, пока не выявлено. Интенсивное лесопользование и лесные пожары приводят к снижению общих запасов древесины, уменьшению площади хвойных лесов, ввиду чего актуальным представляется исследование состояния древесины, подвергшейся пирогенному воздействию, и поиск путей ее рационального использования.

Целью работы являлось изучение химического состава, свойств и особенностей структуры постпирогенной древесины сосны северной тайги, а также оценка потенциала использования такой древесины в технологиях биорефайнинга. Дополнительные исследования связи между изменением химического состава и структуры древесины хвойных пород и воздействием на них пожаров в настоящее время приобретают большую актуальность и позволяют сформировать единую концепцию обоснованного эффективного использования ресурсов субарктических территорий. Полученные результаты будут способствовать разработке методов наиболее полной утилизации постпирогенной древесины, а также расширению сырьевой базы для комплексной переработки растительного сырья.

Объекты и методы исследования

Полевые исследования проводили в Усть-Двинском участковом лесничестве (Архангельское лесничество) в чистых сосновых древостоях – сосняках кустарничково-сфагновых, осушаемых, пройденных низовыми пожарами средней интенсивности, с давностью пожара 12 лет. Заложено 2 пробные площади (ПП): одна – на гари вблизи осушителя, вторая, не затронутая огнем, – в 100 м от первой. Сосняки относятся к 4-му классу возраста, характеризуются средним диаметром 22 см, средней высотой 18 м и относительной полнотой 0,8.

Классификация пройденных пожарами площадей выполнена с учетом методических рекомендаций И.С. Мелехова [7]. Интенсивность пожара устанавливалась по высоте нагара на стволах [9]. Высота нагара достигала 1,80–2,02 м.

Деревья на старых гарях разделяют на поврежденные жизнеспособные без гнили, поврежденные жизнеспособные с гнилью (усыхающие) и усохшие [12]. В данной работе изучали поврежденные жизнеспособные деревья без гнили в сопоставлении с поврежденными, упавшими в текущий вегетационный период (без признаков усыхания – отсутствие пожелтевшей хвои), и контрольными (неповрежденными). Средний возраст поврежденных жизнеспособных деревьев – 75 лет; поврежденных нежизнеспособных – 50 лет; контрольных – 120 лет.

На гари отбирали спилы древесины (диски) у живых и упавших в текущий вегетационный период деревьев, имеющих зеленую хвою: у поврежденных огнем деревьев – у шейки корня, на высоте 1,3 м и 3 м; у неповрежденных и поврежденных нежизнеспособных – только у комля, т. к. из-за отсутствия

поражения ствола (или его полной пораженности) различия состава и структуры древесины по высоте минимальны. Использовали усредненный образец для каждого типа повреждений.

Исследование структуры древесины – ширины годичного слоя и доли поздней древесины – проводили с помощью измерительного прибора Lintab 6 (Германия) с программным обеспечением TsapWin с точностью 0,01 мм.

Для изучения образцов методом световой микроскопии их нагревали на водяной бане в течение 48 ч, затем помещали в 0,5 н. раствор HCl на 10–12 ч. После мацерации из высечек готовили радиальные микротомные срезы толщиной 12 мкм, которые окрашивали водным раствором метилового зеленого – пиронина G. Временные микротомные препараты просматривали и фотографировали в проходящем свете с помощью прямого лабораторного микроскопа AxioScope A1 (Carl Zeiss, Германия). Полученные изображения редактировали с помощью программного обеспечения AxioVision Release 4.8 (Carl Zeiss). Радиальные сколы образцов древесины после напыления технического золота просматривали и документировали с помощью сканирующего электронного микроскопа Sigma-Zeiss (Carl Zeiss).

Определение массовой доли химических элементов проводили с помощью анализатора элементного состава (однореакторное исполнение, комплект конфигурации CHN) EuroEA3000 (EuroVector, Италия) с программным обеспечением Callidus. Диапазон измерения массовой доли элемента составляет 0,01–100 %. Среднеквадратичное отклонение случайной составляющей погрешности измерения, массовая доля: C – 0,3; H – 0,1; N – 0,1 %.

Компонентный состав (содержание целлюлозы, лигнина, веществ, экстрагируемых этанолом) образцов древесины определяли согласно общепринятым методикам [8]. Опилки получали измельчением воздушно-сухой щепы в лабораторной роторно-ножевой мельнице (LM-201, Россия) с водяным охлаждением. Для определения компонентного состава образцов использовали фракцию опилок размером 1–2 мм.

Для изучения компонентного состава древесины в сочетании с классическими методами анализа применен метод ИК-Фурье-спектроскопии. ИК-спектры регистрировали на Фурье-спектрофотометре IR Prestige 21 (Shimadzu, Япония) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) MIRacle с призмой ZnSe (Pike, США) относительно воздуха в диапазоне 4000–600 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹ и числом сканирований 128, функция апподизации SqrTriangle. Полученные коэффициенты пропускания преобразованы в единицы оптической плотности обработкой спектров функцией АТР-коррекции с помощью программы IR Solution.

Относительная оптическая плотность углеводной и лигнинной составляющих рассчитаны для количественной оценки изменения содержания основных компонентов в постпирогенной древесине. Оптическую плотность характерных полос поглощения определяли относительно базовой линии, построенной для волновых чисел 4000, 3700, 2400, 1800, 900 см⁻¹ с использованием программы IRSolution [5, 17, 27]. Относительная оптическая плотность получена по следующей формуле:

$$K_i = \frac{D_c}{D_{st}},$$

где D_c и D_{st} – оптическая плотность полосы поглощения компонента и стандартной полосы поглощения при 2920 см⁻¹ соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

Компонентный состав образцов древесины (табл. 1) определяли отдельно для ядра (его доля составляла 70 %) и заболони (30 %) [1].

Таблица 1

Компонентный состав и относительная оптическая плотность лигнинной ($K_{\text{лиг}}$) и полисахаридной ($K_{\text{ув}}$) составляющих древесины сосны обыкновенной
Composition and relative optical density of the lignin ($K_{\text{лиг}}$) and polysaccharide ($K_{\text{ув}}$) components of Scots pine wood

Образец	Содержание лигнина, масс.%, $\pm 0,5$	Содержание целлюлозы, масс.%, $\pm 0,7$	Вещества, экстрагируемые этанолом, масс.%, $\pm 0,3$	$K_{\text{лиг}}$	$K_{\text{ув}}$	$K_{\text{лиг}}/K_{\text{ув}}$
Поврежденный жизнеспособный, спил у комля, ядро	25,9	42,0	10,2	0,23	1,08	0,21
Поврежденный жизнеспособный, спил у комля, заболонь	24,2	42,7	10,6	0,27	1,19	0,23
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 1,3 м, ядро	27,4	46,7	5,3	0,35	1,75	0,20
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 1,3 м, заболонь	27,8	46,5	4,0	0,27	1,18	0,23
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 3 м, ядро	27,9	49,4	3,9	0,37	1,67	0,22
Поврежденный жизнеспособный, спил на высоте 3 м, заболонь	26,4	45,7	3,5	0,36	1,76	0,20
Поврежденный нежизнеспособный, ядро	24,4	41,6	11,9	0,12	0,35	0,34
Поврежденный нежизнеспособный, заболонь	24,9	49,5	2,5	0,36	1,78	0,20
Контрольный, ядро	25,0	45,3	10,0	0,16	0,81	0,20
Контрольный, заболонь	25,5	51,3	3,2	0,29	1,33	0,22
Сосна обыкновенная, ядро*	30,9	43,5	4,8	—	—	—
Сосна обыкновенная, заболонь*	28,7	45,9	1,8	—	—	—

*По литературным данным для сосны обыкновенной, произрастающей в Архангельской области [23].

Из множества факторов, играющих роль в синтезе компонентов растительного сырья, влияние окружающей среды, особенно экстремальные условия, является решающим и определяет колебания содержания компонентов в растениях. Так, отмечены явно выраженные различия в содержании целлюлозы по градиенту высоты дерева, поврежденного пожаром. В нижней части ствола, наиболее пострадавшей от пожара, содержание целлюлозы минимальное

(42,0–42,7 %), что, очевидно, связано с термической деструкцией целлюлозных волокон в нижней части ствола под воздействием пирогенной нагрузки. Содержание целлюлозы в верхних частях дерева (на отметке 1,3 м и выше) практически не меняется по градиенту высоты и соответствует среднему содержанию целлюлозы согласно литературным данным. Показано более высокое содержание целлюлозы в ядровой части исследуемых образцов древесины по сравнению с заболонью, согласующееся с литературными данными [23].

Для поврежденных и неповрежденных образцов характерно повышенное содержание лигнина в ядровой части дерева, что в целом справедливо для хвойных пород [23, 26], и – уменьшенное в нижней части ствола, обусловленное разрушением компонентов под воздействием высоких температур, как и для целлюлозы.

Согласно литературным данным, для здоровой древесины сосны содержание веществ, экстрагируемых этанолом, составляет от 1,7 % (в заболони) до 5,7 % (в ядровой части). В ядровой части древесины почти у всех образцов отмечено более высокое (в 1,2–4,5 раза) содержание экстрактивных веществ в сравнении с заболонной частью, что сопоставимо с литературными данными [18, 21]. Данная тенденция нарушается только для поврежденного пожаром жизнеспособного дерева, в комлевой части которого количество экстрактивных веществ как в ядре, так и в заболони примерно одинаково (10,2–10,6 %). При пожаре, вероятно, повреждаются и разрываются смоляные ходы, что приводит к значительному увеличению содержания экстрактивных веществ в заболони нижней части ствола, наиболее поврежденной пожаром.

Для дополнительной оценки воздействия пирогенной нагрузки на химический состав древесины сосны исследован элементный состав 3 годичных колец, сформировавшихся до пожара, и 3 после для заболони в комлевой части поврежденного жизнеспособного дерева. Полученные данные подтверждают термическую деструкцию компонентов древесины под воздействием пирогенной нагрузки. Так, в результате пожара снижается содержание углерода и водорода в древесных тканях на 16 и 17 % соответственно и увеличивается содержание кислорода на 16 % (табл. 2).

Таблица 2

Элементный состав, %, образцов заболони постпирогенной древесины сосны обыкновенной
Elemental composition, %, of sapwood samples of post-pyrogenic Scots pine wood

Древесина	О	С	Н	N
Допожарная	49,6	44,8	5,5	0,2
Послепожарная	57,9	37,5	4,5	0,1

Для оценки происходящих в процессе пожара изменений древесных тканей применяются разрушающие и неразрушающие методы. Так, для детального изучения изменения содержания основных компонентов древесины под воздействием пирогенной нагрузки использована ИК-спектроскопия (рис. 1). ИК-спектры всех образцов имеют схожий вид, что указывает на отсутствие качественных различий в функциональной природе основных компонентов. Для анализируемых ИК-спектров характерны следующие полосы поглощения отдельных компонентов и связей между ними: интенсивная полоса поглощения валентных колебаний связей О-Н, участвующих в водородных связях, при 3200–3500 см⁻¹; полоса при 3000–2800 см⁻¹, обусловленная валентными коле-

баниями связей в CH - и CH_2 -группах; при $1735\text{--}1740\text{ см}^{-1}$ – валентными колебаниями C=O -групп. Поглощение при 1650 см^{-1} является следствием наличия связанной воды в древесине; при 1160 , 1107 , 1060 и 1033 см^{-1} – валентных колебаний эфирных связей C-O ; при 900 и 663 см^{-1} – деформационных колебаний связей C-H . Скелетные колебания ароматического кольца лигнина проявляются при полосах 1605 , 1510 , 1425 см^{-1} [4, 5, 25, 27].

Основные различия исследованных спектров отражаются в интенсивности полос поглощения при 3420 , 1740 , 1508 и 1060 см^{-1} , что вызвано изменением структуры и состава древесины в результате пирогенного воздействия. Полученные данные характеризуют заболонь поврежденного жизнеспособного образца относительно меньшим содержанием углеводов по сравнению с образцами заболони контрольного и усыхающего образцов, что согласуется с данными табл. 1. Для поврежденного усыхающего образца свойственна интенсивная полоса поглощения при 1740 см^{-1} , свидетельствующая о повышении содержания карбонильных групп, что является следствием окислительных процессов, протекающих при гниении и деструкции древесины.

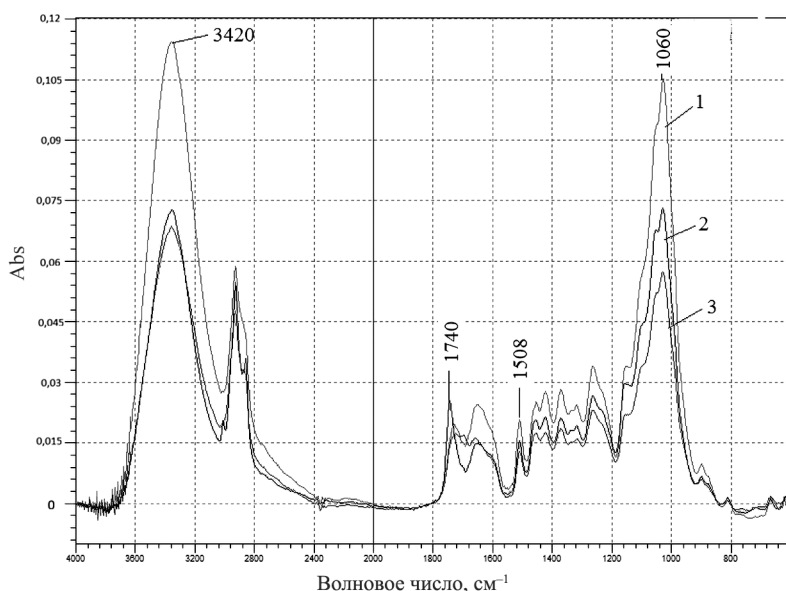


Рис. 1. ИК-спектры образцов древесины: 1 – поврежденная усыхающая; 2 – поврежденная жизнеспособная; 3 – контрольная

Fig. 1. IR spectra of wood samples: 1 – damaged drying; 2 – damaged viable; 3 – reference

Для количественной оценки относительного содержания основных компонентов (лигнина и полисахаридов) рассчитана относительная оптическая плотность древесины образцов. При характеристике содержания лигнина использовалась интенсивная полоса 1508 см^{-1} , вызванная скелетными колебаниями ароматических колец. Для исследования углеводной составляющей выбрана интенсивная полоса при 1060 см^{-1} , обусловленная валентно-симметричными колебаниями C-O -связей.

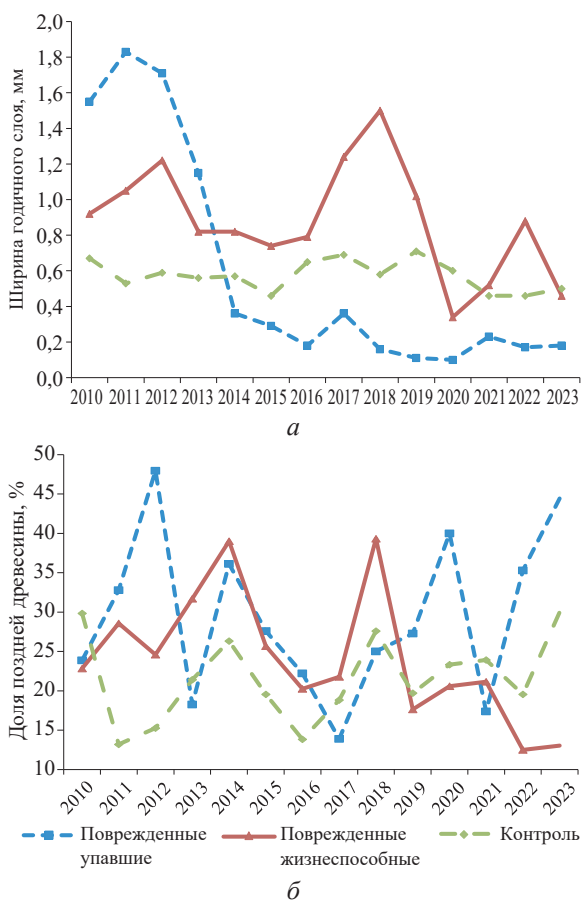
Данные об относительной оптической плотности лигнинной и полисахаридной составляющих в исследованных образцах подтверждают изменения химического состава, которые проявляются под воздействием пирогенной нагрузки. Отмечено снижение общего содержания полисахаридов в наиболее

поврежденной пожаром комлевой части жизнеспособных деревьев, что согласуется со значениями, полученными химическими методами. Повышенное значение показателя $K_{\text{лиг}}$ для ядровой части древесины у образцов, отобранных на высоте 1,3 и 3 м и не поврежденных пожаром, вероятно, обусловлено термической деструкцией компонентов в нижней части ствола. Однако отмеченные изменения содержания лигнинной и полисахаридной составляющих в исследованных образцах в целом не привели к увеличению или уменьшению соотношения $K_{\text{лиг}}/K_{\text{ув}}$ – для всех образцов оно осталось постоянным и составило 0,20–0,22, что сопоставимо со значениями, полученными для контрольного образца.

Тепловое воздействие на ткани стволов сосны обыкновенной во время низового пожара вызывает изменения не только компонентного состава, но и жизнедеятельности клеток и, как следствие, структурные изменения тканей в целом [10]. С применением методов дендрохронологического анализа показано, что ширина годичного слоя у усредненного контрольного образца, не поврежденного пожаром, находится примерно на одном уровне и колеблется от 0,5 до 0,7 мм (рис. 2).

Рис. 2. Макроструктура древесины сосны: *a* – ширина годичного слоя; *б* – доля поздней древесины

Fig. 2. Macrostructure of pine wood: *a* – annual ring width; *б* – late wood content



Отмечено, что посттравматический синдром у поврежденных жизнеспособных деревьев начинает проявляться спустя несколько лет после пожара и заключается в резком усилении радиального роста. Так, толщина годичного слоя в комлевой части сначала снижается на протяжении нескольких лет, а затем резко увеличивается (до 1,5 мм в среднем), что обусловлено активным ростом дерева

за счет увеличения аэрации и содержания минеральных элементов в почве в результате низового пожара и сгорания лесной подстилки и живого напочвенного покрова. Наибольшие колебания ширины годичного кольца наблюдались для поврежденных упавших деревьев. Так, максимальная ширина годичного кольца (1,8 мм) у деревьев, произрастающих вблизи осушителя, отмечена в год перед прохождением пожара. Затем наблюдалось резкое закономерное падение этого показателя до минимума – 0,1–0,2 мм, связанное с замедлением, а затем полным прекращением ростовых процессов у упавших деревьев сосны. Стоит отметить, что в сосняках кустарничково-сфагновых осушаемых происходит выгорание подстилки и очеса, что приводит к повреждению корней, заражению древостоев дереворазрушающими грибами и выпадению поврежденных деревьев [11].

По соотношению толщины слоев поздней и ранней древесины рассчитана доля поздней древесины в годичном кольце. Так, доля поздней древесины в поврежденном жизнеспособном образце составила 24,1 %. Наименьшее содержание поздней древесины отмечено в контрольном образце (21,6 %), наибольшее – в поврежденном упавшем (29,4 %), что, очевидно, обусловлено замедлением роста и уменьшением ширины годичного слоя в процессе усыхания дерева.

Реакция дерева на воздействие пожара зависит не только от интенсивности и продолжительности огневого воздействия, но также от периода вегетации и толщины коры. Для микроскопических исследований был выбран поперечный спил ствола поврежденного пожаром жизнеспособного дерева сосны с участками, различающимися по толщине коры (рис. 3).

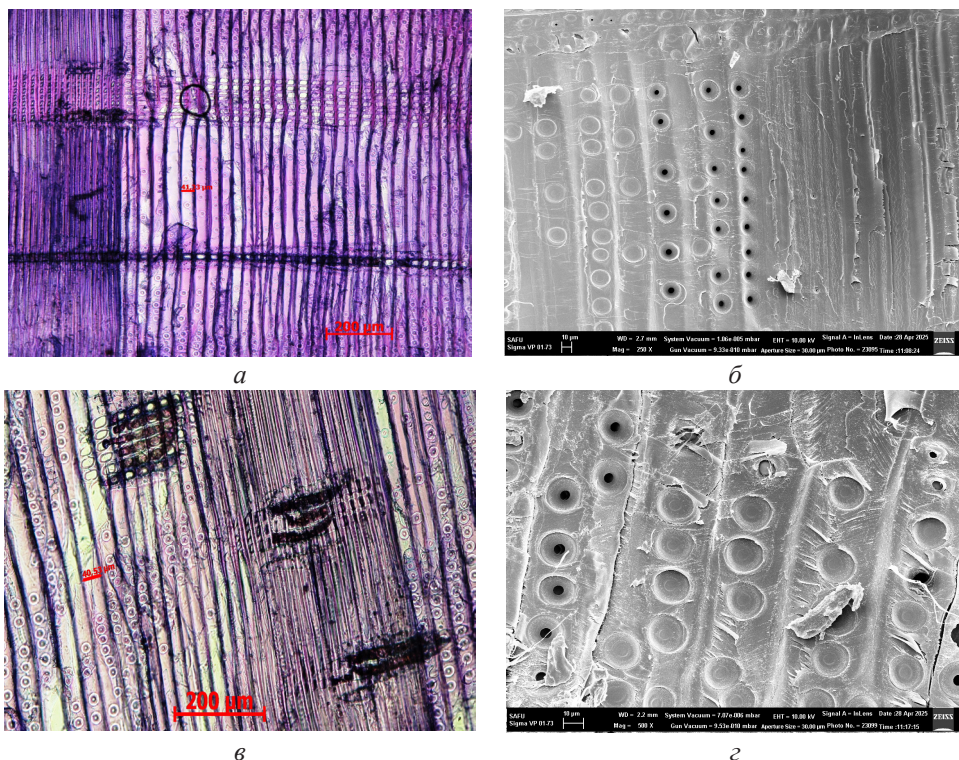


Рис. 3. Анатомическое строение постпирогенной древесины сосны после низового пожара на участках годичного кольца под корой: а, б – толстой; в, г – тонкой

Fig. 3. Anatomical structure of post-pyrogenic pine wood after a ground fire as observed in sections of the annual ring beneath the: а, б – thick bark; в, г – thin bark

На рис. 3, *а*, *б* показан периферийный участок с широкими годичными кольцами, сформировавшимися под толстой (14 мм) корой, на рис. 3, *в*, *г* – участок с узкими кольцами под тонкой (3 мм) корой. Резкое усиление радиального роста на участке ствола под толстой корой произошло в последние 3 года, т. е. спустя 10–12 лет после пожара. Ширина слоев ранней древесины в годичных кольцах в этом секторе составила 1,38–1,50 мм, поздней древесины – 0,69–0,74 мм. На участке под тонкой корой ширина слоев ранней древесины в этих же годичных кольцах сохранилась на уровне предыдущих лет и составила 0,74–0,78 мм, поздней – 0,23–0,25 мм. Отношение доли поздней древесины к ранней на участке под толстой корой уменьшилось по сравнению с участком под тонкой корой в среднем на 68 %. Визуально отмечено увеличение диаметров ранних трахеид на участке под толстой корой в периферийных годичных кольцах, однако вариабельность признака в границах годичного кольца высокая, и эти различия не превышают основную ошибку среднего значения. В целом все структурные анатомические элементы ксилемы у деревьев сосны, выживших после пожара, сохраняются. Проявившийся постпирогенный эффект носит латентный характер, обусловленный усилившейся камбиальной деятельностью, которую можно рассматривать как компенсаторную реакцию дерева на стресс и повышение содержания в почве доступных зольных элементов.

Таким образом, проведенное исследование продемонстрировало, что образцы древесины, отобранные у поврежденных низовым пожаром средней интенсивности жизнеспособных деревьев на высоте 1,3 м и выше, по компонентному составу и физико-химическим свойствам достоверно не отличаются от контрольных образцов древесины, не подвергавшихся пирогенному воздействию, поэтому данная древесина может использоваться в качестве сырья в целлюлозно-бумажном производстве.

Показано, что в комлевой части деревьев под воздействием пирогенной нагрузки происходит термическая деструкция всех основных полимерных компонентов лигноуглеводного комплекса древесины [19], приводящая к равномерному снижению содержания углеводов и лигнина в среднем на 10–13 %. Отмечено, что диаметр трахеид и количество окаймленных пор в ранней и поздней древесине в целом не меняются и соответствуют норме. Это позволяет рекомендовать подобную древесину в качестве сырья в технологиях комплексной химической переработки, таких как целлюлозно-бумажное производство. Предпочтительным способом переработки может являться получение целлюлозы высокого выхода с более тщательными стадиями окорки и сортирования щепы для исключения попадания обгоревшей древесины в технологический процесс. Изготовленную таким образом целлюлозу можно использовать в качестве добавки к макулатурному сырью при производстве различных видов бумажной продукции.

Заключение

На примере сосны обыкновенной исследована ответная реакция высших растений на стрессовое пирогенное воздействие, выражающаяся в изменении содержания входящих в состав древесины компонентов. Дана оценка послепожарной трансформации некоторых физико-химических и морфологических свойств древесины сосны обыкновенной как одной из основных лесобразую-

щих хвойных пород Европейского Севера России. Показано, что воздействие низовых пожаров средней интенсивности вызывает термическую деструкцию основных полимерных компонентов в комлевой части древесины – снижение содержания целлюлозы и лигнина. Образцы древесины, отобранные у поврежденных жизнеспособных деревьев на высоте 1,3 м и выше по компонентному составу и физико-химическим свойствам не отличаются от контрольных образцов древесины, не подвергавшихся пирогенному воздействию. Рекомендована вырубка постпирогенных деревьев сразу после прохождения пожаров, независимо от высоты нагара, поскольку происходит выгорание подстилки, что приводит к их дальнейшему выпадению.

Результаты, полученные в ходе данного исследования, позволяют оценить влияние пожаров на качество древесины хвойных, произрастающих в средней и северной подзонах тайги, и дать рекомендации по химической переработке постпирогенной древесины как одного из возможных направлений ее использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арсеньева Т.В., Чавчавадзе Е.С. Эколого-анатомические аспекты изменчивости древесины сосновых из промышленных районов европейского севера. СПб.: Наука, 2001. 109 с.

Arsenyeva T.V., Chavchavadze E.S. *Ecological and Anatomical Aspects of the Pine Wood Variability in Industrial Areas of the European North*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001. 109 p. (In Russ.).

2. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A. Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 83–94. (In Russ.).

3. Иванова Г.А., Конард С.Г., Макрае Д.Д., Безкоровайная И.Н., Богородская А.В., Жила С.В., Иванов В.А., Иванов А.В., Ковалева Н.М., Краснощекова Е.Н., Кукавская Е.А., Орешков Д.Н., Перевозникова В.Д., Самсонов Ю.Н., Сорокин Н.Д., Тарасов П.А., Цветков П.А., Шишикин А.С. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаежных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука, 2014. 232 с.

Ivanova G.A., Konard S.G., Makraye D.D., Bezkorovaynaya I.N., Bogorodskaya A.V., Zhila S.V., Ivanov V.A., Ivanov A.V., Kovaleva N.M., Krasnoshchekova E.N., Kukavskaya E.A., Oreshkov D.N., Perevznikova V.D., Samsonov Yu.N., Sorokin N.D., Tarasov P.A., Tsvetkov P.A., Shishikin A.S. *The Impact of Fires on the Ecosystem Components of Siberian Middle Taiga Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014. 232 p. (In Russ.).

4. Карклин В.Д. ИК-спектроскопия древесины и ее основных компонентов. V. Количественное сравнение ИК-спектров древесины на основе внешнего стандарта – гексаферрицианида калия // Химия древесины. 1975. № 1. С. 56–62.

Karklin' V.D. IR Spectroscopy of Wood and Its Major Components. V. Quantitative Comparison of IR Spectra of Wood Based on an External Standard – Potassium Hexaferriicyanide. *Khimiya drevesiny*, 1975, no. 1, pp. 56–62. (In Russ.).

5. Котлярова И.А. ИК-спектроскопия древесины сосны, березы и дуба, модифицированной моноэтаноламин(N→B)тригидроксидом // Химия растит. сырья. 2019. № 2. С. 43–49.

Kotlyarova I.A. Infrared Spectroscopy of Wood of Pine, Birch and Oak, Modified with Monoethanolamine(n→b)threehydroxyborate. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of plant raw material, 2019, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.).

<https://doi.org/10.14258/jcprm.2019024609>

6. Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. М.; Л.: Гос. лесотехн. изд-во, 1948. 126 с.
Melekhov I.S. *The Impact of Fires on Forests*. Moscow, Goslestekhizdat Publ., 1948. 126 p. (In Russ.).
7. Мелехов И.С., Душа-Гудым С.И. Лесная пирология. М.: МЛТИ, 1979. 80 с.
Melekhov I.S., Dusha-Gudym S.I. *Forest Pyrology*. Moscow, MLTI Publ., 1979. 80 p. (In Russ.).
8. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
Obolenskaya A.V., Yelnitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratory Work on Wood and Cellulose Chemistry*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 320 p. (In Russ.).
9. Савченко А.Г. Методологические аспекты изучения влияния низовых пожаров на лес // Изв. вузов. Лесн. журн. 1987. № 4. С. 27–31.
Savchenko A.G. Methodological Aspects of Studying the Impact of Ground Fires on Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 1987, no. 4, pp. 27–31. (In Russ.).
10. Стасова В.В., Зубарева О.Н., Иванова Г.А. Анатомические характеристики луба ствола сосны обыкновенной после лесного пожара // Сиб. лесн. журн. 2015. № 1. С. 74–86.
Stasova V.V., Zubareva O.N., Ivanova G.A. Anatomical Features of the Scots Pine Stem Phloem after Forest Fire. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2015, no. 1, pp. 74–86. (In Russ.).
11. Тюкавина О.Н. Теплотворная способность постпирогенной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Актуальн. проблемы лесн. комплекса. 2022. № 62. С. 332–333.
Tyukavina O.N. Calorific Value of Postpyrogen Pine Wood (*Pinus sylvestris* L.). *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2022, no. 62, pp. 332–333. (In Russ.).
12. Тюкавина О.Н., Гудина А.Г. Теплотворная способность постпирогенной древесины сосны // Лесотехн. журн. 2020. № 2. С. 188–195.
Tyukavina O.N., Gudina A.G. Heating Capability of Postpyrogen Pine Wood. *Lesotekhnicheskij Zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2020, no. 2, pp. 188–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>
13. Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Адаи Д.М. Теплотворная способность древесины сосны в культурах северотаежного лесного региона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 82–91.
Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Adaj D.M. Calorific Value of Pine Wood in Crops of the Northern Taiga Forest Area. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 82–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-82-91>
14. Тюкавина О.Н., Феклистов П.А. Пожароустойчивость сосновых древостоев на севере Архангельской области // Лесоведение. 2019. № 6. С. 501–511.
Tyukavina O.N., Feklistov P.A. Fire Resilience of Pine Stands in the North of Arkhangelsk Oblast. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 6, pp. 501–511. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819060111>
15. Фуряев В.В., Заболоцкий В.И., Черных В.А. Пожароустойчивость сосновых лесов. Новосибирск: Наука, 2005. 160 с.
Furyaev V.V., Zabolotsky V.I., Chernykh V.A. *Fire Resistance of Pine Forests*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 160 p. (In Russ.).
16. Фуряев В.В., Киреев Д.М. Изучение послепожарной динамики лесов на ландшафтной основе. Новосибирск: Наука, 1979. 160 с.
Furyaev V.V., Kireev D.M. *A Landscape-Based Study of Post-Fire Forest Dynamics*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979. 160 p. (In Russ.).
17. Хвиюзов С.С., Боголицын К.Г., Гусакова М.А., Зубов И.Н. Оценка содержания лигнина в древесине методом ИК фурье-спектроскопии // Фундамент. исследования. 2015. № 9-1. С. 87–90.

Khviyuzov S.S., Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Zubov I.N. Estimation of Lignin Content in the Wood by the Method of FTIR Spectroscopy. *Fundamental research*, 2015, no. 9-1, pp. 87–90. (In Russ.).

18. Barros J., Serk H., Granlund I., Pesquet E. The Cell Biology of Lignification in Higher Plants. *Annals of Botany*, 2015, vol. 115(7), pp. 1053–1074.

<https://doi.org/10.1093/aob/mcv046>

19. Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Krasikova A.A. Molecular Self-Organization of Wood Lignin–Carbohydrate Matrix. *Planta*, 2021, vol. 254, art. 30.

<https://doi.org/10.1007/s00425-021-03675-4>

20. Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A., Krasikova A.A., Khviyuzov S.S., Samsonova N.A., Selivanova N.V., Pustynnyaya M.A. Dynamics of the Processes of Formation and Accumulation of Phenolic and Pigment Complexes in the Needles of Pine *Pinus sylvestris*. *Plant Physiology Reports*, 2024, vol. 29, pp. 385–394. <https://doi.org/10.1007/s40502-024-00795-3>

21. Campbell A.G., Kim W.-J., Koch P. Chemical Variation in Lodgepole Pine with Sapwood/Heartwood, Stem Height, and Variety. *Wood and Fiber Science*, 1990, vol. 22, pp. 22–30.

22. Cutler N.A., Arróniz-Crespo M., Street L.E., Jones D.L., Chaput D.L., Deluca T.H. Long-Term Recovery of Microbial Communities in the Boreal Bryosphere Following Fire Disturbance. *Microbial Ecology*, 2017, vol. 73, no. 1, pp. 75–90.

<https://doi.org/10.1007/s00248-016-0832-7>

23. Gusakova M., Khviyuzov S., Bogolitsyn K., Krasikova A. Changes in the Content of the Main Components of Wood During the Life Cycle of Higher Plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2024, vol. 94, pp. 727–732. <https://doi.org/10.1007/s40011-024-01597-1>

24. Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Ivanova G.A., Conard S.G., Kalenskaya O.P., Zhila S.V. et al. Influence of Logging on the Effects of Wildfire in Siberia. *Environmental Research Letters*, 2013, vol. 8, no. 4, art. 045034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/045034>

25. Lin S.Y., Dence C.W. *Methods in Lignin Chemistry*. Berlin, Springer, 1992. 578 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74065-7>

26. Raiskila S., Pulkkinen M., Laakso T., Fagerstedt K., Löija M., Mahlberg R., et al. FTIR Spectroscopic Prediction of Klason and Acid Soluble Lignin Variation in Norway Spruce Cutting Clones. *Silva Fennica*, 2007, vol. 41(2), pp. 351–371. <https://doi.org/10.14214/sf.301>

27. Vartanian E., Barres O., Roque C. FTIR Spectroscopy of Woods: A New Approach to Study the Weathering of the Carving Face of a Sculpture. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015, vol. 136, part C, pp. 1255–1259.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.10.011>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest