

УДК 630.181:544

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ПОЖАРОВ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСИНЫ В ГОДИЧНЫХ ПРИРОСТАХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

© *Е.А. Артемихина* *, *С.В. Жила*, *Д.А. Машуков*, *С.Р. Лоскутов*

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

С ростом глобальной пожарной активности в ответ на климатический тренд реконструкция долгосрочных физико-химических характеристик деревьев, переживших термический шок, становится важным направлением для оценки и прогнозирования возобновления и продуктивности нарушенных огнем лесных экосистем в будущем. В данной работе мы оценили способность и потенциал деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающих на Юге Сибири (Прибайкалье) к регенерации и выживаемости после пожаров на физико-химическом уровне. Анализ полученных данных показал снижение потери массы гемицеллюлозы и целлюлозы, а также увеличение потери массы лигнина, что интерпретируется как относительное уменьшение содержания углеводных компонентов и увеличение доли лигнина в ответ на термический стресс. Анализ кинетики термодеструкции образцов древесины по термогравиметрическим данным с использованием кинетической модели Бройдо указал на более быструю реакцию ароматической компоненты на термический стресс. Выявлен эффект необратимости деградации лигно-углеводной матрицы под влиянием кумулятивного эффекта многократных термических шоков. Сопоставление данных по потерям массы и кинетическим параметрам выявило процесс перестройки лигно-углеводной матрицы, при которой сохранившаяся целлюлоза становится более упорядоченной, тогда как накапливающийся лигнин формирует менее прочные связи с углеводами.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, Прибайкалье, пожары, термогравиметрия.

Для цитирования: Артемихина Е.А., Жила С.В., Машуков Д.А., Лоскутов С.Р. Изучение влияния периодического действия пожаров на физико-химические характеристики древесинного вещества в годичных приростах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Химия растительного сырья. 2026. №2. С. 357–368. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260216773>.

Введение

Леса Сибири исторически подвергаются воздействию пожаров, которые оказывают значительное влияние на структуру и продуктивность бореальных экосистем. Кроме того, при катастрофических пожарах огромное количество углерода перемещается из экосистем в атмосферу [1]. Прогнозируемые климатические условия в будущем станут еще более благоприятными для увеличения частоты пожаров и, следовательно, поиск методов выявления и реабилитации нарушенных пожарами лесных экосистем является значимой задачей практического и теоретического лесоведения [2]. Необходимость оценки и прогнозирования возобновления таких нарушенных лесных экосистем особенно актуальна в настоящее время, когда антропогенное воздействие на леса Сибири постоянно усиливается.

Воздействие пожаров как фактор нагревания живых тканей растения может инициировать каскад изменений физиологических и биохимических процессов в дереве, что, в свою очередь, приводит к его ослаблению деревьев, снижению продуктивности насаждений и подверженности атакам насекомыми-вредителями и патогенными микроорганизмами [3]. Вопросы устойчивости древесных растений к воздействию высоких температур во время лесных пожаров рассматривались в ряде публикаций российских и зарубежных исследователей [1, 4–10]. В то же время дискуссионными остаются вопросы о масштабах влияния пожаров на лесные

* Автор, с которым следует вести переписку.

экосистемы, продолжительности протекания пожаров и реабилитации лесных насаждений, задетых огнем. Исследования этих проблем имеют высокую теоретическую значимость в развитии концепции влияния пожаров на процессы восстановления лесных экосистем на анатомическом, физико-химическом и биохимическом уровнях с целью разработки программы успешного лесопользования в будущем. В частности, на примере сосны обыкновенной, произрастающей в Южной Сибири, где выявлена высокая частота и интенсивность пожаров на фоне существующего климатического тренда и антропогенной нагрузки. Перспективным подходом в данном исследовании является использование современного информативного и экспрессного метода термического анализа – термогравиметрии (ТГ). Метод позволяет количественно оценить содержание трех основных компонентов древесины (гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина) через потерю массы в характерных температурных интервалах. Также, по данным, полученным методом ТГ становится возможным рассчитать энергию активации термодеструкции целлюлозы, которая является показателем ее кристалличности и упорядоченности, и рассчитать энергию активации термодеструкции лигнина, являющийся показателем прочности межмолекулярных взаимодействий в лигно-углеводной матрице.

Цель нашей работы – выявление долговременных изменений в соотношении основных полимерных компонентов (целлюлозы, гемицеллюлоз, лигнина) и их термической стабильности в древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сформированной в годы, предшествующие пожару, непосредственно в год пожара и в последующие годы, как индикаторов реакции дерева на повторяющееся термическое воздействие. Гипотеза исследования: многократное термическое воздействие при лесных пожарах приводит к устойчивым изменениям в химическом составе и структуре клеточной стенки древесины сосны: снижается доля углеводных компонентов (целлюлозы и гемицеллюлоз) при относительном увеличении доли лигнина, а также снижается энергия активации термодеструкции лигнина, что свидетельствует об ослаблении межмолекулярных взаимодействий в лигно-углеводной матрице. При этом после каждого последующего пожара восстановление исходных физико-химических характеристик становится менее полным.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования нами были выбраны сосняки (*Pinus sylvestris* L.), произрастающие в бедных по плодородию условиях местопроизрастания. Основными типами почв являются светлые, слабооподзоленные суглинки, супеси и пески с примесью гравия, а местами валунов и скалистого камня вулканического происхождения. Исследуемые насаждения расположены в Хоринском лесничестве Республики Бурятия (рис. 1).

Леса данного района входят в водоохранную зону озера Байкал и отнесены к Забайкальскому горно-таежному району. Высота над уровнем моря – 695 м, северная широта – 52°08', восточная долгота – 109°40'. Сосняки чистые по составу, возраст древостоев – от 120 до 250 лет, IV класс бонитета, относительная полнота 0.5–0.8. Климат района расположения лесничества резко континентальный, характеризуется сухостью воздуха, обилием солнечного света, малым количеством осадков в году. Отбор образцов для исследования проводили в сосновом насаждении, пройденном пожарами. Для оценки периодичности пожаров применяли дендрохронологический анализ. Реконструкцию лет с пожарами и построение их хронологий производили по заготовленным спилам с деревьев имеющих пожарные подсушины – видимый обугленный участок у основания ствола в форме треугольника. Измерение ширины годичных колец на кернах и древесных спилах осуществлялось с использованием прибора LINTAB. Датировку лесных пожаров по поперечным спилам проводили по методике [11]. В ходе исследований нами была проведена оценка степени повреждения дерева в результате пожара. По глубине пожарных подсушин можно судить о степени термического повреждения, виде и силе лесного пожара, направлении его распространения, а также сезонных сроках его возникновения [12].



а

б

Рис. 1. Пробная площадь региона исследования, где (а) – общий вид окружающего ландшафта насаждений и условий произрастания, (б) – микрорельеф местности, живой напочвенный покров и др.

Для физико-химического анализа были отобраны три модельных дерева *P. sylvestris* с четкими пожарными подсушинами, у которых годовичные кольца, соответствующие пожарным годам, а также предшествующие и последующие годы, одновременно присутствовали и были датированы на всех трех спилах. Таким образом, итоговый объем выборки для каждого временного среза (год до пожара, год пожара, год после пожара) составил $n = 3$ (три независимых биологических повторности). Первичная пробоподготовка заключалась в выборе годовичных колец с пожарными шрамами – пожар (П) и установления года, в котором произошел пожар → определении года, предшествующего пожару – год до пожара (ДП) → определении года после пожара (ПП) (рис. 2) → с совпавших на спилах годовичных колец была отобрана древесина и измельчена в древесный порошок на криомельнице IQ MILL-2070 (Frontier, Япония). После кондиционирования образцов до влажности, равновесной с лабораторной влажностью воздуха ~65%, далее проводился термический анализ. Для каждого годовичного кольца выполнено по три аналитических повторности ТГ анализа. Коэффициент вариации для потери массы ($\Delta m_2 - \Delta m_4$) и для рассчитанных значений энергии активации не превышал 5 %, что подтверждает высокую воспроизводимость метода ТГ.

Термогравиметрия. С помощью термомикровесов TG209F1 Libra (Netzsch, Германия) образцы древесины анализировали в атмосфере воздуха при следующих условиях: скорость нагрева – $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}^{-1}$ от 25 до $700 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость потока защитного и продувочного газов – 20 мл/мин; масса образца – от 2.50 до 2.99 мг, тигель корундовый цилиндрической формы. Взвешивание образцов для анализа проводили на лабораторных весах XFR-125E (Vibra, Япония). Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью пакета программ, поставляемого с прибором – «NETZSCH Proteus Thermal Analysis 4.8.4».

Анализ кинетики. Анализ кинетики термодеструкции образцов древесины по термогравиметрическим данным проводили с использованием кинетической модели Бройдо [13]

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{y} \right) \right] = -\frac{E_a}{RT} + C,$$

где y – массовая доля неразложившегося вещества исследуемого образца; E_a – энергия активации, кДж/моль; T – температура, К; $R = 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – универсальная газовая постоянная; C – константа. Данный метод широко используется в термогравиметрии для анализа кинетики по величине E_a процессов термодеструкции различных материалов, протекающих по механизму реакций порядка $n \leq 1$ [14, 15].

Исследование выполнено с использованием аналитической системы термомикровесы TG 209 F1 Libra (Netzsch, Германия) на базе Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

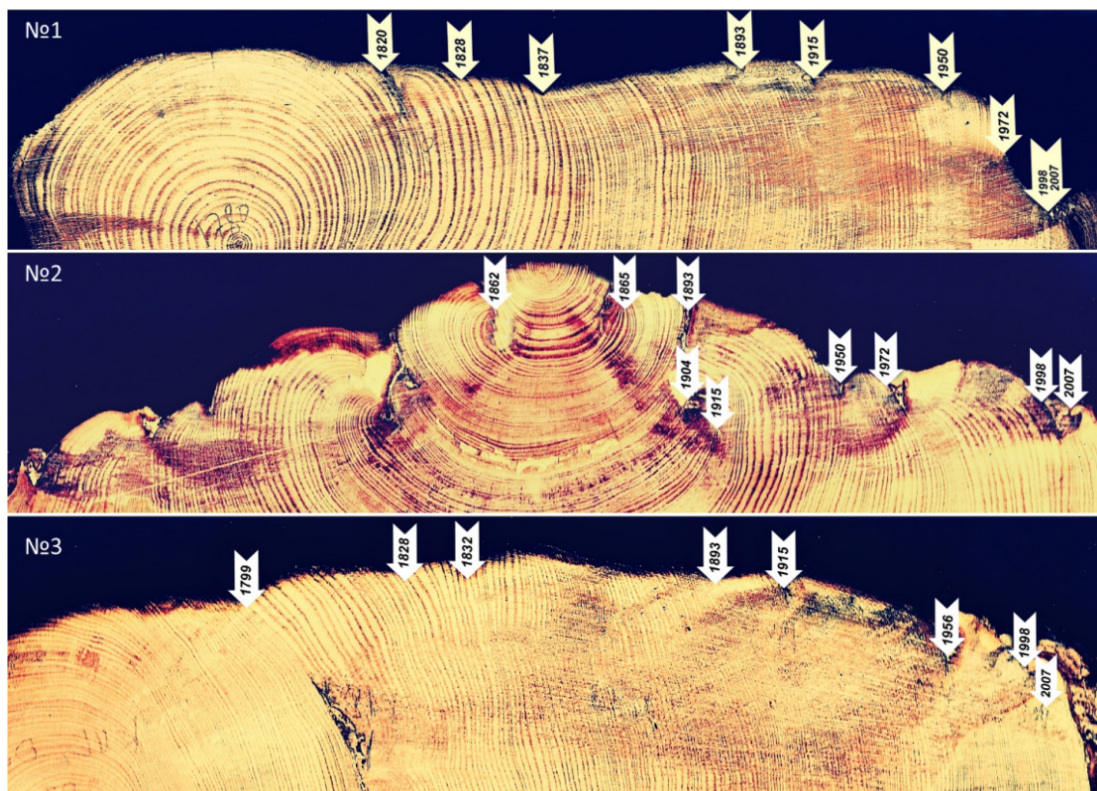


Рис. 2. Датированные спилы *P. silvestris*

Обсуждение результатов

Термогравиметрия. На рисунке 3 представлены результаты термогравиметрии древесины годичных колец *P. silvestris* в год до пожара (1827 ДП), в год пожара (1828 П) и в год после пожара (1829 ПП) в окислительной атмосфере при скорости нагрева 10 °С/мин.

Температурные интервалы потери массы выделяли по дифференциальным термогравиметрическим (ДТГ) кривым на основе литературных данных для хвойных пород древесины [13, 16, 17] и собственного анализа полученных данных. В процессе термодеструкции можно выделить четыре стадии: первая стадия (25–118 °С) связана с удалением влаги и легколетучих веществ (Δm_1); вторая стадия (174–284 °С) обусловлена термическим разложением гемицеллюлоз и аморфной фракцией целлюлозы (Δm_2); на третьей стадии происходит преимущественная термическая деструкция кристаллической целлюлозы (Δm_3); четвертая стадия (375–503 °С) связана с разложением лигнина и окислением углеродного остатка (Δm_4). Указанные температурные интервалы являются корректными для условий данного эксперимента (скорость нагрева 10 °С/мин, атмосфера воздуха, образцы древесины сосны). При изменении скорости нагрева или породном составе деревьев границы могут незначительно смещаться. Однако, в рамках сравнительного анализа (до/после пожара) использование фиксированных интервалов корректно, так как все образцы анализированы в идентичных условиях.

Данные термического анализа о влиянии термического шока от пожара на основные полимерные компоненты древесинного вещества (гемицеллюлозы, целлюлозу и лигнин) в годичных кольцах у *P. silvestris*, представлены на рисунке 4.

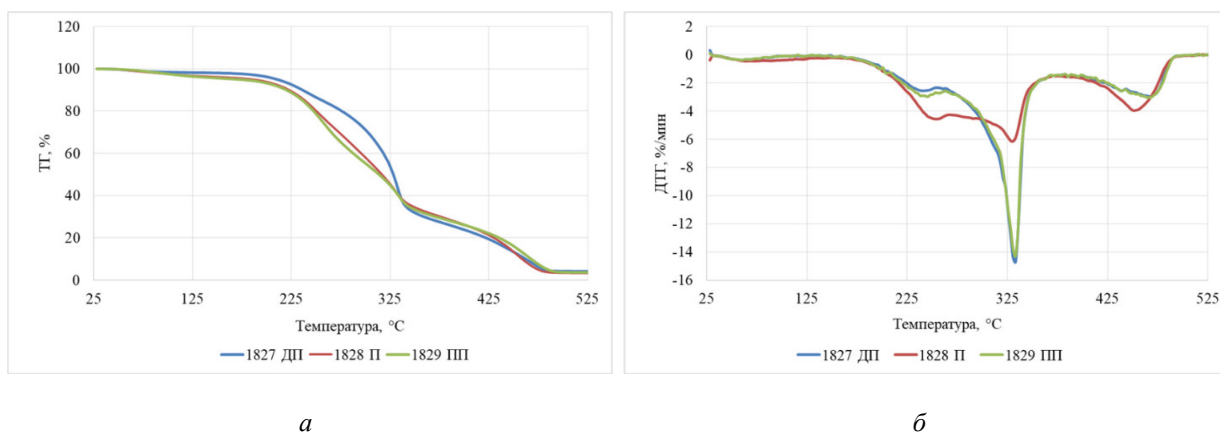


Рис. 3. ТГ (*а*) и ДТГ (*б*) кривые термодеструкции древесинного вещества из годовичных колец *P. sylvestris* 1827–1829 гг.

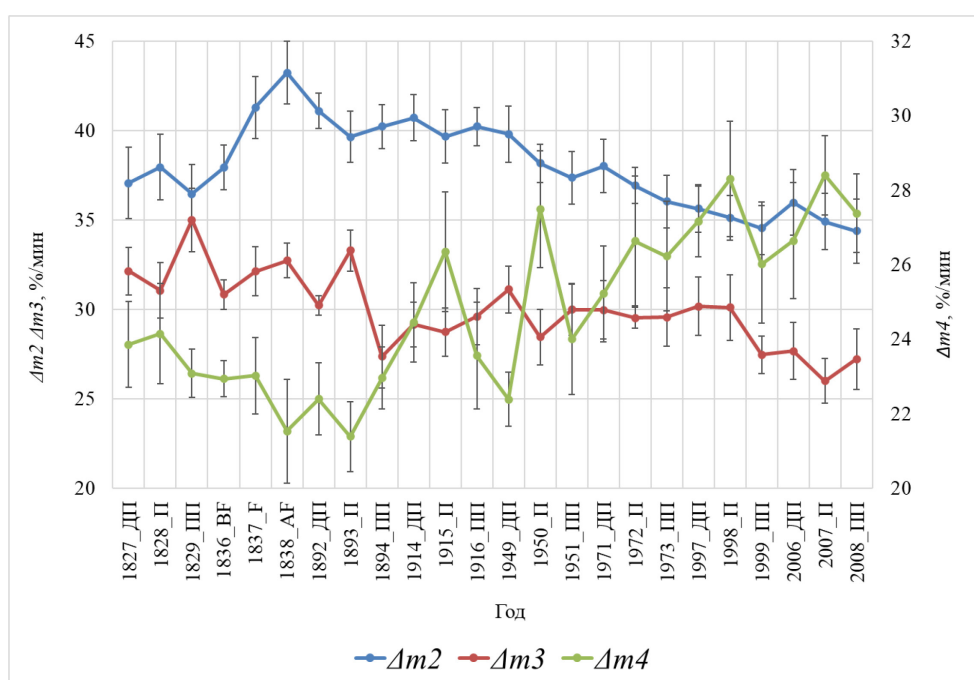


Рис. 4. Изменение значений потери массы для лигнито-углеводного комплекса древесины у *P. sylvestris* в результате многократного воздействия пожара

Термогравиметрические данные выявили отрицательное влияние многократного термического шока на изменение массы углеводного комплекса и положительное влияние на изменения массы лигнина у *P. sylvestris*. Кроме того, из рисунка 4 следует, что после термического шока в 1893 году снижается дисперсия для Δm_2 и Δm_3 и увеличивается для Δm_4 , что указывает на синхронность отклика дерева между углеводной и ароматической компонентами древесинного вещества в результате воздействия термического шока. В результате многократного термического шока, действующего на деревья, выявлено заметное снижение углеводной компоненты в древесинном веществе годовичных колец сосны обыкновенной. Стресс, вызванный высокой температурой и дефицитом воды, который происходит во время пожаров, запустили каскад необратимых реакций на биохимическом уровне, механизмы которого менее известны, чем другие механизмы абиотического стресса. Синергическое влияние повышенной температуры и дефицита влаги оказывает отрицательное воздействие на синтез целлюлозы через снижение экспрессии генов и активность ферментов, участвующих в процессе деградации сахарозы, тем самым ограничивая синтез уридиндифосфатглюкозы, который является прямым субстратом для синтеза целлюлозы [16]. Помимо воздействия на первичную клеточную стенку двойной стресс может опосредовать изменения во вторичном метаболизме клеточной стенки, что ведет за собой изменения синтеза лигнина. Возможно, увеличение синтеза лигнина связано с

увеличением мономерных единиц лигнина: гваяцил-лигнинов и сирингил-лигнинов в ответ на стресс. Кроме того, предполагается, что тепловой стресс регулирует биосинтез лигнина посредством повышения активности фермента пероксидазы [17, 18]. Какой-либо зависимости связанной воды от многократного термического шока на дерево *P. sylvestris* выявить не удалось.

Анализ кинетики. Выбор модели Бройдо для анализа полученных термогравиметрических кривых годовичных колец *P. Sylvestris* обусловлен тем, что модель не требует итерационных расчетов и дает воспроизводимые результаты при малой навеске образца (2–3 мг), что критически важно при анализе отдельных годовичных колец. Также, значения энергии активации, полученные данным методом, чувствительны к кристалличности целлюлозы и степени межмолекулярных взаимодействий в лигнине, что позволяет сравнивать структурное состояние древесины в разные годы. Кроме того, модель Бройдо широко используется в исследованиях, связанных с термической стабильностью древесины, подвергшейся термическому или биологическому стрессу, что обеспечивает сопоставимость наших результатов с литературными данными.

Для оценки структурных изменений в лигно-углеводной матрице древесины под влиянием пожарного стресса были рассчитаны значения энергии активации (E_a) термодеструкции для трех температурных интервалов, соответствующих преимущественно разложению гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина (таблица 1). Значения E_a получены с использованием кинетической модели Бройдо, предполагающей реакцию первого порядка. Значения E_a , при термодеструкции целлюлозы в исследуемый период времени, не выявили закономерностей, полученных из анализа ТГ (рис. 4). Рост E_a гемицеллюлоз в отдельные пожарные годы может указывать на уплотнение аморфной структуры или образование поперечных сшивок при термическом воздействии. Однако, для большинства поздних пожаров (после 1950 г.) характерно снижение E_a , что может свидетельствовать о деградации гемицеллюлоз и ослаблении их межмолекулярных взаимодействий.

Снижение E_a целлюлозы в пожарные годы может свидетельствовать о деградации кристаллической структуры, уменьшении длины молекулярных цепей и/или снижении упорядоченности макромолекул. Это может быть следствием термогидролитических процессов, запускаемых нагревом тканей дерева во время пожара. Рост E_a лигнина в год пожара может отражать повышенную полимеризацию, образование дополнительных поперечных связей или накопление более термостойких ароматических структур (например, конденсированных типов лигнина) в ответ на стресс. Однако, последующее резкое снижение E_a в последующие годы, особенно выраженное после 1950 г., свидетельствует об ослаблении межмолекулярных взаимодействий в лигно-углеводной матрице. Кинетический анализ (таблица 1) выявил разнонаправленные изменения энергии активации термодеструкции для различных компонентов древесины. Для целлюлозы характерно снижение E_a в год пожара на 5–40 % по сравнению с допожарным годом, что указывает на деградацию кристаллической структуры и уменьшение длины молекулярных цепей. Наиболее сильное снижение зафиксировано в 2007 г. (69,1 кДж/моль против 109,5 кДж/моль в 2006 г.). Для лигнина наблюдается увеличение E_a в пожарные годы (до 27 % в 1950 г.), что может отражать повышенную полимеризацию или образование более конденсированных структур в ответ на термический стресс. Сравнение временных периодов показывает, что после 1950 г. восстановление исходных кинетических параметров становится неполным: послепожарные значения E_a целлюлозы и лигнина устойчиво ниже, чем в ранний период (1829–1916 гг.). Это указывает на кумулятивный эффект многократных термических воздействий, приводящий к прогрессирующей деградации лигно-углеводного комплекса.

Для оценки направленности постпирогенных изменений древесины был рассчитан показатель $\Delta E_a = E_a(\text{II}) - E_a(\text{III})$, где положительное значение указывает на снижение энергии активации в год после пожара по сравнению с пожарным годом, а отрицательное указывает на рост E_a (рис. 5). Во всех анализируемых пожарных эпизодах ΔE_a для целлюлозы была положительной (от +4 до +55 %). Это связано со снижением энергии активации термодеструкции целлюлозы в год после пожара по сравнению с пожарным годом. Этот эффект выражен в 1998 г., где ΔE_a достигла +55 %, и в 2007 г., где значения достигли +48 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что временное повышение кристалличности целлюлозы в год пожара сменяется ее «аморфизацией» в последующие годы, причем степень этого снижения нарастает с каждым последующим пожаром. В отличие от целлюлозы, динамика значений энергии активации лигнина выявила свою неоднородность. В ранних пожарах (1828 и 1893 гг.) ΔE_a положительная (+8 и +2 %), что указывает на снижение энергетического барьера деструкции лигнина после пожара. Однако, начиная с 1915 г., ΔE_a для лигнина отрицательная (от -5 до -32 %), что связано с тем, что в годы, следующие за пожаром, энергия активации лигнина возрастает по сравнению с пожарным годом. Максимальные отрицательные значения

зафиксированы после 1950 г.: -32 % в 1951 г., -25 % в 1973 г., -28 % в 1999 и 2009 гг. Разнонаправленность изменений целлюлозы и лигнина особенно выражена в поздний период (после 1950 г.), где целлюлоза демонстрирует резкое снижение Ea , что свидетельствует об аморфизации, тогда как лигнин показывает рост Ea и данный факт связан с повышением термостабильности. Вышеуказанный факт может быть связан с перестройкой лигно-углеводной матрицы. Выявленный тренд усиливается с каждым последующим пожаром, что свидетельствует о кумулятивном эффекте многократных термических воздействий.

Сравнение допожарных и послепожарных значений энергии активации выявило различия в постпирогенной динамике целлюлозы и лигнина. Для целлюлозы ΔEa остается положительной и демонстрирует устойчивый рост: от 0–3 % в 1827–1838 гг. до 164 % к 2006 г. Это связано с тем, что после каждого последующего пожара энергия активации целлюлозы в послепожарные годы оказывается все ниже по сравнению с допожарным уровнем и, следовательно, кристаллическая структура целлюлозы деградирует, а ее способность к восстановлению снижается с каждым новым термическим шоком. Для лигнина ΔEa остается отрицательной с тенденцией к усилению отрицательности: от -3...-5 % в ранний период до -161 % к 2006 г. Следовательно, после каждого последующего пожара энергия активации лигнина в послепожарные годы оказывается выше по сравнению с допожарным уровнем. Ароматическая матрица клеточной стенки становится более термостабильной, что может интерпретироваться как защитная реакция дерева, направленная на укрепление механической прочности тканей в условиях повторяющегося стресса. Разнонаправленность изменений целлюлозы и лигнина особенно ярко проявляется после 1950 г., когда оба тренда усиливаются. Это указывает на достижение некоего порога, после которого восстановительные процессы в углеводной фракции становятся неполными, а компенсаторное упрочнение лигнина – более выраженным. Наблюдаемый эффект может быть следствием кумулятивного действия многократных пожаров, приводящего к устойчивой перестройке лигно-углеводной матрицы.

Результаты расчета значений энергии активации термодеструкции лигно-углеводного комплекса древесинного вещества у *P. sylvestris* в результате многократного воздействия пожара

Год	Ea (гемицеллюлозы), кДж/моль	Ea (целлюлоза), кДж/моль	Ea (лигнин), кДж/моль
1827_ДП	88.9±2.01	160.0±1.34	166.2±2.15
1828_П	117.8±1.84	151.6±1.34	189.5±2.15
1829_ПП	109.4±1.64	160.5±1.56	200.8±1.35
1836_ДП	108.3±0.97	102.7±2.77	187.8±1.65
1837_П	103.8±1.44	98.2±1.53	195.7±2.97
1838_ПП	104.8±2.23	101.3±1.15	191.0±2.94
1892_ДП	109.1±1.28	110.7±1.74	174.0±0.83
1893_П	99.3±2.48	105.1±2.25	175.9±2.07
1894_ПП	90.2±1.08	116.8±1.35	179.3±1.61
1914_ДП	94.8±1.56	171.4±2.58	164.3±1.44
1915_П	94.1±2.07	165.1±1.32	187.2±2.73
1916_ПП	100.8±2.47	172.8±1.54	151.5±1.57
1949_ДП	111.7±1.50	102.6±1.43	185.2±1.93
1950_П	103.8±1.94	85.1±1.63	235.7±1.29
1951_ПП	83.2±1.47	101.7±0.58	178.1±1.74
1971_ДП	97.3±1.33	156.5±1.02	191.8±1.41
1972_П	86.8±2.24	111.4±2.64	196.4±0.95
1973_ПП	89.6±1.48	141.4±1.86	151.9±1.54
1997_ДП	119.3±1.84	145.7±2.04	184.9±1.67
1998_П	101.1±1.57	88.1±2.59	205.5±1.67
1999_ПП	86.3±1.79	134.0±1.25	155.0±1.56
2006_ДП	96.8±1.26	109.5±1.68	181.2±1.06
2007_П	104.9±1.95	69.1±1.93	199.5±2.35
2008_ПП	68.0±1.84	101.7±2.24	150.8±2.06

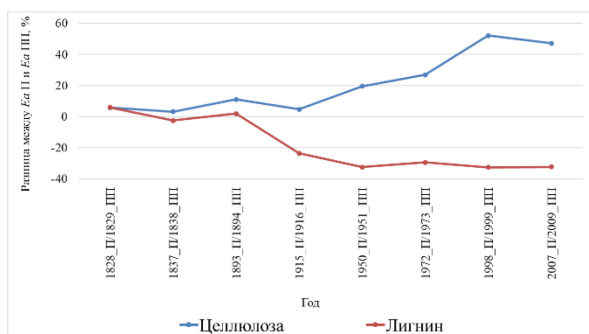


Рис. 5. Разница значений Ea термодеструкции целлюлозы и лигнина, рассчитанная для древесинного вещества годовых колец с пожаром (П) и годовыми кольцами после него (ПП)

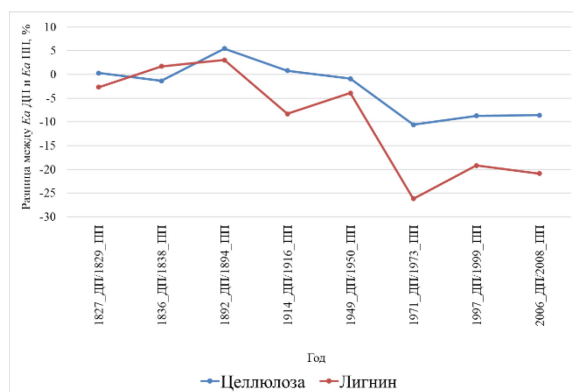


Рис. 6. Разница между значениями Ea термодеструкции целлюлозы и лигнина древесинного вещества годовых колец до пожара (ДП) и после него (ПП)

Наиболее информативным параметром для оценки степени влияния пожаров на клеточную стенку выявлен показатель $\Delta m3$, соответствующий кристаллической целлюлозе (рис. 4). В ранний период (1827–1916 г.) значения $\Delta m3$ варьировали в диапазоне 28–35 % без устойчивой связи с пожарами. Начиная с 1990-х годов фиксируется прогрессирующее снижение $\Delta m3$ в пожарные годы: в 1998 г. – до 27 %, в 2007 г. – до 25 % (по сравнению с 30 % и 28 % в предшествующие допожарные годы, соответственно). Восстановления $\Delta m3$ в послепожарные годы не происходит: в 1999 и 2008 гг. значения остаются на уровне 26 %. Это свидетельствует о необратимой деградации кристаллической структуры целлюлозы под влиянием многократных пожаров. $\Delta m4$ обнаружила аномально высокое значение (36 %) в 1950 г., что более чем на 10 % превышает значения 22–29 %. Это может интерпретироваться как защитное накопление лигнина в ответ на экстремальный термический стресс. В более поздние пожары (1998, 2007) такой реакции не наблюдалось, что может указывать на истощение адаптационного потенциала дерева. Кинетические параметры, рассчитанные основных полимерных компонентов древесины годовых колец *P. sylvestris* с применением модели Бройдо (таблица 1) выявили, что во всех пожарных годах фиксируется снижение Ea целлюлозы по сравнению с предшествующим допожарным годом, и наиболее выраженное снижение наблюдается в поздний период. В послепожарные годы значения Ea целлюлозы частично восстанавливаются, но не достигают допожарного уровня, особенно в период после 1950 г. Стоит отметить, что в годы пожара Ea лигнина увеличивается по сравнению с допожарными значениями, однако, в послепожарные годы Ea лигнина резко снижается, часто падая ниже допожарного уровня. Также, во всех пожарных годовых кольцах значения $\Delta Ea(П-ПП)$ (рис. 5) для целлюлозы положительна и возрастает со временем, что связано с аморфизацией целлюлозы в периоды после термического воздействия. В ранних пожарах (1828, 1893) значения $\Delta Ea(П-ПП)$ для лигнина положительна, то есть после пожара Ea лигнина снижается. Однако, начиная с 1915 г., значения $\Delta Ea(П-ПП)$ становится отрицательной свидетельствует о постепенном упрочнении ароматической матрицы. Наиболее полное представление о кумулятивном эффекте пожаров дает сравнение послепожарных значений Ea с допожарным уровнем (рис. 6). Значения $\Delta Ea(ДП-ПП)$ для целлюлозы остаются положительными и обнаруживают устойчивый возрастающий тренд, в котором положительное значение ΔEa связано с тем, что энергия активации целлюлозы в годы после пожара ниже, чем в допожарные годы. Способность целлюлозы восстанавливать исходную кристаллическую структуру после термического воздействия прогрессивно ухудшается. После пяти-шести пожаров «послепожарная» целлюлоза оказывается значительно более аморфной (менее термостабильной), чем до начала воздействия пожара. Значения $\Delta Ea(ДП-ПП)$ для лигнина остаются отрицательными и также обнаруживают устойчивый тренд в сторону уменьшения и после многократных пожаров лигнин становится значительно более устойчивым к термическому разложению, чем до начала воздействия огня.

Многократное термическое воздействие приводит к деградации кристаллической целлюлозы [21]. Как показано в исследованиях термической деструкции древесины, повышение кристалличности и

увеличение размера кристаллитов целлюлозы сдвигают процесс термического разложения в область более высоких температур, тогда как снижение этих показателей ускоряет деградацию. Этим может объясняться наблюдаемое снижение кинетических параметров термодеструкции углеводной компоненты годичных колец сосны обыкновенной после воздействия огня по сравнению с допожарными годами. Лигно-углеводная матрица представляет собой трехкомпонентную систему лигнина, гемицеллюлоз и целлюлозы. Поскольку формирование подобной структуры напрямую зависит от химической природы компонентов клеточной стенки, особенностей процесса их биосинтеза, а также активности и локализации задействованных ферментов, на которые влияют условия произрастания, биотические и абиотические факторы [22], изменения в одной компоненте неизбежно сказываются на других. Образование ароматического полимерного лигнина протекает путем полимеризации мономерных единиц – первичных структурных звеньев, которые образуются из углеводов по пути шикимовой кислоты [23]. В контексте стрессового воздействия пожара особый интерес представляют так называемые «стрессовые лигнины». Исследования показывают, что лигнин играет важную роль в защите растений от неблагоприятных воздействий окружающей среды, включая механические повреждения, засуху, низкие температуры и патогены. В условиях термического стресса возможно усиление биосинтеза лигнина с изменением его мономерного состава (соотношения гваяцильных и сирингильных единиц) и увеличением доли конденсированных (более термостойких) структур. Этим может объясняться наблюдаемое в наших экспериментах повышение энергии активации лигнина в годы сильных пожаров (например, аномальный рост E_a до 235,7 кДж/моль в 1950 г.). Таким образом, выявленное в работе снижение энергии активации деструкции лигнина в послепожарные годы может быть связано с комплексом факторов: деградацией углеводной матрицы, изменением доступности мономерных предшественников, а также перестройкой самой структуры лигнина под влиянием повторяющихся термических воздействий. Влияние термического стресса на лигно-углеводную матрицу, по-видимому, носит кумулятивный характер: с каждым последующим пожаром способность дерева восстанавливать исходную структуру снижается, о чем свидетельствует прогрессирующее уменьшение энергии активации целлюлозы и лигнина в послепожарные годы после 1950 г.

Заключение

В настоящей работе методом термогравиметрического анализа впервые выполнена сравнительная оценка физико-химических изменений древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в годичных кольцах, сформированных до, во время и после многократных пожаров на Юге Сибири (Прибайкалье). На основе анализа потери массы в трех температурных интервалах и кинетических параметров термодеструкции установлено снижение потери массы гемицеллюлоз и целлюлозы, а также увеличение потери массы лигнина. Выявлено снижение энергии активации целлюлозы от 5 до 40 % по сравнению с допожарным годом, а в послепожарные годы энергия активации целлюлозы постепенно восстанавливается, но не достигает исходного уровня. Сравнение допожарных и послепожарных значений показывает устойчивый рост положительной разницы от 0-3 % в XIX веке до 164 % к 2006 г., что указывает на прогрессирующую аморфизацию целлюлозы с каждым последующим пожаром. Энергия активации лигнина в год пожара возрастает от 10–27%, а в послепожарные годы значения резко снижаются, опускаясь ниже допожарного уровня. Сравнение допожарных и послепожарных значений энергии активации лигнина показывает устойчивый рост отрицательной разницы от -3...-5 % до -161 % к 2006 г., что означает прогрессирующее снижение термостабильности лигнина в послепожарный период. Также, кинетический анализ выявил различную чувствительность углеводной и ароматической компонент древесины в котором лигнин обнаруживает значимые изменения кинетических параметров после четырех зафиксированных пожаров (с 1915 г.), а целлюлоза демонстрирует аналогичные устойчивые изменения только после пяти пожаров (с 1950 г.). Тренд на ослабление межмолекулярных взаимодействий в лигно-углеводной матрице прослеживается с 1950 г., то есть после многократного термического воздействия, что совпадает с информацией о сильно угнетенном состоянии лесных экосистем Забайкалья, вызванном пожарами с 1930-х годов, возникающими при промышленном освоении региона, сопровождающего интенсивным лесопользованием [24]. Ввиду малого объема выборки ($n = 3$ дерева на каждый временной срез) полученные результаты носят пилотный характер. Они демонстрируют принципиальную применимость термогравиметрического анализа для оценки постпирогенных изменений древесины на уровне годичных колец, но требуют подтверждения на расширенной выборке (не менее 10–15 деревьев на популяцию).

Также данное исследование было основано на результатах изученных деревьев с одной пробной площади «Хоринское лесничество», поэтому необходимы дальнейшие исследования, которые позволят расширить понимание закономерности и механизмов реакции на тепловой стресс деревьев сосны. Кроме того, дальнейшие исследования позволят расширить понимание способности данной породы адаптироваться к тепловому стрессу, поскольку протекающие внутри дерева процессы используются для повышения выживаемости при столкновении с волнами тепла на фоне продолжающегося глобального изменения климата.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Базового проекта «Роль природных и антропогенных факторов в системе устойчивого управления лесами Сибири» FWES-2024-0007.

Конфликт интересов

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

Открытый доступ

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

Список литературы

1. Иванова Г.А., Жила С.В., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Кукавская Е.А. Постпирогенная трансформация основных компонентов сосняков Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2018. №3. С. 30–41. <https://doi.org/10.15372/SJFS20180304>.
2. McLauchlan, K.K., Higuera P.E., Miesel J., Rogers B.M., Schweitzer J., Shuman J.K., Tepley A.J. Fire as a fundamental ecological process: research advances and frontiers // J. Ecology. 2020. Vol. 108. Pp. 2047–2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>.
3. Schafer J.L., Breslow B.P., Hohmann M.G., Hoffmann W.A. Relative bark thickness is correlated with tree species distributions along a fire frequency gradient // Fire Ecol. 2015. Vol. 11. Pp. 74–87. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1101074>.
4. Smith K.T., Arbellay E., Falk D.A., Sutherland E.K. Macroanatomy and compartmentalization of recent fire scars in three North American conifers // Can. J. For. Res. 2016. Vol. 46. Pp. 535–542. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0377>.
5. Sudachkova N.E., Romanova L.I., Astrakhantseva N.V., Novoselova M.V., Kosov I.V. Stress reactions of Scots pine trees to injuring by ground fire // Contemp. Probl. Ecol. 2016. Vol. 9. Pp. 608–616. <https://doi.org/10.1134/S1995425516050152>.
6. Kiryanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // Environ. Res. Lett. 2020. Vol. 15. 034061. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7469>.
7. Knorre A.A., Siegwolf R.T., Kiryanov A.V., Saurer M., Churakova (Sidorova) O.V., Prokushkin A.S. Fire as a major factor in dynamics of tree-growth and stable $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ variations in larch in the permafrost zone // Forests. 2022. Vol. 13. 13050725. <https://doi.org/10.3390/f13050725>.
8. Perrakis D.D., Agee J.K. Seasonal fire effects on mixed-conifer forest structure and ponderosa pine resin properties // Can. J. For. Res. 2006. Vol. 36. Pp. 238–254. <https://doi.org/10.1139/x05-212>.
9. Bär A., Michaletz S.T., Mayr S. Fire effects on tree physiology // New Phytol. 2019. Vol. 223. Pp. 1728–1741. <https://doi.org/10.1111/nph.15871>.
10. Alexou M., Dimitrakopoulos A. Early physiological consequences of fire as an abiotic stressor in metabolic source and sink of young Brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) // Tree Physiol. 2014. Vol. 34. Pp. 1388–1398. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu098>.
11. Baisan, C.H., Swetnam, T.W. Fire history on a desert mountain range: Rincon mountain wilderness, Arizona, USA // Canadian. J. For. Res. 1990. Vol. 20. Pp. 1559–1569. <https://doi.org/10.1139/x90-208>.
12. Rother M.T., Huffman J.M., Harley G.L., Platt W.J., Jones N., Robertson K.M., Orzell S.L. Cambial phenology informs Tree-ring analysis of fire seasonality in coastal plain pine savannas // Fire Ecology. 2018. Vol. 14. Pp. 164–185. <https://doi.org/10.4996/fireecology.140116418>.
13. Poletto M. Thermogravimetric analysis and kinetic study of pine wood pyrolysis // Ciênc. Madeira - RCM. 2016. Vol. 7. Pp. 111–118. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v7n2p111-118>.
14. Poletto M., Dettenborn J., Pistor V., Zeni M., Zattera A.J. Materials Produced from Plant Biomass. Part I: Evaluation of thermal stability and pyrolysis of wood // Mater. Res. 2010. Vol. 13. Pp. 375–379. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000300016>.
15. Lionetto F., Del Sole R., Cannoletta D., Vasapollo G., Maffezzoli A. Monitoring wood degradation during weathering by cellulose crystallinity // Mater. 2012. Vol. 5. Pp. 1910–1922. <https://doi.org/10.3390/ma5101910>.

16. Wu X., Deng X., Ye C., Riitamaa Ch., Chen Z., Li K., Yi L. Charring and pyrolysis of coniferous wood: insights into heat transfer, gas micro-permeability and influencing factors // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. Vol. 255. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127644>.
17. Norton C., Hu J., Scott R., Barron-Gafford G., Babst F. Thermal imaging of conducting sapwood width enhances dendroecological studies in southwestern U.S. Conifers // *Trees.* 2025. Vol. 39. <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02687-x>.
18. Hu W., Gao M., Xu B., Wang S., Wang Y., Zhou Z. Co-occurring elevated temperature and drought stresses during cotton fiber thickening stage inhibit fiber biomass accumulation and cellulose synthesis // *Industrial Crops Products.* 2022. Vol. 187. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115348>.
19. Han F., Chen H., Li X.J., Yang M.F., Liu G.S., Shen S.H. A comparative proteomic analysis of rice seedlings under various high-temperature stresses // *Biochim. Biophys. Acta.* 2009. Vol. 1794. Pp. 1625–1634. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2009.07.013>.
20. Gulen H., Eris A. Effect of heat stress on peroxidase activity and total protein content in strawberry plants // *Plant Sci.* 2004. Vol. 166. Pp. 739–744. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.014>.
21. Fujita M., Lechner B., Barton D.A., Overall R.L., Wasteneys G.O. The missing link: do cortical microtubules define plasma membrane nanodomains that modulate cellulose biosynthesis? // *Protoplasma.* 2012. Vol. 249. Pp. 59–67. <https://doi.org/10.1007/s00709-011-0332-z>.
22. Tyutkova E.A., Loskutov S.R., Benkova V.E., Shashkin A.V. Thermal analysis of earlywood and latewood of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) found along the Polar tree line. Correlation of wood destruction values with climatic factors // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017. Vol. 130. Pp. 1391–1397. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6550-7>.
23. Moura J.C.M.S.C., Bonine A.V., Viana J.O.F., Carnier Dornelas M., Mazzafera P. Abiotic and biotic stresses and changes in the lignin content and composition in plants // *J. Integr. Plant. Biol.* 2010. Vol. 52. Pp. 360–376. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00892.x>.
24. Евдокименко М.Д., Кривобоков Л.В., Петренко А.Е. Лесоэкологические последствия ландшафтных пожаров в Забайкалье // *Вестник Томского государственного университета. Биология.* 2022. №58. С. 153–180. <https://doi.org/10.17223/19988591/58/8>.

Поступила в редакцию 17 января 2025 г.

После переработки 25 июля 2025 г.

Принята к публикации 18 мая 2026 г.

Artemikhina E.A.*[†], Zhila S.V., Mashukov D.A., Loskutov S.R. STUDY OF THE INFLUENCE OF PERIODIC FIRES ON THE PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF WOOD IN TREE RINGS OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS – a separate division of the Federal Research Center KSC SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russia, tyukatie@gmail.com

With the increase in global fire activity in response to the climate trend, reconstruction of long-term physicochemical characteristics of trees that survived thermal shock becomes an important direction for assessing and predicting the restoration and productivity of forest ecosystems damaged by fire in the future. In this work, we assessed the ability and potential of trees growing in the South of Siberia (Baikal region) for regeneration and survival after fires at the physicochemical level. Analysis of the obtained data shows that as a result of multiple thermal shock in pine trees, the content of hemicelluloses and cellulose decreases; the content of lignin increases. An increase in the packing density of cellulose macromolecules is observed precisely in fire years. In the process of tree restoration, a tendency towards "amorphization" is observed, the activation energy of thermo-oxidative decomposition of lignin decreases, which caused a tendency to weakening of intermolecular interactions in the lignocarbhydrate matrix, which has been traced since 1950. In other words, the repeated impact of thermal shock caused by fires since the 1930s coincides with the disruption of forest ecosystems in the Baikal region that arose as a result of intensive industrial forest management in this region.

Keywords: Siberian pine, Baikal region, fires, thermogravimetry.

For citing: Artemikhina E.A., Zhila S.V., Mashukov D.A., Loskutov S.R. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 2, pp. 357–368. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260216773>.

* Corresponding author.

References

- Ivanova G.A., Zhila S.V., Ivanov V.A., Kovaleva N.M., Kukavskaya Ye.A. *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2018, no. 3, pp. 30–41. <https://doi.org/10.15372/SJFS20180304>. (in Russ.).
- McLauchlan, K.K., Higuera P.E., Miesel J., Rogers B.M., Schweitzer J., Shuman J.K., Tepley A.J. *J. Ecology*, 2020, vol. 108, pp. 2047–2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>.
- Schafer J.L., Breslow B.P., Hohmann M.G., Hoffmann W.A. *Fire Ecol.*, 2015, vol. 11, pp. 74–87. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1101074>.
- Smith K.T., Arbellay E., Falk D.A., Sutherland E.K. *Can. J. For. Res.*, 2016, vol. 46, pp. 535–542. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0377>.
- Sudachkova N.E., Romanova L.I., Astrakhantseva N.V., Novoselova M.V., Kosov I.V. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2016, vol. 9, pp. 608–616. <https://doi.org/10.1134/S1995425516050152>.
- Kirdyanov A.V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A.A., Prokushkin A.S., Churakova (Sidorova) O.V., Fonti M.V., Büntgen U. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, 034061. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7469>.
- Knorre A.A., Siegwolf R.T., Kirdyanov A.V., Saurer M., Churakova (Sidorova) O.V., Prokushkin A.S. *Forests*, 2022, vol. 13, 13050725. <https://doi.org/10.3390/f13050725>.
- Perrakis D.D., Agee J.K. *Can. J. For. Res.*, 2006, vol. 36, pp. 238–254. <https://doi.org/10.1139/x05-212>.
- Bär A., Michaletz S.T., Mayr S. *New Phytol.*, 2019, vol. 223, pp. 1728–1741. <https://doi.org/10.1111/nph.15871>.
- Alexou M., Dimitrakopoulos A. *Tree Physiol.*, 2014, vol. 34, pp. 1388–1398. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu098>.
- Baisan, C.H., Swetnam, T.W. *Canadian. J. For. Res.*, 1990, vol. 20, pp. 1559–1569. <https://doi.org/10.1139/x90-208>.
- Rother M.T., Huffman J.M., Harley G.L., Platt W.J., Jones N., Robertson K.M., Orzell S.L. *Fire Ecology*, 2018, vol. 14, pp. 164–185. <https://doi.org/10.4996/fireecology.140116418>.
- Poletto M. *Ciênc. Madeira – RCM*, 2016, vol. 7, pp. 111–118. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v7n2p111-118>.
- Poletto M., Dettenborn J., Pistor V., Zeni M., Zattera A.J. *Mater. Res.*, 2010, vol. 13, pp. 375–379. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000300016>.
- Lionetto F., Del Sole R., Cannoletta D., Vasapollo G., Maffezzoli A. *Mater.*, 2012, vol. 5, pp. 1910–1922. <https://doi.org/10.3390/ma5101910>.
- Wu X., Deng X., Ye C., Riitamaa Ch., Chen Z., Li K., Yi L. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2022, vol. 255, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127644>.
- Norton C., Hu J., Scott R., Barron-Gafford G., Babst F. *Trees*, 2025, vol. 39. <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02687-x>.
- Hu W., Gao M., Xu B., Wang S., Wang Y., Zhou Z. *Industrial Crops Products*, 2022, vol. 187. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115348>.
- Han F., Chen H., Li X.J., Yang M.F., Liu G.S., Shen S.H. *Biochim. Biophys. Acta*, 2009, vol. 1794, pp. 1625–1634. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2009.07.013>.
- Gulen H., Eris A. *Plant Sci.*, 2004, vol. 166, pp. 739–744. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.014>.
- Fujita M., Lechner B., Barton D.A., Overall R.L., Wasteneys G.O. *Protoplasma*, 2012, vol. 249, pp. 59–67. <https://doi.org/10.1007/s00709-011-0332-z>.
- Tyutkova E.A., Loskutov S.R., Benkova V.E., Shashkin A.V. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2017, vol. 130, pp. 1391–1397. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6550-7>.
- Moura J.C.M.S.C., Bonine A.V., Viana J.O.F., Carnier Dornelas M., Mazzafera P. *J. Integr. Plant. Biol.*, 2010, vol. 52, pp. 360–376. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00892.x>.
- Yevdokimenko M.D., Krivobokov L.V., Petrenko A.Ye. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2022, no. 58, pp. 153–180. <https://doi.org/10.17223/19988591/58/8>.

Received January 17, 2025

Revised July 25, 2025

Accepted May 18, 2026

Сведения об авторах

Артемихина Екатерина Александровна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией физико-химической биологии древесных растений, tyukatie@gmail.com

Жила Сергей Викторович – старший научный сотрудник, getgain@mail.ru

Машуков Дмитрий Александрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, mashukov1988@gmail.com

Лоскутов Сергей Реджинальдович – доктор химических наук, главный научный сотрудник, lsr@ksc.krasn.ru

Information about authors

Artemikhina Ekaterina Aleksandrovna – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Physicochemical Biology of Woody Plants, tyukatie@gmail.com

Zhila Sergey Viktorovich – Senior Researcher, getgain@mail.ru

Mashukov Dmitry Aleksandrovich – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, mashukov1988@gmail.com

Loskutov Sergey Reginaldovich – Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, lsr@ksc.krasn.ru