

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/2>

УДК 630\*81:543.226:630\*44(571.52)



## Термогравиметрический анализ древесины кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) на разных стадиях усыхания, произрастающего в Северо-Восточной Тыве

Екатерина А. Артемихина (Тютюкова)<sup>1,2</sup> ✉, [tyukatie@gmail.com](mailto:tyukatie@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>

Сергей В. Жила<sup>1,2</sup>, [getgain@mail.ru](mailto:getgain@mail.ru) <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>

Сергей С. Кулаков<sup>2</sup>, [muscul-kul@yandex.ru](mailto:muscul-kul@yandex.ru) <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>

Денис А. Демидко<sup>1,2</sup>, [sawer-beetle@yandex.ru](mailto:sawer-beetle@yandex.ru) <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>

Юрий В. Данилюк<sup>1,3</sup>, [ura\\_danilyk@mail.ru](mailto:ura_danilyk@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>

Антонина А. Анискина<sup>1</sup>, [aniskina\\_a@ksc.krasn.ru](mailto:aniskina_a@ksc.krasn.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>

<sup>1</sup>Институт 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

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

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, 660041, пр. Свободный, 82А, Российская Федерация

Повышение температуры воздуха в результате глобального потепления, скорее всего, станет ключевым абиотическим стрессором, которому древесным растениям придется противостоять. Было проведено много исследований отдельных стрессоров, однако растения обычно страдают от сочетаний факторов стресса в естественной среде обитания. В последние годы комбинированные абиотические стрессы стали особенно серьезным последствием изменения климата. Ситуация, связанная с дефицитом влаги, которая вызвана засухой, в сочетании с повышающейся температурой воздуха были признаны одними из наиболее важных триггеров гибели деревьев во всем мире. Это исследование было первым, в котором темнохвойные насаждения кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), произрастающие в восточной части республики Тыва были изучены с помощью быстрого аналитического метода исследования – термогравиметрия. Наши результаты показывают, что самая ранняя стадия диагностирования стресса возможна на жизненном состоянии «ослабленные деревья» с дефолиацией 11–25% и незначительным изменением окраски хвои и единичными повреждениями. На данном этапе происходит снижение относительного содержания лигнина и повышение относительного содержания целлюлозы. Вышеуказанный факт открывает возможность для выявления деревьев, которые находятся в критическом состоянии. Кроме того, увеличивающееся относительное содержание лигнина и снижающееся относительное содержание целлюлозы может быть маркером для установления критической фазы. Также, одновременное снижение значений энергии активации целлюлозы маркером деградации ее структуры. Полученные выводы, подчеркивают необходимость пересмотра традиционных подходов к лесопользованию в условиях антропогенных климатических изменений и разработки новых стратегий сохранения биоразнообразия бореальных экосистем. Последовательное изучение физико-химических процессов темнохвойных насаждений имеет важное значение для внедрения своевременных мер по управлению рисками в лесном хозяйстве.

**Ключевые слова:** кедр сибирский, термический анализ, усыхание, климатический тренд, комбинированный стресс

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение коллективом научной лаборатории «Защита леса» проекта «Методологические основы оценки лесопатологических рисков в насаждениях юга Средней Сибири» (№ FEFE-2024-0016)

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


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Термогравиметрический анализ древесины кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) на разных стадиях усыхания, произрастающего в Северо-Восточной Тыве / Е. А. Артемихина (Тютюкова), С. В. Жила, С. С. Кулаков, Д. А. Демидко, Ю. В. Данилюк, А. А. Анискина // Лесотехнический журнал. – 2026. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 20–36. – Библиогр.: с. 31–35 (40 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/2>.


Поступила 08.07.2025. Пересмотрена 09.02.2026. Принята 15.03.2026. Опубликована онлайн 27.03.2026.

Article


## **Thermogravimetric analysis of Siberian cedar wood (*Pinus sibirica* Du Tour) at different stages of dieback, growing in North-Eastern Tuva**


**Ekaterina A. Artemikhina (Tyutkova)**<sup>1,2</sup> ✉, tyukatie@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>

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

**Sergey S. Kulakov**<sup>2</sup>, muscul-kul@yandex.ru  <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>

**Denis A. Demidko**<sup>1,2</sup>, sawer-beetle@yandex.ru  <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>

**Yuriy V. Danilyuk**<sup>1,3</sup>, ura\_danilyk@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>

**Antonina A. Aniskina**<sup>1</sup>, aniskina\_a@ksc.krasn.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>

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

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Krasnoyarskij rabochij avenue, 31, Russian Federation

<sup>3</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Svobodny Avenue, 82A, Russian Federation

### **Abstract**

Rising air temperatures due to global warming will likely become a key abiotic stressor that woody plants will have to cope with. While numerous studies have examined individual stressors, plants typically suffer from combinations of stressors in their natural habitats. In recent years, combined abiotic stresses have become a particularly serious consequence of climate change. Drought-induced moisture deficits, coupled with rising air temperatures, have been recognized as among the most important triggers of tree mortality worldwide. This study was the first to examine dark-coniferous Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) stands in the eastern part of the Republic of Tuva using a rapid analytical method – thermogravimetry. Our results show that the earliest stage of stress diagnosis is possible in the "weakened trees" life stage, with 11-25% defoliation, minor changes in needle color, and isolated lesions. At this stage, the relative lignin content decreases and the relative cellulose content increases. This fact opens the possibility of identifying trees in critical condition. Furthermore, increasing relative lignin content and decreasing relative cellulose content can serve as a marker for determining a critical phase. Similarly, a simultaneous decrease in cellulose activation energy values is a marker of structural degradation. These findings highlight the need to reconsider traditional approaches to forest management in the face of anthropogenic climate change and develop new strategies for preserving the biodiversity of boreal ecosystems. A consistent study of the physicochemical processes in dark coniferous stands is essential for the implementation of timely risk management measures in forestry.

**Keywords:** *Siberian pine, thermal analysis, shrinkage, climate trend, combined stress*

**Funding:** was provided by the project "Methodological basis for assessment of forest pathology risks in southern Central Siberia" (№ FEFE-2024-0016) under the state order of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation for implementation by the Scientific Laboratory of Forest Health

**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 (Tyutkova) E. A., Zhila S. V., Kulakov S. S., Demidko D. A., Danilyuk Yu. V., Aniskina A. A. (2026). Thermogravimetric analysis of Siberian cedar wood (*Pinus sibirica* Du Tour) at different stages of dieback, growing in North-Eastern Tuva. *Forestry Engineering journal*, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 20-36 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2026.1/2>.

**Received** 08.07.2025.

**Revised** 09.02.2026.

**Accepted** 15.03.2026. **Published online** 27.03.2026.

### **Введение**

Темнохвойные насаждения горных лесов Республики Тыва представляют собой уникальный объект для экологических исследований, имеющий важное значение для поддержания биологического разнообразия и устойчивости горных ландшафтов всего Алтае-Саянского экорегиона. Южная Сибирь – один из наиболее уязвимых к изменению климата регионов России, современные климатические

изменения, характеризующиеся ростом температур, изменением режима осадков и учащением экстремальных погодных явлений, оказывают значительное влияние на лесные экосистемы данного региона [1-3].

В современной лесной экологии особый научный интерес вызывают исследования горных лесных насаждений, что обусловлено их исключительной чувствительностью к глобальным климатическим трансформациям по сравнению с

равнинными аналогами [3-5]. Горные леса представляют большой интерес для анализа связи между климатом и продуктивностью данных насаждений [2]. Особую актуальность приобретают исследования горных экосистем Южной Сибири, где многочисленными авторами была установлена их исключительная восприимчивость к современным климатическим изменениям [2].

За последние несколько десятилетий в бореальных лесах Сибири рядом авторов отмечена тревожная тенденция к увеличению смертности ценозообразующих хвойных пород, в частности кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) [5-7]. Кедровые насаждения является чутким индикатором климатических изменений на южной границе произрастания [5]. Современные научные исследования [7], убедительно доказывают, что наблюдаемая деградация данных лесных экосистем представляет собой сложный многофакторный процесс, обусловленный взаимодействием климатических и биотических факторов, где ключевыми элементами являются прогрессирующее снижение влагообеспеченности, увеличение испаряемости на фоне глобального потепления и изменение сезонного распределения осадков, что в совокупности формирует устойчивый гидротермический дисбаланс в лесных экосистемах.

В контексте глобальных климатических изменений темнохвойные насаждения Республики Тыва, расположенные в южной части горной системы Южной Сибири, представляют особый научный интерес как уникальный модельный регион [8]. Географическое положение данной территории на стыке Центрально-Азиатского и Сибирского климатических регионов, а также выраженная высотная поясность создают исключительное разнообразие природных условий на относительно компактной площади [1, 8]. Кедровые насаждения Тывы формируются в условиях ограниченного увлажнения и значительных перепадов температур, что делает их особенно чувствительными индикаторами климатических изменений [8]. Важнейшей характеристикой региона выступает его относительная экологическая сохранность - антропогенная трансформация лесных экосистем здесь значительно менее выражена по сравнению со многими другими регионами Сибири, что позволяет изучать реакции лесных экосистем на изменяющиеся климатические параметры в условиях, максимально приближенных к естественным [1].

Современные климатические изменения, характеризующиеся устойчивым повышением средних температур, оказывают существенное воздействие на функционирование лесных экосистем, данный абиотический фактор приобретает особую значимость в связи с его

прямым влиянием на ключевые физиологические и биохимические процессы [9]. Согласно современным данным, комбинированный эффект засухи и теплового стресса рассматривается как один из основных факторов, способствующих масштабной гибели древесных растений в глобальном масштабе. Важно отметить, что физиологические и биохимические реакции растений на комбинированный стресс зачастую существенно отличаются от их реакции на отдельные стрессовые воздействия [9, 10]. Это позволило исследователям выдвинуть гипотезу о том, что растения воспринимают комбинированный стресс как качественно новое стрессовое состояние.

Несмотря на то, что влияние климатического тренда на бореальные леса широко задокументировано, знания о том, как изменение климата влияет на основные полимерные компоненты клеточной стенки деревьев в процессе усыхания и, следовательно, на их жизненное состояние скудны. Исследования подобного рода предполагают использование современных высокоинформативных, точных и экспрессных методов. Этим требованиям удовлетворяют метод термического анализа (термогравиметрия – ТГ), который широко используется в древесиноведении и химии древесины при изучении свойств древесинного вещества и основных его полимерных компонентов – целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина [11]. Это послужило основанием использования нами метода ТГ для оценки изменения физико-химических процессов в клеточных стенках кедра сибирского под влиянием изменяющихся условий произрастания древесной растительности. Изложенный в работе материал имеет непосредственное отношение к исследованию особенностей древостоев в процессе усыхания в условиях современного климатического тренда.

Цель нашей работы состояла в оценке причины усыхания кедровых насаждений в горных лесах Южной Сибири с применением метода термического анализа.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследований*

Объектами исследования были насаждения кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour), относящиеся к Тоджинскому лесничеству в северо-восточной части Республики Тыва. Пробная площадь (ПП) расположена в 14 км на северо-запад от п. Ырбан (52.814944, 95.629244) и в 148 км к северо-востоку от столицы Республики Тыва города Кызыл, в вершине ручьев Урунер, Чинге-Даг-Хем и Уза (рис. 1).



Рисунок 1. Расположение пробной площади (ПП) на карте.

Figure 1. Location of the trial plot on the map.

Источник: карты Гугл

Source: Google Maps

Рельеф горный, высота над уровнем моря 1377 метров. Растительность представлена кедровым чернично-зеленомошным лесом. Древесный ярус представлен кедром сибирским (*Pinus sibirica* Du Tour), елью сибирской (*Picea obovate* Ledeb.), лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и березой повислой (*Betula pendula* Roth). Средний возраст исследуемых деревьев кедра 140 лет. Средний диаметр – 28 см., средняя высота – 23 м., полнота – 0,6, а запас – 260 м<sup>3</sup>/га.

Климат исследуемой территории резко-континентальный. В летнее время температура воздуха поднимается до +40 градусов, лето часто засушливо. Зимой температура понижается до -50 градусов, зима в основном малоснежная.

### Дизайн эксперимента

Для определения жизненного состояния исследуемых насаждений на ПП проведено обследование древостоев в соответствии с общепринятыми таксационными методиками, с использованием современного оборудования [12]. Было заложено несколько круговых площадок радиусом 15 м. на которых проводились работы по учету отпада деревьев (оценено не менее 200 деревьев). Для оценки жизненного состояния деревьев *P. sibirica* использовалась стандартизированная методика визуальной оценки состояния крон, с делением на категории, разработанная в рамках Международной кооперативной программы по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests) [13, 14]. Данная методология является общепринятым стандартом для исследований лесных экосистем в Европе и широко применяется в российских работах [15-17]. Для каждой категории состояния методом случайной стратифицированной выборки отбиралось не менее 7 модельных деревьев (рис. 2), соответствующих средним таксационным

показателям древостоя (средние диаметра на высоте 1,3 м и высота), что позволяет минимизировать влияние размерного фактора при сравнительном анализе. Согласно протоколу ICP Forests, к категории 1 (Кат. 1) (здоровые деревья) отнесены особи с дефолиацией менее 10%, нормальной зеленой окраской хвои и отсутствием видимых повреждений. Категория 2 (Кат. 2) (ослабленные деревья) включала экземпляры с дефолиацией 11-25%, незначительным изменением окраски хвои и единичными повреждениями. Категория 3 (Кат. 3) (сильно ослабленные деревья) характеризовалась дефолиацией 26–60%, выраженным изменением окраски хвои и наличием признаков заселения стволовыми вредителями. Категория 4 (Кат. 4) (усыхающие деревья) объединяла особи с дефолиацией 61–99%, преимущественно сухой или некротизированной хвоей и активным заселением ксилофагами. Категория 5 (Кат. 5) (сухостой) подразделялась на свежий сухостой текущего года (дефолиация 100%, хвоя полностью сухая, но сохраняющаяся) и старый сухостой прошлых лет (отсутствие хвои, осыпание коры, начальные стадии деструкции древесины) [14].

Кат. 1 / Cat. 1 Кат. 2 / Cat. 2 Кат. 3 / Cat. 3 Кат. 4 / Cat. 4 Кат. 5 / Cat. 5

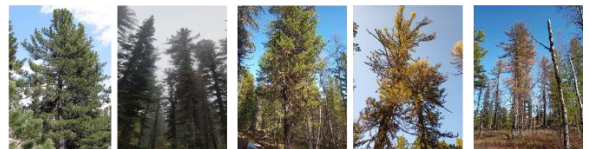


Рисунок 2. Категории жизненного состояния кедр.

Figure 2. Siberian pine tree viability classes

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

С каждой категории были выбраны по 7 деревьев, с семи деревьев были отобраны 7 сквозных кернов на высоте уровня груди (1,3 м.) Поскольку первые признаки ослабления кедр нами зафиксированы в 2017 году, то было принято решения исследовать физико-химическую характеристику древесины деревьев в период с 2017 по 2023 гг. (рис. 3.).

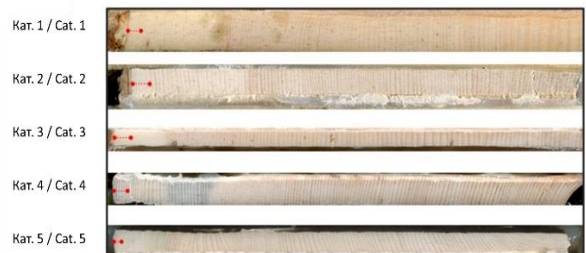


Рисунок 3. Крены кедр с деревьев различных категорий жизненного состояния.

Figure 3. Siberian pine cores from trees of various life status categories.

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Под 20-кратным увеличительным стеклом проводился отсчет нужных для исследования годичных колец, от кернов отрезался нужный временной ряд, далее часть керна с кольцами 2023-2017 гг. измельчалась в древесный порошок на криомельнице IQ MILL-2070 (Frontier, Япония). После кондиционирования образцов до влажности, равновесной с лабораторной влажностью воздуха ~65 %, после чего проводился термический анализ.

#### Термогравиметрия

С помощью термомикровесов TG209F1 Libra (Netzsch, Германия) образцы древесины анализировали в атмосфере воздуха при следующих условиях: скорость нагрева – 10 °С/мин от 25 до 700 °С, 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

Кинетические характеристики определяли, используя термогравиметрические данные, полученные при разных скоростях нагрева: 10, 20 и 40 град/мин в атмосфере азота при следующих условиях: скорость нагрева – 10, 20 и 40 °С/мин в температурной области от 25 до 700 °С, скорость потока защитного и продувочного газов – 20 мл/мин; масса образца от 2,50 до 2,99 мг, тигель корундовый цилиндрической формы. Анализ кинетических зависимостей термодеструкции древесины *A. sibirica* проводили на основе термогравиметрических данных с использованием безмодельного метода Озавы–Флинна–Уолла (ОФУ). Уравнение для расчёта энергии активации выглядит следующим образом [18]:

$$\ln(\beta) \cong \ln(AEaRF(\alpha)) - 5.3305 - 1.052 \times EaRT, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – степень превращения:  $\alpha = (m_0 - m) / (m_0 - m_f)$ ;  $m_0$  – начальная масса образца в эксперименте ТГ;  $m$  – текущая масса образца при

температуре  $T$ ;  $m_f$  – конечная масса образца после термической дегградации;  $\beta$  – скорость нагрева;  $R$  – газовая постоянная;  $A$  – предэкспоненциальный фактор;  $F(\alpha)$  – функция математического представления кинетической модели ОФУ. Расчеты выполнены в программах Kinetics-3.

Полученные результаты ТГ/ДТГ-анализа в окислительной среде были использованы для установления относительного количества основных полимерных компонентов в древесинном веществе кедр сибирского, а результаты ТГ/ДТГ-анализа в инертной среде были использованы для расчета энергии активации пиролиза древесины кедр сибирского. Ввиду того, что пиролиз лигноцеллюлозной биомассы включает целый ряд одновременно и/или последовательно протекающих химических реакций, сопровождаемых потерей массы, основную кинетическую характеристику процесса пиролиза – энергию активации – следует рассматривать как эффективный, или кажущийся параметр. энергии активации пиролиза коры пихты.

#### Анализ данных

Статистическая обработка полученных результатов была произведена с помощью многомерного дисперсионного анализа MANOVA [19].

Исследование выполнено с использованием аналитической системы Термомикровесы TG 209 F1 Libra в комплексе со встроенным Фурье ИК-спектрометром Perseus на базе Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

### Результаты

#### 1.1 Термогравиметрия

На рисунке 4 представлены результаты термогравиметрии образцов древесины кедр (средние значения ТГ и ДТГ данных, полученных в результате термического анализа для семи деревьев кедр из каждой категории). В таблице 1 представлены термические характеристики образцов древесины кедр.

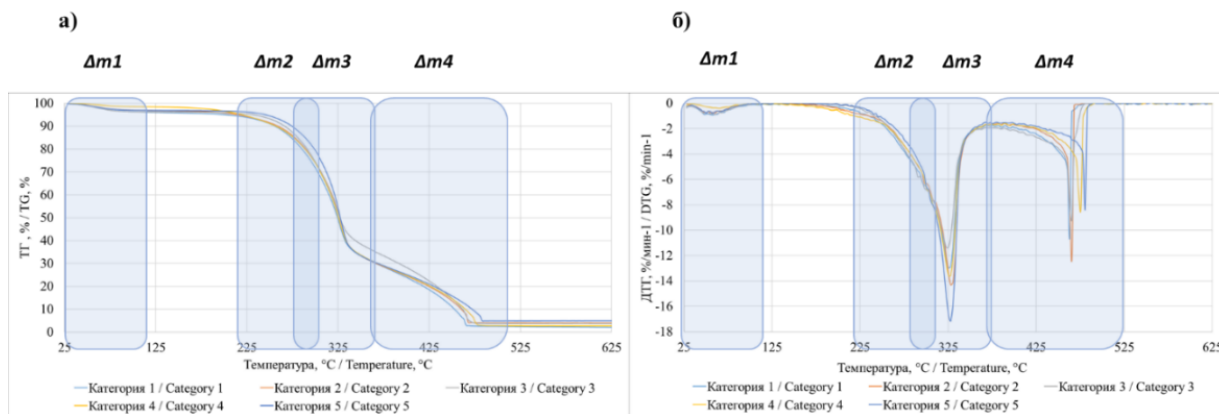


Рисунок 4. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) для окислительной термодеструкции образцов кедра.

Figure 4. TG (a) and DTG (b) curves for oxidative thermal destruction of cedar samples

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Таблица 1

Стадии термической деструкции образцов древесины кедра в окислительной атмосфере

Table 1

Stages of thermal destruction of cedar wood samples in an oxidizing atmosphere

Образец / Sample	$\Delta m1$	$\Delta m2$	$\Delta m3$	$\Delta m4$	$\Delta m3/\Delta m4$
Категория 1 / Category 1	3,45±0,705	20,17±1,506	42,47±2,392	29,17±2,990	1,45
Категория 2 / Category 2	2,97±0,503	20,03±1,531	47,10±1,174	25,70±1,819	1,83
Категория 3 / Category 3	3,39±0,826	16,59±1,161	45,29±1,207	32,25±1,016	1,40
Категория 4 / Category 4	1,96±0,600	19,18±2,254	41,92±1,146	32,53±1,733	1,28
Категория 5 / Category 5	2,85±0,724	16,57±1,099	37,93±1,022	37,44±1,447-	1,01

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Потеря массы на кривых ДТГ (рис. 4 б) ниже 180 °С приписывается испарению воды ( $\Delta m1$ ) и высвобождению летучих соединений древесины варьировалась от 1,96 до 3,45 % (табл. 1). Экстрактивные вещества древесины разрушаются при также при низкой температуре и могут оказывать влияния на термическую стабильность основных полимерных компонентов древесинного вещества и удаление экстрактивных веществ последовательно приводит к повышению термической стабильности древесины в целом [20].

В диапазоне 180-700 °С образцы древесины кедра показали три пика (плеча) на кривых ДТГ (рис. 4 б), связанных с тремя последовательными стадиями потери массы, которые представляют собой термическую деградацию основным компонентов древесины и сжигание угля [21, 22]. Анализируя кривые ТГ и ДТГ можно заметить, что термическая деградация образцов кедра полностью завершается при 500 °С для всех образцов. На рисунке 5 представлены значения основных полимерных компонентов образцов кедра в зависимости от его жизненного состояния.

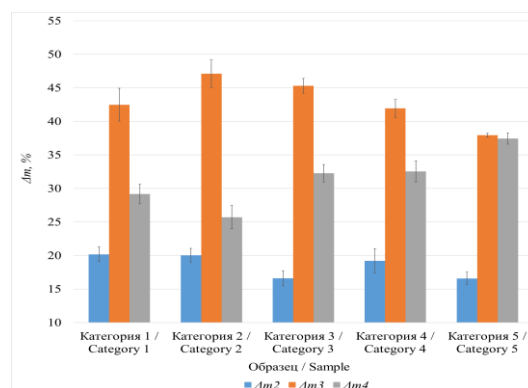


Рисунок 5. Изменение основных полимерных компонентов древесины кедра на разных стадиях жизненного состояния.

Figure 5. Changes in the main polymer components of cedar wood at different stages of life.

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Первая стадия относится к разложению или дегидратации гемицеллюлоз ( $\Delta m2$ ) в диапазоне 180-308 °С [23] и рассматривается как плечо на ДТГ-кривых для всех образцов кедра. До ~300 °С древесина не окисляется и проявляются реакции, которые могут быть типичны для пиролиза [24]. Для всех исследованных образцов кедра термическая деструкция гемицеллюлоз было идентифицировано

как плечо в температурном диапазоне 288-308 °С. Минимальная температура термической деструкции гемицеллюлоз выявлена для образца Кат.3 (293,1 °С), а максимальная – для образцов Кат. 4 (303,7 °С) (рис. 4 б). Различия в термической стабильности гемицеллюлоз могут свидетельствовать об их неодинаковом химическом составе, который формируется в процессе жизненного состояния дерева под влиянием специфических факторов среды.

Вторую стадию принято связывать с терморазложением кристаллической формы целлюлозы и частично лигнина ( $\Delta m_3$ ) до ~380 °С. Целлюлоза характеризуется высокой степенью упорядоченности и является термически стабильным компонентом древесины по сравнению с гемицеллюлозой. На данной стадии термической деструкции наименее стабильные алифатические группы разрушаются посредством гомолитического расщепления связей С–С и СН, что приводит к образованию высоко конденсированного и сшитого углеродистого материала [23]. Термическая деструкция целлюлозы имела форму четкого пика ДТГ (рис. 4 б) для всех образцов кедра. Минимальная температура пика ДТГ определена для образцов Кат.3 (325,7 °С), максимальная – для Кат.5 (329,1 °С). Потеря массы варьировалась от 37,9% до 47,1% (рис. 5), где образцы Кат. 2 и Кат. 3 были выше образцов Кат. 1 на 10,7 % и на 5,3 %, соответственно. Затем значение  $\Delta m_3$  уменьшается по мере усыхания деревьев. Также из рисунка 4 б видны различия в максимальной скорости потери массы. Так, например, минимальное значение было выявлено для образцов Кат. 3 (-11,6 %), максимальное – для образцов Кат. 5 (-17,1%). Разная термическая стабильность образцов обусловлена увеличением индекса кристалличности и размерами кристаллитов целлюлозного комплекса. Известно, что молекулы целлюлозы представлены длинными гликозидными участками, которые способствуют увеличению термической стабильности древесины. То есть чем больше размер кристаллитов целлюлозы, тем выше термическая стабильность образца древесины [25, 26]. Таким образом, установлено, что наибольшей термической стабильностью обладает образец Кат. 3 (330 °С), а минимальной – Кат. 5 (325 °С). Образцы Кат. 3 выявил самую медленную скорость разложения целлюлозного комплекса из всех исследованных образцов древесины. На термическую стабильность целлюлозы также могут оказывать влияние экстрактивные вещества. Выявлено, что чем выше их содержание, тем медленнее происходит процесс

деградации древесины [27], что согласуется с данными, полученными для образцов Кат. 3.

Третья стадия обусловлена преобладающим термохимическим процессом, связанным с разложением и превращением лигнина ( $\Delta m_4$ ) и окислением ранее образованного угля [28]. Механизм термической деструкции лигнина изучен недостаточно полно. Вследствие сложности химического строения и многообразия связей в структуре лигнина, при его термической деструкции протекает множество различных реакций. Сначала осуществляются реакции разрыва более слабых связей, а при более высокой температуре – и более прочных, деструктирующих уже по другому механизму. Термическое разложение лигнина начинается при довольно низких температурах. Лигнин является достаточно термостабильным высокомолекулярным компонентом древесины, что обусловлено его ароматической природой [29]. Самое высокое значение  $\Delta m_4$  выявлено у Кат. 5, а минимально – у Кат. 1. Также, замечена тенденция на повышение  $\Delta m_4$  в зависимости от жизненного состояния деревьев (рис. 5). Образцы Кат. 2 выявили небольшое снижение значения  $\Delta m_4$  по сравнению с Кат. 1 на 11,5 %, но в последствии  $\Delta m_4$  повышается. Пиковые температуры были максимальны для Кат. 4 (475,3 °С) и для Кат. 5 (480,5 °С) (рис. 4 б), что указывает на высокую термическую стабильность лигнина о образцах Кат. 4. Остальные образцы выявили достаточно равные значения температуры при ~465 °С (рис. 5 б). Также, выявлено, что образцы Кат. 4 и Кат. 5 имели высокие значения по скорости потери массы по сравнению с образцами Кат. 1-Кат. 3, что указывает на быструю скорость разложения именно термостабильного лигнина образцов Кат. 4 и Кат. 5. Отношение целлюлозы к лигнину ( $\Delta m_3/\Delta m_4$ ) (табл. 1) обеспечивает надежную интерпретацию полученных данных является убедительным параметром для определения степени дегградации древесины. Расчеты показали, что  $\Delta m_3/\Delta m_4$  снижается по мере усыхания исследуемых образцов кедра (за исключением образцов Кат. 2), что по нашему мнению указывает на изменения в лигно-углеводном комплексе в образцах Кат. 3-Кат. 5 вследствие влияния климатического тренда.

В таблице 2 представлена матрица попарных различий компонентного состава древесины кедра сибирского между группами (p-value<0,05 после fdg-коррекции) на разной стадии усыхания. В таблице 3 показаны средние значения  $\Delta m$  в древесине кедра сибирского для исследуемых образцов.

Таблица 2

Матрица попарных различий компонентного состава древесины кедра сибирского между группами (p-value<0,05 после fdr-коррекции) на разной стадии усыхания

Table 2

Matrix of pairwise differences in the component composition of Siberian cedar wood between groups (p-value < 0.05 after fdr-correction) at different stages of dieback

Образец / Sample	Категория 1 / Category 1	Категория 2 / Category 2	Категория 3 / Category 3	Категория 4 / Category 4	Категория 5 / Category 5
Категория 1 / Category 1	-	0,11	0,07	0,01	0,01
Категория 2 / Category 2	-	-	0,01	0,01	0,01
Категория 3 / Category 3	-	-	-	0,01	0,05
Категория 4 / Category 4	-	-	-	-	0,01
Категория 5 / Category 5	-	-	-	-	-

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Таблица 3

Средние значения  $\Delta m$  в древесине кедра сибирского для контрольной и опытных групп

Table 3

Average values of  $\Delta m$  in Siberian cedar wood for the control and experimental groups

Образец / Sample	$\Delta m, 1$ %	$\Delta m2, \%$	$\Delta m3, \%$	$\Delta m4, \%$
Категория 1 / Category 1	3,6%	21,2%	44,6%	30,7%
Категория 2 / Category 2	3,1%	20,9%	49,2%	26,8%
Категория 3 / Category 3	3,5%	17,0%	46,5%	33,0%
Категория 4 / Category 4	2,1%	20,0%	43,8%	34,1%
Категория 5 / Category 5	3,0%	17,5%	40,0%	39,5%

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Из таблицы 2 и таблицы 3 видно, что MANOVA выявила значимые различия в химическом составе древесины между группами (p<0.05). Попарные сравнения с коррекцией fdr показали, что Кат. 4 и Кат. 5 значимо отличаются от контроля и между собой, тогда как группы Кат. 2 и Кат. 3 статистически не отличались от контроля по многомерному критерию. Анализ компонентного состава выявил, что в Кат. 2 наблюдалось повышение доли целлюлозы и снижение лигнина, что может отражать раннюю стрессовую реакцию укрепления клеточных стенок; в группе Кат. 3 зафиксировано снижение гемицеллюлоз и рост лигнина, характерные для переходной фазы; в группах Кат. 4 и Кат. 5 изменения соответствовали прогрессирующей деградации с падением целлюлозы и накоплением лигнина.

### 1.2 Анализ кинетики

Важным элементов количественной оценки результатов термогравиметрии для выявления различий физико-химических свойств между образцами является анализ кинетики процессов, которые регистрируются в процессе термической деструкции. Метод Озавы-Флинна-Уолла позволяет связать макрокинетические параметры процесса (энергию активации) с изменениями в химическом составе и надмолекулярной структуре древесины, вызванными деградацией [30]. Графическая интерпретация кинетического анализа образцов кедра сибирского методом ОФУ представлена на рисунке 6. Кинетические параметры пиролиза образцов кедра сибирского, полученные методом представлены в таблице 4

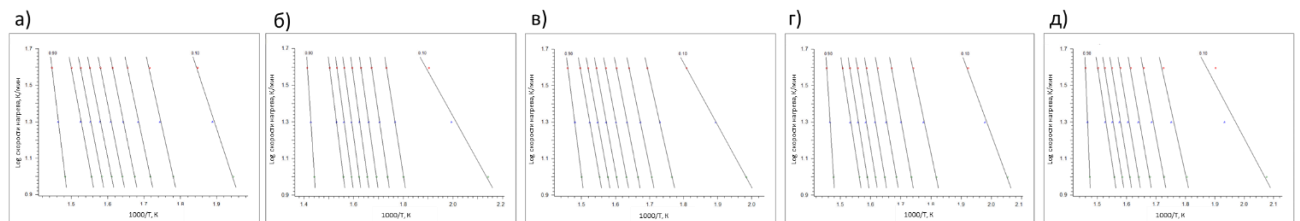


Рисунок 6. Линейзация кинетического анализа методом ОФУ образцов кедра сибирского для категории 1 (а), категории 2 (б), категории 3 (в), категории 4 (г), категории 5 (д)

Figure 6. Linearization of kinetic analysis by the Ozawa–Flynn–Wall method of Siberian cedar samples for category 1 (a), category 2 (b), category 3 (c), category 4 (d), category 5 (e)

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Кинетические параметры пиролиза образцов кедр сибирского, полученные методом ОФУ

Table 4

Kinetic parameters of pyrolysis of Siberian cedar samples obtained by the OFW method

$\alpha$	Категория 1 / Category 1	Категория 2 / Category 2	Категория 3 / Category 3	Категория 4 / Category 4	Категория 5 / Category 5
0,1	108,68±2,642	39,05±2,831	57,98±4,578	79,17±5,014	47,057±4,107
0,2	163,41±5,722	156,61±4,693	150,98±6,051	139,21±3,268	127,52±4,725
0,3	171,92±2,534	167,12±7,723	163,85±6,181	167,95±1,697	152,65±4,356
0,4	181,55±3,778	173,37±3,342	171,62±5,956	169,51±2,897	161,58±5,551
0,5	181,65±4,075	176,01±5,333	178,27±4,892	173,45±4,981	172,95±2,724
0,6	180,9±5,052	179,54±3,074	178,95±3,768	173,61±2,682	172,51±5,283
0,7	186,08±3,714	186,47±2,512	181,28±3,068	180,45±4,711	183,32±2,336
0,8	194,32±2,294	195,62±3,075	187,84±5,138	194,95±1,935	193,58±3,236
0,9	310,32±7,479	405,31±6,965	279,42±8,079	485,02±6,659	763,35±8,385

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Графические выражения уравнения (1) показаны набором изоконверсионных линий (рис. 6), соединяющих точки с одинаковой степенью конверсии при разных скоростях нагрева. Определение энергии активации проведено с помощью метода наименьших квадратов и аппроксимирования зависимости  $\ln\beta$  от  $1/T$  к виду линейной функции и исходя из ее наклона. Энергию активации при степенях конверсии 0,1 и 0,9 следует считать экстремальной, ее значения соответствуют разным стадиям пиролиза: начальной (стадии потери влаги) и конечной (образованию коксового остатка в конце пиролиза биомассы) [31]. Изоконверсионные линии на графике метода ОФУ (рис. 6) характеризуются разными наклонами, что дает возможность объединить их в три группы аналогично результатам ТГ/ДТГ-анализа.

На основании данных таблицы 4 нами была построена зависимость значений энергии активации от жизненного состояния деревьев кедр сибирского (рис. 7). При расчете средних величин энергии активации не учитывались крайние значения  $\alpha$  (0,1 и 0,9).

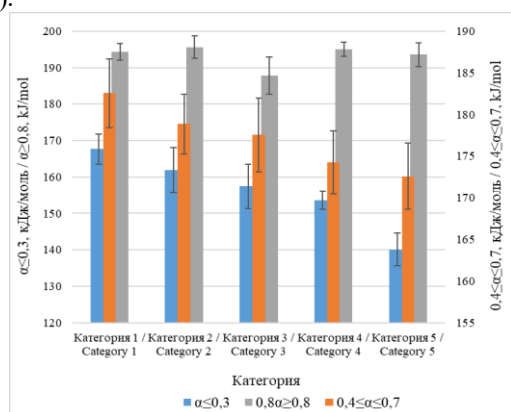


Рисунок 7. Зависимость значений энергии активации от жизненного состояния деревьев кедр.

Figure 7. Dependence of activation energy values on the vital state of cedar trees

Источник: собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Значения энергии активации, рассчитанные методом ОФУ, различаются в зависимости от степени конверсии, что указывает на существование сложного механизма термической деструкции образцов кедр сибирского, происходящих в твердой фазе [28]. Выделяются три интервала: в первом ( $0,1 \leq \alpha \leq 0,3$ ) энергия активации увеличивается и, здесь, главным образом происходит разложение гемицеллюлоз и аморфной целлюлозы. Средние значения энергии активации термической деструкции гемицеллюлоз и аморфной целлюлозы плавно снижались по мере ослабления деревьев кедр сибирского, с которых были отобраны образцы для анализа. Так, разница между образцами Кат. 1 и Кат. 2 составила 15,9 % (рис. 7) В интервале  $0,4 \leq \alpha \leq 0,7$  деструкции подвергается целлюлоза. В данном интервале мы наблюдали такое же плавное снижение значений энергии активации целлюлозы в процессе ослабления деревьев кедр. Образцы Кат. 5 выявили значения энергии активации на 5,5 % ниже таковых в образцах Кат. 1 (рис. 7). На конечной стадии пиролиза образцов кедр сибирского ( $\alpha \geq 0,8$ ) наблюдается резкое увеличение значений энергии активации. При температурах свыше 500°C процесс деструкции лигнина включает как фрагментацию внутримолекулярных связей, так и образование мономерных продуктов распада (фенолов и их производных). Пиролитическая деградация лигнина при температурах выше 600-700°C сопровождается разложением некоторых ароматических соединений и формированием структуры угля [32]. Тенденции изменения значений энергии активации в данном диапазоне нами обнаружено не было.

В таблице 5 представлены результаты попарных сравнений энергии активации, методом Озавы-Флинна-Уолла, для исследованных образцов кедр сибирского (перестановочный t-test, 5000 перестановок, fdr-коррекция).

Результаты попарных сравнений энергии активации, рассчитанной методом Озава-Флинна-Уолла, для групп с разной степенью повреждения кроны (перестановочный t-test, 5000 перестановок, fdr-коррекция)

Table 5

Results of pairwise comparisons of activation energy calculated by the Ozawa-Flynn-Wall method for groups with different degrees of crown damage (permutation t-test, 5000 permutations, fdr correction)

	Кат. 1 / Cat. 1	Кат. 2 / Cat. 2	Кат. 3 / Cat. 3	Кат. 4 / Cat. 4	Кат. 5 / Cat. 5
$0,1 \leq \alpha \leq 0,3$					
Кат. 1 / Cat. 1	-	0,076	0,029	0,029	0,029
Кат. 2 / Cat. 2	-	-	0,086	0,029	0,029
Кат. 3 / Cat. 3	-	-	-	0,217	0,029
Кат. 4 / Cat. 4	-	-	-	-	0,029
Кат. 5 / Cat. 5	-	-	-	-	-
$0,4 \leq \alpha \leq 0,7$					
Кат. 1 / Cat. 1	-	0,042	0,031	0,031	0,031
Кат. 2 / Cat. 2	-	-	0,199	0,031	0,031
Кат. 3 / Cat. 3	-	-	-	0,031	0,042
Кат. 4 / Cat. 4	-	-	-	-	0,042
Кат. 5 / Cat. 5	-	-	-	-	-
$\alpha \geq 0,8$					
Кат. 1 / Cat. 1	-	0,573	0,096	0,573	0,684
Кат. 2 / Cat. 2	-	-	0,065	0,755	0,557
Кат. 3 / Cat. 3	-	-	-	0,065	0,065
Кат. 4 / Cat. 4	-	-	-	-	0,497
Кат. 5 / Cat. 5	-	-	-	-	-

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

Из таблицы 5 видно, что значения энергии активации в интервале  $0,1 \leq \alpha \leq 0,3$  начинают снижаться в образцах Кат. 3 и достигают минимальных значений в образцах Кат. 3 и Кат. 4. Энергия активации интервала  $0,4 \leq \alpha \leq 0,7$  выявила изменения в образцах Кат. 2. В свою очередь, значения энергии активации интервала  $\alpha \geq 0,8$  не меняются в процессе усыхания кедра.

### Обсуждение

В контексте глобального потепления повышение температуры вероятно станет ключевым абиотическим стрессом, к которому растениям придется приспособиться. Не смотря на обширные исследования, проведенные по отдельным стрессам, растения в природе подвергаются комбинации стрессоров. Это явление стало более выраженным в последние годы из-за усиливающихся последствий климата. Таким образом, стресс от засухи в сочетании с тепловым стрессом был определен как важный триггер всемирной гибели деревьев в контексте климатического тренда [9]. Физиологическая и биохимическая реакция растения на комбинированный стресс в значительной степени отличается часто от реакции при отдельных стрессах. Поэтому было высказано предположение, что растения воспринимают комбинированный стресс как новое стрессовое состояние [33]. В условиях двойного стресса

эффективность фотосинтеза снижается, что в свою очередь сокращает жизненный цикл растений и снижает их производительность. Хорошо известно, что фотосинтез является одним из наиболее чувствительных к комбинированному стрессу физиологических процессов, и его последствия приводят к дисбалансу клеточной энергии [9, 10]. Разумно полагать, что биосинтез целлюлозы должен реагировать на фотосинтетические колебания, вызывая изменения в доступности некоторых предшественников, необходимых для биосинтеза целлюлозы. В настоящее время есть исследования, описывающие связь между влиянием фотосинтеза и модуляцией клеточной стенки. Недавно было показано, что фотосинтетическая активность является основным регулятором синтеза и отложения целлюлозы [34].

Комбинированный стресс приводит к снижению кристаллической целлюлозы [35], что подразумевает обратную зависимость между скоростью синтеза целлюлозы и ее кристаллическостью. В исследованных нами образцах было выявлено повышенные значения показателя, соответствующего содержанию целлюлозы ( $\Delta m3$ ) и снижение такового для лигнина ( $\Delta m4$ ) в образцах Кат. 2 (рис. 6). В тоже время, в образцах Кат. 3 выявлено повышение значения  $\Delta m4$  и небольшое снижение  $\Delta m3$ . Данный факт, по нашему мнению, может быть связан с процессами, с помощью

которых происходит замедление лигнификации в образцах Кат. 2, что обусловлено ответом на комбинированный стресс [36], а повышенное значение  $\Delta m_3$  может быть связано с запасанием сахаров с целью синтеза целлюлозы на начальном этапе стресса у дерева. В условиях комбинированного стресса повышенный синтез целлюлозы может быть средством, с помощью которого поддерживается целостность клеточной стенки и давления тургора клеток, что позволяет обеспечить непрерывный рост при недостатках влаги [35]. В деревьях Кат. 3 увеличение показателя  $\Delta m_4$  и повышенное по сравнению с контрольными образцами (Кат. 1)  $\Delta m_3$  (рис. 6) может быть связано с увеличивающимся синтезом лигнина в клеточных стенках продолжающимися процессами запасанием сахаров. В случае с деревьями Кат. 4 и Кат. 5, был выявлен эффект, связанный с продолжающимся ростом  $\Delta m_4$  и одновременным снижением  $\Delta m_3$  в процессе усыхания деревьев кедра, что прекращением синтеза целлюлозы, снижением фотосинтетической активности и истощением запасов углеводов, и пассивным накоплением лигнина [37]. Содержание лигнина в кедрах увеличивается в процессе их роста под действием тепла и дефицита влаги. Как фенольный биополимер, лигнин является одним из важных продуктов пути биосинтеза фенилпропаноидов растений в сосудистых растениях. При комбинированном стрессе деревья растут ненормально и сопровождаются физиологическими изменениями. Такой стресс может значительно изменить содержание лигнина или повлиять на его состав и структурную перестройку [38]. Содержание гемицеллюлоз в процессе усыхания деревьев практически не меняется. Возможно, этот факт связан со способностью гемицеллюлоз связывать целлюлозу в ее более аморфное состояние, что является адаптивным механизмом регуляции развития клеточной стенки в результате комбинированного стресса [35].

В свою очередь, падение значений энергии активации в участках, которые относятся к аморфной целлюлозе и к кристаллической ее части (рис. 7) может быть связано с деструктивными процессами в ее структурах в процессе усыхания деревьев. Аморфные участки целлюлозы являются не неупорядоченными областями в макромолекулярной цепи полисахарида, чередующиеся с кристаллическими участками [39], возможно, в результате влияния комбинированного стресса разрушаются быстрее, в следствии чего, меньше энергии нужно для их дальнейшей деструкции. Следовательно, энергия активации аморфной структуры снижается быстро. Кристаллическая структура целлюлозы является высокоупорядоченной надмолекулярной системой и

прочнее аморфной части. По нашему мнению, под действием стресса, в кристаллической структуре нарушается упорядоченность, что облегчает термическое разложение даже кристаллических областей. Значения энергии активации лигнина практически не меняется в процессе усыхания деревьев кедра (рис. 7). Так как лигнин разлагается в широком диапазоне температур (200-900°C), и его пиролиз идет медленно [40], следовательно, расчет энергии активации менее точный и менее чувствительный к небольшим изменениям.

### Выводы

Впервые жизненное состояние темнохвойных насаждений на примере кедра сибирского, произрастающей на Юге Сибири было изучено с помощью точного экспрессного аналитического метода исследования – термогравиметрия. Примененный метод позволил выявить динамику изменения физико-химических характеристик клеточной стенки у кедра сибирского под воздействием биотического стресса. Полученные данные согласуются с гипотезой о ведущей роли комбинированного стресса рост и продуктивность деревьев. Наши результаты показывают, что самая ранняя стадия диагностирования стресса возможна на жизненном состоянии «ослабленные деревья» с дефолиацией 11–25% и незначительным изменением окраски хвои и единичными повреждениями. На данном этапе происходит снижение относительного содержания лигнина и повышение относительного содержания целлюлозы. Вышеуказанный факт открывает возможность для выявления деревьев, которые находятся в критическом состоянии. Кроме того, увеличивающееся относительное содержание лигнина и снижающееся относительное содержание целлюлозы может быть маркером для установления критической фазы. Также, одновременное снижение значений энергии активации целлюлозы маркером деградации ее структуры.

Риск усыхания кедровых насаждения на территории Тоджинского лесничества в северо-восточной части Республики Тыва Южной Сибири подчеркивает настоятельную необходимость в крупномасштабном и пространственно-точном мониторинге для выявления быстро меняющихся изменений в темнохвойных насаждениях. Изменение климата влечет за собой усыхание деревьев, следовательно, увеличивается риск пожаров, которые приводят к ослаблению древостоев, снижению продуктивности и возможности атак вредителями и патогенами.

Проблема усыхания кедра сибирского приобретает особую актуальность в системе лесного хозяйства ввиду существующего правового режима его эксплуатации. Согласно действующему лесному законодательству, рубки жизнеспособных кедровых

насаждений находятся под полным запретом, за исключением случаев санитарных мероприятий в усыхающих древостоях, где допускаются исключительно выборочные рубки ограниченной интенсивности. Поэтому последовательное изучение физико-химических процессов

темнохвойных насаждений имеет важное значение для внедрения своевременных мер по управлению рисками в лесном хозяйстве.

### Список литературы

1. Куулар Х.Б. Состояние и динамика границ кедровых лесов хребта Западный Танну-Ола в Республике Тыва. Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2023. – Т. 78. – № 4. – С. 40-50. – DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4>.
2. Кошкаров А.Д., Кошкарова В.Л., Назимова Д.И. Многовековые климатические тенденции трансформации кедровых лесов разных лесорастительных зон Западного Саяна // Сибирский лесной журнал. – 2021. – № 2. – С. 3-16. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210201>.
3. 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: Schiekhoff, U., Singh, R., Mal, S. (eds) Mountain Landscapes in Transition. Sustainable Development Goals Series. 2022; 403-416. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16).
4. Kharuk, V.I., Im S.T., Petrov I.A. Alpine ecotone in the Siberian Mountains: Vegetation response to warming. Journal of Mountain Science. 2021; 18 (12): 3099-3108. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6876-2>.
5. Kharuk V.I., Petrov I.A., Golyukov A.S., Im S.T., Shushpanov A.S. Mountain taiga in a warming climate: contrast of Siberian pine growth along an elevation gradient. Forests. 2024; 15 (1): 50. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15010050>.
6. Шишикин А.С., Мурзакматов Р.Т., Брюханов И.И. Восстановление усыхающих горных кедровников юга Сибири. Сибирский лесной журнал. – 2024. – № 5. – С. 70–78. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240507>.
7. Petrov I.A., Kharuk V.I., Golyukov A.S., Im S.T., Ondar S.O., Shushpanov A.S. Siberian pine and larch response to warming-drying climate in the Southern boundary of their range. Forests. 2024; 15 (6): 1054. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061054>.
8. Makunina N.I., Egorova A.V., Pisarenko O.Y. Drawing of potential areas of plant communities for geobotanical zoning purposes (on example of Tuva forests). Contemporary Problems of Ecology. 2020; 13: 412-417. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425520040095>.
9. Dias M.C., De Oliveira J.M.F., Marum L., Pereira V., Almeida T., Nunes S., Araújo M., Pereira J.M.M., Correia C., Santos C. *Pinus elliottii* and *P. Elliottii* x *P. Caribaea* hybrid differently cope with combined drought and heat episodes Industrial Crops and Products. 2022; 176: 114428. – DOI: <http://10.1016/j.indcrop.2021.114428>.
10. Gong X.W., Hao G.Y. The synergistic effect of hydraulic and thermal impairments accounts for the severe crown damage in *Fraxinus mandshurica* seedlings following the combined drought-heatwave stress. Science of The Total Environment. 2023; 856 (1): 159017. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159017>.
11. Paredes R., Castells B., Tascón A. Thermogravimetric assessment of biomass: unravelling kinetic, chemical composition and combustion profiles. Fire. 2024; 7(11): 396. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7110396>.
12. Нагимов З.Я., Шевелина И.В., Нагимов В.З., Артемьева И.Н. Лесотаксационные измерения. Учебное пособие. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2021; 95.
13. Schwärzel K., Seidling W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. Strategy and Implementation of ICP Forests. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, 2022; 12.
14. 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. (ed.). Hamburg: Thünen Institute of Forest Ecosystems, 2020; 49.
15. 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>.
16. 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>.

17. 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>.
18. Fischer, O., Lemaire, R. & Bensakhria, A. Thermogravimetric analysis and kinetic modeling of the pyrolysis of different biomass types by means of model-fitting, model-free and network modeling approaches. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024; 149: 10941-10963. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12868-w>.
19. Lu M., Zhou B. A one-way MANOVA test for high-dimensional data using clustering subspaces. *Statistics & Probability Letters*. 2025; 217: 110293. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2024.110293>.
20. Albert, C.M., Liew, K.C. A review on the role of thermogravimetric analysis in assessing thermal stability and degradation of wood. *Wood Science and Technology*. 2025; 59: 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-025-01665-3>.
21. Barzegar R., Yozgatligil A., Olgun H., Atimtay A.T. TGA and kinetic study of different torrefaction conditions of wood biomass under air and oxy-fuel combustion atmospheres. *Journal of the Energy Institute*. 2020; 93(3): 889-898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.001>.
22. Czajkowski Ł., Olek W., Weres J. Effects of heat treatment on thermal properties of European Beech wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020; 78(3): 425-431. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01525-w>.
23. Fraga L.G., Silva J., Teixeira S., Soares D., Ferreira M., Teixeira J. Influence of operating conditions on the thermal behavior and kinetics of pine wood particles using thermogravimetric analysis. *Energies (Basel)*. 2020; 13(11). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112756>.
24. Hill C., Altgen M., Rautkari L. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*. 2021; 56(11): 6581-6614. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.
25. Nurazzi N.M., Asyraf M.R.M., Rayung M., Norrahim M.N.F., Shazleen S.S., Rani M.S.A., Shafi A.R., Aisyah H.A., Radzi M.H.M., Sabaruddin F.A., Ilyas R.A., Zainudin E.S., Abdan K. Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments. *Polymers (Basel)*. 2021; 13(16): 2756. –DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162710>.
26. Shapchenkova O., Loskutov S., Aniskina A., Börcsök Z., Pásztor Z. Thermal characterization of wood of nine European tree species: thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022; 80(2): 409-417. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01763-6>.
27. Keržič E., Vek V., Oven P., Humar M. Changes in wood durability due to leaching of biologically active substances (extractives) resulting from weathering. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03921. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03921>.
28. Фетисова О.Ю., Микова Н.М., Таран О.П. Оценка применимости модельных и безмодельных методов кинетического анализа неизотермического пиролиза коры пихты. *Кинетика и катализ*. 2020; 6: 804-811.
29. Riaz S., Oluwoye I., Al-Abdeli Y.M. Oxidative torrefaction of densified woody biomass: Performance, combustion kinetics and thermodynamics. *Renewable Energy*. 2022; 199: 908-918. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.023>.
30. Koga N., Vyazovkin S., Burnham A.K., Favregeon L., Muravyev N., Pérez-Maqueda L.A., Saggese C., Sánchez-Jiménez P.E. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics. *Thermochimica Acta*. 2023; 719: 179384. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179384>.
31. Elkhalfi S., Mariyam S., Mackey H.R., Al-Ansari T., McKay G., Parthasarathy P. Pyrolysis valorization of vegetable wastes: thermal, kinetic, thermodynamics, and Pyrogas analyses. *Energies (Basel)*. 2022; 15(17): 6277. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176277>.
32. Lu X., Gu X. A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2022; 15(1): 106. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02203-0>.
33. Hwang Y.B., Park K.S., Yoo S.Y., Kim T.W. Interplay of stress responses in pear tree revealed by chlorophyll fluorescence under combined *Erwinia amylovora* infection and temperature stress. *Horticulturae*. 2025; 11(11): 1358. – DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111358>.
34. Maleki S.S., Mohammadi K., Movahedi A., Wu F. and Ji K.S. Increase in cell wall thickening and biomass production by overexpression of *PmCesA2* in poplar. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 110. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00110>.
35. Han Y., Yang Y., Luo H., Cui J., Kuang B., Zhang X., Sun J., Xu J.W., Liu F. Water stress reduces cellulose deposition in the cell wall and increases wax content, resulting in decreased fiber quality. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 1(16): 1611390. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1611390>.

36. Han X., Zhao Y., Chen Y., Xu J., Jiang C., Wang X., Zhuo R., Lu M.Z., Zhang J. Lignin biosynthesis and accumulation in response to abiotic stresses in woody plants. *Forestry Research*. 2022; 12(2): 9. – DOI: <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0009>.
37. Spies P.A., Keplinger T., Horbelt N., Reppe F., Scoppola E., Eder M., Fratzl P., Burgert I., Rüggeberg M. Cellulose lattice strains and stress transfer in native and delignified wood. *Carbohydrate Polymers*. 2022; 15(296): 119922. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119922>.
38. Hang J., Tuskan G.A., Tschaplinski T.J., Muchero W., Chen J. Transcriptional and post-transcriptional regulation of lignin biosynthesis pathway genes in *Populus*. *Frontiers in Plant Science*. 2020; (11): 652. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00652>.
39. Ren W., Guo F., Zhu J. A comparative study on the crystalline structure of cellulose isolated from bamboo fibers and parenchyma cells. *Cellulose*. 2021; 28: 5993-6005. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03892-w>.
40. Jalilian M., He Q., Hu Y. Thermal Characterizations of Lignin. In: Jawaid, M., Ahmad, A., Meraj, A. (eds.). Singapore: Springer, Singapore, 2025; 375-394. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-96-7633-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-96-7633-0_16).

### References

1. Kuular Kh.B. *Sostoyanie i dinamika granic kedrovyyh lesov hrebta Zapadnyj Tannu-Ola v Respublike Tyva*. [The state and dynamics of the borders of cedar forests at the Western Tannu-Ola Range in the Tyva Republic]. In: Lomonosov Geography Journal. 2023; 4: 40-50. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4>.
2. Koshkarov A.D., Koshkarova V.L., Nazimova D.I. *Mnogovekovyye klimaticheskie tendencii transformacii kedrovyyh lesov raznyh lesorastitel'nyh zon Zapadnogo Sayana*. [Centuries-old climatic trends of transformation of the Siberian stone pine forests in different forest vegetation zones of the Western Sayan Mountains]. In: *Siberian Forestry Journal*, 2021; 2: 3-16. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210201>.
3. 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. 2022; 403-416. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70238-0_16).
4. Kharuk, V.I., Im S.T., Petrov I.A. *Alpine ecotone in the Siberian Mountains: Vegetation response to warming*. *Journal of Mountain Science*. 2021; 18 (12): 3099-3108. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6876-2>.
5. Kharuk V.I., Petrov I.A., Golyukov A.S., Im S.T., Shushpanov A.S. *Mountain taiga in a warming climate: contrast of Siberian pine growth along an elevation gradient*. *Forests*. 2024; 15 (1): 50. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f15010050>.
6. Shishikin A.S., Murzakmatov R.T., Bryukhanov I.I. *Vosstanovlenie usyhayushih gornyyh kedrovnikov yuga Sibiri*. [Restoration of drying mountain cedar forests in southern Siberia]. In: *Siberian Forestry Journal*, 2024; 5: 70-78. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20240507>.
7. Petrov I.A., Kharuk V.I., Golyukov A.S., Im S.T., Ondar S.O., Shushpanov A.S. *Siberian pine and larch response to warming-drying climate in the Southern boundary of their range*. *Forests*. 2024; 15 (6): 1054. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15061054>.
8. Makunina N.I., Egorova A.V., Pisarenko O.Y. *Drawing of potential areas of plant communities for geobotanical zoning purposes (on example of Tuva forests)*. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020; 13: 412-417. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425520040095>.
9. Dias M.C., De Oliveira J.M.F., Marum L., Pereira V., Almeida T., Nunes S., Araújo M., Pereira J.M.M., Correia C., Santos C. *Pinus elliottii and P. elliottii x P. caribaea hybrid differently cope with combined drought and heat episodes*. *Industrial Crops and Products*. 2022; 176: 114428. DOI: <http://10.1016/j.indcrop.2021.114428>.
10. Gong X.W., Hao G.Y. *The synergistic effect of hydraulic and thermal impairments accounts for the severe crown damage in Fraxinus mandshurica seedlings following the combined drought-heatwave stress*. *Science of The Total Environment*. 2023; 856 (1): 159017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159017>.
11. Paredes R., Castells B., Tascón A. *Thermogravimetric assessment of biomass: unravelling kinetic, chemical composition and combustion profiles*. *Fire*. 2024; 7(11): 396. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7110396>.
12. Nagimov Z.Ya., Shevelina I.V., Nagimov V.Z., Artemyeva I.N. *Lesotaksacionnye izmereniya. Uchebnoe posobie* [Forest Inventory Measurements. Tutorial]. 2021; 95 (In Russ.).
13. Schwärzel K., Seidling W., Hansen K., Strich S., Lorenz M. *Strategy and Implementation of ICP Forests*. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.). Germany: Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, 2022; 12.
14. 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*. (ed.). Hamburg: Thünen Institute of Forest Ecosystems, 2020; 49.
15. Alekseev A., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforhin I., Chernikhovskiy 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>.
16. 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>.
17. 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>.
18. Fischer, O., Lemaire, R. & Bensakhria, A. *Thermogravimetric analysis and kinetic modeling of the pyrolysis of different biomass types by means of model-fitting, model-free and network modeling approaches*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024; 149: 10941-10963. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12868-w>.
19. Lu M., Zhou B. *A one-way MANOVA test for high-dimensional data using clustering subspaces*. Statistics & Probability Letters. 2025; 217: 110293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2024.110293>.
20. Albert, C.M., Liew, K.C. *A review on the role of thermogravimetric analysis in assessing thermal stability and degradation of wood*. Wood Science and Technology. 2025; 59: 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-025-01665-3>.
21. Barzegar R., Yozgatligil A., Olgun H., Atimtay A.T. *TGA and kinetic study of different torrefaction conditions of wood biomass under air and oxy-fuel combustion atmospheres*. Journal of the Energy Institute. 2020; 93(3): 889-898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.001>.
22. Czajkowski Ł., Olek W., Weres J. *Effects of heat treatment on thermal properties of European Beech wood*. European Journal of Wood and Wood Products. 2020; 78(3): 425-431. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01525-w>.
23. Fraga L.G., Silva J., Teixeira S., Soares D., Ferreira M., Teixeira J. *Influence of operating conditions on the thermal behavior and kinetics of pine wood particles using thermogravimetric analysis*. Energies (Basel). 2020; 13(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112756>.
23. Lu X., Gu X. *A review on lignin pyrolysis: pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency*. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2022; 15(1): 106. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02203-0>.
24. Hill C., Altgen M., Rautkari L. *Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity*. Journal of Materials Science. 2021; 56(11): 6581-6614. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.
25. Nurazzi N.M., Asyraf M.R.M., Rayung M., Norrrahim M.N.F., Shazleen S.S., Rani M.S.A., Shafi A.R., Aisyah H.A., Radzi M.H.M., Sabaruddin F.A., Ilyas R.A., Zainudin E.S., Abdan K. *Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments*. Polymers (Basel). 2021; 13(16): 2756. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162710>.
26. Shapchenkova O., Loskutov S., Aniskina A., Börcsök Z., Pásztor Z. *Thermal characterization of wood of nine European tree species: thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere*. European Journal of Wood and Wood Products. 2022; 80(2): 409-417. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01763-6>.
27. Keržič E., Vek V., Oven P., Humar M. *Changes in wood durability due to leaching of biologically active substances (extractives) resulting from weathering*. Case Studies in Construction Materials. 2024; 21: e03921. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03921>.
28. Fetisova O.Yu., Mikova N.M., Taran O.P. *Ocenka primenimosti model'nyh i bezmodel'nyh metodov kineticheskogo analiza neizotermicheskogo piroliza kory pihty*. [Assessment of the applicability of model and model-free methods for kinetic analysis of non-isothermal pyrolysis of fir bark]. In: Kinetics and Catalysis, 2020; 6: 804-811.
29. Riaz S., Oluwoye I., Al-Abdeli Y.M. *Oxidative torrefaction of densified woody biomass: Performance, combustion kinetics and thermodynamics*. Renewable Energy. 2022; 199: 908-918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.023>.
30. Koga N., Vyazovkin S., Burnham A.K., Favregeon L., Muravyev N., Pérez-Maqueda L.A., Saggese C., Sánchez-Jiménez P.E. *ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics*. Thermochimica Acta. 2023; 719: 179384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179384>.
31. Elkhalfifa S., Mariyam S., Mackey H.R., Al-Ansari T., McKay G., Parthasarathy P. *Pyrolysis valorization of vegetable wastes: thermal, kinetic, thermodynamics, and Pyrogas analyses*. Energies (Basel). 2022; 15(17): 6277. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176277>.
33. Hwang Y.B., Park K.S., Yoo S.Y., Kim T.W. *Interplay of stress responses in pear tree revealed by chlorophyll fluorescence under combined Erwinia amylovora infection and temperature stress*. Horticulturae. 2025; 11(11): 1358. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111358>.
34. Maleki S.S., Mohammadi K., Movahedi A., Wu F. and Ji K.S. *Increase in cell wall thickening and biomass production by overexpression of PmCesA2 in poplar*. Frontiers in Plant Science. 2020; 11: 110. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00110>.

35. Han Y., Yang Y., Luo H., Cui J., Kuang B., Zhang X., Sun J., Xu J.W., Liu F. *Water stress reduces cellulose deposition in the cell wall and increases wax content, resulting in decreased fiber quality*. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 1(16): 1611390. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1611390>.

36. Han X., Zhao Y., Chen Y., Xu J., Jiang C., Wang X., Zhuo R., Lu M.Z., Zhang J. *Lignin biosynthesis and accumulation in response to abiotic stresses in woody plants*. *Forestry Research*. 2022; 12(2): 9. DOI: <https://doi.org/10.48130/FR-2022-0009>.

37. Spies P.A., Keplinger T., Horbelt N., Reppe F., Scoppola E., Eder M., Fratzl P., Burgert I., Rüggeberg M. *Cellulose lattice strains and stress transfer in native and delignified wood*. *Carbohydrate Polymers*. 2022; 15(296): 119922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119922>.

38. Hang J., Tuskan G.A., Tschaplinski T.J., Muchero W., Chen J. *Transcriptional and post-transcriptional regulation of lignin biosynthesis pathway genes in Populus*. *Frontiers in Plant Science*. 2020; (11): 652. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00652>.

39. Ren W., Guo F., Zhu J. *A comparative study on the crystalline structure of cellulose isolated from bamboo fibers and parenchyma cells*. *Cellulose*. 2021; 28: 5993-6005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03892-w>.

40. Jalilian M., He Q., Hu Y. *Thermal Characterizations of Lignin*. In: Jawaid, M., Ahmad, A., Meraj, A. (eds.). Singapore: Springer, Singapore, 2025; 375-394. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-96-7633-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-96-7633-0_16).

### Сведения об авторах

✉ *Артемихина (Тюткова) 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, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: [tyukatie@gmail.com](mailto: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, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: [getgain@mail.ru](mailto:getgain@mail.ru).

*Кулаков Сергей Сергеевич* - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории защиты леса, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>, e-mail: [muscul-kul@yandex.ru](mailto:muscul-kul@yandex.ru).

*Демидко Денис Александрович* - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории защиты леса, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>, e-mail: [sawer-beetle@yandex.ru](mailto:sawer-beetle@yandex.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, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: [ura\\_danilyk@mail.ru](mailto:ura_danilyk@mail.ru).

*Анискина Антонина Александровна* - 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, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д.50, стр. 28, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>, e-mail: [aniskina\\_a@ksc.krasn.ru](mailto:aniskina_a@ksc.krasn.ru).

### Information about the authors

✉ *Ekaterina A. Artemikhina (Tyutkova)* - Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2364-4998>, e-mail: [tyukatie@gmail.com](mailto: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, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4130-9094>, e-mail: [getgain@mail.ru](mailto:getgain@mail.ru).

*Sergey S. Kulakov* – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarskij rabochij avenue, 31, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7074-5401>, e-mail: [muscul-kul@yandex.ru](mailto:muscul-kul@yandex.ru).

*Denis A. Demidko* - Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarskij rabochij avenue, 31, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6538-9828>, e-mail: [sawer-beetle@yandex.ru](mailto:sawer-beetle@yandex.ru).

*Yuriy V. Danilyuk* - Senior Laboratory Research Assistant, Laboratory of Physical and Chemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7272-0377>, e-mail: [ura\\_danilyk@mail.ru](mailto:ura_danilyk@mail.ru).

*Antonina A. Aniskina* - Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Biology of Woody Plants, Forest Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok 50, building 28, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2696-0267>, e-mail: [aniskina\\_a@ksc.krasn.ru](mailto:aniskina_a@ksc.krasn.ru).

✉ Для контактов | Corresponding author