

На правах рукописи



**Тютюкова Екатерина Александровна**

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРЕВЕСИНЫ  
ЛИСТВЕННОЦЫ ГМЕЛИНА (*LARIX GMELINII* (RUPR.) RUPR.)  
В ЛЕСОТУНДРОВОМ ЭКОТОНЕ**

03.02.08 – Экология (биология)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

**Научный руководитель:** доктор биологических наук,  
**Бенькова Вера Ефимовна**

**Официальные оппоненты:**

**Румянцев Денис Евгеньевич**, доктор биологических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра ЛТ-2 «Лесоводство, экология и защита леса» Мытищенского филиала, профессор

**Гаевский Николай Александрович**, доктор биологических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра водных и наземных экосистем, профессор

**Савчук Дмитрий Анатольевич**, кандидат биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория динамики и устойчивости экосистем, старший научный сотрудник

Защита состоится 18 февраля 2021 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.03.02», созданного на базе Института биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства (Биологического института) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус НИИ ББ ТГУ, к. 69).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru).

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/56b8f336-b262-4d60-81ad-8ca4cdf00780>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » января 2021г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат биологических наук



Франк Юлия Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Быстрое и значительное текущее потепление климата, его влияние на растительные сообщества вызывает озабоченность во всем мире. Особое внимание привлекают экосистемы Крайнего Севера, экстремально чувствительные к климатическим изменениям [WMO, 2002]. В исследованиях адаптивной способности древесных видов, составляющих лесные экосистемы, к изменению климата и локальным условиям произрастания, в частности, на уровне ксилемы [Гамалей, 2008; Гамалей, 2011], заключена возможность установления функциональных механизмов формирования лесных границ, в том числе и полярных [Tranquillini, 1979; Korner, 1998], и прогнозирования качества древесины. Ранее полученные результаты показали, что деревья лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), из которых на 100% состоят древостои непосредственно на границе с тундрой на севере Средней Сибири, характеризуются высокой чувствительностью радиального прироста к изменению погодных условий [Наурзбаев и др., 2001; Бенькова и др., 2012 и др.], а также размеров трахеид, обеспечивающих водный транспорт от корней к кроне [Gurskaya et al., 2012; Фархутдинова, 2017]. Вместе с тем, до настоящего времени, вопрос о влиянии межсезонного и внутрисезонного изменения погодных условий на изменение свойств самих клеточных стенок, разработан недостаточно.

Слабо изученными остаются влияние изменения климата на лесные экосистемы, механизмы этого влияния; воздействие сходных изменений климата в прошлом на рост древесных растений. Дискуссионными являются вопросы, касающиеся развития лесных экосистем в аспекте динамики первичной продуктивности древесных сообществ, которые чувствительны к изменению климата. Наше исследование направлено на поиск ответа на вопрос о внутреннем и внешнем контроле ксилогенеза в изменяющейся среде. В связи с вышеизложенным, исследование влияния климатических факторов на биохимические свойства древесинного вещества у деревьев лиственницы Гмелина, произрастающих на северной границе леса в условиях современного климатического тренда, является актуальным.

**Степень разработанности темы.** В современной литературе широко обсуждается вопрос о влиянии внешних условий на строение ксилемы на биохимическом уровне. Установлено, что условия произрастания влияют на массовую долю и химический состав гемицеллюлоз, массовую долю и степень кристалличности целлюлоз [Шарков, 1972; Kostianen et al., 2007; Xu et al., 2012], угол наклона микрофибрилл целлюлозы [Xu et al., 1997; Poletto et al., 2012], относительно оси трахеид [Xu et al., 2012], массовую долю лигнина и степень метаксилирования [Antonović et al., 2010], соотношение в его структуре количества фенольных и спиртовых гидроксилы и, как следствие, степень «упаковки» макромолекулы [Gower, Richards, 1990]. Можно ожидать, что в течение конкретного вегетационного периода синтезируется полимерная композиция клеточной стенки древесины лиственницы на северной границе леса, «уникальная» по своим характеристикам, отвечающим этому периоду: по соотношению массовых долей полимерных компонентов и экстрактивных

веществ, пространственной структуре лигноуглеводной матрицы, а также плотности древесины годичного слоя.

Исследования такого рода имеют высокую теоретическую значимость в развитии концепции образования (синтеза) и строения древесинного вещества как природной полимерной композиции. Перспективным подходом, в данном случае, является использование современных прецизионных информативных и экспрессных физических методов исследования – ИК-Фурье-спектроскопии (ИКФС), термического анализа – термогравиметрии (ТГ/ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), а также растровой (сканирующей) электронной микроскопии.

**Цель исследования** – определить физико-химические характеристики ранней и поздней древесины в годичных слоях у лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), произрастающей на границе с тундрой, и выявить климатические факторы, существенно влияющие на свойства древесинного вещества.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Показать эффективность использования комплекса экспериментальных экспрессных физических методов для индивидуализации последовательных годичных слоев ранней и поздней древесины по физико-химическим показателям потери массы, скорости потери массы и изменения энтальпии в процессе термодеструкции у лиственницы Гмелина, произрастающей на границе с тундрой.

2. Определить кинетические параметры термического разложения древесины индивидуальных годичных слоев с использованием кинетических моделей Озавы–Флинна–Уолла (ОФУ), Бройдо и Колмогорова-Ерофеева.

3. Установить сходство и различия ИК-спектральных показателей лигноуглеводной матрицы в древесинном веществе ранней и поздней древесины в годичных слоях. Оценить степень кристалличности целлюлозы и состояние связанной воды.

4. Выявить климатические факторы, существенно влияющие на физико-химические свойства ранней и поздней древесины, сформированной в один и тот же сезон и в разные сезоны.

**Научная новизна:**

1. Впервые показано, что использование комплекса экспрессных физических методов (термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии и ИК-Фурье спектроскопии) эффективно для индивидуализации последовательных годичных слоев и ранней и поздней древесины по физико-химическим характеристикам у лиственницы Гмелина, произрастающей на границе с тундрой.

2. Впервые, с применением кинетических моделей Озавы–Флинна–Уолла (ОФУ) и Бройдо установлена значимая вариабельность химического состава древесины, образованной при разных погодных условиях и выявлена предпочтительность первой, в оценке кинетических параметров термического разложения древесины индивидуальных годичных слоев.

3. По результатам ИК-Фурье-спектроскопии ранней и поздней древесины годовых слоев лиственницы Гмелина впервые выявлена значимая вариабельность степени кристалличности целлюлозы и свойств связанной воды в клеточных стенках в связи с различием погодных условий их образования.

4. Выявлены климатические факторы, существенно влияющие на физико-химические свойства ранней и поздней древесины в последовательных годовых слоях у лиственницы Гмелина, произрастающей в лесотундровом экотоне непосредственно на границе с тундрой.

**Теоретическая и практическая значимость.** Реализованный подход с использованием физико-химических методов исследования древесины является эффективным инструментом для ряда аспектов изучения древесины: в дендрэкологических исследованиях, при решении задач о влиянии климатических условий на древесину в ботаническом, физиолого-биохимическом, физико-химическом, а также в лесоводственном аспектах; в технологическом, что обусловлено потребностью в информации о термоустойчивости древесины индивидуальных пород как конструкционного материала, разработки новых технологий термического модифицирования древесины, создания новых композиционных материалов на основе древесины, эксплуатируемых в различных условиях, а также для разработки новых технологий пиролиза и утилизации отходов лесопиления и производства целлюлозы как биоэнергетического ресурса. Кроме того, знание «спектра» показателей термического разложения древесины (горения) имеет важное практическое применение в решении задач лесной пирологии. В целом, изложенный в работе материал позволит, по нашему мнению, выйти на новые аспекты в оценке влияния погодных условий на физические свойства и химический состав формирующейся древесины ствола деревьев на северной границе леса и прогнозе качества древесины в лиственничниках, произрастающих в лесотундровом экотоне, в условиях современного климатического тренда.

Полученные результаты могут быть использованы в учебных курсах по физиологии древесных растений, экологической анатомии древесины, дендрэкологии, техническом и биологическом древесиноведении, лесоведении.

**Основные положения, выносимые на защиту.** Погодные условия сезона роста существенно влияют на процесс образования лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз в клеточных стенках ранних и поздних трахеид у лиственницы Гмелина, произрастающей в экстремально суровых экологических условиях на границе с тундрой, а именно, на соотношение основных полимерных компонентов в клеточных стенках ранних и поздних трахеид, а также на межмолекулярные взаимодействия в лигноуглеводной матрице. Степень этого влияния определяется неравномерным распределением основных полимерных компонентов в стенках клеток и особенностями взаимодействия между ними.

**Степень достоверности результатов исследования** определяется применением сертифицированных термогравиметрической системы и дифференциального сканирующего калориметра фирмы «NETZSCH»

(Германия), ИК-Фурье-спектрометра «Vertex-80» («Bruker», Германия) сканирующего электронного микроскопа TM-1000 («НИТАСИ», Япония); реперных веществ и стандартов, поставляемых с приборами; обработкой экспериментальных данных в программных средах «NETZSCH Proteus Thermal Analysis 4.8.4» и «Orus»; статистической обработкой конечных результатов измерений.

**Личный вклад автора.** Автор лично проводил аналитические исследования влияния погодных факторов вегетационного периода на физико-химические характеристики ранней и поздней древесины лиственницы Гмелина с помощью методов термического анализа (термогравиметрия и дифференциальная сканирующая калориметрия) и инфракрасной Фурье-спектроскопии. Автор принимал непосредственное участие в планировании и выполнении экспериментов, сборе данных, анализе отечественных и зарубежных информационных источников.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на II(X) Международной ботанической конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 2012), 8-ой Тихоокеанской региональной конференции по анатомии древесины (PRWAC) (Нанкин, Китай, 2013), V Международном симпозиуме РКСД «Строение, свойства и качество древесины – 2014» (Москва, 2014), конференциях молодых ученых Институт леса СО РАН (Красноярск, 2012, 2013, 2017, 2018 гг.). Полученный в рамках госзадания научный результат «Термический анализ древесины лиственницы Гмелина: корреляция показателей деструкции с климатическими факторами» признан важнейшим результатом фундаментальных исследований по проекту № АААА-А17-117101970008-9 «Ксилогенез основных лесообразующих пород Сибири: инвариантность и изменчивость метаболизма, физико-химических показателей и анатомического строения древесины в изменяющихся условиях» за 2017 г. (ИЛ СО РАН).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в журналах, включённых в Перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (в том числе 1 статья в научном журнале, входящем в Web of Science, 2 статьи в научных журналах, входящих в Scopus), 1 статья в прочем научном журнале, 8 статей в сборниках материалов международных и российских научных и научно-практических конференций.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Текст работы изложен на 154 страницах, иллюстрирован 29 рисунками 20 таблицами. Список использованной литературы содержит 193 источника, из которых 125 работ на иностранном языке.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность за научное руководство, консультации и обсуждение результатов исследования доктору биологических наук, старшему научному сотруднику лаборатории структуры древесных колец В. Е. Беньковой; доктору химических наук, заведующему лабораторией

физико-химической биологии древесных растений С. Р. Лоскутову за консультации по работе с приборами ТГ/ДТГ, ДСК, ИКФС и обсуждение полученных результатов. Автор выражает благодарность заведующему лабораторией структуры древесных колец кандидату физико-математических наук А. В. Шашкину и кандидату биологических наук В. В. Симанько за предоставленные образцы древесины деревьев *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr., ценные советы и рекомендации; научному сотруднику М. А. Пляшечник за сканирующую электронную микроскопию образцов древесины.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1 РОСТ И СТРОЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ НА СЕВЕРНОЙ ГРАНИЦЕ ЛЕСА ПРИ СОВРЕМЕННОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА**

В последние десятилетия накапливается информация о воздействии современного потепления на динамику лесной растительности Крайнего Севера, которое способствует возрастанию густоты и продуктивности древостоев, приводит к изменению их видового разнообразия и экспансии территории тундры [Luckman, Kavanagh, 2000; Наурзбаев и др., 2003; Watson, 2003; Devi et al., 2008; McDonald et al., 2008 Kirilyanov et al., 2012; Kharuk et al., 2009 и др.]. Среди множества факторов, определяющих равновесие в лесных экосистемах в суровых условиях Заполярья, самым важным является абсолютное доминирование лиственницы [Поздняков, 1975; Абаимов и др., 1997]. При современном изменении климата особую важность приобретают перестройки в ксилеме деревьев лиственницы, происходящие в результате приспособления к новым климатическим условиям, и этому вопросу посвящены многочисленные исследования [Чавчавадзе, Сизоненко, 2002; Бенькова, Бенькова, 2006; Schweingruber et al., 2011; Esper, Schweingruber, 2004; Vaganov et al., 2013; и др.]. Между тем, до настоящего времени вопрос о том, как при изменении климатических условий модифицируются сами клеточные стенки, остается недостаточно разработанным [Panyushkina et al., 2016; Гурская, Бенькова, 2013]. Подробно рассмотренные методические особенности термического [Brostow et al., 2009; Barneto et al., 2011; Traore et al., 2016] и спектроскопического анализов [Rana et al., 2010; Xin et al., 2017] позволили сделать вывод, что применение точных экспресс-методов, таких как термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, является перспективным решением этого вопроса. В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы, посвященная исследованию влияния климатических факторов на физико-химические показатели древесинного вещества клеточных стенок лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) на северной границе леса является важной и актуальной.

## 2 ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования находится на юго-востоке п-ова Таймыр. Климат резко-континентальный. Субарктический термический режим. Сплошное распространение вечной мерзлоты. Средняя температура января  $-29.6^{\circ}\text{C}$ , июля  $+12.5^{\circ}\text{C}$ , среднегодовая температура  $-13^{\circ}\text{C}$ , очень низкие значения годовых осадков (247 мм в год). Вегетационный период длится 60–65 дней. Древостои на 100% состоят из лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.).

Ключевой участок «Котуй» расположен на стыке плато Путорана и Анабарского плато, в долине р. Котуй ( $70^{\circ}52'53''$  с.ш.,  $102^{\circ}58'26''$  в.д.) и характеризуется наличием сплошной границы «редколесье-тундра». В древостое, произрастающем непосредственно на границе с тундрой (рисунок 1), в ходе комплексных исследований в 2008 г. была заложена пробная площадь (ПП, таблица 1). Для решения задач настоящей диссертационной работы было выбрано одно *типичное здоровое дерево*, со ствола которого был взят спил на высоте 1.3 м над поверхностью почвы.



Рисунок 1 – Лиственничник, выбранный для исследования непосредственно на границе с тундрой (вид из тундры)

Решение выбрать одно дерево имело следующие основания:

1. Ранее проведенный дендроэкологический анализ на этой пробной площади по тридцати деревьям [Бенькова и др., 2012] выявил высокую синхронность их индексированных хронологий радиального прироста ( $R=78-86\%$ ), то есть деревья на пробной площади синхронно реагировали (по динамике радиального прироста) на влияние климатических факторов. Сделано предположение, что не только динамику радиального прироста, но и погодичную динамику физико-химических свойств стенок трахеид, из которых состоят годовичные слои, с достаточной степенью достоверности может представлять одно дерево.
2. Биометрические характеристики выбранного дерева соответствовали средним значениям по древостою (таблица 1).
3. Количество образцов и масса образцов древесины, изготовленных из одного годовичного слоя на спиле, соответствовали инструкции прецизионных методов, обеспечивающих 100%-ю точность определения физико-химических характеристик веществ, которые были использованы в настоящей работе.

Таблица 1 – Характеристика древостоя на пробной площади

Средний возраст, лет	66
Сомкнутость крон	0.20
Средний диаметр деревьев, см	7.95

## Окончание таблицы 1

Средняя высота, м	4.72
Средняя протяженность кроны, м	1.23
Средний диаметр кроны, м	2.07
Средний прирост за последние 50 лет, мм год <sup>-1</sup>	0.52±0.24
Высота мохового покрова, см	2–4

Датировка годовых слоев на взятом с дерева спиле проводилась на измерительном комплексе LINTAB v3.0. В связи с трудностью разделения очень узких годовых слоев (типичных для деревьев в северных древостоях) на раннюю и позднюю древесину, для исследования была выбрана серия из одиннадцати последовательных сравнительно широких слоев, которые были сформированы с 1988 по 1998 гг. То есть, их структура сформировалась при возрастающей интенсивности потепления с начала 80-х годов прошлого века [Наурзбаев и др., 2003; Devi et al., 2008; Kirdeyanov et al., 2012 и др.].

Раннюю и позднюю древесину в годовых слоях разделяли под микроскопом при десятикратном увеличении. Для удаления экстрактивных веществ по методу настаивания использовали спирто-толуольную смесь [Оболенская и др., 1991]. Приготовленные экспериментальные образцы (11 образцов ранней и 11 поздней древесины) кондиционировали до равновесной влажности с окружающей средой, влажность которой была близка к 65 % при температуре 20±2°C.

Термический анализ образцов древесины осуществлялся с помощью методов термогравиметрии (ТГ/ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием приборов TG 209 F1 и DSC 204 F1 («NETZSCH», Германия), соответственно.

#### *Термогравиметрия*

Образцы древесины анализировали в атмосфере воздуха при следующих условиях: скорость нагрева 10; 20; 40 °С/мин от 25 до 700 °С, скорость потока защитного и продувочного газов 20 мл/мин<sup>-1</sup>; масса образца от 2.50 до 2.99 мг, тигель корундовый цилиндрической формы. Калибровка TG 209 F1 осуществлялась по инструкции и с использованием реперных веществ, прилагаемым к приборам. Взвешивание образцов для анализа проводили на лабораторных весах XFR-125E. Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью пакета программ, поставляемого с прибором – «NETZSCH Proteus Thermal Analysis 4.8.4»

#### *Дифференциальная сканирующая калориметрия*

Образцы древесины анализировали в атмосфере воздуха при следующих условиях: скорость нагрева 10; 40 °С/мин от 25 до 590 °С, скорость потока защитного и продувочного газов 40 мл·мин<sup>-1</sup>; масса образца от 1.05 до 1.38 мг, тигель алюминиевый с перфорированной крышкой; эталон–пустой алюминиевый тигель. Калибровка DSC 204 F1 осуществлялась по инструкции и с использованием реперных веществ, прилагаемых к прибору. Взвешивание образцов для анализа проводили на лабораторных весах XFR-125E. Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью пакета программ,

поставляемого с прибором – «NETZSCH Proteus Thermal Analysis 4.8.4» [Di Blasi, 2008; Barneto et al., 2011].

#### *Инфракрасная-Фурье спектроскопия*

ИК-спектры были получены с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра «VERTEX 80V» (Bruker Optics, Германия) в спектральном диапазоне от 8000 до 350 см<sup>-1</sup>. Спектральное разрешение ±0.2 см<sup>-1</sup>; воспроизводимость волнового числа ±0.05 см<sup>-1</sup>. Для снятия спектров использовали тонкие таблетки бромида калия с запрессованными в них образцами древесины: ~1.5 мг древесины растирали в ступке со 100 мг KBr; измельченный материал помещали в пресс-форму.

#### *Кинетические методы в термическом анализе*

Результаты ТГ-измерений термоокислительной деструкции древесины анализировались в рамках кинетических моделей Бройдо и Озавы-Флинна-Уолла (ОФУ) [Mamleev et al., 2004; Gašparović, et al., 2009].

В соответствии с методом Бройдо использовали уравнение:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{y} \right) \right] = -\frac{E_a}{RT} + \ln \left( \frac{ART_m^2}{\beta E_a} \right), \quad (1)$$

где  $y$  – массовая доля неразложившегося вещества исследуемого образца;  $E_a$  — энергия активации;  $T_m$  – температура (К), соответствующая максимуму на дифференциальной термогравиметрической кривой (ДТГ);  $A$  – предэкспоненциальный множитель (частотный фактор);  $T$ – температура (К);  $\beta$ – скорость нагрева;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

По изоконверсионной модели ОФУ применяли уравнение:

$$\ln(\beta) \cong \ln \left( \frac{AE_a}{RF(\alpha)} \right) - 5.3305 - 1.052 \frac{E_a}{RT}, \quad (2)$$

где функция  $F(\alpha)$  – математическое представление кинетической модели.

Для анализа кинетики неизотермической термодеструкции древесины в опытах по дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК-кривые) использовали двухпараметрическое топохимическое уравнение Колмогорова-Ерофеева [Дельмон, 1972]:

$$\alpha = 1 - e^{-kt^n}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – степень завершенности теплового эффекта на отдельной стадии термической разложения древесинного веществ;  $k$  – параметр, определяющий константу скорости реакции по Саковичу;  $n$  – параметр, указывающий на характер процесса. Константу скорости реакции находили по формуле Саковича:

$$K = n \cdot k^{1/n}. \quad (4)$$

### **3 ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАННЕЙ И ПОЗДНЕЙ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ ГМЕЛИНА НА ГРАНИЦЕ С ТУНДРОЙ**

С помощью методов термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии ранее было показано, что различие химического состава древесины разных пород по основным полимерным компонентам обуславливает неодинаковую кинетику термодеструкции древесинного

вещества [Лоскутов и др., 2015]. Очевидно, что решение обратной задачи также перспективно и позволит по кинетическим характеристикам термодеструкции оценить вариацию химического состава клеточных стенок образцов древесины.

*Результаты термогравиметрии древесинного вещества в годичных слоях 1988–1998 гг.*

Значения потери массы связанной воды ( $\Delta m_1$ ), гемицеллюлоз ( $\Delta m_2$ ), целлюлозы ( $\Delta m_3$ ), лигнина, а также потери массы при сгорании образовавшегося угля ( $\Delta m_4$ ) из образцов ранней (а) и поздней (б) древесины, взятых из годичных слоев 1988–1998 гг., представлены на рисунке 2. У ранней и поздней древесины, сформированной в период с 1988 по 1998 гг., сравнительно низкие абсолютные значения принимает показатель  $\Delta m_1$ , а высокие —  $\Delta m_3$ ; погодичная изменчивость  $\Delta m_1$  также самая низкая среди показателей  $\Delta m$  (рисунок 2).

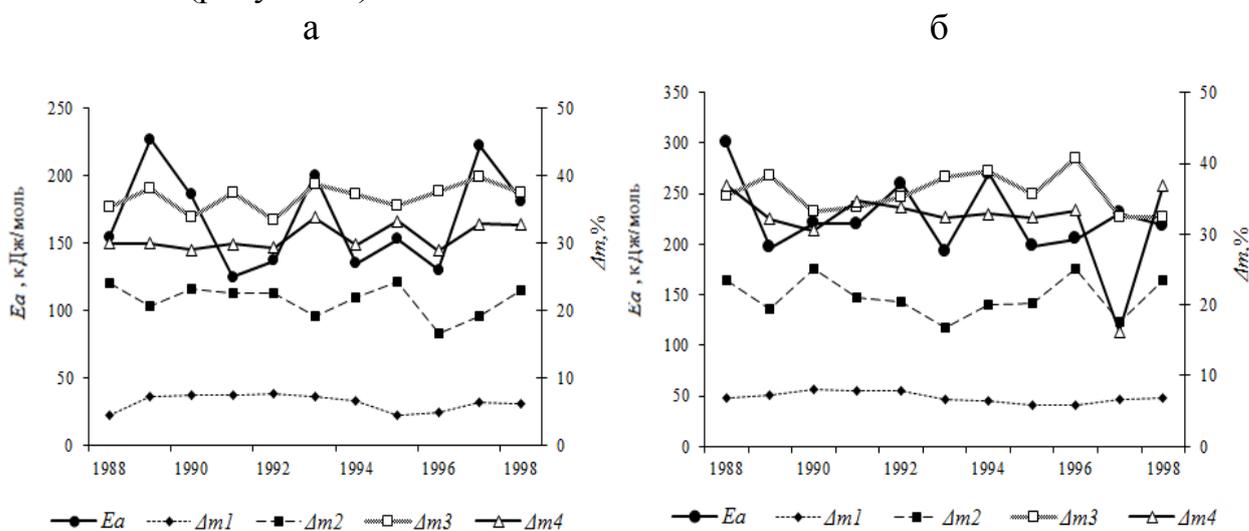


Рисунок 2 – Термические показатели ( $E_a$  (по методу ОФУ),  $\Delta m_1$ ,  $\Delta m_2$ ,  $\Delta m_3$ ,  $\Delta m_4$ ) ранней (а) и поздней (б) древесины в годичных слоях, образованных в период с 1988 по 1998 гг., у лиственницы Гмелина

Для ранней и поздней древесины соответствующие средние за период с 1988 по 1998 гг. значения показателей  $\Delta m$  для ранней и поздней древесины (соответственно) ( $\Delta m_1=6.39\%$  и  $6.94\%$ ;  $\Delta m_2=21.57\%$  и  $21.15\%$ ;  $\Delta m_3=36.76\%$  и  $35.83\%$ ,  $\Delta m_4=30.83\%$  и  $32.10\%$ ) по критерию Стьюдента достоверно не различаются ( $P \geq 0.95$ ).

Важным показателем изменения (или постоянства) свойств древесины является энергия активации термодеструкции ( $E_a$ ). Значения  $E_a$  для ранней и поздней древесины сформированной в период с 1988 по 1998 гг. рассчитаны по методам Бройдо и Озавы-Флинна-Уолла (ОФУ) (уравнение 1 и 2, Глава 2). Значения  $E_a$ , рассчитанные по методу Бройдо у ранней древесины, изменяются от 148 до 194 кДж/моль, у поздней – от 162 до 218 кДж/моль (то есть,  $E_a$  изменяется фактически в одинаковых пределах). Значения  $E_a$  углеводного комплекса, рассчитанные по методу ОФУ, изменяются у ранней древесины от 214 до 339 кДж/моль, а у поздней – от 307 до 422 кДж/моль, т.е. различие по этому показателю между ранней и поздней древесиной более выраженное.

Рисунки 3 и 4 иллюстрируют ярко выраженную погодичную изменчивость энергии активации  $E_a$  термодеструкции компонентов углеводного комплекса как ранней, так и поздней древесины (при оценке обоими методами). Это — отражение заметного влияния погодных условий на образование основных полимерных компонентов клеточной стенки.

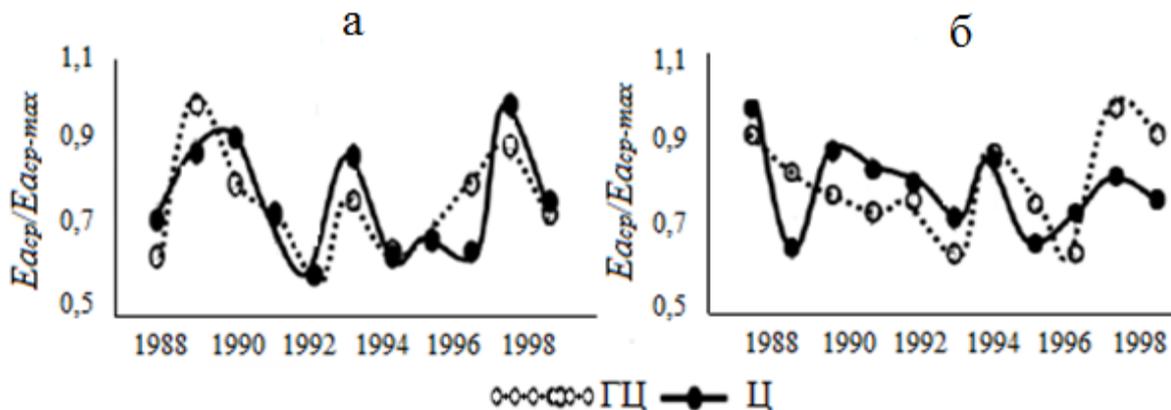


Рисунок 3 – Нормированная средняя энергия активации термического разложения гемицеллюлоз (ГЦ) и целлюлозы (Ц) в ранней (а) и поздней (б) древесине, рассчитанная по методу ОФУ, в годичных слоях 1988–1998 гг.

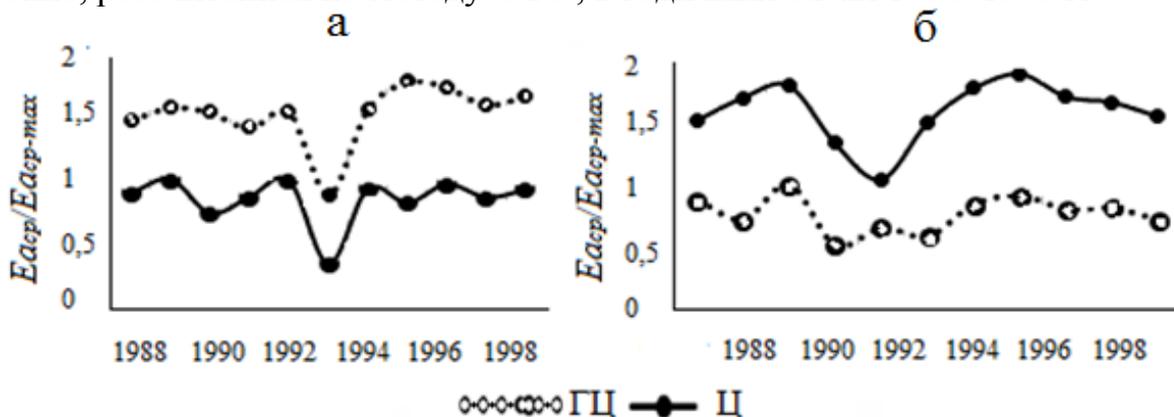


Рисунок 4 – Нормированная средняя энергия активации термического разложения гемицеллюлоз (ГЦ) и целлюлозы (Ц) в ранней (а) и поздней (б) древесине, рассчитанная по методу Бройдо, в годичных слоях 1988–1998 гг.

Судя по рисункам 3 и 4, нормированные значения температурных диапазонов, соответствующих термическому разложению гемицеллюлоз и целлюлозы в клеточных стенках как в ранней (а), так и в поздней (б) древесине под влиянием погодично изменяющихся климатических факторов меняются довольно синхронно. В то же время, судя по количеству и абсолютным значениям экстремумов на графиках, можно сделать вывод, что энергия активации термического разложения, рассчитанная по методу ОФУ (рисунок 3) более «чувствительна» к влиянию погодично меняющихся климатических факторов, чем рассчитанная по методу Бройдо (рисунок 4), поэтому в расчетах предпочтительнее использовать метод ОФУ.

Таким образом, результаты термогравиметрии указывают на различие процесса термического разложения древесины (ранней и поздней) в годичных слоях в температурных интервалах термодеструкции углеводных компонентов (гемицеллюлоз и целлюлозы) и ароматической части – лигнина.

### Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)

В результате экспериментов получены ДСК-кривые для ранней и поздней древесины каждого годовичного слоя из исследованных одиннадцати, сформированных в 1988–1998 гг. (на рисунке 5 представлены результаты для ранней древесины 1988 и 1997 гг.) В температурном диапазоне от 25 до 130°C испаряется гигроскопическая влага (эндоэффект (Endo) на рисунке 5). При увеличении температуры от 200 до 507–525°C регистрируется экзотермический процесс (Ехо на рисунке 5) окислительной термодеструкции древесинного вещества.

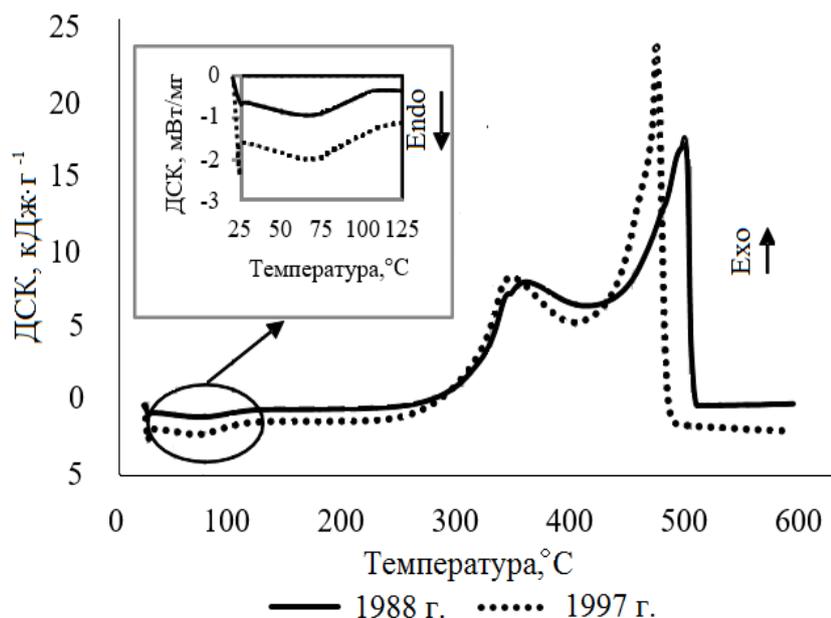


Рисунок 5 – ДСК-кривые ранней древесины годовичных слоев 1988 и 1997 гг. в температурном диапазоне испарения гигроскопической (связанной) влаги

По ДСК-кривым выявлено различие между ранней и поздней древесиной, сформированной в один и тот же год, по энергии связи гигроскопической

влаги с основными полимерными компонентами. Выявлено также, что соотношение основных полимерных компонентов и их «упаковка» в клеточных стенках ранней древесины, сформированной в разные годы (то есть, при разных погодных условиях) неодинаковое; то же относится и к поздней древесине.

Из ДСК-эксперимента получены значения термических показателей выделения ( $Q$ ) и поглощения ( $-Q$ ) теплоты, минимальной температуры испарения связанной воды ( $t_{min}$ ), максимальных температур разложения углеводного комплекса ( $t_{max1}$ ) и лигнина ( $t_{max2}$ ) для ранней и поздней древесины за 1988–1998 гг. (рисунок 6 а, б). Поздняя древесина (рисунок 6 б) заметно отличается от ранней (рисунок 6 а) по абсолютным величинам и динамике показателей  $-Q$  и  $t_{min}$ .

Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии выявили различия ранней и поздней древесины в разных годовичных слоях по термическому разложению. Об этом свидетельствуют динамика показателей эндотермических и экзотермических процессов, а также минимальная температура испарения связанной воды и максимальная температура разложения лигноуглеводной матрицы (рисунок 6). Значения  $-Q$ , и  $t_{min}$ , как видно из рисунка 6, отличаются заметной погодичной вариабельностью, то есть, «чувствительностью» к климатическим условиям сезонов роста.

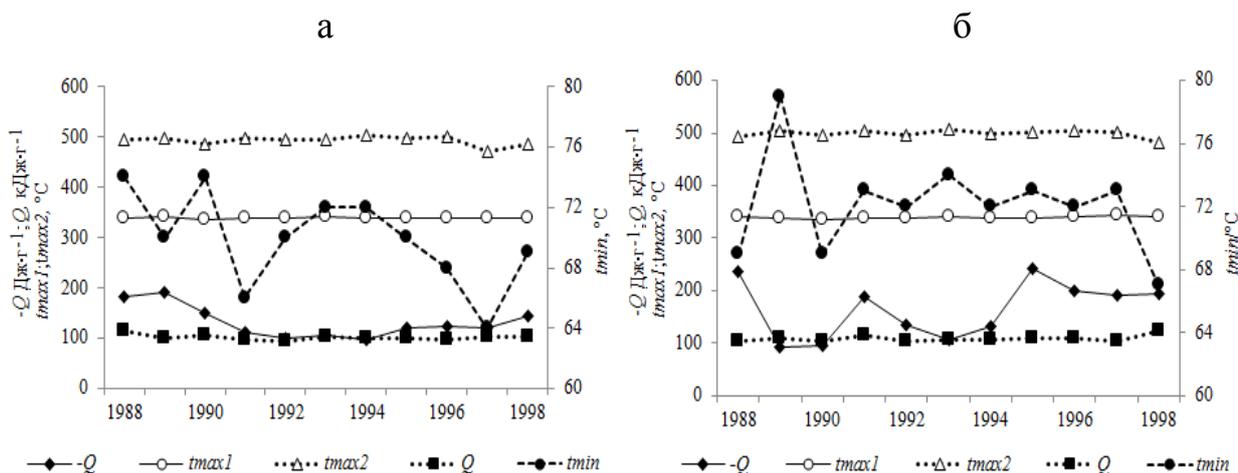


Рисунок 6 – Термические показатели ранней (а) и поздней (б) древесины лиственницы Гмелина в годичных слоях, сформированных в 1988–1998 гг.

Таким образом, по результатам исследования древесины термическими методами, получено:

1. Ранняя и поздняя древесины в годичном слое отличаются: а) по кинетике термодеструкции углеводных компонентов (гемицеллюлоз и целлюлозы) и ароматической части – лигнина; б) по степени гигроскопичности. Поздняя древесина чаще характеризуется повышенной гигроскопичностью по сравнению с ранней; в) по термической стабильности, обусловленной неодинаковым распределением полимерных компонентов в древесинном веществе; г) по энергии, расходуемой на термическое разложение основных полимерных компонентов древесинного вещества; д) по характеристикам тепловых эффектов испарения влаги и термодеструкции древесинного вещества; е) по температуре минимумов эндотермы испарения влаги и максимумов на экзотермической части кривых ДСК.

2. Физико-химические свойства ранней древесины — энергия активации термодеструкции углеводного комплекса, кинетические показатели термодеструкции углеводного и ароматического комплекса в ранней и поздней древесине, характеристики теплового эффекта в годичных слоях, соответствующего испарению связанной воды, — погодично варьируют.

3. Физико-химические свойства поздней древесины погодично варьируют, но в большей степени, по сравнению с ранней древесиной. Это следует из погодичного варьирования: а) показателей потери массы углеводного комплекса; б) энергии активации термодеструкции углеводного комплекса, найденной методом ОФУ; в) значениям теплового эффекта, соответствующего испарению влаги; г) минимальной температуры на эндотермической части кривой в эксперименте ДСК; е) кинетических показателях термодеструкции ароматического комплекса в древесинном веществе. Предполагается, что погодичная вариабельность этих показателей связана с погодичным изменением климатических условий.

#### 4 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАННЕЙ И ПОЗДНЕЙ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ ГМЕЛИНА НА ГРАНИЦЕ С ТУНДРОЙ

ИК-спектры ранней и поздней древесины из годовичных слоев, сформированных в период с 1988 по 1998 гг., имеют определенные сходства и различия (рисунок 7). Различия по интенсивности поглощения явно проявились в полосах, которые соответствуют межмолекулярным колебаниям в основных полимерных компонентах древесинного вещества, а также в полосах, соответствующих колебаниям в связанной воде. Наиболее резкие различия ИК-спектров ранней и поздней древесины лиственницы Гмелина наблюдали в диапазоне частоты «отпечатков пальцев». Различия выявляли, анализируя значения отношения интенсивности полосы поглощения лигнина  $I_L$  (скелетные колебания ароматического кольца при  $k=1510 \text{ см}^{-1}$ ) к интенсивности характерных полос углеводного комплекса  $I_{УК}$  ( $k=1733-1735, 1373, 1157-1159, 894-896 \text{ см}^{-1}$ ) ранней и поздней древесины (отношение  $I_L/I_{УК}$  впервые для анализа применялся в работе [Pandey, Nagveni, 2007]). Отношение  $I_L/I_{УК}$  для ранней и поздней древесины характеризуется средней и высокой погодичной вариабельностью, но в поздней древесине – более высокой, чем в ранней. Кроме того, выявлена заметная вариабельность индекса кристалличности целлюлозы, рассчитанная по методу [Котенёва и др., 2011; Lionetto et al., 2012]; более высокой вариабельностью этого показателя также характеризуется поздняя древесина.

Важной характеристикой изменения (или постоянства) физико-химических свойств древесины являются спектральные показатели связанной воды в клеточных стенках. Полоса в диапазоне  $1637-1645 \text{ см}^{-1}$  является разновидностью деформационных колебаний валентного угла НОН (полоса поглощения прочно связанной воды), полоса приблизительно при  $700 \text{ см}^{-1}$  является разновидностью либрационных колебаний НОН [Еремина, 2007; Бессонова, Стась, 2008]. Анализ спектральных показателей связанной воды в клеточных стенках ранней и поздней древесины проведен по всем годовичным слоям, сформированным в период с 1988 по 1998 гг. Установлено, что интенсивность полосы поглощения в области  $1650-1630 \text{ см}^{-1}$ , характеризующая свойства связанной воды в древесинном веществе, в поздней древесине оказалась на 3–20% выше (в разные годы), чем в ранней. Полоса поглощения при  $778 \text{ см}^{-1}$  в ранней и поздней древесине достоверно не различалась по интенсивности. У ранней и поздней древесины, сформированной в период 1988–1998 гг., сравнительно низкими значениями максимальной интенсивности характеризуются полосы поглощения при  $791-762 \text{ см}^{-1}$  (либрационные колебания НОН) и  $1760-1720 \text{ см}^{-1}$  (колебания в неконъюгированной кетогруппе ксилана), высокими значениями — полосы  $1650-1630 \text{ см}^{-1}$ ,  $1520-1496 \text{ см}^{-1}$  и  $1435-1400 \text{ см}^{-1}$ , которые соответствуют межмолекулярным колебаниям в лигноуглеводной матрице (рисунок 7). Погодичная вариабельность интенсивности полос поглощения имеется на всех семи кривых, представляющих полосы поглощения на ИК-спектрах (рисунок 7). Сравнительно высокой стабильностью характеризуется полоса поглощения в

области  $791\text{--}762\text{ см}^{-1}$  в поздней древесине, соответствующая межмолекулярным колебаниям в связанной воде в стенках поздних трахеид.

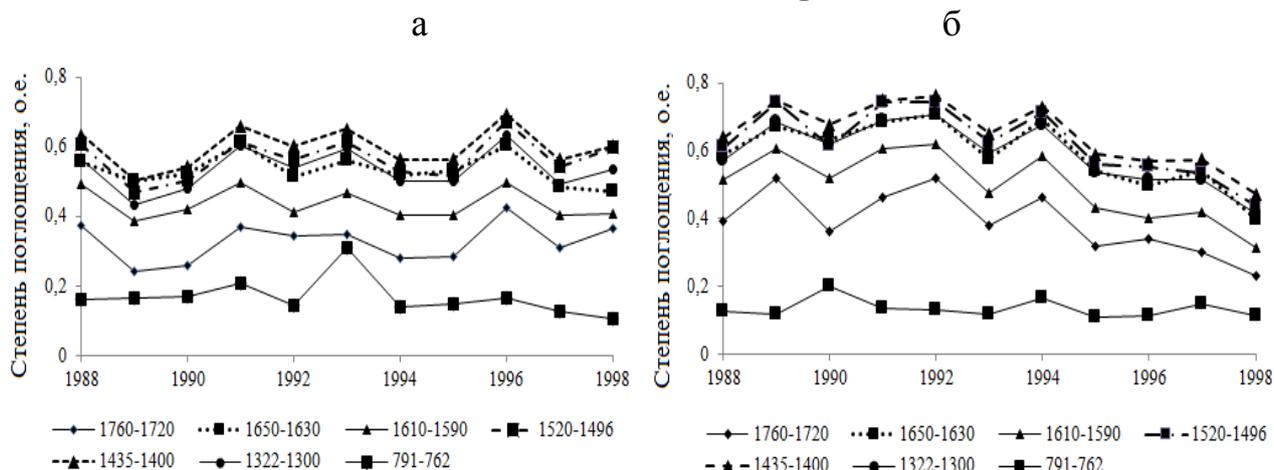


Рисунок 7 – Полосы поглощения в ранней (а) и поздней (б) древесине лиственницы Гмелина в годичных слоях, сформированных в 1988–1998 гг.

Таким образом, по результатам исследования методом инфракрасной-Фурье спектроскопии, получено:

1. Ранняя и поздняя древесина, сформированная в один и тот же год, различается по: а) спектральным показателям в диапазоне частоты «отпечатков пальцев» (от  $1800$  до  $600\text{ см}^{-1}$ ); б) интенсивности полос скелетных колебаний ароматического кольца с максимумами при  $1610\text{ см}^{-1}$  (сирингильного (S) типа) и  $1510\text{ см}^{-1}$  (гваяцильного (G) типа).

2. Годичные слои, сформированные в разные годы, различаются по ИК-спектральным показателям ранней и поздней древесин, а именно, по положению максимумов полос поглощения и их интенсивности, соответствующие межмолекулярным колебаниям в углеводной части древесинного вещества разных лет образования, характеризующие степень кристалличности целлюлозы и состояние связанной воды, а также по положению максимумов полос поглощения и их интенсивности, соответствующие межмолекулярным колебаниям в ароматической части древесинного вещества.

3. Спектральные показатели ранней древесины существенно погодично варьируют по максимальной интенсивности полос поглощения, соответствующие а) либрационным колебаниям угла НОН; б) колебаниям С–Н связей лигнине.

4. Спектральные показатели поздней древесины погодично варьируют в гораздо большей степени, чем ранней. Это следует из погодичного варьирования максимальной интенсивности полос поглощения, соответствующие: а) колебаниям кето-группы в ксилане (гемицеллюлозы); б) деформационному колебанию валентного угла НОН; в) интенсивности полос скелетных колебаний ароматического кольца сирингильного (S) и гваяцильного (G) типов; г) колебаниям С–Н связи в целлюлозе и колебаниям  $C_1\text{--}O$  связи в производных сирингильных группах; д) колебаниям ароматического кольца сирингильного типа и колебаниям С–О связи в лигнине и ксилане;

е) колебаниям С–О–С связи в целлюлозе; ж) колебаниям С–О связи в целлюлозе и гемицеллюлозе.

## **5 КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СТРОЕНИЕ КЛЕТОЧНЫХ СТЕНОК РАННЕЙ И ПОЗДНЕЙ ДРЕВЕСИНЫ (ПО ДАННЫМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА)**

С помощью методов термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии было показано (Глава 3), что неодинаковая кинетика термодеструкции древесинного вещества в годичных слоях, обусловлена различием химического состава древесины (как ранней, так и поздней) по основным полимерным компонентам, и это обусловлено различием погодных условий сезонов роста. Для выявления периодов в сезоне со значимым влиянием климатических факторов применяли расчет и анализ статистических связей термических показателей ранней и поздней древесины с климатическими переменными — среднемесячной температурой воздуха и количеством месячных осадков в период 1988—1998 гг.

*Анализ корреляционной связи с климатическими факторами показателей, определенных методом термогравиметрии (ТГ/ДТГ) в ранней и поздней древесине*

Температура воздуха достоверно коррелирует только с показателями потери  $\Delta m_3$  (целлюлоза) и  $\Delta m_4$  (лигнин) только в поздней древесине.  $\Delta m_3$  отрицательно связан с температурой июня ( $R=-0.58$ ), а  $\Delta m_4$  — с температурой апреля и мая ( $R=-0.82$ ;  $-0.72$ ). Энергия активации термодеструкции ранней древесины достоверно связана с температурой апреля и мая ( $R=0.65$  и  $0.58$ ), а поздней древесины — с температурой апреля ( $R=0.58$ ).

Показатели потери массы  $\Delta m_1$  (связанная вода);  $\Delta m_2$  (гемицеллюлозы);  $\Delta m_4$  (лигнин) достоверно ( $P \geq 0.95$ ) коррелируют с весенними (апрельскими и майскими) осадками. У ранней древесины только показатель  $\Delta m_2$  «чувствителен» к осадкам ( $R=-0.67$ ); у поздней древесины «чувствительными» к осадкам оказались показатели  $\Delta m_1$  и  $\Delta m_4$ : первый положительно коррелирует с апрельскими осадками ( $R=0.60$ ), второй — отрицательно с майскими ( $R=-0.58$ ).

*Анализ корреляционной связи с климатическими факторами показателей, определенных методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в ранней и поздней древесине*

У поздней древесины показатели  $t_{min}$  и  $Q$  достоверно коррелируют с температурой воздуха:  $t_{min}$  отрицательно связана с температурой июня ( $R=-0.62$ ), а показатель  $Q$  отрицательно связан с майской температурой ( $R=-0.62$ ) и положительно — с температурой августа ( $R=0.64$ ).

Температура воздуха достоверно коррелирует с показателями  $Q$  (выделение теплоты),  $t_{max1}$  (максимальная температура термодеструкции углеводного комплекса и  $t_{max2}$  (максимальная температура термодеструкции лигнина) в ранней древесине:  $t_{max1}$  связан со средней температурой июня ( $R=-0,77$ ),  $t_{max2}$  — с температурами апреля и мая ( $R=-0,66$  и  $-0,66$ ),

а показатель  $Q$  – с июньской температурой ( $R=0,78$ ). У поздней древесины  $t_{min}$  отрицательно связана с температурой июня ( $R=-0.62$ ), а показатель  $Q$  отрицательно связан с майской температурой ( $R=-0.62$ ) и положительно – с температурой августа ( $R=0.64$ ).

С месячными осадками достоверно (при  $P \geq 0.95$ ) коррелируют показатели  $-Q$ ;  $Q$ ;  $t_{max2}$  (таблица 5.4). У *ранней древесины* показатель  $-Q$  положительно связан с июльскими осадками ( $R=0.58$ ), а  $Q$  отрицательно связан с майскими осадками ( $R=-0.63$ ). У *поздней древесины* «чувствительными» к осадкам оказались показатели  $t_{max2}$  и  $Q$ : первый положительно коррелирует с майскими ( $R=0.62$ ) и отрицательно с июльскими ( $R=-0.59$ ) осадками, второй – отрицательно коррелирует с июньскими осадками ( $R=-0.63$ ).

Таким образом, в Главе 5 получены результаты детального анализа корреляционной связи показателей термодеструкции с погодными условиями сезона роста (с апреля по август) в период с 1988 по 1998 гг., которые заключаются в следующем. Интерпретация корреляционных связей заключается в следующем.

Влияние условий произрастания, в том числе и погодных, на соотношение ароматической и углеводной компонент в клетках ранней и поздней древесины специфично, и это обусловлено тем, что процесс синтеза стенок ранних и поздних трахеид происходит в разное время сезона, при разных условиях. Компонентный состав ранней древесины, в отличие от поздней, не зависит от температуры воздуха. В сезоны, характеризующиеся сравнительно высокими температурами апреля и мая, в стенках поздних трахеид уменьшается массовая доля лигнина, а при высоких температурах июня — целлюлозы. Обильные осадки в апреле определяют повышенную массовую долю связанной воды в стенках поздних трахеид, а майские – пониженную долю гемицеллюлоз в ранней древесине и лигнина в поздней древесине.

При повышенных значениях температуры воздуха апреля и мая межмолекулярные связи в лигнине ослабевают в стенках ранних трахеид. Повышение температуры воздуха в конце сезона роста ведет к усилению межмолекулярных взаимодействий в лигноуглеводной матрице в стенках поздних трахеид.

Межмолекулярные связи в лигнине в стенках поздних трахеид сильные, тем не менее, обильные осадки в июне могут привести к их ослаблению. Обильные осадки в мае могут ослабить межмолекулярные взаимодействия в лигноуглеводной матрице в ранней древесине. Стоит отметить, что усиление взаимодействия связанной воды с лигноуглеводной матрицей в ранней древесине связано с повышением количества июльских осадков.

Таким образом, погодные условия сезона роста существенно влияют на процесс образования лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз в клеточных стенках ранних и поздних трахеид у лиственницы Гмелина, произрастающей на границе с тундрой. Степень этого влияния определяется неравномерным распределением основных полимерных компонентов в стенках клеток и особенностями взаимодействия между ними.

### Список сокращений

ТГ/ДТГ – термогравиметрия (метод термического анализа)

ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия (метод термического анализа)

ИКФС – инфракрасная Фурье спектроскопия

РЭМ – растровая электронная микроскопия

Метод ОФУ – метод Озавы-Флинна-Уолла

ПП – пробная площадь

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертации применен новый подход к анализу строения древесинного вещества, доказавший свою эффективность в индивидуализации годичных слоев и ранней и поздней древесины по физико-химическим свойствам и заключающийся в использовании точных экспрессных методов: термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии и инфракрасной-Фурье спектроскопии.

2. Выявлены различия процессов термического разложения ранней и поздней древесины в годичных слоях по показателям потери массы и энергии активации методом термогравиметрии. Установленные величины тепловых эффектов испарения влаги и термодеструкции древесинного вещества свидетельствуют о значимой вариабельности химического состава древесины, образованной в разные годы.

3. Энергия активации термического разложения углеводного комплекса в ранней и поздней древесине лиственницы, рассчитанная по методу Озавы-Флинна-Уолла, продемонстрировала более высокую чувствительность межмолекулярных связей к погодным условиям, чем рассчитанная методом Бройдо.

4. Разная внутрисезонная и межсезонная термостабильность древесинного вещества, выявленная методами термического анализа и ИК-Фурье спектроскопии, обусловлена неодинаковым распределением основных полимерных компонентов в клеточных стенках, а также отличиями во взаимодействии компонентов между собой.

5. Установлены достоверные различия в ИК-спектральных характеристиках ранней и поздней древесины. Различия по интенсивности поглощения явно проявились в межмолекулярных колебаниях в основных полимерных компонентах древесинного вещества, а также в межмолекулярных колебаниях в связанной воде.

6. Выявлено, что погодные условия сезона роста существенно влияют на соотношение основных полимерных компонентов в клеточных стенках ранних и поздних трахеид:

– в апрель-майский период предсезонной реактивации камбия и начала сезона роста при повышенных температурах воздуха уменьшается массовая доля лигнина в поздней древесине; межмолекулярные связи в лигнине ослабевают в ранней древесине. Обильные апрельские осадки определяют повышенную массовую долю связанной воды в стенках поздних трахеид, а

майские – пониженную долю гемицеллюлоз в ранней древесине и лигнина в поздней древесине.

– в июньский период активного роста погодные условия не сказываются на компонентный состав в ранней древесине. Обильные осадки уменьшают массовую долю целлюлозы

7. Выявлено, что погодные условия сезона роста существенно влияют на межмолекулярные взаимодействия:

– обильные осадки в мае ослабляют межмолекулярные взаимодействия в лигноуглеводной матрице в ранней древесине и межмолекулярные связи в лигнине в стенках поздних трахеид.

– повышение температуры воздуха в конце сезона роста ведет к усилению межмолекулярных взаимодействий в лигноуглеводной матрице в стенках поздних трахеид.

В диссертации дано новое решение актуальной научной задачи установления влияния климатических факторов на физико-химические показатели древесины лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) на северной границе леса на основе использования методов термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии, инфракрасной-Фурье спектроскопии и стандартных дендрохронологических методов исследования.

Результаты исследования расширили и конкретизировали сложившиеся представления о лимитирующем влиянии субарктического климата на радиальный рост и строение клеточных стенок ранней и поздней древесины в годичных слоях лиственницы. Современные информативные и экспрессные физические термические и спектроскопические методы исследования, успешно примененные к древесине годичных слоев, сформированных в условиях экотона лесотундры, оказались эффективными для исследования влияния климата и погодных условий на свойства древесинного вещества. Благодаря этим методам установлено, как погодные условия (температура воздуха и количество осадков) модифицируют компонентный состав и межмолекулярные взаимодействия в ранней и поздней древесине. Полученные результаты имеют практическую значимость: они позволяют осуществлять прогноз качества древесины, сформированной в разных погодных условиях в лиственничниках, произрастающих в лесотундровом экотоне при текущем изменении климата.

На основе полученных результатов, с использованием прецизионных физико-химических методов исследования древесины индивидуальных годичных слоев, открывается перспектива количественного прогнозирования последствий современного климатического тренда, а именно: оценка экологической пластичности строения стволовой древесины у деревьев, образующих полярную границу леса, изменение продуктивности биомассы притундровых лиственничных лесов.

Результаты исследования позволят выйти на новый уровень определения условий плантационного лесовыращивания, обеспечивающего повышенную продуктивность насаждения и «заданные» биохимические характеристики древесины, определяющие доходность лесовыращивания.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. **Тютькова Е. А.** ИК-спектроскопия древесины индивидуальных годовичных слоев *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. / Е. А. Тютькова, С. Р. Лоскутов, Н. П. Шестаков // Хвойные бореальной зоны. – 2017. – Т. 35, № 3–4. – С. 61–67. – 0,65 / 0,21 а.л.

2. Лоскутов С. Р. Связанная вода в древесине лесообразующих пород Сибири: термический анализ и сорбция / С. Р. Лоскутов, А. А. Анискина, О. А. Шапченкова, **Е. А. Тютькова** / Сибирский лесной журнал. – 2019. – № 3. – С. 26–32. – DOI: 10.15372/SJFS20190304. – 0,43 / 0,1 а.л.

3. **Tyutkova E. A.** Thermal analysis of earlywood and latewood of larch (*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.) found along the polar tree line: correlation of wood destruction values with climatic factors / E. A. Tyutkova, S. R. Loskutov, A. V. Shashkin, V. E. Benkova // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 130, is. 3. – P. 1391–1397. – DOI: 10.1007/s10973-017-6550-7. – 0,7 / 0,17 а.л. (*Web of Science*).

4. **Tyutkova E. A.** FTIR Spectroscopy of early and latewood of *Larix gmelinii* growing along the polar treeline: the correlation between absorption bands and climatic factors / E. A. Tyutkova, S. R. Loskutov, N. P. Shestakov // Wood material science and engineering. – 2020. – Vol 15, is. 4. – P. 205–212. – DOI: 10.1080/17480272.2018.1562495. – 0,68 / 0,22 а.л. (*Scopus*).

5. **Тютькова Е. А.** Термический анализ древесины лиственницы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) / Е. А. Тютькова, О. А. Шапченкова, С. Р. Лоскутов // Химия растительного сырья. – 2017. – № 2. – С. 89–100. – DOI: 10.14258/jcprgm.2017021389. – 0,66 / 0,22 а.л.

*Scopus:* **Tyutkova E. A.** Thermal analysis of larch wood (*Larix Gmelinii* (Rupr.) Rupr.) / E. A. Tyutkova, O. A. Shapchenkova, S. R. Loskutov // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*. – 2017. – № 2. – P. 89–100.

*Публикации в прочих научных изданиях:*

6. **Тютькова Е. А.** Термогравиметрия древесины из индивидуальных годовичных слоев сосны обыкновенной / Е. А. Тютькова // Исследование компонентов лесных экосистем Сибири : материалы конференции молодых ученых. Красноярск, 05–06 апреля 2012 г. – Красноярск, 2012. – Вып. 13. – С. 68–71. – 0,2 а.л.

7. **Тютькова Е. А.** Термогравиметрия древесины лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*) из индивидуальных годовичных слоев / Е. А. Тютькова, С. Р. Лоскутов // II (X) Международная ботаническая конференция молодых ученых : тезисы докладов. Санкт-Петербург, 11–16 ноября 2012 г. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 54. – 0,06 / 0,03 а.л.

8. Loskutov S. R. The invariance some physico-chemical properties of wood / S. R. Loskutov, **E. A. Tyutkova** // Fundamental science and technology – promising development : Proceedings of the International Conference. Moscow, Russia, May

22–23, 2013. – Moscow, 2013. – Vol. 2. – P. 231–235. – 0,04 / 0,02 а.л.

9. Лоскутов С. Р. Термогравиметрия древесины индивидуальных годовичных слоев лиственницы (*Larix Gmelinii*) / С. Р. Лоскутов, **Е. А. Тютюкова** // Строение, свойство и качество древесины : тезисы докладов V Международного симпозиума РКСД. Москва–Мытищи, 22–25 сентября 2014 г. – С. 48–49. – 0,03 / 0,02 а.л.

10. Лоскутов С. Р. Термогравиметрия древесины индивидуальных годовичных слоев лиственницы (*Larix gmelinii*) / С. Р. Лоскутов, **Е. А. Тютюкова** // Фундаментальные и прикладные науки сегодня : материалы VI Международной научно-практической конференции. North Charleston, USA, 24–25 августа, 2015 г. – North Charleston, 2015. – С. 269–272. – 0,04 / 0,02 а.л.

11. **Тютюкова Е. А.** Термический анализ древесины лиственницы (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) / Е. А. Тютюкова // Исследование компонентов лесных экосистем Сибири : материалы конкурса-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов. Красноярск, 05–06 апреля, 2017 г. – Красноярск, 2017. – Вып. 14. – С. 51–53. – 0,03 а.л.

12. **Тютюкова Е. А.** ИК-спектроскопия древесины индивидуальных годовичных слоев *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) / Е. А. Тютюкова // Исследование компонентов лесных экосистем Сибири : материалы конкурса-конференции ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов. Красноярск, 04 апреля, 2018 г. – Вып. 15 – С. 48–51. – 0,17 а.л.

13. **Тютюкова Е. А.** Термический и спектральный анализ ранней и поздней древесины лиственницы Гмелина, произрастающей на полярной границе леса: корреляция с климатическими факторами / Е. А. Тютюкова, С. Р. Лоскутов // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски : материалы всероссийской конференции с международным участием. Красноярск, 26–31 августа 2019 г. – Красноярск, 2019. – С. 455–458. – 0,2 / 0,1 а.л.

14. **Тютюкова Е. А.** ИК-спектроскопия древесины индивидуальных годовичных слоев *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.: степень кристалличности целлюлозы, связанная вода / Е. А. Тютюкова, С. Р. Лоскутов, Н. П. Шестаков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – № 9 (35). – С. 148–161. – 0,66 / 0,22 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.  
Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательского Дома Томского государственного университета  
Заказ № 7246 от «28» декабря 2020 г. Тираж 100 экз.  
г. Томск Московский тр.8, тел. 53-15-28