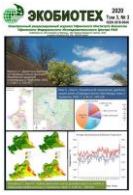
ЭКОБИОТЕХ
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru



ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕРМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ *BETULA TORTUOSA* LEDEB. И *LARIX SIBIRICA* LEDEB., ПРОИЗРАСТАЮЩИЕ В ЭКОТОНЕ АЛЬПИЙСКОЙ ЛЕСОТУНДРЫ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

Тютькова Е.А.*, Лоскутов С.Р., Петров И.А.

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск (Россия)
*E-mail: tyukatie@gmail.com

Приведены результаты исследования процесса термодеструкции ранней и поздней древесины в годичных кольцах, образованных в 1993–2002 гг у деревьев березы извилистой (*Betula tortuosa* Ledeb) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb) произрастающие в экотоне альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау. Анализ корреляционной связи между показателями термодеструкции и средними значениями температуры воздуха и осадков показал, что главным образом погодные условия июня-августа определяют компонентный состав ранней и поздней древесины березы. Температура воздуха оказывает заметное влияние на компонентный состав при синтезе клеточных стенок ранней и поздней древесины, осадки – поздней. Компонентный состав ранних и поздних трахеид лиственницы оказался не столь чувствительным к изменяющимся погодным условиям. Отмечается лишь зависимость показателя испарения связанной воды поздней древесины от летних температур.

Ключевые слова: термический анализ, древесина, *Larix sibirica* L., *Betula tortuosa* L., климат, годичное кольцо

THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE THERMAL VALUES OF *BETULA TORTUOSA* LEDEB. AND *LARIX SIBIRICA* LEDEB., GROWING IN THE ECOTONE OF THE ALPINE FOREST-TUNDRA OF THE KUZNETSK ALATAU

Tyutkova E.A.*, Loskutov S.R., Petrov I.A.

V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, (Russia)
*E-mail: tyukatie@gmail.com

The results of the study of the thermal structure of early and latewood in the annual rings formed in 1993-2002 in the trees of Arctic white birch (*Betula tortuos*a Ledeb) and Siberian larch (*Larix sibiric*a Ledeb) grows in the alpine tundra ecotone of The Kuznetsky Alatau. An analysis of the correlation between thermodynamics and mean temperatures and precipitation showed that mainly the June-August weather conditions determine the component composition of early and late birch wood. Air temperature has a noticeable influence on the component composition during the synthesis of cell walls of early and latewood, precipitation - late. The component composition of the early and late foliage trachea was not as sensitive to changing weather conditions. The evaporation rate of the bound latewood water is only observed to be dependent on summer temperatures.

Keywords: thermal analysis, wood, *Larix sibirica* L., *Betula tortuosa* L., climate, annual growth ring

Поступила в редакцию: 14.05.2020

DOI: 10.31163/2618-964X-2020-3-3-478-487

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое и значительное текущее потепление климата и его влияние на растительные сообщества вызывает множество дискуссий во всем мире. Особое внимание привлекает экотон альпийской лесотундры, где воздействие климата на рост древесной растительности является наиболее выраженным [Holtmeier, 2009]. В исследованиях адаптивной способности древесных видов, составляющих лесные экосистемы, к изменению климата и локальных условий произрастания, в частности, на уровне ксилемы [Гамалей, 2008; Гамалей, 2011], заключена возможность установления функциональных механизмов формирования лесных границ. В то же время, в литературе до настоящего времени не был получен ответ на вопрос, как при межсезонном и внутрисезонном изменении погодных условий роста модифицируются свойства самих клеточных стенок. Между тем было показано, что условия произрастания влияют на массовую долю и химический состав гемицеллюлоз, массовую

долю и степень кристалличности целлюлоз [Sharkov, Kuybina, 1972], угол наклона микрофибрилл целлюлозы [Xu, Tu, 1997; Poletto, Zattera, 2012], относительно оси трахеид, массовую долю лигнина и, как следствие, степень «упаковки» макромолекулы [Gower, Richards, 1990].

В связи с вышеизложенным, вопрос, касающийся выявления воздействий климата на рост основных лесообразующих видов таежных лесов, является актуальным.

Исследования подобного рода предполагают использование современных высокоинформативных, точных и экспрессных методов. Этим требованиям удовлетворяют методы термического анализа (термогравиметрия и дифференциальная сканирующая калориметрия), которые широко используются в древесиноведении и химии древесины при изучении свойств древесинного вещества и основных его полимерных компонентов – целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина [Poletto, Zattera, 2012; Ira, Hasalová, 2019; Lisperguer, Saravia, 2016; Mannochio Russo, Nunes, 2018; Poletto, Dettenborn, 2010; Qu, Wu, 2011; Richter, 2017; Tarrio-Saavedra, Naya, 2011]. Это послужило основанием использования нами методов термического анализа для количественной оценки изменения физико-химических свойств и химического состава клеточных стенок ранних и поздних трахеид под влиянием изменяющихся условий произрастания древесной растительности. Изложенный в работе материал имеет непосредственное отношение к исследованию особенностей формирования границы леса в условиях современного потепления климата.

Цель работы: сравнительный анализ термических показателей древесины лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb) и березы (*Betula tortuosa* Ledeb) на изменение климата в экотоне альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау. Кузнецкий Алатау включает несколько ориентированных с севера на юг хребтов длиной до 300 км с максимальными высотами до 2200 м. В высокогорьях (1350–1500 м н.у.м) растительность представлена тундровыми сообществами Субальпийский пояс (1100–1350 м) занимают луга и редколесья, сформированные *Larix sibirica, Pinus sibirica, Abies sibirica и Betula Tortuosa.* Верхняя и средняя части лесного пояса (600–1100 м) представлены преимущественно древостоями кедра с примесью пихты и ели [Petrov, Kharuk, 2015] (Рис. 1).

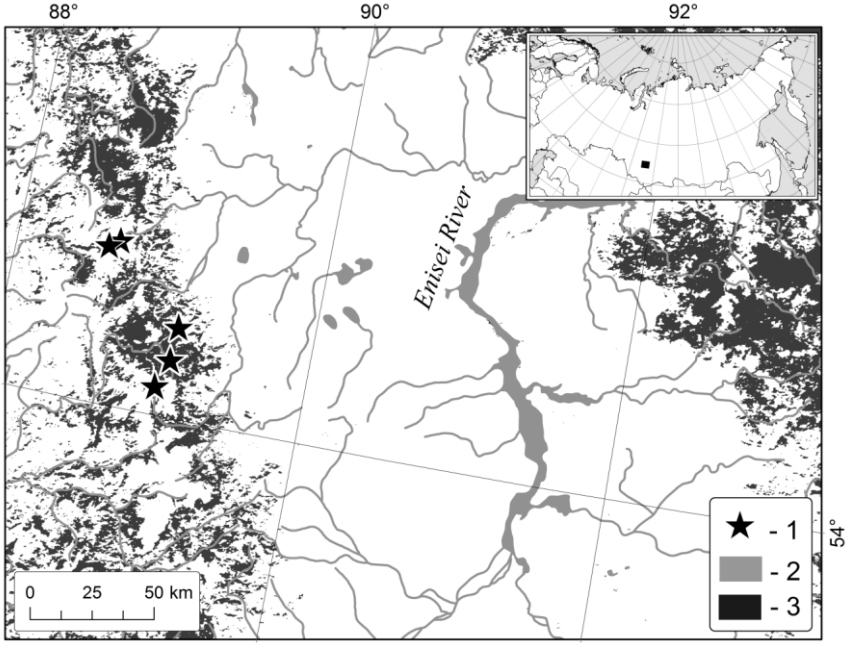


Рис. 1. Географическое расположение исследуемых участков (1 - опытные участки, 2 - реки и озера, 3 - темнохвойные хвойные древостои)

Климат исследуемой территории континентальный, с холодной и длинной зимой и (либо теплым, либо жарким летом). На склонах западной экспозиции сумма годовых осадков составляет 600–800 мм, в то время как в центральной наветренной части гор выпадает до 1500 мм осадков в год. Средняя температура января и июля – -15,3 □C и +13,4 □C соответственно [Petrov, Kharuk, 2015]. В расчетах использованы данные метеостанции «Ненастная» (~10 км).

Для построения древесно-кольцевых хронологий образцы древесины отбирались на различных временных пробных площадях (N = 4 для *Betula tortuosa* и N = 2 для *Larix sibirica*) в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау. Итоговые хронологии построены по 96 образцам лиственницы и 130 образцам берёзы. Измерения ширины годичных колец выполнялись по общепризнанным методикам [Speer, 2010] на установке LINTAB-6. Полученные временные ряды ширины годичных колец подвергались стандартизированию и детрендированию с использованием метода отрицательной экспоненты или линейной регрессии с отрицательным наклоном. В дендроклиматическом анализе использовались остаточные хронологии (без автокорреляционной составляющей). Связь ширины радиального прироста и климатических переменных оценивалась по величине коэффициента корреляции Спирмана.

Для исследования физико-химической гетерогенности древесинного вещества ранних и поздних трахед было выбрано по одному *типичному здоровому дереву лиственницы и березы*, с которых были взяты образцы для исследования в виде спилов. Обоснованность выбора для анализа по одному дереву состоит в следующем:

1. Ранее проведенный дендрохронологический анализ в этом регионе по 110 исследуемым деревьям берёзы с 4 пробных площадей [Petrov, Golyukov, 2019] и 85 деревьям лиственницы с двух пробных площадей [Petrov, Kharuk, 2015] выявил высокую синхронность их индексированных хронологий радиального прироста (межсериальный коэффициент корреляции r > 0.6; EPS (Expressed population signal) ~ 0.99).

2. Количество и масса образцов древесины, изготовленных из одного годичного слоя оказались достаточными для удовлетворения требований к использованию метода термогравиметрии, обеспечивающий необходимую точность и достоверность определения физико-химических характеристик древесинного веществ.

Датировка годичных слоев на взятом с деревьев спилах проводилась на измерительном комплексе LINTAB v6.0. Раннюю и позднюю древесину в годичных слоях разделяли под микроскопом при десятикратном увеличении. Экстрактивные вещества образцов древесины лиственницы удаляли по методу настаивания с использованием спирто-толуольной смеси [Obolenskaya, 1991]. Процедура необходима для снятия влияния экстрактивных веществ на термические показатели основных полимерных компонентов древесины. Приготовленные экспериментальные образцы (10 образцов ранней и 10 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) с использованием прибора TG 209 F1 (“NETZSCH”, Германия).

Образцы древесины анализировали в атмосфере воздуха при следующих условиях: скорость нагрева 10 ºС/мин$^{-1}$ от 25 до 700 ˚С, скорость потока защитного и продувочного газов 20 мл/мин$^{-1}$; 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»

В качестве примера на рис. 2 приведены ТГ/ДТГ-кривые ранней древесины лиственницы сибирской, сформированной в 1995 г. Интерпретация этапов термодеструкции древесины лиственницы по кривым, проведена опираясь на ТГ/ДТГ–ДСК лигнино-целлюлозного сырья [Poletto, 2012; Poletto, 2010; Jin, 2013; Лоскутов, 2015]. По термогравиметрическим кривым выделяются четыре температурных диапазона с изменяющейся скоростью потери массы и один – с относительно малой постоянной скоростью убыли массы (рисунок 1000). Температурные диапазоны изменения скорости потери массы характеризуют следующие этапы термодеструкции. На первом этапе при нагревании древесины от 35 до 195°C происходит ее сушка и удаление легколетучих компонентов (Δm_1). Уменьшение массы при дальнейшем повышении температуры вплоть до 310°C обусловлено в основном термическим разложением гемицеллюлоз (Δm_2). Дальнейшая потеря массы связана с развитием термодеструкции целлюлозы (Δm_3). На последнем этапе от 359 до 500°C происходит преимущественная термодеструкция лигнина (Δm_4) и сгорание образовавшегося угля.

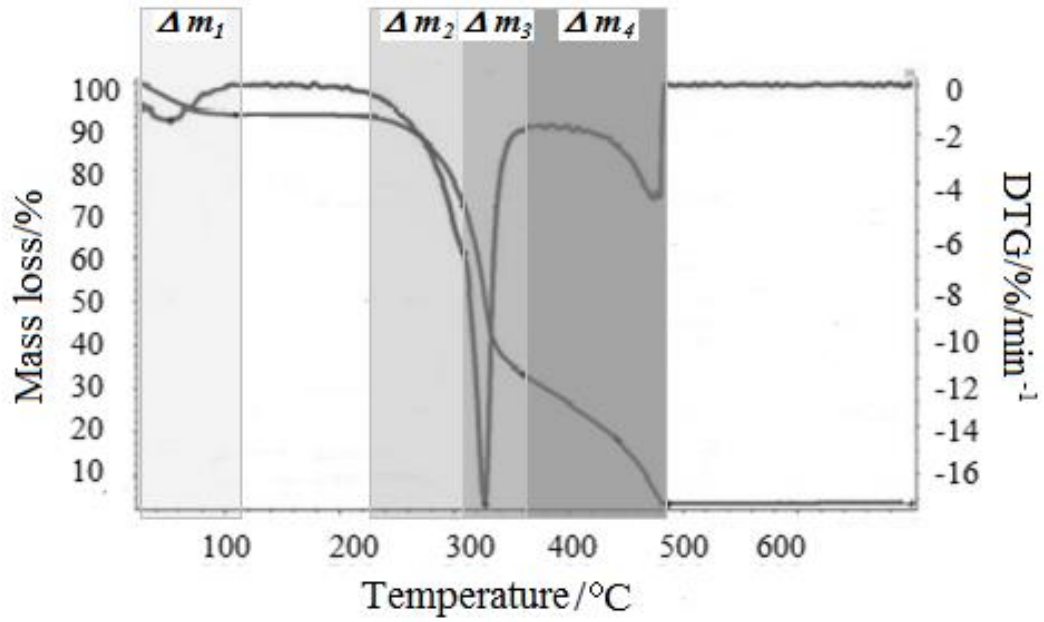


Рис. 2. Результаты термического анализа в окислительной среде ранней древесины лиственницы сибирской в годичном слое 1995 г.: Δ*m1* (%) – потеря массы гигроскопической влаги; Δ*m2* (%) – потеря массы гемицеллюлоз; Δ*m3* (%) – потеря массы целлюлозы; Δ*m4* (%) – преимущественная потеря массы лигнина и сгорание образовавшегося угля

Связь термических показателей ранней и поздней древесины у березы извилистой и лиственницы сибирской и климатических переменных оценивалась по величине коэффициента корреляции Спирмана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее проведенными исследованиями установлено, что деревья лиственницы сибирской и березы извилистой, произрастающий в экотоне альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау имеют сходную реакцию на изменения климата, которая проявилась в

выраженной зависимости радиального прироста стволовой древесины от погодных условий их формирования (рис. 3) [Petrov, Golyukov, 2019].

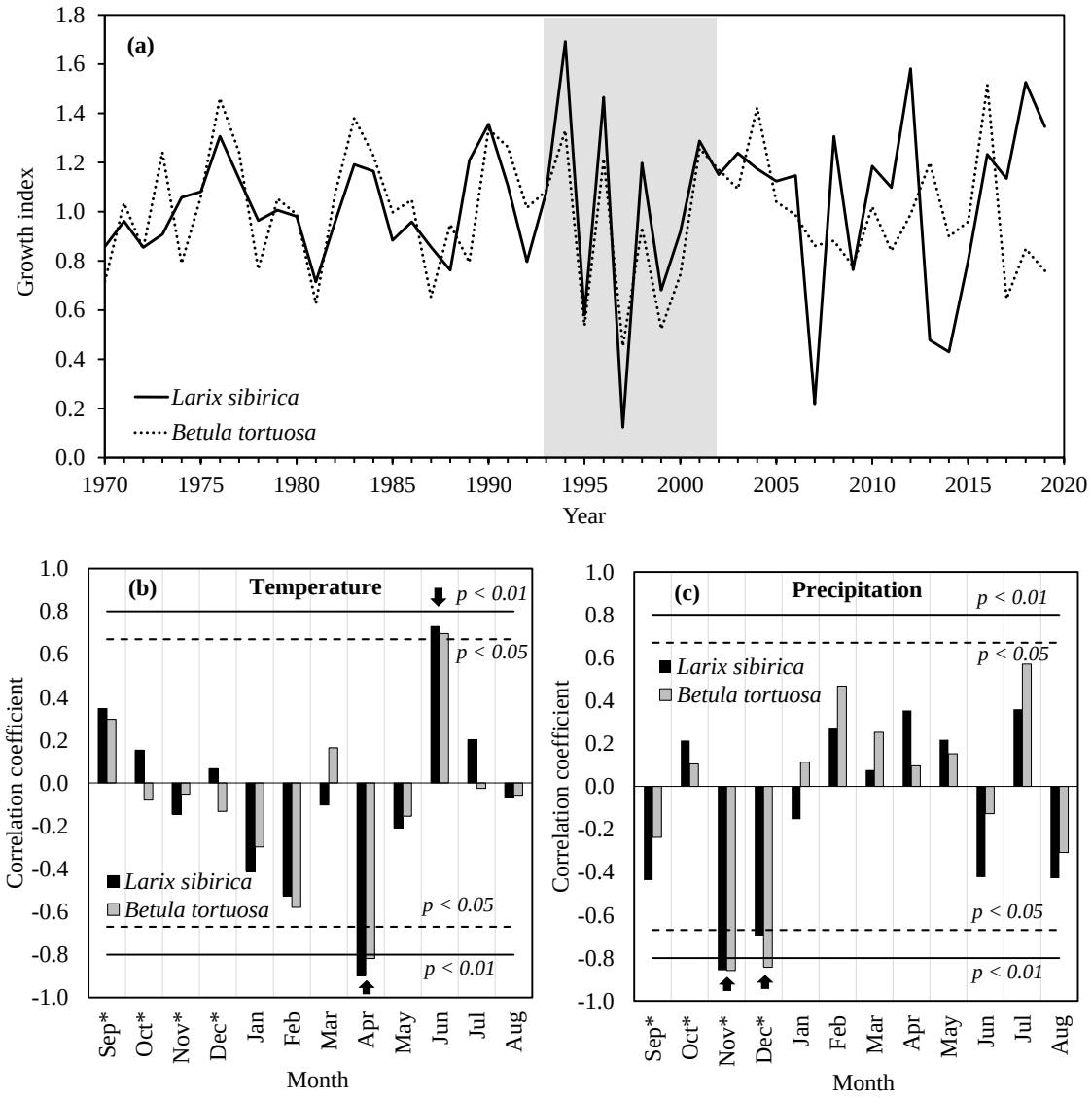


Рис. 3. Остаточные хронологии (a) *Larix sibirica* и *Betula tortuosa* (исследуемый участок выделен серым фоном) и коэффициенты корреляции индексов радиального прироста со среднемесячной температурой (b) и среднемесячной суммой осадков (c) за исследуемый период (1993–2002 гг.; стрелками отмечены значимые коэффициенты корреляции)

Динамика радиального прироста лиственницы и берёзы в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау весьма схожа (коэффициент корреляции 0.5 с 1970 по 2019 годы и 0.93 с 1993 по 2002 год). Климатический отклик радиального прироста также схож: оба вида положительно реагируют на возрастание температуры в июне и отрицательно на повышение температуры апреля. Также отрицательные корреляции зафиксированы для твёрдых осадков холодного периода (ноябрь-декабрь предыдущего года). В экотоне горной лесотундры температура рассматривается как основной лимитирующий радиальный прирост фактор. Возрастание температуры в июне стимулирует радиальный прирост и увеличивает продолжительность вегетационного сезона. Возрастание температуры в апреле вызывает «явление провокации», прогревая надземную часть дерева и пробуждая физиологические процессы, в то время как подземная часть растения находится в промёрзшей земле. Без доступа влаги от корней из замерзшей почвы наступает физиологическая засуха. Кроме того,

за потеплением часто следуют заморозки, повреждающие активизировавшийся камбий. Накопление твердых осадков сокращает вегетационный сезон, замедляя сход снега и прогревание почвы.

С помощью методов термогравиметрии и диффенциальной сканирующей калориметрии было показано, что погодные условия сезона роста существенно влияют на процесс образование лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз в клеточных стенках ранних и поздних трахеид у лиственницы Гмелина, произрастающей на границе с тундрой [Tyutkova, 2017].

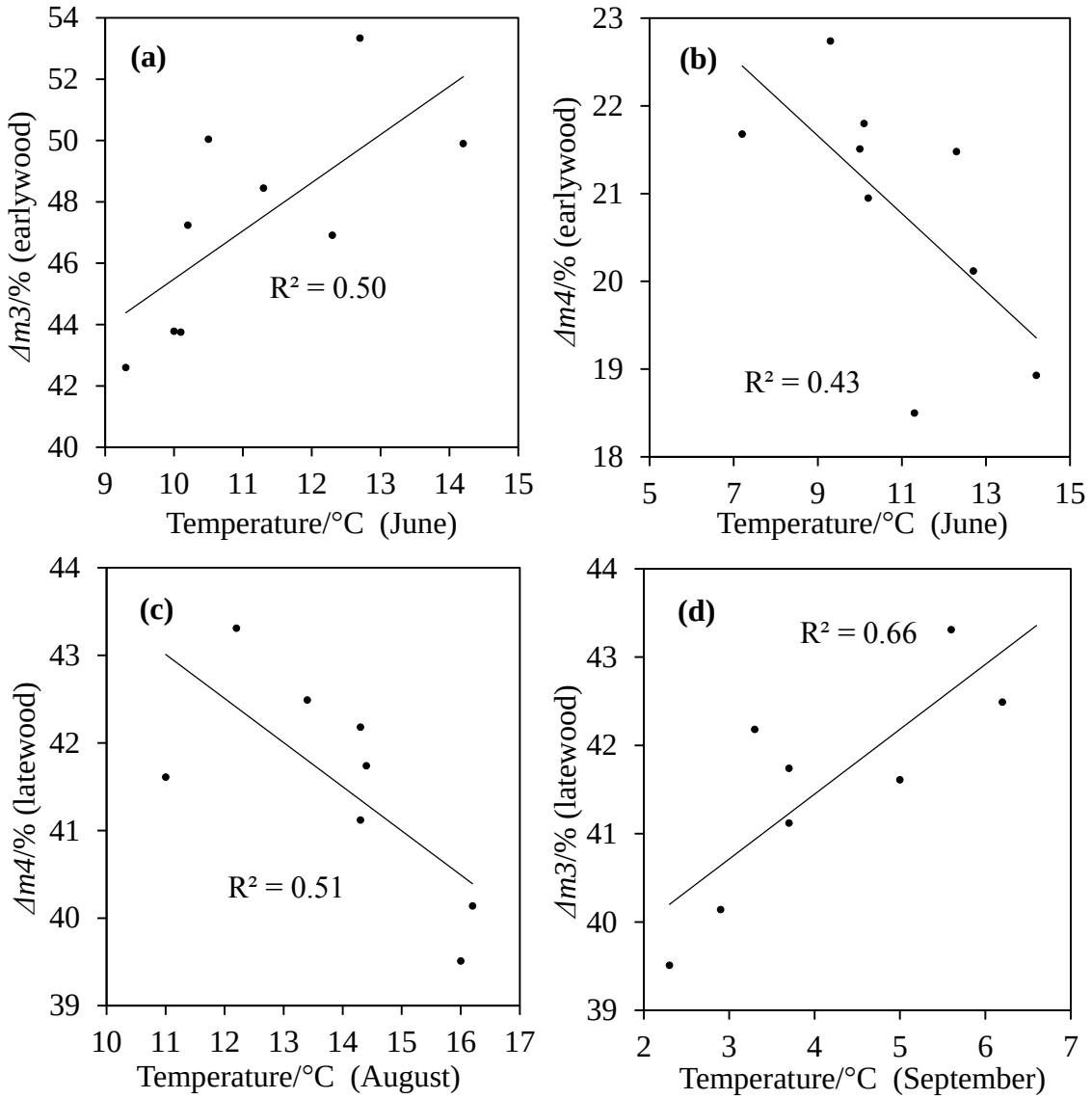


Рис. 4. Зависимость термических показателей в ранней и поздней древесине у *Betula tortuosa* Ledeb от температуры

A – зависимость термодеструкции целлюлозы ранней древесины от июньской температуры
B – зависимость термодеструкции лигнина ранней древесины от июньской температуры
C – зависимость термодеструкции лигнина поздней древесины от августовской температуры
D – зависимость термодеструкции целлюлозы поздней древесины от сентябрьской температуры

Из рисунка 4 видно, что показатель термодеструкции целлюлозы (Δm_3) в ранней древесине у березы извилистой положительно связан с температурой июня (r=0.77 при P≥0.99), а в поздней Δm_3 положительно связан с сентябрьскими температурами (r=0.83 при P≥0.99). Термодеструкция лигнина (Δm_4) в ранней древесине у березы отрицательно связана

с июльскими температурами (r=-0.71 при P≥0.99), а Δm_4 в поздней древесине положительно связан с августовскими температурами (r=-0.73 при P≥0.99).

Δm_3 в поздней древесине березы отрицательно связан с апрельскими осадками (r=-0.72 при P≥0.99), у поздней древесины показатель Δm_4 «чувствителен» к августовским осадкам, связь отрицательная (r=-0.82 при P≥0.99) (рис. 5).

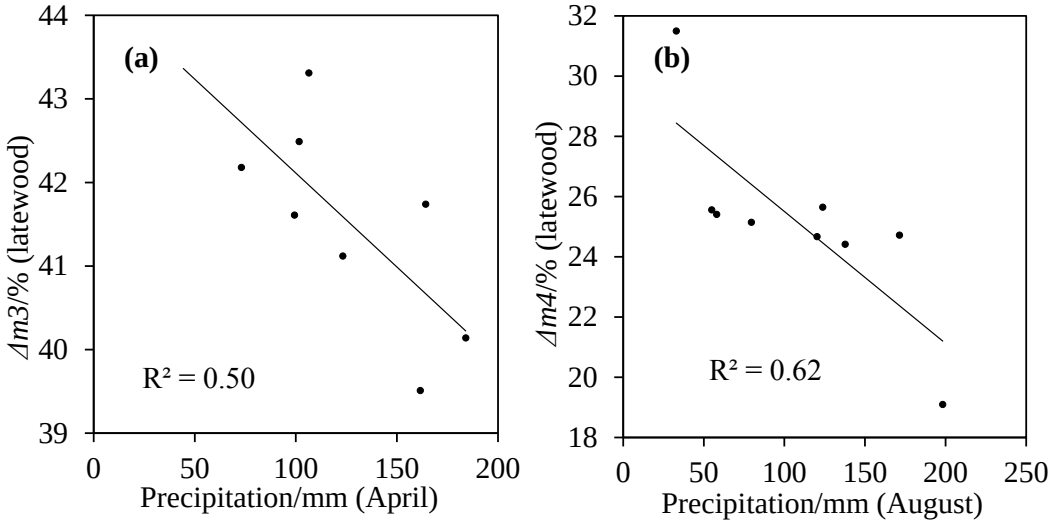


Рис. 5. Зависимость термических показателей ранней и поздней древесины у *Betula tortuosa* Ledeb от среднемесячных осадков

А – зависимость термодеструкции целлюлозы поздней древесины от апрельских осадков
В – зависимость термодеструкции лигнина поздней древесины от августовских осадков

Термические показатели испарения влаги (Δm_1), связанной в стенках поздних трахеид лиственницы сибирской, достоверно коррелируют с температурой воздуха: в июне Δm_1 положительно связан с температурой воздуха (r=0.84 при P≥0.99), в июле отрицательно (r=-0.70 при P≥0.99) (рис. 6).

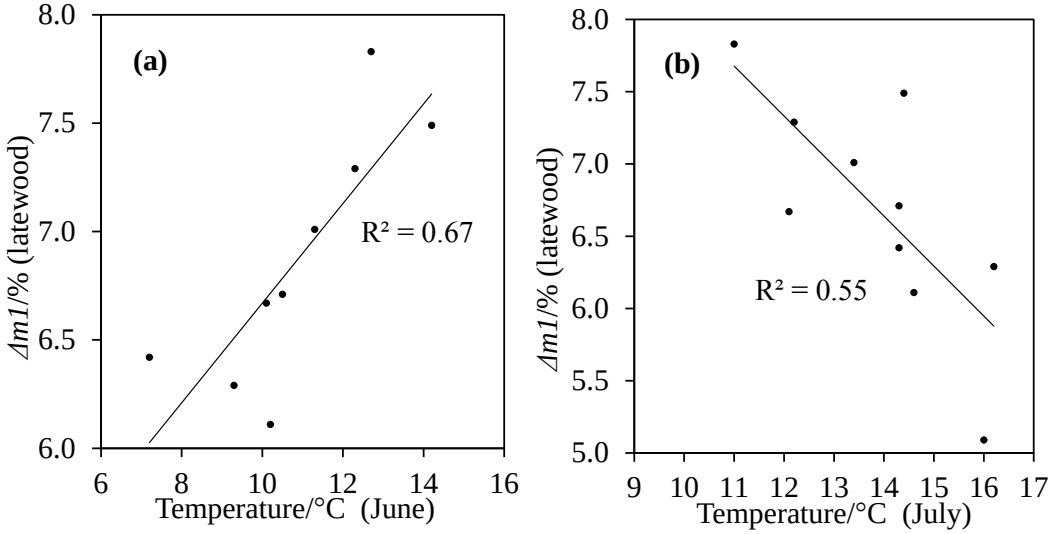


Рис. 6. Зависимость термических показателей в ранней и поздней древесине у *Larix sibirica* Ledeb от температуры

А – зависимость испарения влаги, связанной в поздней древесине, от июньской температуры
В – зависимость испарения влаги, связанной в поздней древесине, от июльской температуры

Сравнительный анализ ранней и поздней древесины *Betula tortuosa* Ledeb по корреляции с климатическим факторами показал следующее. Компонентный состав ранней и поздней древесины березы чувствительный в большинстве случаев к температуре воздуха, чем к осадкам.

Повышенные значения температуры воздуха в июне ведут к увеличению содержания целлюлозы, и уменьшению содержания лигнина в стенках ранних тархеид у березы извилистой (рисунок 4 A, B). Отмечено также, что повешенные значения августовских температур обусловливают повышение содержания лигнина в стенках поздних трахеид (рисунок 4 C). Кроме того, при повышении температуры в сентябре повышается содержание целлюлозы в поздней древесине у березы (рисунок 4 D).

К количеству осадков оказался «чувствителен» компонентный состав поздней древесины в начале и в конце сезона роста. Чем больше осадков выпадает в апреле и сентябре, тем меньше целлюлозы и лигнина образуется в стенках поздних трахеид (рисунок 5 A B).

Содержание целлюлозы и лигнина связаны с активностью камбия [Niklas, 1992; Okuyama, 1995; Wilson, 1979]. Камбиальная активность зависит как от температуры, так и от осадков в любое время в течение вегетационного периода, причем более высокая интенсивность одного из них всегда является решающей [Horacek, 1999]. Для березы извилистой температура оказала влияние на первоначальное деление и расширение радиальной ячейки, главным образом, в июне, а влияние осадков сказалось в августе и сентябре.

Стоит отметить, что гемицеллюлозы ранней и поздней древесины березы извилистой, произрастающей в экотоне горной лесотундры кузнецкого Алатау оказались не чувствительными к изменяющимся погодным условиям.

Только термические показатели испарения воды, связанной в поздней древесине у *Larix sibirica* Ledeb, оказались чувствительны к изменяющимся погодным условиям. Повышение температуры ведет к «аккумуляции» связанной воды в стенках поздних трахеид, а повышение температуры в июле, приводит к уменьшению количества связанной воды в поздней древесине. Данный факт связан с влиянием климатических факторов на образование гемицеллюлоз и их взаимодействием с лигнином, в результате подобного взаимодействия меняются гигроскопические свойства древесинного вещества в стенках ранних и поздних трахеид.

Таким образом, погодные условия сезона роста существенно влияют на процесс образование лигнина и целлюлозы в клеточных стенках ранних и поздних трахеид у березы извилистой, чем на таковые у лиственницы сибирской, произрастающие в экотоне альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау.

Степень влияния определяется неравномерным распределением основных полимерных компонентов в стенках клеток и особенностями взаимодействия между ними.

ВЫВОДЫ

Предложен новый подход к решению одной из актуальных научных задач – установления влияния климатических факторов на физико-химические показатели древесины видов *Betula tortuosa* Ledeb и *Larix sibirica* Ledeb в экотоне горной лесотундры Кузнецкого Алатау на основе использования метода термогравиметрии. Практическая значимость полученных результатов заключается в открывающейся возможности количественного прогнозирования последствий современного потепления: оценки экологической пластичности строения и свойств стволовой древесины у деревьев, образующих экотон горной лесотундры. Совместное применение современных высокоинформативных и экспрессных физико-химических методов исследования и методов

дендроклиматического анализа позволит детализировать картину влияния изменяющихся климатических факторов на рост основных лесообразующих видов таежных лесов.

Погодные условия сезона роста исследованных видов по-разному влияют на соотношение основных полимерных компонентов в клеточных стенках ранних и поздних трахеид у березы извилистой и лиственницы сибирской.

Береза извилистая:

1. В ***апрельский*** период предсезонной реактивации камбия при обильных осадках уменьшается массовая доля целлюлозы у березы извилистой.

2. Повышение температуры в ***июне*** ведет к ускорению процесса образования целлюлозы и замедлению лигнификации.

3. При повышенной температуре ***июля*** процесс лигнификации клеточных стенок замедляется.

4. ***Августовские*** осадки так же определяют пониженное содержание лигнина в клеточных стенках.

5. При повышенной температуре ***сентября*** ускоряется образование целлюлозы.

Лиственница сибирская:

1. Повышение температуры воздуха в ***июне*** ведет к аккумуляции связанной воды в поздней древесине.

2. Высокие значения температуры воздуха ***июля*** ведут к уменьшению массовой доли влаги в клеточных стенках поздней древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамалей Ю.В. Клеточные системы растений // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 2. С. 300–311.
2. Гамалей Ю.В. Криофиты Евразии: происхождение и структурно-функциональная специфика // Ботанический журнал. 2011. Т. 96. № 12. С. 1521–1546.
3. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесообразующих пород Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17–30.
4. Наурзбаев М.М., Сидорова, О.В., Ваганов Е.А. История климата позднего голоцена на востоке Таймыра по данным свехдлинной древесно-кольцевой хронологии // Археология, этнография и антропология Евразии. 2001. № 3 (7). С. 17–25.
5. Фархутдинова В.В., Бенькова В.Е., Шашкин А.В. Влияние климатических факторов на клеточное строение годичных колец лиственницы Гмелина в контрастных гидротермических условиях лесотундры // Известия РАН. Серия биологическая. 2017. № 6. С. 85–94.
6. Benkova V.E., Shashkin A.V., Naurzbaev M.M., Prokushkin A.S., Simanko V.V. The Importance of microecological conditions for growth of larch at the timberline on Taimyr Peninsula // Forest Science. 2012. V. 4. P. 73–84.
7. Gower S.T., Richards J. H. Larches: Deciduous Conifers in an Evergreen World // BioScience. 1990. V. 40. №. 11. P. 818–826.
8. Holtmeier F.K. Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 2009. 438 c.
9. Horacek P., Slezingerova J., Gandelova L. Effects of environment on the xylogenesis of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). In: Wimmer R (ed) Tree-ring analysis // CAB International. Oxon. 1999. P. 33–53.
10. Ira J., Hasalová L., Šálek V., Jahoda M., Vystrčil V. Thermal Analysis and Cone Calorimeter Study of Engineered Wood with an Emphasis on Fire Modelling // Fire Technology. 2019. P. 1–34.

11. Jin W., W. Jin K., Singh Zondlo J. Pyrolysis kinetics of physical components of wood and wood-polymers using isoconversion method // Agriculture. 2013. № 3. P. 12–32.
12. Kostiainen K. Wood properties of northern forest trees grown under elevated CO2, O3 and temperature // Dissertationes Forestales. 2007. V. 47. 36 p.
13. Lisperguer J, Saravia Y, Vergara E. Structure and thermal behavior of tannins from *Acacia dealbata* bark and their reactivity toward formaldehyde. J Chil Chem Soc. 2016;61:3188–90.
14. Mannochio Russo H.M, Nunes W.D.G, da Silva Bolzani V., Ionashiro M., Caires F.-J. Thermoanalytical and spectroscopic characteristics of young and old leaves powder and methanolic extracts of *Niedenzuella multiglandulosa* // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. V. 132. № 1. P. 771–776.
15. Niklas K.J. Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function. Chicago. The University of Chicago Press. 1992. 607 p.
16. Obolenskaya A.V., Yelnitskiy Z.P., Leonovich A.A.. Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose. Moscow: Ecology, 1991. 320 p.
17. Okuyama T., Toshida M., Yamamoto H. An estimation of the turgor pressure changes as one of the factors of growth stress generation in cell walls // Mokuzai Gakkaishi. 1995. V. 41. P. 114–117.
18. Petrov I.A., Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Im S.T., Reaction of coniferous trees of Kuznetsky Ala Tau Alpine tundra ecotone on climate change // Siberian ecological journal. 2015. V.4. P. 518–527.
19. Petrov I.A., Golyukov A.S., Shushpanov A.S., Kharuk V.I. The Impact of Climate Change on *Betula tortuosa* Ledeb. Radial Increment on the Eastern Macroslope of Kuznetsk Alatau. Results and Prospects of Geobotanical Research in Siberia. 2019. https://doi.org/10.1051/bioconf/20191600025/
20. Poletto M. Zattera A.J., Forte M. M. C., Santana R. M. C. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size // Bioresource Technology. 2012. V. 109. № 1. P. 148–153.
21. Poletto M. Dettenborn J., Pistor V., Zeni M., Zattera A.J. Materials Produced from Plant Biomass // Part I: Evaluation of Thermal Stability and Pyrolysis of Wood // Materials Research. 2010. V. 13. № 3. P. 375–379.
22. Qu H. Wu W., Jiao Y., Xie J., Xu J.Investigation on the thermal decomposition and flame retardancy of wood treated with a series of molybdates by TG–MS // J Therm Anal Calorim. 2011. V. 105. P. 269–77.
23. Richter F., Rein G. Pyrolysis kinetics and multi-objective inverse modelling of cellulose at the microscale // Fire Saf J. 2017. V. 91. P. 191–199.
24. Sharkov V.I., Kuybina N.I. Hemicellulose chemistry. Forest industry. Moscow, 1972. 440 p.
25. Speer J.H. Fundamentals of tree-ring research. Tucson: Univ. of Arizona Press. 2010. 508 p.
26. Tarrio-Saavedra J., Naya S., Francisco-Fernandez M., Lopez-Beceiro J., Artiaga R. Functional nonparametric classification of wood species from thermal data // J Therm Anal Calorim. 2011. V. 104. P. 87–100.
27. Tyutkova E.A., Loskutov S.R., Shashkin A.V., Benkova V.E. Thermal analysis of earlywood and latewood of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) found along the Polar tree line // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017. Vol. 130, №. 3. P. 1391–1397.
28. Wilson B.F., Archer R.A. Tree design: some biological solutions to mechanical problems // Bioscience. 1979. V. 9. P. 293–298.
29. Xu J., Lu J., Bao F., Evans R., Downes G., Huang R., Zhao Y. Cellulose microfibril angle variation in Picea crassifolia tree rings improves climate signals on the Tibetan plateau // Trees. 2012. V. 26. № 3. P. 1007–1016.
30. Xu Y.M. Tu K.G., Ye X.S., Xiang C.Y. Variations in wood chemical compositions of *Pinus taeda* provenances // Chemistry and Industry of Forest Products. 1997. Vol. 17. P. 73–78.