

УДК 681.785.574:543.573:581.19

ИЗУЧЕНИЕ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ЕЛИ СИБИРСКОЙ (*PICEA OBOVATA* L.), ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ НА ЮГЕ СИБИРИ, НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОМ УРОВНЕ

© Е.А. Тютюкова*, М.А. Пляшечник, С.Р. Лоскутов, Д.А. Машуков, А.В. Пименов, С.П. Ефремов

Институт леса им. В.Н. Сукачева, ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок,
50/28, Красноярск, 660036, Россия, tyukatie@gmail.com

В нашем исследовании мы сконцентрировались на оценке потенциала термического анализа для «мониторинга» внутривидовой изменчивости у *Picea obovata* L. с участков, расположенных в северо-восточной части Кузнецкого Алатау: Сарала, Агаскыр, Коммунар, Каратас, Тунгужуль, Тарча. В результате исследования мы выявили два участка с максимальными и минимальными спектральными и термическими характеристиками. Образцы древесины ели с участка Сарала показали минимальные значения для углеводного комплекса (целлюлоза и гемицеллюлозы) и повышенное содержание лигнина, что указывает на защитную реакцию растения в ответ на стресс, вызванный активной эксплуатацией земель с последующим обеднением почвенного плодородного слоя. Микроклиматические условия произрастания на участке Коммунар приводят к повышению содержания целлюлозы и гемицеллюлоз, а также снижению синтеза лигнина. Тем не менее у деревьев ели сибирской с других ключевых участков – Агаскыр, Тунгужуль (участки, на которых удалось обнаружить признаки антропогенной нагрузки) не выявлено каких-либо особенностей по физико-химическим характеристикам древесинного вещества. Возможно, вырубки, массовый выпас скота, распашки и опустынивание земель, обнаруженные на вышеуказанных участках, являются факторами, которые имеют выраженную микроэволюционную составляющую, детерминируют адаптивные тренды ценопопуляций ели сибирской и контролируют полиморфизм деревьев в исследованной части Кузнецкого Алатау. Метод сканирующей электронной микроскопии в настоящем исследовании доказал свою эффективность в индивидуализации анатомических характеристик образцов лишь по среднему количеству клеток в годичных кольцах.

Ключевые слова: ель сибирская, термогравиметрия, ИК-Фурье спектроскопия, СЭМ.

Для цитирования: Тютюкова Е.А., Пляшечник М.А., Лоскутов С.Р., Машуков Д.А., Пименов А.В., Ефремов С.П. Изучение биоразнообразия ели сибирской (*Picea obovata* L.), произрастающей на Юге Сибири, на физико-химическом уровне // Химия растительного сырья. 2025. №3. С. 114–123. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316599>.

Введение

Для лесов России характерна большая внутривидовая изменчивость и высокая адаптация к экстремальным условиям, благодаря чему один и тот же вид может составлять различные биотипы. Исследование популяционной структуры на примере семейства *Pinaceae* открывают перспективу оценивать уровень их полиморфизма и степень дифференциации в различных условиях произрастания [1]. Такой подход особенно актуален при исследовании маргинальных популяций видов семейства *Pinaceae*, произрастающих в условиях влияния природных и антропогенных факторов среды. Ель сибирская относится к числу лесообразующих видов Евразии, а в свою очередь, ельники имеют огромные ареалы и формируют древостои в широком диапазоне условий произрастания [2]. Для исследования лесных экосистем России используются различные методы математического анализа. Данные космического мониторинга лесов рассматриваются в качестве важного компонента информационного обеспечения мониторинга лесного покрова. Кроме того, изучение генетического полиморфизма выявил высокий уровень внутривидовой изменчивости у лесообразующих пород Сибири [3]. Вместе с тем малоизученной остается структура древесинного вещества, которая является гетерогенной полимерной композицией. Вышеуказанный момент важен, поскольку необходимо установить систему показателей (признаков) внутривидовой изменчивости видов древесных растений,

* Автор, с которым следует вести переписку.

имеющих промышленное значение, с целью определения направлений переработки древесины и, в целом, оценки ресурсного потенциала России. Исследование такого рода имеет высокую теоретическую значимость в развитии концепции оценки внутривидовой изменчивости и ресурсно-технологического потенциала лесных насаждений Сибири на фоне существующего климатического тренда и антропогенной нагрузки. Перспективным подходом в данном случае является использование современных информативных и экспрессных методов исследования, таких как термогравиметрия в сочетании с инфракрасной-Фурье спектроскопией (ТГ-ИКФС) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ).

Цель исследования состояла в решении задачи мониторинга «развития» внутривидовой изменчивости у деревьев ели сибирской (*Picea obovata* L.), произрастающих практически в равных климатических условиях и изолированных орографическими барьерами на основе сопряженного дендрэкологического и термического анализа.

Экспериментальная часть

Объектами исследования послужили шесть ценопопуляций *Picea obovata* Ledeb. (семейство *Pinaceae*), расположенных в северо-восточной части Кузнецкого Алатау. С каждой пробной площади были отобраны по пять образцов древесины здоровых деревьев (сквозные керны) на высоте 1.3 м. В таблице 1 представлена краткая характеристика древостоев исследованных ценопопуляций.

СЭМ и датировка ШГК. На образцах кернов *P. obovata* по двум радиусам измерили ширину годовичных колец (ШГК). Большую часть измерений провели на полуавтоматическом измерительном комплексе LINTAB v3.0 (Германия) при сорокакратном увеличении с пакетом программного обеспечения TSAP Win v4.68 (точность 0.01 мм). Микроскопию кернов ели проводили с помощью растрового сканирующего электронного микроскопа TM-1000 («НИТАСН», Япония). Измерялись радиальные размеры люменов клеток, толщина клеточных стенок и радиальное количество клеток в годовичном кольце (последние 20 лет).

ТГ-ИКФС. Средние образцы древесины *P. obovata* из годовичных колец с 2001 по 2022 гг. с каждого участка подготавливались путем измельчения их в гомогенизированный древесный порошок. Образцы кондиционировались в течение трех недель при постоянной влажности воздуха 65% и температуре ~22 °С. После этого проводился термический анализ. Масса образцов – 3–3.5 мг; нагревание осуществлялось в окислительной среде (воздух) со скоростью 10 °С/мин. С помощью комбинированной аналитической системы термомикровесов в комплексе со встроенным Фурье инфракрасным спектрометром (ТГ-ИКФС) спектрометром анализировали газообразные продукты окисления: в процессе термодеструкции древесины (TG209F1, «Netzsch», Германия) газообразные продукты окисления древесинного вещества направлялись через специальный интерфейс в инфракрасный (ИК)-Фурье спектрометр для записи спектров (Vertex70, «Bruker», Германия). Температуру образца древесины повышали от 25 до 1000 °С. Скорость потока продувочного газа (воздух) – 20 мл/мин. Летучие продукты, высвобождаемые при термодеструкции, немедленно отводились в камеру с холодным газом для анализа с помощью ИК-Фурье-спектрометра. Транспортная линия и газовая ячейка нагревались до 200 °С для предотвращения конденсации образующихся газов. Разрешение при регистрации ИК-спектров – 4 см⁻¹, частота сканирования спектра – 8 раз в мин, спектральный диапазон – 600–4000 см⁻¹ [4, 5].

Таблица 1. Краткая биоэкологическая характеристика ценопопуляций *P. obovata* в северо-восточной части нагорья Кузнецкий Алатау

Географические координаты и таксационные показатели	Сарала	Агаскыр	Коммунар	Каратас	Тунгужуль	Тарча
Координаты	54°43' 88°52'	54°57' 89°18'	54°19' 89°19'	54°08' 89°29'	54°16' 89°38'	54°31' 89°23'
Высота н.у.м., м.	643	523	634	617	622	517
Возраст, лет	65	71	82	84	135	117
Диаметр, м	46	48	46	49	50	47
Высота, м	1.6	1.64	1.59	1.67	1.57	1.62
Антропогенная нагрузка	+	+	–	–	+	–
Подтопления	–	–	+	–	–	–
Мхи, лишайники	+	+	+	+	+	+

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.

Обсуждение результатов

СЭМ. Анализ изменчивости радиального прироста исследуемых образцов ели сибирской за полный период роста деревьев показал для ряда лет асинхронность отклика годичного прироста и существенно неодинаковую ширину годичных колец деревьев в одни и те же годы, что свидетельствует о разных микроклиматических условиях произрастания ели сибирской (рис. 1). Четко выраженный отрицательный тренд радиального прироста наблюдается для деревьев с участков Сарала, Агаскыр, Коммунар, Каратас. Для участков Тарча и Тунгужуль наблюдается небольшое увеличение прироста.

Микроскопическое изучение анатомии поперечного среза образцов древесины ели показало различия между исследованными ценопопуляциями только по среднему количеству клеток в годичном кольце (табл. 2). В то время как размеры люменов и клеточных стенок не имеют выраженной вариабельности.

Термический анализ. Термогравиметрия. В качестве примера на рисунке 2 представлены термические профили образцов древесины *P. obovata* с двух исследуемых участков – Коммунар и Сарала. Выбор данных участков для представления этапов термодеструкции обусловлен выявленными различиями по термическим показателям среди всех исследованных участков. Анализ кривых, представленных на рисунке 2, позволяет разделить процесс термодеструкции древесинного вещества ели сибирской на четыре этапа: первый этап (27–115 °C (Δm_1)) обусловлен испарением связанной воды в древесине. Потеря массы образцом при увеличении нагрева до 328 °C связана с термическим разложением гемицеллюлоз (Δm_2). Последующая потеря массы до 385 °C обусловлена термическим разложением целлюлозы (Δm_3). На последнем этапе до 500 °C происходит преимущественная термодеструкция лигнина (Δm_4) и сгорание образовавшегося угля [6].

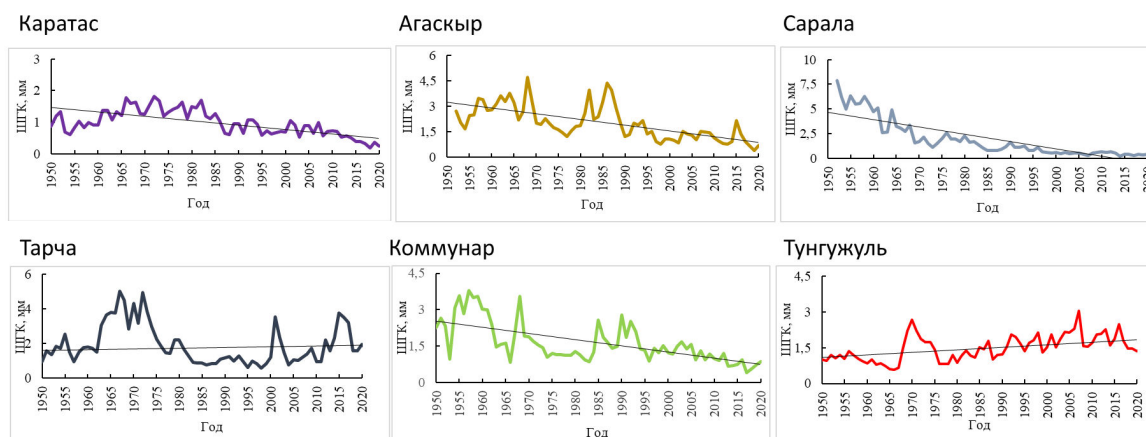


Рис. 1. Динамика ширины годичных колец *P. obovata*

Таблица 2. Анатомические характеристики *P. obovata*

Среднее значение	Количество клеток в годичном кольце, шт.	Люмен, мкм	Клеточные стенки, мкм
Агаскыр	37.95±17.15	25.21±2.96	5.18±1.13
Каратас	31.72±13.56	19.84±3.95	6.24±1.51
Коммунар	25.68±11.19	27.17±4.39	5.5±0.88
Сарала	53.02±17.96	25.23±5.44	5.5±1.41
Тунгужуль	22.85±12.16	22.08±3.32	5.74±0.94
Тарча	32.67±20.65	26.53±3.27	5.38±0.99

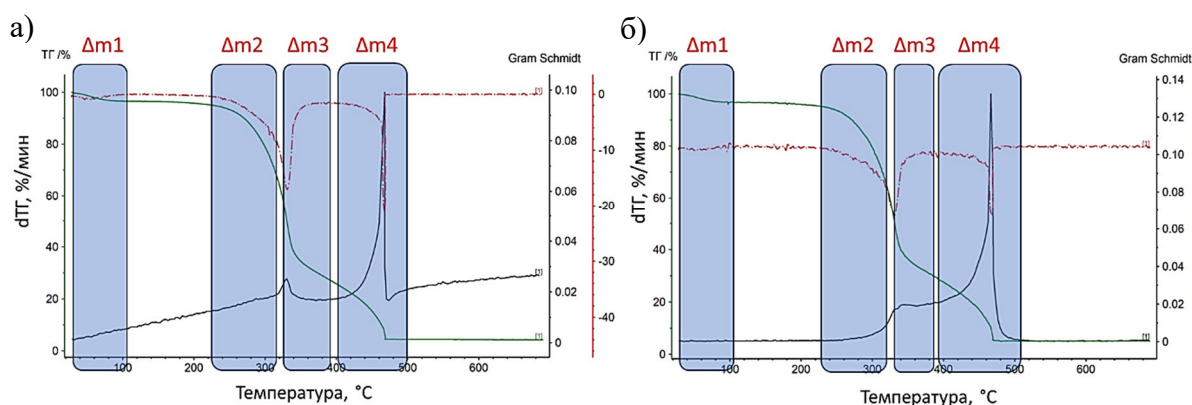


Рис. 2. Результаты термического анализа в окислительной среде образцов древесинного вещества *P. obovata* с участков Коммунар (а) и Сарала (б)

Все исследуемые ценопопуляции находятся практически в равных климатических условиях, ельники изолированы орографическими барьерами, и влияние антропогенной деятельности отмечено только по косвенным признакам. Нами принято решение сравнивать между собой участки с максимальными и минимальными значениями показателей, полученными в результате термического и спектрального анализов. Как следует из таблицы 3, максимальные значения для $\Delta m1$ – $\Delta m3$ выявлены в участке Коммунар, а минимальные – в участке Сарала. Участки Агаскыр, Каратас, Тарча и Тунгужуль показали практически равные значения $\Delta m1$ – $\Delta m3$. В свою очередь, результаты для $\Delta m4$ выявили минимальные значения для деревьев *P. obovata*, произрастающей на участке Тунгужуль и Коммунар, а максимальные значения $\Delta m4$ – для деревьев с участка Сарала. Отношение холоцеллюлоза/лигнин ($\Delta m3/\Delta m4$) для образцов древесины ели сибирской с участка Сарала было в 1.8 раза ниже, чем таковое для образцов с участка Коммунар, что указывает на значительные изменения лигноуглеводной матрицы древесинного вещества ели, произрастающей на участке Сарала. Показатель $\Delta m3/\Delta m4$ обычно измеряется с помощью термогравиметрического анализа и используется для внутреннего сравнения набора данных, а индекс признан высокоинформативным параметром для определения степени деградации древесины [7, 8].

3D ИКФС. 3D ИК-спектры газов, выделяющихся при термической деструкции образцов, отобранных с участков Коммунар и Сарала, включая информацию об инфракрасном поглощении, волновом числе и времени, показаны на рисунке 3. Выбор данных участков для представления спектральной картины обусловлен выявленными различиями древесины по спектральным показателям среди всех исследованных участков.

Рисунок 3 представляет собой 3D график ИК-спектра выделяющихся газов при термоокислительной деструкции образцов древесинного вещества *P. obovata*. Волна поглощения согласуется с потерей с массы древесинного вещества, фиксируемой ТГ кривой (рис. 2). Для первичного анализа в данном исследовании были выбраны семь диапазонов длин волн для выявления наличия/отсутствия различий между образцами, произрастающих на исследуемых пробных площадях (табл. 4).

В таблице 4 приведены максимальные интенсивности полос поглощения газов, выделяющихся при термической деструкции древесины ели сибирской. Интерпретация полос поглощения всех исследованных образцов древесины проведена на основе сопряженного анализа ИК-спектров лигноцеллюлозного сырья [9].

Таблица 3. Стадии термической деструкции образцов древесины *P. obovata* с исследуемых территорий

Участок	$\Delta m1$, %	$\Delta m2$, %	$\Delta m3$, %	$\Delta m4$, %	$\Delta m3/\Delta m4$
Сарала	2.17±0.07	15.77±0.16	35.95±0.83	35.31±0.81	1.45
Агаскыр	2.52±0.18	23.32±0.65	43.21±1.49	29.73±0.61	1.32
Коммунар	4.44±0.19	25.92±0.79	47.84±1.56	25.41±1.38	1.81
Каратас	2.59±0.16	22.26±2.30	41.89±1.24	31.72±2.37	0.99
Тунгужуль	2.87±0.06	21.25±1.25	42.57±1.62	36.41±0.82	1.52
Тарча	3.65±0.08	21.15±1.16	43.1±0.99	28.18±1.05	1.67

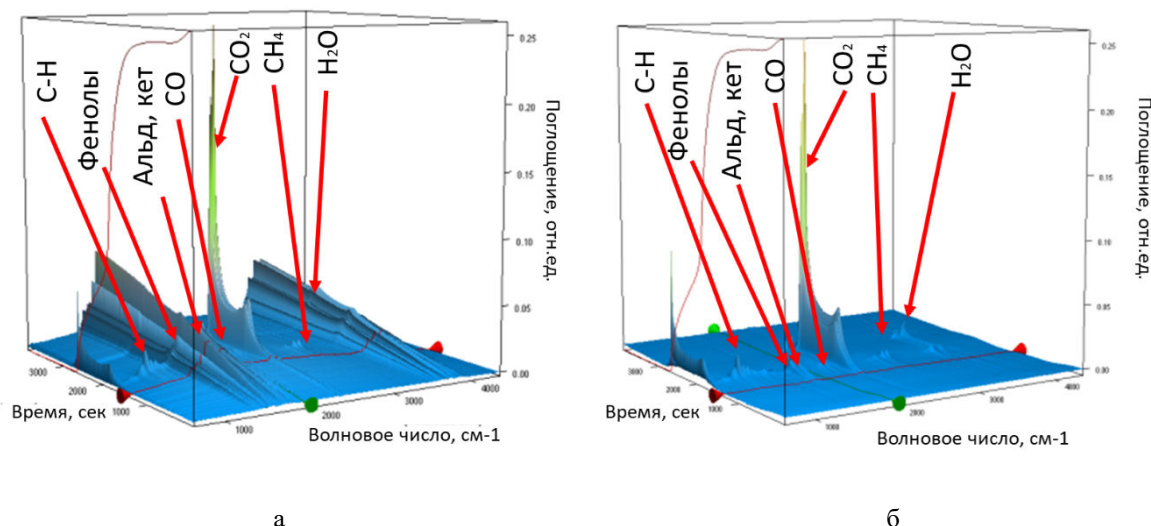


Рис. 3. 3D ТГ-ИКФС-диаграммы процесса термодеструкции для древесинного вещества образцов *P. obovata* с участков Коммунар (а) и Сарала (б)

Таблица 4. Характеристические полосы ИК-спектров исследуемых образцов древесины *P. obovata*

Диапазон поглощения, см ⁻¹	Отнесение полос поглощения	Соответствие полимерному компоненту
4000–3500	H ₂ O	Лигнин Целлюлоза Целлюлоза Целлюлоза
3000–2730	CH ₄	
2400–2260	CO ₂	
2260–1990	CO	
1900–1660	Альдегиды, кетоны (Альд./кет.)	Целлюлоза
1500–950	Фенолы, эфиры (Фен./эф.)	Лигнин
900–650	Ароматические углеводороды (Аромат.)	Лигнин

Результаты ИКФС, полученные нами, показывают, что ряд спектральных характеристик древесинного вещества ели сибирской чувствительны к условиям произрастания. Данные в таблице 5 иллюстрируют изменения в полосах поглощения, соответствующих воде, метану, альдегидам/кетонам, фенолам/эфирам, ароматическим углеводородам. Так, выделяющиеся газы, соответствующие полосе поглощения при 4000–3500 см⁻¹ (H₂O), выявили различия между участками Коммунар, Тунгужуль и Сарала. Максимальное поглощение наблюдалось для образцов древесины ели, произрастающей на участках Коммунар и Тунгужуль, а минимальное – на участке Сарала. Полоса при 3000–2730 см⁻¹ (метан) указывает на несколько участков с максимальной (Агаскыр, Каратас, Сарала) и минимальной (Коммунар и Тунгужуль) интенсивностью поглощения. Отметим также, что максимальная интенсивность полос поглощения для монооксида углерода и альдегидов/кетонов обнаружена у образцов с участка Коммунар, минимальная – с участка Сарала. Максимальное поглощение в ИК-спектре фенолов/эфиров и ароматических углеводородов выявлено в образцах ели с участка Сарала, а минимальное – с участка Коммунар.

Таблица 5. Максимальные интенсивности полос поглощения образцами древесины ели сибирской

Участок	H ₂ O, отн.ед.	CH ₄ , отн.ед.	CO ₂ , отн.ед.	CO, отн.ед.	Альд./кет., отн.ед.	Фен./эф., отн.ед.	Аромат., отн.ед.
Сарала	6.692±0.76	11.236±1.00	57.625±2.97	3.446±0.49	16.049±0.73	30.260±0.83	21.724±0.99
Агаскыр	11.430±0.85	10.821±1.55	64.515±1.89	4.194±0.95	25.343±1.13	23.478±0.93	18.968±0.36
Коммунар	15.470±1.27	6.112±1.31	55.205±1.01	5.767±0.99	31.205±1.59	20.498±0.81	15.470±1.20
Каратас	11.802±0.92	11.186±1.28	55.194±0.89	4.558±0.49	22.630±1.78	28.644±0.80	19.706±1.58
Тунгужуль	14.676±0.59	6.178±1.07	56.986±0.80	4.856±0.46	23.391±0.97	22.478±1.15	16.405±0.55
Тарча	12.049±0.52	9.544±1.24	64.168±0.67	4.110±1.43	25.042±1.72	24.357±1.76	18.557±0.51

Методом ТГ (рис. 4а) установлено, что древесина ели ценопопуляции Коммунар имеет максимальное значение содержания воды в клеточных стенках, а древесина ели ценопопуляции Сарала – минимальное по сравнению с древесиной ели, произрастающей на других исследованных участках. Это хорошо согласуется с данными, полученными методом ИКФС (рис. 4б). Содержание гемицеллюлоз и целлюлозы максимально в образцах древесины ели, произрастающей на участке Коммунар, а минимально – на участке Сарала. Также относительное содержание лигнина проявили минимальные значения в образцах ели сибирской, произрастающих на участке Коммунар. Данные, полученные методом ТГ, положительно коррелирует с данными, полученными методом ИКФС.

Анализ полученных данных показал контрастное выделение на фоне других участков образцов древесины *P. obovata* с участка Сарала: низкое содержание связанной воды, минимальное содержание холоцеллюлозы в клеточных стенках, а также минимальные значения спектральных характеристик альдегидов/кетонов и монооксида углерода. По нашему мнению, это может быть связано с тем, что Саралинский участок имеет развитые в его пределах месторождения и проявления медных, молибденово-медных руд, месторождения мрамора и золоторудное месторождение [10]. Вышеупомянутый факт указывает на активную эксплуатацию земель с последующим обеднением почвенного плодородного слоя, а также на загрязнение окружающих территорий на десятки километров, вследствие чего почвы загрязняются отходами, токсинами, тяжелыми металлами, солями, прочими выбросами добывающих предприятий – загрязняющие вещества (ЗВ) [11]. Известно, что клеточная стенка представляет собой физический барьер против проникновения загрязняющих и токсичных веществ в симпластный компартмент. Одной из стратегий растительных клеток для борьбы с токсинами и выбросами добывающих предприятий является их удаление из протопласта путем секвестрации в экстрацитоплазматические компартменты [12, 13]. Это защищает наиболее чувствительные участки внутри протопласта от токсичности ЗВ [14]. Полисахариды клеточной стенки растений играют решающую роль в связывании и накоплении загрязняющих веществ в клеточной стенке. Одним из преимуществ осаждения их внутри клеточной стенки является сильная метаболическая инактивация. Гемицеллюлозы вместе с пектином играют ключевую роль в процессе связывания ЗВ [15]. В литературе отмечается, что активность фермента, регулирующего синтез гемицеллюлоз (гомогалатуронан), подавляется под действием ЗВ, что ведет к снижению содержания гемицеллюлоз, кроме того, гены, кодирующие синтез целлюлозы и отвечающие за растяжение клеток, замедляют свою активность под воздействием стресса, связанным с влиянием ЗВ, что также связано впоследствии с уменьшением содержания целлюлозы в клеточных стенках [16]. Биосинтез лигнина индуцируется под воздействием ЗВ в растительных клетках. ЗВ оказывают положительное влияние на его биосинтез и повышают активность некоторых ферментов, включая пероксидазы клеточной стенки и лакказы, которые осуществляют полимеризацию монолигнольных предшественников лигнина, что коррелирует с накоплением лигнина и указывает на защитную реакцию растения [17]. Также отмечается, что экспрессия нескольких генов, отвечающих за биосинтез лигнина, увеличивается в результате воздействия ЗВ, что также является важным шагом к усиленной лигнификации и как следствие снижение роста растения, подвергнувшегося стрессу от ЗВ [18].

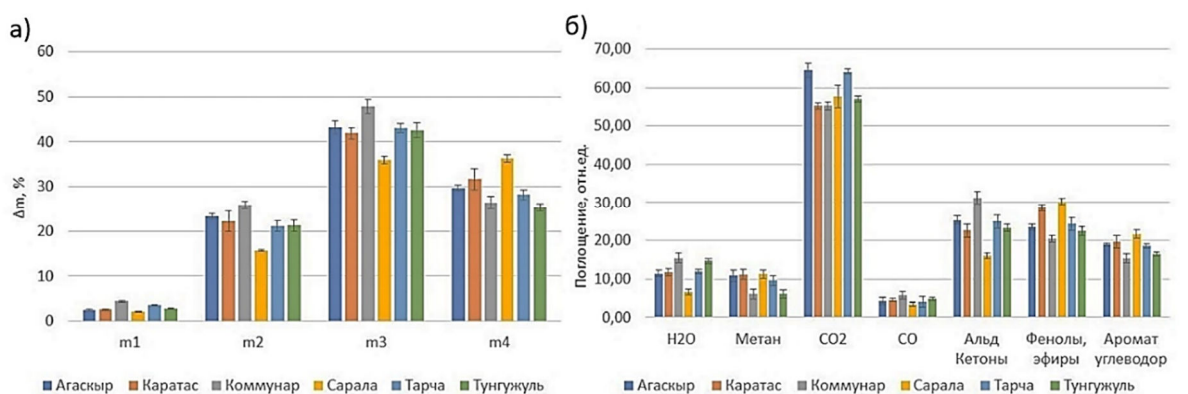


Рис. 4. Распределение основных полимерных компонентов (а) и газовых продуктов сгорания (б) древесинного вещества ели сибирской

Максимальное, по сравнению с другими участками, содержание воды в образцах с участка Коммунар обусловлено тем, что в периоды снеготаяния летних и осенних паводков есть вероятность выхода реки Собака из берегов на высоту водного потока до 40 см, что может сказаться на повышении количества связанной влаги в трахеидах клеточных стенок древесины. Почвенный покров участка Коммунар насыщен горным мелкоземом, на этот факт указывает тонкая слоистость минеральными присыпками корненасыщенных профилей почвы в береговых ельниках. К тому же на участке отмечены мхи, являющиеся индикаторами известковых условий произрастания – мниум цинклидиевидный (*Mnium cinclidioides* (Blytt) Hub.), мниум точечный (*M. punctatum* Hedw.) и палуделла оттопыренная (*Paludella squarrosa* (Hedw.) Brid.). Почва насыщена пылеватой фракцией материнской минералогической основы, что, возможно, указывает на наличие солевого стресса для растительности этой территории [19, 20]. В работах [21, 22] выявлено, что растения демонстрируют торможение роста побегов во время первой фазы солевого стресса, отчасти из-за потери растяжимости клеточной стенки. Изменения в структуре клеточной стенки, по-видимому, являются общей чертой реакции на солевой стресс. После воздействия солевого стресса в растении начинается регуляция ряда первичных генов, кодирующих белки клеточной стенки. Например, экспрессия определенного гена (экспансин) может ускоряться, что впоследствии влияет на синтез гемицеллюлозы клеточной стенки. Кроме того, полипептиды активируются при воздействии солевого стресса, повышают экспрессию специальных генов, отвечающих за повышение содержания целлюлозы. Солевой стресс влияет на формирование и структуру вторичной клеточной стенки, что было выявлено путем изменения биосинтеза лигнина, а именно снижение экспрессии гена, отвечающего за процесс лигнификации.

Заключение

В настоящем исследовании описаны подходы к анализу строения древесинного вещества деревьев *P. obovata* из шести ценопопуляций на территории Южной Сибири. Метод СЭМ доказал свою эффективность лишь по среднему количеству клеток в годичных кольцах образцов ели. Термогравиметрия в сочетании с инфракрасной-Фурье-спектроскопией позволила выявить, что архитектура клеточной стенки подвержена влиянию микроклиматических условий. Активная эксплуатация земель с последующим обеднением почвенного плодородного слоя на участке Сарала приводит к снижению содержания углеводной компоненты и повышению ароматической в клеточных стенках ели сибирской. Условия произрастания участка Коммунар приводят к повышению содержания целлюлозы и гемицеллюлоз и пониженному содержанию лигнина у ели. Тем не менее у деревьев ели сибирской с ряда других участков – Агаскыр, Тунгузюль (участки, на которых удалось обнаружить признаки антропогенной и биогенной нагрузок) не выявили каких-либо особенностей по физико-химическим характеристикам. Возможно, вырубки, массовый выпас скота, распашки и опустынивание земель, обнаруженные на вышеуказанных участках, являются факторами, которые имеют выраженную микроэволюционную составляющую, детерминируют адаптивные тренды ценопопуляций ели сибирской и контролируют полиморфизм деревьев в исследованной части Кузнецкого Алатау, что впоследствии, возможно, позволит постепенно выработать у деревьев устойчивость к антропогенным нагрузкам.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Базового проекта «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты» FWES-2024-0028.

Конфликт интересов

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

Открытый доступ

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

Список литературы

1. Cadotte M.W. Functional traits explain ecosystem function through opposing mechanisms // *Ecol. Lett.* 2017. Vol. 20. Pp. 989–996. <https://doi.org/10.1111/ele.12796>.
2. Ефремов С.П., Милютин Л.И. Биоразнообразие лиственных Азиатской России. Новосибирск, 2010. 159 с.

3. Кравченко А.Н., Экарт А.К., Ларионова А.Я. Генетическое разнообразие и дифференциация популяций ели сибирской по ядерным микросателлитным локусам // *Генетика*. 2016. Т. 52, №11. С. 1262–1269. <https://doi.org/10.7868/S0016675816090083>.
4. Gao N., Li A., Quan C., Du L., Duan Y. TG-FTIR and Py-GC/MS analysis on pyrolysis and combustion of pine sawdust // *J. Analytical Appl. Pyrolysis*. 2013. Vol. 100. Pp. 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.009>.
5. Ren X., Guo J., Li S., Chang J. Thermogravimetric Analysis–Fourier Transform Infrared Spectroscopy Study on the Effect of Extraction Pretreatment on the Pyrolysis Properties of Eucalyptus Wood Waste // *ACS Omega*. 2020. Vol. 5, no. 36. Pp. 23364–23371. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03271>.
6. Ulloa C.A., Gordon A.L., García X.A. Thermogravimetric study of interactions in the pyrolysis of blends of coal with radiata pine sawdust // *Fuel Process Technol.* 2009. Vol. 90. Pp. 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.12.015>.
7. Tamburini D., Łucejko J.J., Zborowska M., Modugno F., Prądzyński W., Colombini M.P. Archaeological wood degradation at the site of Biskupin (Poland): wet chemical analysis and evaluation of specific Py-GC/MS profiles // *J. Analytical Appl. Pyrolysis*. 2015. Vol. 115. Pp. 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.06.005>.
8. Babiński L., Zborowska M., Fabisiak E., Prądzyński W. Are the wooden remains of the Lusatian culture settlement at Biskupin safe? Decomposition of archaeological oak wood samples during a 10-year experiment // *Archaeol Anthropol Sci*. 2019. Vol. 11. Pp. 6583–6594. <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00926-0>.
9. Shen D.K., Gu S., Bridgwater A.V. Study on the pyrolytic behaviour of xylan-based hemicellulose using TG-FTIR and Py-GC-FTIR // *J. Analytical Appl. Pyrolysis*. 2010. Vol. 87. Pp. 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.12.001>.
10. Энциклопедия Республики Хакасия / под ред. Г.Ю. Семигина, В.А. Кузьмина, Л.В. Анжигановой, В.В. Анюшина, А.Н. Асочакова, Н.Я. Артамонова. Абакан; Красноярск, 2008. Т. 2. 318 с.
11. Kelepertzis E. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece // *Geoderma*. 2014. Vol. 221. Pp. 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.007>.
12. Krzeslowska M. The wall cell in plant cell response to trace metals: Polysaccharide remodelling and its role in defense strategy // *Acta Physiol. Plant*. 2011. Vol. 33. Pp. 35–51. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0581-z>.
13. Ovečka M., Takáč T. Managing heavy metal toxicity stress in plants: Biological and biotechnological tools // *Biotechnol. Adv.* 2014. Vol. 32. Pp. 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.11.011>.
14. Krzeslowska M., Lenartowska M., Samardakiewicz S., Bilski H., Wosny A. Lead deposited in the cell wall of *Funaria hygrometrica* protonema is not stable—a remobilization can occur // *Environ. Pollut.* 2010. Vol. 158. Pp. 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.035>.
15. Hossain A.K.M.Z., Koyama H., Hara T. Growth and cell wall properties of two wheat cultivars differing in their sensitivity to aluminum stress // *J. Plant Physiol.* 2006. Vol. 163. Pp. 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.02.008>.
16. Yang Z.B., Eticha D., Rotter B., Rao I.M., Horst W.J. Physiological and molecular analysis of polyethylene glycol-induced reduction of aluminium accumulation in the root tips of common bean (*Phaseolus vulgaris*) // *New Phytol.* 2011. Vol. 192. Pp. 99–113. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03784.x>.
17. Claus H. Laccases: Structure, reaction, distribution // *Micron*. 2004. Vol. 35. Pp. 93–96. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2003.10.029>.
18. Chandran D., Sharopova N., Ivashuta S., Gantt J.S., VandenBosch K.A., Samac D.A. Transcriptome profiling identified novel genes associated with aluminium toxicity, resistance and tolerance in *Medicago truncatula* // *Planta*. 2008. Vol. 228 (1). Pp. 151–166. <https://doi.org/10.1007/s00425-008-0726-0>.
19. Munns R., Tester M. Mechanisms of salinity tolerance // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2008. Vol. 59. Pp. 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
20. Szabolcs I. Salt-Affected Soils. USA, 1989. 274 p.
21. Lü P., Kang M., Jiang X., Dai F., Gao J., Zhang C. RhEXPA4, a rose expansin gene, modulates leaf growth and confers drought and salt tolerance to *Arabidopsis* // *Planta*. 2013. Vol. 237. Pp. 1547–1559. <https://doi.org/10.1007/s00425-013-1867-3>.
22. Evers D., Legay S., Lamoureux D., Hausman J.F., Hoffmann L., Renaut J. Towards a synthetic view of potato cold and salt stress response by transcriptomic and proteomic analyses // *Plant Mol. Biol.* 2012. Vol. 78. Pp. 503–514. <https://doi.org/10.1007/s11103-012-9879-0>.

Поступила в редакцию 18 декабря 2024 г.

Принята к публикации 19 декабря 2024 г.

Tyut'kova E.A.*, Plyashechnik M.A., Loskutov S.R., Mashukov D.A., Pimenov A.V., Efremov S.P. INVESTIGATION OF SIBERIAN SPRUCE BIODIVERSITY (*PICEA OBOVATA* L.) FROM SOUTH OF SIBERIA BY PHYSICOCHEMICAL METHODS

Forest Institute named after V.N. Sukacheva, Federal Research Center KSC SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russia, lilwood@ksc.krasn.ru

In our study, we focused on assessing the potential of thermal analysis for intraspecific variability "monitoring" in *Picea obovata* L. from six sites located in the northeastern part of the Kuznetsk Alatau. We identified two sites with maximum and minimum spectral and thermal characteristics. Spruce wood samples from the Sarala site showed minimum values for the carbohydrate complex (cellulose and hemicelluloses) and an increased lignin content, which indicates a protective reaction of the plant in response to stress caused by active land exploitation with subsequent depletion of the fertile soil layer. Microclimatic growing conditions at the Kommunar site lead to an increase in the content of cellulose and hemicelluloses and a decrease in lignin synthesis. However, no features in the physical and chemical characteristics of the wood substance were found in the Siberian spruce trees from other key sites of Agaskyr and Tunguzhul (sites where signs of anthropogenic load were detected). The scanning electron microscopy method in this study proved its effectiveness in individualizing the anatomical characteristics of samples only by the average number of cells in annual rings.

Keywords: Siberian spruce, thermogravimetry, FT-IR spectroscopy, SEM.

For citing: Tyut'kova E.A., Plyashechnik M.A., Loskutov S.R., Mashukov D.A., Pimenov A.V., Efremov S.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 3, pp. 114–123. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316599>.

References

1. Cadotte M.W. *Ecol. Lett.*, 2017, vol. 20, pp. 989–996. <https://doi.org/10.1111/ele.12796>.
2. Yefremov S.P., Milyutin L.I. *Bioraznoobraziye listvennits Aziatskoy Rossii*. [Biodiversity of larches of Asian Russia]. Novosibirsk, 2010, 159 p. (in Russ.).
3. Kravchenko A.N., Ekart A.K., Larionova A.Ya. *Genetika*, 2016, vol. 52, no. 11, pp. 1262–1269. <https://doi.org/10.7868/S0016675816090083>.
4. Gao N., Li A., Quan C., Du L., Duan Y. *J. Analytical Appl. Pyrolysis*, 2013, vol. 100, pp. 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.009>.
5. Ren X., Guo J., Li S., Chang J. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, no. 36, pp. 23364–23371. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03271>.
6. Ulloa C.A., Gordon A.L., Garcia X.A. *Fuel Process Technol.*, 2009, vol. 90, pp. 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.12.015>.
7. Tamburini D., Łucejko J.J., Zborowska M., Modugno F., Prądyński W., Colombini M.P. *J. Analytical Appl. Pyrolysis*, 2015, vol. 115, pp. 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.06.005>.
8. Babiński L., Zborowska M., Fabisiak E., Prądyński W. *Archaeol Anthropol Sci.*, 2019, vol. 11, pp. 6583–6594. <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00926-0>.
9. Shen D.K., Gu S., Bridgwater A.V. *J. Analytical Appl. Pyrolysis*, 2010, vol. 87, pp. 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.12.001>.
10. *Entsiklopediya Respubliki Khakasiya* [Encyclopedia of the Republic of Khakassia], ed. G.Yu. Semigin, V.A. Kuz'min, L.V. Anzhiganova, V.V. Anyushin, A.N. Asochakov, N.Ya. Artamonov. Abakan; Krasnoyarsk, 2008, vol. 2, 318 p. (in Russ.).
11. Kelepertzis E. *Geoderma*, 2014, vol. 221, pp. 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.007>.
12. Krzeslowska M. *Acta Physiol. Plant.*, 2011, vol. 33, pp. 35–51. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0581-z>.
13. Ovečka M., Takáč T. *Biotechnol. Adv.*, 2014, vol. 32, pp. 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.11.011>.
14. Krzeslowska M., Lenartowska M., Samardakiewicz S., Bilski H., Wosny A. *Environ. Pollut.*, 2010, vol. 158, pp. 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.035>.
15. Hossain A.K.M.Z., Koyama H., Hara T. *J. Plant Physiol.*, 2006, vol. 163, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.02.008>.
16. Yang Z.B., Eticha D., Rotter B., Rao I.M., Horst W.J. *New Phytol.*, 2011, vol. 192, pp. 99–113. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03784.x>.
17. Claus H. *Micron*, 2004, vol. 35, pp. 93–96. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2003.10.029>.
18. Chandran D., Sharopova N., Ivashuta S., Gantt J.S., VandenBosch K.A., Samac D.A. *Planta*, 2008, vol. 228 (1), pp. 151–166. <https://doi.org/10.1007/s00425-008-0726-0>.
19. Munns R., Tester M. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2008, vol. 59, pp. 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant.59.032607.092911>.
20. Szabolcs I. *Salt-Affected Soils*. USA, 1989, 274 p.
21. Lü P., Kang M., Jiang X., Dai F., Gao J., Zhang C. *Planta*, 2013, vol. 237, pp. 1547–1559. <https://doi.org/10.1007/s00425-013-1867-3>.
22. Evers D., Legay S., Lamoureux D., Hausman J.F., Hoffmann L., Renaut J. *Plant Mol. Biol.*, 2012, vol. 78, pp. 503–514. <https://doi.org/10.1007/s11103-012-9879-0>.

Received December 18, 2024

Accepted December 19, 2024

* Corresponding author.

Сведения об авторах

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

Пляшечник Мария Анатольевна – научный сотрудник, lilwood@ksc.krasn.ru

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

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

Пименов Александр Владимирович – доктор биологических наук, заместитель директора института по научной работе, pimenov@ksc.krasn.ru

Ефремов Станислав Петрович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, efr2@ksc.krasn.ru

Information about authors

Tyutkova Ekaterina Aleksandrovna – candidate of biological sciences, head of the laboratory of physical and chemical biology of woody plants, tyukatie@gmail.com

Plyashechnik Maria Anatolyevna – research fellow, lilwood@ksc.krasn.ru

Loskutov Sergey Reginaldovich – doctor of physical and chemical sciences, chief research fellow, lsr@ksc.krasn.ru

Mashukov Dmitry Aleksandrovich – candidate of biological sciences, senior research fellow, mashukov1988@gmail.com

Pimenov Aleksandr Vladimirovich – doctor of biological sciences, deputy director of the institute for scientific work, pimenov@ksc.krasn.ru

Efremov Stanislav Petrovich – doctor of biological sciences, chief research fellow, efr2@ksc.krasn.ru