

ТЕРМОГРАВИМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ВНУТРИВИДОВОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ПОПУЛЯЦИЙ ЕЛИ СИБИРСКОЙ (*PICEA OBOVATA* L.)

С.Р. Лоскутов, Л.К. Казарян, А.А. Анискина[✉],
О.А. Шапченкова, Г.В. Пермякова, С.П. Ефремов, А.В. Пименов

ФГБУ «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50/28

aniskina_a@ksc.krasn.ru

Приведены результаты термического анализа послеэкстракционного остатка (лигноуглеводный комплекс, ПЭОХ) хвои шести популяций ели, произрастающих на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау. Популяции орографически изолированы друг от друга и отличаются по своим морфологическим и таксационным характеристикам. Цель исследования — установить наличие (или отсутствие) физико-химической изменчивости лигноуглеводного комплекса как биохимического полимерного «каркаса» хвои. С помощью методов термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) исследована термоокислительная деструкция ПЭОХ популяций: осуществлен сравнительный анализ кинетики процесса, его «микростадийность» по четвертым производным ДТГ-контуров и анализ профилей убыли массы при нагреве от 20 до 700 °C со скоростью 10 °C/мин. Анализ базовых данных по ТГ и ДТГ, кинетики термоокислительной деструкции ПЭОХ не выявил существенных различий между популяциями: средние величины кажущейся энергии активации всего процесса термического разложения малоизменчивы. Рассчитаны значения индексов изменчивости Шеннона и Маргалафе, параметра проективной инвариантности экспериментальных популяций ели на уровне лигноуглеводного комплекса ПЭОХ. Величины этих параметров свидетельствуют о бедном внутривидовом химическом разнообразии на уровне лигноуглеводного комплекса хвои *P. obovata* L. Дальнейшие исследования экспериментальных объектов будут посвящены анализу компонентного состава терпенового комплекса хвои *P. obovata* L.

Ключевые слова: популяции ели, хвоя, лигноуглеводный комплекс, термический анализ

Ссылка для цитирования: Лоскутов С.Р., Казарян Л.К., Анискина А.А., Шапченкова О.А., Пермякова Г.В., Ефремов С.П., Пименов А.В. Термогравиметрия в исследовании внутривидовой физико-химической дифференциации популяций ели сибирской (*Picea obovata* L.) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 6. С. 135–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-6-135-146

Ель сибирская (*Picea obovata* L.) относится к числу основных лесообразующих видов boreальной зоны Евразии. На территории России леса с участием ели (*Picea A. Dietr.*) занимают примерно 76 млн га, что составляет около 11 % всей лесопокрытой площади страны [1]. В пределах области распространения ель сибирская образует широкий спектр морфологической изменчивости, проявляющийся в наличии внутривидовых форм и морфотипов деревьев, адаптированных к различным условиям произрастания [2]. Для вида характерна высокая степень генетической дифференциации, при этом основная доля генетической изменчивости приходится на внутрипопуляционный уровень [3, 4]. Наибольшее разнообразие морфологических форм с особыми адаптивными характеристиками и индивидуальной устойчивостью к внешним воздействиям

нередко характерно для пограничных популяций, функционально «отягощенных» географической изоляцией, гибридогенными процессами и жесткими рамками естественного отбора [5]. Диагностирована высокая чувствительность темнохвойных видов к антропогенным воздействиям, проявляющаяся, в частности, у ели сибирской в существенном сокращении генетического разнообразия молодых поколений на месте сплошных широколесосечных и выборочных рубок высокой интенсивности [6].

Актуальность выявления внутривидового разнообразия или сохранения инвариантности вида *P. obovata* L. определяет целесообразность проведения биоресурсных исследований в тех частях ареала, где в оптимальные для вида условия произрастания в целом характеризуются почвенно-гидрологической и фитоценотической неоднородностью, наличием орографических и фенологических межпопуляционных барьеров. Таким критериям соответствует южносибирская

часть ареала ели сибирской в пределах Республики Хакасия, где на относительно небольшой площади сосредоточены чистые и смешанные древостои видов *Pinaceae* горнотаежного, лесостепного и пойменно-болотного рядов развития, различающиеся по своей морфотипической, возрастной и пространственной структуре и характеризующиеся повышенным уровнем генетической изменчивости популяций [7–10].

К числу основных показателей *P. obovata* L., влияющих на ресурсно-технологическую значимость, наряду с морфологическим и генетическим относится химический аспект, включающий в себя изучение вариаций химического состава вторичных метаболитов [11–13].

Вместе с тем данные о составе характерных для растений полимеров, таких как гемицеллюлозы, целлюлоза и лигнин, их соотношение в хвое, крайне мало представлены в литературе. С одной стороны, роль этих компонентов в строении клеточных стенок как полимерного матрикса, обеспечивающего механические свойства клеток и органов, предполагает наименьшую внутриклеточную вовлеченность в биохимические процессы. С другой стороны, можно предположить, что в процессе их синтеза во время роста хвои до зрелого состояния в структуре всего комплекса «записано» влияние факторов, придающих «的独特性» синтезируемому матриксу. Учитывая относительное постоянство его состава на протяжении жизненного цикла хвои по сравнению с быстро изменяющимися по содержанию компонентами клеток, в зависимости от условий среды произрастания (как, например, терпены), физико-химические свойства лигноуглеводного комплекса (гемицеллюлозы + целлюлоза + лигнин) являются, по нашему мнению, маркерами внутривидовой биохимической инвариантности или химического разнообразия, в зависимости от амплитуд воздействия биотических и абиотических факторов.

Цель работы

Цель работы — установление наличия или отсутствия вариации ряда физико-химических показателей лигноуглеводного матрикса хвои ели сибирской (*Picea obovata* L.) из территориально обособленных популяций в экологически контрастных местопроизрастаниях восточного макросклона Кузнецкого Алатау.

Материалы и методы

Объектами исследования послужили шесть популяций *P. obovata* L. из различных экотопов Республики Хакасии, представляющие горно-

долинные ельники зеленомошно-травяно-кустарниковой группы типов леса на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау в пределах Ширинского и Орджоникидзевского районов республики. Изученные популяции ели орографически изолированы одна от другой, отличаются по морфологическим и таксационным характеристикам. Наименование популяций определяется названием близлежащих населенных пунктов (Коммунар, Агаскыр) либо малых рек бассейна р. Чулым (рек Карагас, Тунгужуль, Сарала, Тарча), по долинам которых произрастают данные популяции *P. obovata* L. (табл. 1). Отбор экспериментальных материалов (образцов хвои) проводился в сентябре 2023 г.

Подготовка среднего образца пробной площади осуществлялась по методу квартования. Свежезаготовленную хвою ели высушивали на воздухе до равновесной (с влажностью воздуха 55...60 %) влажности, измельчали до размера 0,5...1,0 мм. Навески по 10 г хвои исчерпывающе экстрагировали смесью вода — моноэтаноламин (1 %) при температуре 80 °C и жидкостном модуле 1:10 в течение 6 ч [14]. Выход проэкстрагированных веществ составил в среднем по всем популяциям 31,05 ± 2,56 % массы сухого образца. Последэкстракционный остаток хвои (ПЭОХ) промывали деионизированной водой и высушивали при температуре 40 °C.

Термогравиметрии (ТГ) подвергались воздушно-сухие образцы ПЭОХ с помощью аналитической системы TG 209 F1 («NETZSCH», ФРГ) при следующих условиях: ТГ/ДТГ — нагрев со скоростью 10 °C/мин от 25 до 700 °C в окислительной динамической атмосфере (20 мл/мин, воздух), масса образцов ПЭОХ — 2,15...2,79 мг.

Важным характеристическим параметром кинетики термоокислительной деструкции ПЭОХ является кажущаяся энергия активации (E_a), которая рассчитана с использованием ТГ-кривых по уравнению Брайдо [15, 16]

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{y} \right) \right] = -\frac{E_a}{RT} + \ln \left(\frac{\alpha r T_{\max}^2}{\beta E_a} \right),$$

где y — массовая доля неразложившегося анализируемого образца;

T — температура;

R — универсальная газовая постоянная;

α — предэкспоненциальный множитель (частотный фактор);

β — скорость нагрева;

T_{\max} — температура, соответствующая максимуму на кривой ДТГ.

Компоненты лигноуглеводного комплекса ПЭОХ при нагревании в опытах по термогравиметрии разлагаются в частично перекрыва-

Таблица 1

**Биоэкологическая характеристика популяций *P. obovata* L. в Ширинском
и Орджоникидзевском районах Республики Хакасия**

**Bioecological characteristics of *P. obovata* L. populations in the Shirinsky
and Ordzhonikidze districts of the Republic of Khakassia**

Номер популяции	Наименование популяции	Географические координаты	Орографические и фитоценотические условия
1	Тунгужуль	54°16' с. ш. 89°38' в. д.	Ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый на суходольной бровке вдоль торфяного массива в долине р. Тунгужуль (правый приток р. Белый Июс). Высота 622 м н. у. м. Кустарниковый ярус развит на границе древостоя с пастбищными лугами, сформирован густыми, высокорослыми до 2–3 м зарослями березы низкой и ивы розмаринолистной с редким участием пятилистника кустарникового
2	Коммунар	54°19' с. ш. 89°19' в. д.	Ельник травяно-зеленомошный на суходольном берегу горной р. Собака в 2 км от пос. Коммунар. Высота 634 м н. у. м. Характерно наличие осадочных фракций горного мелкозема, переносимого течением в почвенные горизонты с расположенных выше по течению реки хвостохранилищ горно-обогатительной фабрики
3	Агаскыр	54°57' с. ш. 89°18' в. д.	Суходольный ельник травяно-кустарниковый на правобережной части надпойменной террасы р. Печище (левый приток р. Черный Июс) в 2 км от с. Агаскыр. Высота 523 м н. у. м. В состав древостоя входят единичные лиственницы и березы. Кустарниковый ярус представлен пятилистником кустарниковым и караганой кустарниковой
4	Сарала	54°43' с. ш. 88°52' в. д.	Горно-долинный ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый на правобережной части надпойменной террасы р. Сарала (левый приток р. Черный Июс) Высота 643 м н. у. м. В состав древостоя входят единичные лиственницы, кедры, пихты и березы
5	Каратас	54°08' с. ш. 89°29' в. д.	Суходольный, умеренно влажный ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый в межгорно-долинном пространстве р. Каратас (правый приток р. Белый Июс). Высота 617 м н. у. м. В состав древостоя входят единичные лиственницы, кедры и березы. Подлесок хорошо выражен, представлен рябиной, черемухой, свидой белой, смородиной, малиной, шиповником, таволгами иволистной и средней, кизильником одноцветковым
6	Тарча	54°31' с. ш. 89°23' в. д.	Суходольный ельник зеленомошно-травяно-кустарниковый в долине р. Тарча (левый приток р. Белый Июс). Высота 517 м н. у. м. В редком подлеске встречаются смородина, шиповник, черемуха, пятилистник кустарниковый, кизильник одноцветковый. Моховой ярус сформирован рыхлыми дерновинами, образует комплексы с синузиями кладоний разнообразных форм

Примечание. В дальнейшем изложении номера популяций, указанные в тексте, на графиках, рисунках и в таблицах, соответствуют популяциям в данной таблице.

ющихся температурных интервалах, поэтому кривые дифференциального термического анализа (ДТГ) являются контурами суперпозиции составляющих пиков. Для визуализации «содержимого» этих контуров используют методы деконволюции, а также четвертые (или вторые) производные, рассчитываемые с помощью дифференцирующих фильтров, например фильтра Савицкого — Голея [17–20].

В настоящей работе для визуализации «микростадийности» процесса термодеструкции образцов ПЭОХ были рассчитаны четвертые производные сплайн-интерполяций экспериментальных ДТГ-контуров. Полученные за-

висимости $\partial^4(\text{ДТГ}) / \partial t^4 = f(t)$ использовались для определения наличия (или отсутствия) дифференциации популяций или по параметрам «микростадийной» термоокислительной деструкции лигноуглеводного комплекса хвои.

С этой же целью была рассчитана кажущаяся энергия активации E_a (в зарубежной литературе — apparent activation energy) как основной кинетический показатель термического разложения ПЭОХ всех популяций.

Результаты и обсуждение

Записи термограмм всех образцов ПЭОХ визуально сходные (рис. 1). Вместе с тем анализ

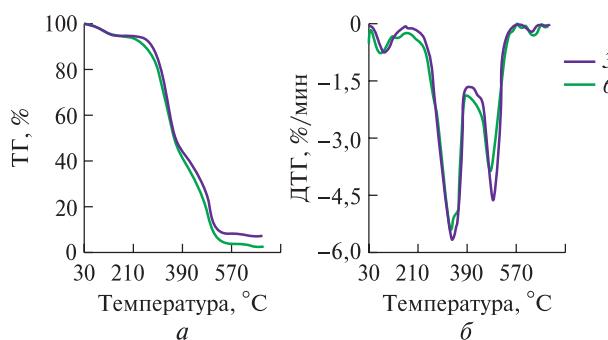


Рис. 1. Термограммы ТГ (а) и ДТГ (б) послеэкстракционного остатка хвои из популяций 3 и 6
Fig. 1. The thermograms of TG (a) and DTG (b) of the post-extraction residual of spruce needles from the populations 3 and 6

их цифровых копий позволяет установить различия, отвечающие физико-химическим параметрам, которые свидетельствуют о степени вариабельности данного типа между исследованными популяциями ели. Из многочисленных литературных данных по изучению лигноцеллюлозных материалов с помощью методов термического анализа установлены температурные интервалы термоокислительной деструкции углеводного комплекса (УК) — холоцеллюлозы и фенольного комплекса (ФК) — в основном лигнина, идентифицируемых по кривым ДТГ [20–23].

Ширина соответствующих температурных интервалов для разных образцов (объектов) неодинакова: зависит от массовой доли и типа гемицеллюлоз, доли аморфной и высокоупорядоченной структур целлюлозы в составе холоцеллюлозы (УК), типа и строения лигнина — основного компонента ФК.

Определены параметры пиков ДТГ термодеструкции ПЭОХ всех популяций, установ-

ленные по усредненным термограммам после двукратного термогравиметрического теста каждого образца (табл. 2).

По данным табл. 2 видно, что температура пиков ДТГ_{УК} и ДТГ_{ФК} не зависит от популяции. Биохимический смысл этого наблюдения состоит в том, что химический состав и структура лигноуглеводного комплекса хвои, практически одинаковы (по этим параметрам) во всех популяциях. Наиболее выраженное различие температуры пиков ДТГ_{УК} по сравнению с пиками ДТГ_{ФК} для исследованных ПЭОХ, объясняется химической гетерогенностью фенольного комплекса хвои, а также, вероятно, разной степенью «участия» образовавшегося в процесс термодеструкции ПЭОХ биоугля. Коэффициент вариации этого показателя указывает на незначительные колебания в целом по популяциям, что не свидетельствует о внутривидовом химическом разнообразии для популяций на уровне этой характеристики ПЭОХ.

При исследовании лигноуглеводных материалов методом ТГ/ДТГ установлен факт перекрывания (overlapping) в разной степени температурных интервалов термического разложения полиоз, целлюлозы и лигнина [24, 25], с одной стороны, и зависимость структуры этих компонентов от экзо- и эндогенных условий роста растений — с другой [26]. Так, состав и степень разветвленности молекул полиоз, доля аморфной и высокоупорядоченной структуры целлюлозы (степень кристалличности), степень метоксилирования и общая гетерогенность лигнина, характер взаимодействия между компонентами, их массовая доля в исследуемом образце — это параметры лигноуглеводного комплекса, обусловливающие характер термодеструкции элементов структуры компонентов комплекса и соответствующую форму ДТГ-контура.

Таблица 2

Параметры ДТГ-пиков углеводного и фенольного комплексов и остаточная масса по завершении ТГ/ДТГ тестов послеэкстракционного остатка хвои

Parameters of the carbohydrate and phenolic complexes DTG peaks and residual mass at the end of TG/DTG tests

Параметр	1*	2	3	4	5	6	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
$T_{УК}, ^\circ\text{C}$	329	329	329	330	329	329	329	0,37	0,11
ДТГ _{УК} , %/мин	5,51	4,97	5,61	5,27	5,17	5,33	5,31	0,21	3,97
$T_{ФК}, ^\circ\text{C}$	479	474	489	470	474	474	477	6,10	1,28
ДТГ _{ФК} , %/мин	3,46	3,83	5,75	3,60	3,77	3,80	4,04	0,78	19,27
Остаточная масса**, %	8,40	5,91	4,38	3,65	6,21	1,49	5,01	2,17	43,44

*1–6 — номер популяции; **Остаточная масса включает в себя минеральные компоненты и недоокисленный уголь, образовавшийся в ходе анализа образцов.

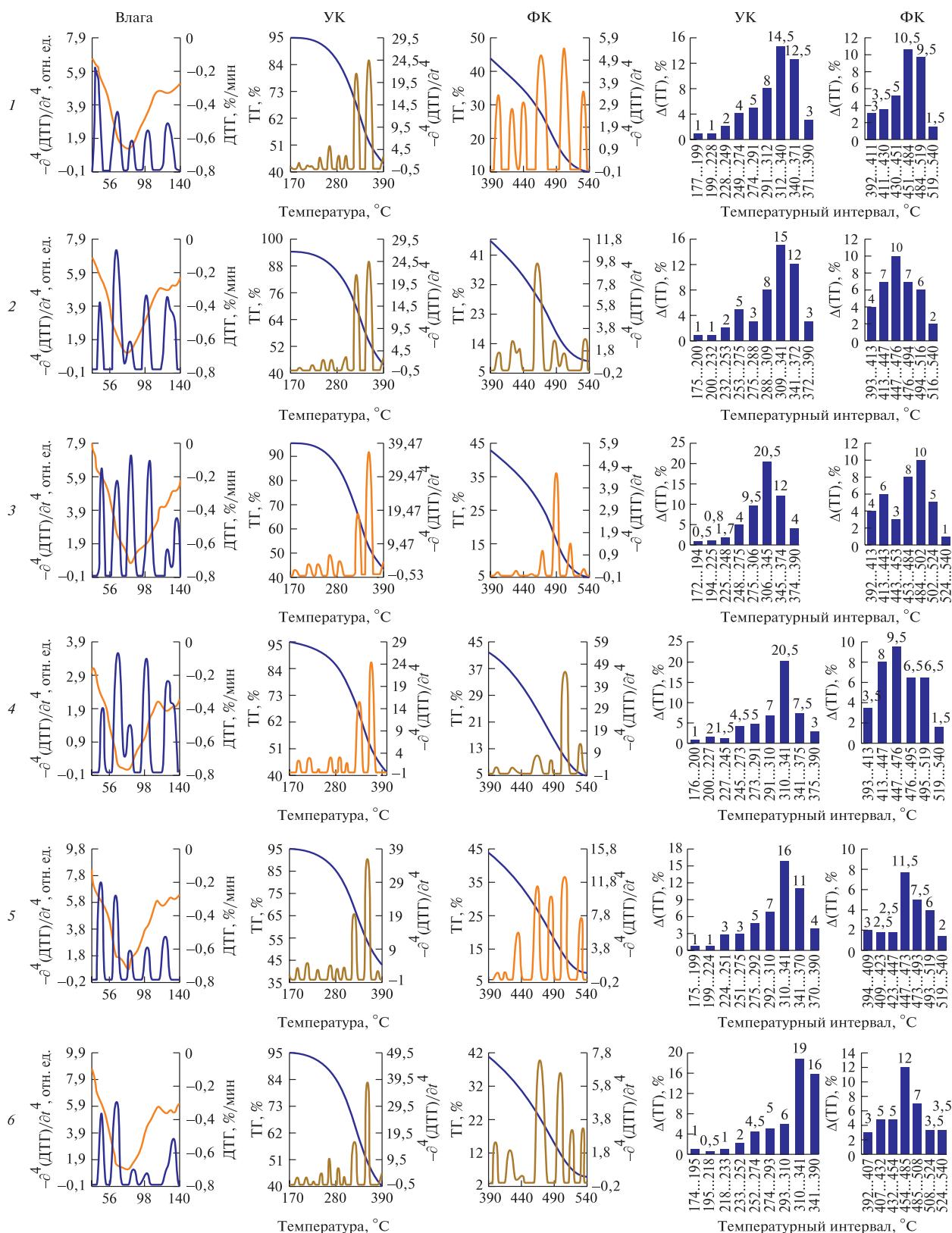


Рис. 2. Визуализация «микростадийности» испарения влаги, термодеструкции углеводного и фенольного комплексов послезэкстракционного остатка хвои популяций 1–6 по методу четвертых производных ДТГ-контуротов с помощью дифференцирующего фильтра Савицкого — Голея (ширина окна — 7 точек, степень полинома — 4)

Fig. 2. Visualization of the «micro staging» of moisture evaporation, thermal degradation of carbohydrate and phenolic complexes of the post-extraction residue of needles from the populations 1–6 by the method of fourth derivatives of DTG contours using a Savitzky — Golay differentiating filter (window width of 7 points, degree of polynomial 4)

Эффективным методом анализа «содержимого» различных контуров (чаще всего спектральных — поглощения биологическими объектами в ИК-диапазоне, реже — ДТГ-контурами, ВЭЖХ, капиллярного электрофореза и др.), как уже отмечалось, является расчет вторых или четвертых производных сплайн-интерполяций экспериментальных контуров, например с помощью дифференцирующего фильтра Савицкого — Голея [27–32].

В настоящем исследовании эта процедура проведена для ДТГ-контуров (рис. 2). Биохимический смысл разных картин потери влаги образцами заключается в неодинаковом распределении центров адсорбции молекул воды по энергии связи в ПЭОХ, которое имеет стохастическую природу. Для данного соотношения гидрофильных компонентов и числа теоретически доступных для гидратации центров (ОН-групп) при уменьшении влажности образца во время его кондиционирования перед проведением термогравиметрического теста случайным образом «замораживается» сегментальная подвижность носителей центров адсорбции, которая обуславливает зарегистрированную в термогравиметрическом опыте дегидратацию (влажность) ПЭОХ.

В температурном диапазоне 170...390 °C, где преимущественно разлагается УК, деконволюция ДТГ-контуров образцов 1–6 визуально сходна. Вариабельность, характеризуемая коэффициентом вариации, полиоз и целлюлозы ПЭОХ шести популяций низкая и составляет 7,7 и 8,7 % соответственно. Коэффициент вариации массовой доли в целом УК в составе ПЭОХ исследованных популяций равен 3,1 %, что, очевидно, свидетельствует об инвариантности УК относительно «преобразования» (изменения) эндо- и экзогенных факторов («координат») образования и функционирования в составе матрикса хвои популяций ели.

Структура «микростадийности» термоокислительной деструкции ФК между популяциями заметно отличается от термического разложения УК как по числу пиков, так и по их интенсивности (см. рис. 2). Вариабельность ФК в ПЭОХ на момент заготовки образцов хвои низкая — 5,1 %, что несколько выше коэффициента вариации УК — 3,1 %.

Выполнен расчет энергии активации E_a (рис. 3) реакций термоокислительной деструкции ПЭОХ по ТГ-кривым, что дает представление о термической стабильности компонентов

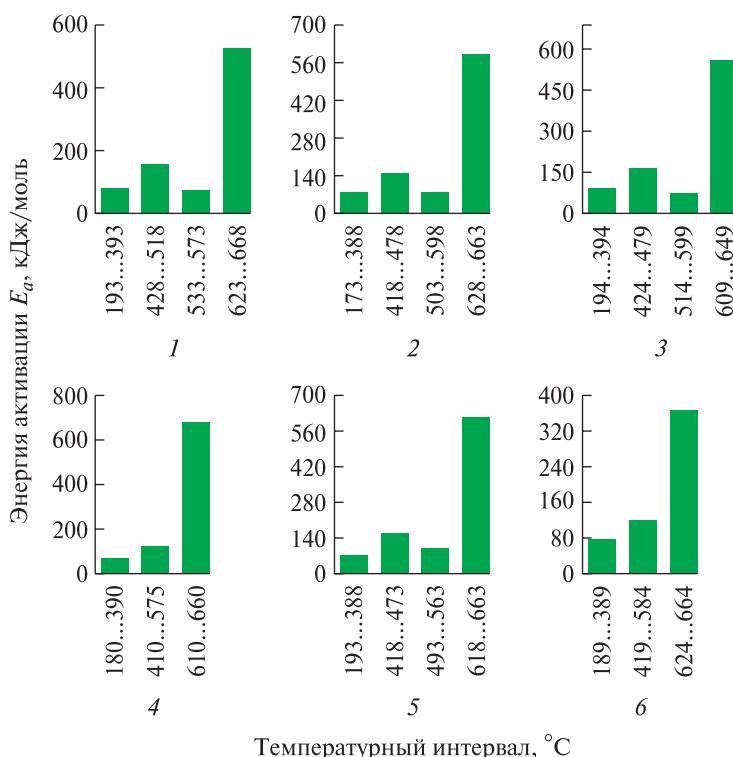


Рис. 3. Гистограммы зависимости энергии активации реакций термодеструкции послежэкстракционного остатка хвои из популяций 1–6
Fig. 3. Histograms of changes in activation energy of thermal destruction reactions of the PERN from the populations 1–6

лигноуглеводного комплекса, которая определяется его структурой, химическим строением гемицеллюлоз и лигнина, степенью кристалличности целлюлозы, взаимодействием компонентов. В связи с этим химически различным лигноуглеводным комплексам по названным характеристикам будут отвечать разные значения энергии активации E_a их термической деструкции.

В настоящей работе рассмотрение конкретных значений E_a (см. рис 3) не так важно, как анализ их вариабельности. Так, коэффициент вариации энергии активации термического разложения углеводного комплекса ПЭОХ составляет 6,5 %, фенольного — 11,8 %. Вряд ли возможно относить такие значения коэффициента вариации для лигноуглеводного матрикса хвои к показателям наличия внутривидового химического разнообразия, поскольку он сложного строения, с изменяющимися в зависимости от эндо- и экзогенных условий физико-химическим состоянием и биохимической функциональностью.

Вместе с тем их индикационная (дифференцирующая) способность при сравнении биологически подобных объектов приемлема.

Термогравиметрия и дифференциальная термогравиметрия с анализом зависимостей $\partial^4(\text{DTG}) / \partial t^4 = f(t)$, полученных с помощью применения дифференцирующего фильтра Савицкого — Голея к ДТГ-контурам ПЭОХ индивидуальных популяций ели, насколько нам известно, использованы впервые с целью выявления их химического разнообразия или инвариантности на уровне физико-химических свойств лигноуглеводного матрикса хвои, состоящего из полиоз, целлюлозы и лигнина.

Лигноуглеводный комплекс (или матрикс) хвои, отобранный одновременно во всех популяциях, является «наименее биохимически используемым» в жизненном цикле хвои от момента своего образования. Другими словами, для данной популяции ели — это некая константа в физико-химическом смысле, но, вероятно, будет варьировать у популяций с неодинаковой биотической и абиотической историей. Поэтому исследование разнообразия или инвариантности популяций ели на уровне физико-химических свойств лигноуглеводного матрикса хвои сводится к анализу изменчивости (или постоянства) набора его характеристических параметров (см. табл. 2, рис. 2, рис. 3).

Из анализа результатов термогравиметрии ПЭОХ получены данные (табл. 3) для оценки химического разнообразия по индивидуальным компонентам ПЭОХ популяций ели с помощью часто используемого индекса Шеннона и впервые по предлагаемому индексу инвариантности [33].

Таблица 3

Исходные данные для расчета показателя I_{lcp} и индекса Шеннона ($H = \sum p_i \cdot \ln p_i$)

Source data for calculating the I_{lcp} indicator and the Shannon index ($H = \sum p_i \cdot \ln p_i$)

Номер популяции	Парциальные значения содержания компонентов послеэкстракционного остатка хвои ели		
	Лигнин (p_l)	Целлюлоза (p_c)	Полиозы (p_p)
1	0,388	0,352	0,247
2	0,409	0,341	0,227
3	0,398	0,392	0,177
4	0,388	0,339	0,230
5	0,385	0,341	0,220
6	0,390	0,350	0,200

Приняты следующие обозначения:

C, P, Ph — массовая доля (%) целлюлозы, полиоз и фенольного комплекса (лигнина и других лигниноподобных веществ) соответственно в ПЭОХ;

$$p_c = \frac{C}{(Ph + C + P)}, \quad p_p = \frac{P}{(Ph + C + P)};$$

$p_l = \frac{Ph}{(Ph + C + P)}$ — парциальные значения содержания целлюлозы (p_c), полиоз (p_p) и лигнина (p_l) в ПЭОХ.

Показатель инвариантности компонентного состава лигноуглеводного комплекса ПЭОХ рассчитан по формуле

$$I_{lcp} = \frac{(p_l + p_c) \cdot (p_c + p_p)}{p_c}.$$

По формуле Маргалефа рассчитан индекс «химического богатства»

$$D = \frac{(S-1)}{\ln N} = 0,692,$$

где S — число компонент лигноуглеводного комплекса ПЭОХ, равное 3;

N — общее число компонент всех популяций ели, равное 18.

Параметр инвариантности лигноуглеводного комплекса ПЭОХ шести популяций ели ($1,247 < I_{lcp} < 1,335$) выходит за пределы значений $1,033 < I_{lcp} < 1,152$ для древесины 23 ботанических видов хвойных из 47 экологически благополучных ботанико-географических областей [29, 34].

В работе [35] приведены данные о химическом составе здоровой *Picea abies* L. и аномальной древесины с наростов («wulstholz») на этом же стволе. Для аномальной древесины среднее значение $I_{lcp} = 1,244$, для здоровой — $1,068 < I_{lcp} < 1,078$. Если принять во внимание этот факт, то относительно параметра инвариантности лигноуглеводного комплекса ПЭОХ шести популяций ели можно говорить об аномальной величине индекса ($1,247 < I_{lcp} < 1,335$), либо рассчитанные значения I_{lcp} — это новый интервал показателя инвариантности лигноуглеводного комплекса хвои. Последнее, по нашему мнению, маловероятно. Следовательно, увеличенное I_{lcp} выше 1,152 может свидетельствовать о стрессовом состоянии популяций, вызванном продолжительным действием каких-либо стрессоров.

Значения индекса Маргалефа и параметра инвариантности ($D = 0,692$ и $I_{lcp} = 1,292 \pm 0,075$ соответственно) свидетельствуют о бедном химическом разнообразии на уровне лигноуглеводного матрикса хвои и слабом стрессовом состоянии исследованных популяций ели. Среднее значение индекса Шеннона (H), рассчитанное для индивидуальных компонентов лигноуглеводного комплекса ПЭОХ (2,129) указывает на сбалансированность популяций по химическому разнообразию на уровне лигноуглеводного комплекса хвои.

Выводы

Анализ результатов термогравиметрии (ТГ/ДТГ) послеэкстракционного остатка хвои шести популяций ели показал следующее. Несмотря на их орографическую изолированность и отличия по морфологическим и таксационным характеристикам, вариабельность температурных интервалов параметров пиков ДТГ и энергии активации термоокислительной деструкции углеводного и фенольного комплексов не позволяет говорить о химическом разнообразии популяций по физико-химическим характеристикам послеэкстракционного остатка.

Индексы Шеннона и Маргалефа также указывают на бедное химическое разнообразие.

Параметр инвариантности отвечает однаковому (или близкому) компонентному составу послеэкстракционного остатка хвои исследуемых популяций ели, одновременно указывая на их стрессовое состояние.

Популяции ели, произрастающие на восточном макросклоне Кузнецкого Алатау, возможно, адаптировались к продолжительному действию стрессоров, выработав «новый» инвариант лигноуглеводного матрикса хвои.

Список литературы

- [1] Рысин Л.П., Савельева Л.И. Еловые леса России. М.: Наука, 2002. 335 с.
- [2] Попов П.П., Казанцева М.Н., Арефьев С.П. Фенотипическая структура популяций ели на Европейском Севере России // ИзВУЗ Лесной журнал, 2021. № 2. С. 9–20.
- [3] Кравченко А.Н., Ларионова А.И., Милютин Л.И. Генетический полиморфизм ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в Средней Сибири // Генетика, 2008. Т. 44. № 1. С. 45–53.
- [4] Шилкина Е.А., Ибе А.А., Шеллер М.А., Сухих Т.В. Генетическая дифференциация популяций *Picea obovata* L. в регионах Сибири // Хвойные бореальные зоны, 2019. Т. XXXVII, № 1. С. 68–73.
- [5] Коропачинский И.Ю., Потемкин О.Н., Рудиковский А.В., Кузнецова Е.В. Полиморфизм и структура популяций ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на северном пределе распространения вида // Сибирский экологический журнал, 2012. № 2. С. 174–184.
- [6] Тихонова И.В., Экарт А.К., Кравченко А.Н., Тихонова Н.А. Генетическая изменчивость в популяциях *Pinus sylvestris*, *Picea obovata*, *Abies sibirica* на вырубках в южной тайге Средней Сибири // Генетика, 2021. Т. 57. № 3. С. 296–310.
- [7] Орешкова Н.В., Седельникова Т.С., Ефремов С.П., Пименов А.В. Генетический полиморфизм сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) в Кузнецком Алатау // Сибирский экологический журнал, 2020. № 6. С. 677–688.
- [8] Орешкова Н.В., Пименов А.В. Седельникова Т.С., Ефремов С.П. Генетический полиморфизм лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в контрастных экотопах Республики Хакасия // Генетика, 2025. Т. 61. № 1. С. 45–54.
- [9] Седельникова Т.С., Пименов А.В., Ефремов С.П. Кардиологическое исследование изолированной популяции сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) Ширинской степи Республики Хакасия // Известия РАН. Серия биологическая, 2023. № 5. С. 487–498. DOI: 10.31857/S1026347022600716
- [10] Кононов Г.Н., Зарубина А.Н., Веревкин А.Н., Зайцев В.Д., Чекунин Д.Б. Древесина как химическое сырье. История и современность. III. Пиролиз древесины как метод ее переработки // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 3. С. 126–141. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-126-141
- [11] Moore B.D., Andrew R. L., Külheim C., Foley W. Explaining intraspecific diversity in plant secondary metabolites in an ecological context // New Phytologist, 2013, v. 201, no. 3, pp. 733–750. DOI: 10.1111/nph.12526. www.newphytologist.com New
- [12] Staudt M., Mandl N., Joffre R., Ramba S. Intraspecific variability of monoterpane composition emitted by *Quercus ilex* leaves // Can. J. For. Res., 2001, v. 31, no. 1, pp. 174–180. DOI: 10.1139
- [13] Kopaczynka J. M., Wargulab J., Jeloneka T. The variability of terpenes in conifers under developmental and environmental stimuli // Environmental and Experimental Botany, 2020, v. 180, 104197 p.
- [14] Лоскутов С.Р., Пермякова Г.В., Анискина А.А., Перышкина Г.И. Влияние добавокmonoэтаноламина на экстракцию коры *Larix sibirica* Ledeb. Растворительные ресурсы, 1997. Т. 33. № 2. С. 74–78.

- [15] Broido A. A Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data // J. of polymer science, 1969, Part A-2, v. 7, pp. 1761–1773.
- [16] Ming G., Qiu-ju D. Studies on Thermal Degradation of Cellulosic Fibers Treated with Flame Retardants // The Chinese J. of Process Engineering, 2006, v. 6, no. 2, pp. 242–246.
- [17] Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Analytical Chemistry, 1964, v. 36, no. 8, pp. 1627–1639.
- [18] Luo J., Ying K., He P., Bai J. Properties of Savitzky-Golay digital differentiators // Digital Signal Processing, 2005, v. 15, pp. 122–136.
- [19] Казарян Л.К., Лоскутов С.Р., Пляшечник М.А., Симкин Ю.Я. Торрефикация и пиролиз хвои *Pinus Sylvestris L.*: сравнительная характеристика продуктов // Ползуновский вестник, 2023. № 4. С. 214–222.
- [20] Казарян Л.К., Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Пляшечник М.А., Пермякова Г.В., Шимова Ю.С. Характеристика продуктов пиролиза послеэкстракционного остатка хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 6. С. 84–97.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-84-97
- [21] Tyutkova E., Loskutov C., Petrov I., Dorzhiev D. Seasonal biochemical changes in *Betula tortuosa* Ledeb. annual rings in Alpine forest-tundra of Kuznetsk Ala Tau Mountains // Wood Science and Technology, 2023, v. 57, no. 1, pp. 289–306.
- [22] Shen D.K., Gua S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment // Fuel, 2009, v. 88, no. 6, pp. 1024–1030.
- [23] Shapchenkova O., Loskutov S., Aniskina A., Börcsök Z., Pásztory Z. Thermal characterization of wood of nine European tree species: thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere // European J. of Wood and Wood Products, 2022, v. 80, iss. 2, pp. 409–417.
- [24] Zhao H., Yan H., Zhang C., Sun B., Zhang Y., Dong S., Xue Y., Qi S. Thermogravimetry study of pyrolytic characteristics and kinetics of the giant wetland plant *Phragmites australis* // J. Therm Anal Calorim, 2012, v. 110, no. 2, pp. 611–617.
DOI 10.1007/s10973-011-2018-3.
- [25] Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction // Practical Design and Theory. Academic Press. Elsevier, 2013, 551 p.
- [26] Тютькова Е.А., Лоскутов С.Р., Доржиев Д.В. Сезонная изменчивость химической структуры годичных колец *Betula tortuosa* L., произрастающей в экотоне альпийской лесотундры Кузнецкого Алатау // Химия растительного сырья, 2023. № 3. С. 63–70.
- [27] Rosales-Martinez O., Granda-Gutiérrez E.E., García-Hernandez R.A., Alejo-Eleuterio R., Flores-Fuentes A.A. Spectral Derivatives Improve FTIR-Based Machine Learning Classification of Plastic Polymers // Modelling, 2025, v. 6, no. 115, pp. 1–22.
<https://doi.org/10.3390/modelling6040115>
- [28] Traoré M., Kaal J., Cortiza A.M. Differentiation between pine woods according to species and growing location using FTIR-ATR // Wood Sci Technol., 2018, v. 52, pp. 487–504.
- [29] Loskutov S.R., Tyutkova E.A. The invariance some physicochemical properties of wood // Fundamental science and technology – promising developments, 2013, v. 2, pp. 231–235.
- [30] Цибульский В.Р., Арефьев С.П., Новиков В.П., Соловьев И.Г., Говорков Д.А. Определение индекса биоразнообразия Шеннона растительных сообществ, образованных деревьями-эдификаторами, на примере лесов севера Западной Сибири // Вестник Нижневартовского государственного университета, 2021. Т. 54. № 2. С. 32–39.
- [31] Nolan K.A., Callahan J.E. Beachcomber Biology: The Shannon-Weiner Species Diversity Index // Proc. workshop, 2006, v. 27, pp. 334–338.
- [32] Петров Э.А. Информационный подход к морфогенезу // Доклады академии наук, 1992. Т. 325. № 2. С. 390–392.
- [33] Лоскутов С.Р. Взаимодействие древесины с физически активными низкомолекулярными веществами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 171 c.
- [34] Fengel D., Grosser D. Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubhölzern // Holz als Roh- und Werkstoff, 1975, v. 33, no. 1, pp. 32–34.
- [35] Koch G., Bauch J., Puls J., Schwab E. Biological, chemical and mechanical characteristics of «wulstholtz» as respons to the mechanical stress in living trees of *Picea abies* [L.] Karst // Holzforschung, Walter de Gruyter Berlin, New York, 2000, v. 54, pp. 137–143.

Сведения об авторах

Лоскутов Сергей Реджинальдович — д-р хим. наук, академик Международной академии наук о древесине (ИАВС), гл. науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», lsr@ksc.krasn.ru

Казарян Лилит Кареновна — мл. науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», kazaryan.lk@ksc.krasn.ru

Анискина Антонина Александровна — науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», aniskina_a@ksc.krasn.ru

Шапченкова Ольга Александровна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», sholga@ksc.krasn.ru

Пермякова Галина Васильевна — науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», permyakova.gv@ksc.krasn.ru

Ефремов Станислав Петрович — д-р биол. наук, гл. науч. сотр., ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», efr2@ksc.krasn.ru

Пименов Александр Владимирович — д-р биол. наук, зам. директора по науч. работе, ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН», pimenov@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 15.04.2025.

Одобрено после рецензирования 05.05.2025.

Принята к публикации 02.10.2025.

THERMOGRAVIMETRY IN INTRASPECIFIC PHYSICO-CHEMICAL DIFFERENTIATION STUDY OF SIBERIAN SPRUCE (*PICEA OBOVATA* L.)

S.R. Loskutov, L.K. Kazaryan, A.A. Aniskina[✉],
O.A. Shapchenkova, G.V. Permyakova, S.P. Efremov, A.V. Pimenov

Sukacev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, 50/28, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russia

aniskina_a@ksc.krasn.ru

The article studies the thermal analysis of the postextraction needles' residue (lignocarbon complex, PERN) from six spruce populations growing on the eastern macroslope of the Kuznetsk Alatau. The populations are orographically isolated from each other and differ in their morphological and taxation characteristics. The aim of the study is to establish the presence (or absence) of the physico-chemical variability of the lignocarbon complex as a biochemical polymer «framework» of needles. Using the methods of thermogravimetry (TG) and differential thermogravimetry (DTG), the thermo-oxidative degradation of PERN populations was investigated: a comparative analysis of the kinetics of the process, its «micro staging» according to the fourth derivatives of DTG contour and the analysis of mass loss profiles when heated from 20 to 700 °C at a rate of 10 °C/min. An analysis of the basic data on TG and DTG, the kinetics of thermal shock, and the relative structure of PERN revealed no significant differences between populations: the average values of the apparent activation energy of the entire thermal decomposition process are little changed. The values of the Shannon and Margalef variability indices and the parameter of projective invariance of experimental spruce populations at the level of the PERN lignocarbon complex are calculated. The values of these parameters indicate poor intraspecific chemical diversity at the level of the lignocarbon complex of *P. obovata* L. needles. Further studies of experimental objects will be devoted to the analysis of the component composition of the terpene in needles *P. obovata* L.

Keywords: spruce populations, needles, lignocarbon complex, thermal analysis

Suggested citation: Loskutov S.R., Kazaryan L.K., Aniskina A.A., Shapchenkova O.A., Permyakova G.V., Efremov S.P., Pimenov A.V. Termogravimetriya v issledovanii vnutrividovoy fiziko-khimicheskoy differentsiatsii populatsiy eli sibirskoy (*Picea obovata* L.) [Thermogravimetry in intraspecific physico-chemical differentiation study of Siberian spruce (*Picea obovata* L.)]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2025, vol. 29, no. 6, pp. 135–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-6-135-146

References

- [1] Rysin L.P., Savelyeva L.I. *Eloyye lesa Rossii* [Spruce forests of Russia]. Moscow: Nauka, 2002, 335 p.
- [2] Popov P.P., Kazantseva M.N., Arefyev S.P. *Fenotipicheskaya struktura populyatsiy eli na Evropeyskom Severe Rossii* [Phenotypic structure of spruce populations in the European North of Russia]. Russian Forestry J., 2021, no. 2, pp. 9–20.
- [3] Kravchenko A.N., Larionova A.I., Milyutin L.I. *Geneticheskiy polimorfizm eli sibirskoy (Picea obovata Ledeb.) v Sredney Sibiri* [The genetic polymorphism of the Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in Central Siberia]. Genetika [Genetics], 2008, v. 44, no. 1, pp. 45–53.
- [4] Shilkina E.A., Ibe A.A., Sheller M.A., Sukhov T.V. *Geneticheskaya differentsiatsiya populyatsiy Picea obovata L. v regionakh Sibiri* [Genetic differentiation of populations of *Picea obovata* L. in the regions of Siberia]. Khvoynye boreal'noy zony [Coniferous boreal zones], 2019, v. XXXVII, no. 1, pp. 68–73.
- [5] Koropachinsky I.Yu., Potemkin O.N., Rudikovsky A.V., Kuznetsova E.V. *Polimorfizm i struktura populyatsiy eli sibirskoy (Picea obovata Ledeb.) na severnom predele rasprostraneniya vida* [Polymorphism and structure of populations of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) at the northern limit of the species distribution]. Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Siberian Ecological J.]. 2012, no. 2, pp. 174–184.
- [6] Tikhonova I.V., Ekart A.K., Kravchenko A.N., Tikhonova N.A. *Geneticheskaya izmenchivost' v populyatsiyakh Pinus sylvestris, Picea obovata, Abies sibirica na vyrobkakh v yuzhnay tayge Sredney Sibiri* [Genetic variability in the populations of *Pinus sylvestris*, *Picea obovata*, *Abies sibirica* on deforestation in the southern taiga of Central Siberia]. Genetika [Genetics], 2021, v. 57, no. 3, pp. 296–310.
- [7] Oreshkova N.V., Sedelnikova T.S., Efremov S.P., Pimenov A.V. *Geneticheskiy polimorfizm sosny sibirskoy kedrovoy (Pinus sibirica Du Tour) v Kuznetskom Alatau* [Genetic polymorphism of Siberian cedar pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in Kuznetsk Alatau]. Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Siberian Ecological J.], 2020, no. 6, pp. 677–688.
- [8] Oreshkova N.V., Pimenov A.V., Sedelnikova T.S., Efremov S.P. *Geneticheskiy polimorfizm listvennitsy sibirskoy (Larix sibirica Ledeb.) v kontrastnykh ekotopakh Respubliki Khakasiya* [Genetic polymorphism of Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) in contrasting ecotypes of the Republic of Khakassia]. Genetika [Genetics], 2025, v. 61, no. 1, pp. 45–54.
- [9] Sedelnikova T.S., Pimenov A.V., Efremov S.P. *Kariologicheskoe issledovanie izolirovannoy populyatsii sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris) Shirinskoy stepi Respubliki Khakasiya* [Karyological study of an isolated population of ordinary pine (*Pinus sylvestris*) of the Shirinsky steppe of the Republic of Khakassia]. Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya [Izvestia of the Russian Academy of Sciences. The series is biological], 2023, no. 5, pp. 487–498. DOI: 10.31857/S1026347022600716
- [10] Kononov G.N., Zarubina A.N., Verevkin A.N., Zaytsev V.D., Chekunin D.B. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoryya i sovremennost'. III. Piroliz drevesiny kak metod ee pererabotki* [Wood as a chemical raw material. History and modernity. III. Wood pyrolysis as processing method]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 126–141. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-126-141
- [11] Moore B.D., Andrew R. L., Külheim C., Foley W. Explaining intraspecific diversity in plant secondary metabolites in an ecological context. New Phytologist, 2013, v. 201, no. 3, pp. 733–750. DOI: 10.1111/nph.12526. www.newphytologist.com New
- [12] Staudt M., Mandl N., Joffre R., Ramba S. Intraspecific variability of monoterpene composition emitted by *Quercus ilex* leaves. Can. J. For. Res., 2001, v. 31, no. 1, pp. 174–180. DOI: 10.1139
- [13] Kopaczka J. M., Wargulab J., Jeloneka T. The variability of terpenes in conifers under developmental and environmental stimuli. Environmental and Experimental Botany, 2020, v. 180, 104197 p.
- [14] Loskutov S.R., Permyakova G.V., Aniskina A.A., Peryshkina G.I. *Vliyanie dobavok monoethanolamina na ekstraktsiyu kory Larix sibirica Ledeb.* [The effect of monoethanolamine additives on the extraction of *Larix sibirica* Ledeb bark]. Rastitel'nye resursy [Plant resources], 1997, v. 33, no. 2, pp. 74–78.
- [15] Broido A. A Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data. J. of polymer science, 1969, Part A-2, v. 7, pp. 1761–1773.
- [16] Ming G., Qiu-ju D. Studies on Thermal Degradation of Cellulosic Fibers Treated with Flame Retardants. The Chinese J. of Process Engineering, 2006, v. 6, no. 2, pp. 242–246.
- [17] Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. Analytical Chemistry, 1964, v. 36, no. 8, pp. 1627–1639.
- [18] Luo J., Ying K., He P., Bai J. Properties of Savitzky-Golay digital differentiators. Digital Signal Processing, 2005, v. 15, pp. 122–136.
- [19] Kazaryan L.K., Loskutov S.R., Plyashechnik M.A., Simkin Yu.Ya. *Torrefikatsiya i piroliz khvoi Pinus Sylvestris L.: sravnitel'naya kharakteristika produktov* [Torification and pyrolysis of *Pinus Sylvestris* L. needles: comparative characteristics of products] Polzunovsky vestnik [Polzunovsky Herald], 2023, no. 4, pp. 214–222.
- [20] Kazaryan L.K., Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Plyashechnik M.A., Permyakova G.V., Shimova Yu.S. *Kharakteristika produktov piroliza posleekstraktsionnogo ostatka khvoi sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.)* [Pyrolysis products characteristics of pine needles (*Pinus sylvestris* L.) post-extraction residue]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 84–97. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-84-97
- [21] Tyutkova E., Loskutov C., Petrov I., Dorzhiev D. Seasonal biochemical changes in *Betula tortuosa* Ledeb. annual rings in Alpine forest-tundra of Kuznetsk Ala Tau Mountains. Wood Science and Technology, 2023, v. 57, no. 1, pp. 289–306.
- [22] Shen D.K., Gua S., Luo K.H., Bridgewater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. Fuel, 2009, v. 88, no. 6, pp. 1024–1030.
- [23] Shapchenkova O., Loskutov S., Aniskina A., Börcsök Z., Pásztory Z. Thermal characterization of wood of nine European tree species: thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere. European J. of Wood and Wood Products, 2022, v. 80, iss. 2, pp. 409–417.

- [24] Zhao H., Yan H., Zhang C., Sun B., Zhang Y., Dong S., Xue Y., Qi S. Thermogravimetry study of pyrolytic characteristics and kinetics of the giant wetland plant *Phragmites australis*. *J. Therm Anal Calorim.*, 2012, v. 110, no. 2, pp. 611–617. DOI 10.1007/s10973-011-2018-3.
- [25] Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Design and Theory. Academic Press. Elsevier, 2013, 551 p.
- [26] Tyutkova E.A., Loskutov S.R., Dorzhiev D.V. *Cezonnaya izmenchivost' khimicheskoy struktury godichnykh kolets Betula tortuosa L., proizrastayushchey v ekotone al'piiskoy lesotundry Kuznetskogo Alatau* [Seasonal variability of the chemical structure of annual rings of *Betula tortuosa* L., growing in the ecotone of the Altai forest tundra of the Kuznetsk Altai]. Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials], 2023, no. 3, pp. 63–70.
- [27] Rosales-Martinez O., Granda-Gutierrez E.E., Garcia-Hernandez R.A., Alejo-Eleuterio R., Flores-Fuentes A.A. Spectral Derivatives Improve FTIR-Based Machine Learning Classification of Plastic Polymers // Modelling, 2025, v. 6, no. 115, pp. 1–22. <https://doi.org/10.3390/modelling6040115>
- [28] Traoré M., Kaal J., Cortiza A.M. Differentiation between pine woods according to species and growing location using FTIR-ATR. *Wood Sci Technol.*, 2018, v. 52, pp. 487–504.
- [29] Loskutov S.R., Tyutkova E.A. The invariance some physicochemical properties of wood. Fundamental science and technology – promising developments, 2013, v. 2, pp. 231–235.
- [30] Tsibulskiy V.R., Arefyev S.P., Novikov V.P., Soloviev I.G., Gorkov D.A. *Opredelenie indeksa bioraznoobraziya Shennona rastitel'nykh soobshchestv, obrazovannykh derev'yami-edifikatorami, na primere lesov severa Zapadnoy Cibiri* [Determination of the Shannon biodiversity index of growing communities formed by edifice trees using the example of forests of the north of the Western Siberia]. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Herald of Nizhnevartovsk State University], 2021, v. 54, no. 2, pp. 32–39.
- [31] Nolan K.A., Callahan J.E. Beachcomber Biology: The Shannon-Weiner Species Diversity Index. Proc. workshop, 2006, v. 27, pp. 334–338.
- [32] Petrov E.A. *Informatsionnyy podkhod k morfogenezmu* [Informational approach to morphogenesis]. DAN, 1992, v. 325, no. 2, pp. 390–392.
- [33] Loskutov S.R. *Vzaimodeystvie drevesiny s fizicheski aktivnymi nizkomolekulyarnymi veshchestvami* [Interaction of wood with physically active low molecular weight substances]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN [Publishing house SB RAS], 2004, 171 p.
- [34] Fengel D., Grosser D. Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubholzern. Holz als Roh- und Werkstoff, 1975, v. 33, no. 1, pp. 32–34.
- [35] Koch G., Bauch J., Puls J., Schwab E. Biological, chemical and mechanical characteristics of «wulstholz» as response to the mechanical stress in living trees of *Picea abies* [L.] Karst. *Holzforschung*, Walter de Gruyter Berlin, New York, 2000, v. 54, pp. 137–143.

Authors' information

Loskutov Sergey Redzhinal'dovich — Dr. Sci. (Chem.), Fellow of the IAWS, Chief Researcher, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, lsr@ksc.krasn.ru

Kazaryan Lilit Karenovna — Junior Researcher, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, kazaryan.lk@ksc.krasn.ru

Aniskina Antonina Aleksandrovna✉ — Research Assistant, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, aniskina_a@ksc.krasn.ru

Shapchenkova Ol'ga Aleksandrovna — Cand. Sci. (Biology), Senior Scientist, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, sholga@ksc.krasn.ru

Permyakova Galina Vasil'evna — Research Assistant, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, permyakova.gv@ksc.krasn.ru

Efremov Stanislav Petrovich — Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, efr2@ksc.krasn.ru

Pimenov Aleksandr Vladimirovich — Dr. Sci. (Biology), Deputy Director of the Institute for scientific work, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center» SB RAS, pimenov@ksc.krasn.ru

Received 15.04.2025.

Approved after review 05.05.2025.

Accepted for publication 02.10.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest