



Оригинальная статья

Хемотаксономические исследования деревьев рода *Larix* на территории Центральной Якутии

С. М. Рожина[✉], А. А. Местникова, И. В. Слепцов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]sahayana-rozhina@mail.ru

Аннотация

В работе представлено хемотаксономическое исследование трех видов лиственниц: лиственница Каяндера (*Larix cajanderi*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*) и лиственница Гмелина (*Larix gmelinii*). Изучены метаболомные профили, полученные методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором, различных органов (хвоя, кора и шишки) для выявления видовых особенностей на биохимическом уровне, а также их связи с экологическими условиями произрастания. Исследуемые образцы растений были собраны в однотипных условиях на территории Ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. Анализ собранных образцов проводился методом метаболомного профайлинга с использованием газового хромато-масс-спектрометра (ГХ-МС). Результаты исследований показали, что *L. gmelinii* и *L. cajanderi* имеют близкие метаболомические профили, рассчитанные методом главных компонент (РСА), что указывает на их близость на биохимическом уровне и может быть связано с аналогичными экологическими адаптациями в условиях Центральной Якутии. Напротив, *L. sibirica* формировала отдельный кластер, подтверждая свою идентичность и отличия в метаболомическом профиле. Анализ метаболомов показал, что экологические факторы, такие как влажность, температура и условия почвы, оказывают более значительное влияние на химический состав хвои и коры указанных видов по сравнению с их таксономическими различиями. Полученные результаты подчеркивают важность учета экологических факторов при изучении систематики и дифференциации видов рода *Larix*, а также открывают новые пути для дальнейших исследований в области экологической биохимии хвойных древесных растений. Представленная работа может послужить основой для будущих исследований метаболомики и хемотаксономии в контексте адаптации растений к меняющимся экологическим условиям.

Ключевые слова: лиственница, метаболомный анализ, *Larix*, хемотаксономия, газовая хроматография, химический состав

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297–2021-0025, рег. № АААА-А21-121012190035–9) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Рожина С.М., Местникова А.А., Слепцов И.В. Хемотаксономические исследования деревьев рода *Larix* на территории Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):250–259. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-250-259>

Original article

Chemotaxonomic investigations of *Larix* species in Central Yakutia

Sakhaiana M. Rozhina[✉], Anna A. Mestnikova, Igor V. Sleptsov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]sahayana-rozhina@mail.ru

Abstract

This paper presents a chemotaxonomic investigation of three larch species: Cajander larch (*Larix cajanderi*), Siberian larch (*Larix sibirica*), and Gmelin larch (*Larix gmelinii*). We examined the metabolomic profiles obtained through gas chromatography coupled with mass spectrometry detector of various plant organs, including needles, bark, and cones of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii*, and *Larix cajanderi*. The objective of this study was to identify species-specific bio-

chemical characteristics and their correlation with environmental growth conditions. Plant samples were collected under controlled conditions from the Botanical Garden of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS. The results of our study indicate that *L. gmelinii* and *L. cajanderi* share similar metabolic profiles, as revealed by principal component analysis (PCA). This finding suggests a biochemical similarity between the two species, which may reflect their related ecological adaptations to the environmental conditions of Central Yakutia. In contrast, *Larix sibirica* was observed to form a distinct cluster, thereby confirming its unique identity and differences in metabolic profile. The metabolomic analysis indicated that environmental factors, including soil conditions, humidity, and temperature, have a more pronounced impact on the chemical composition of the needles and bark of these species than their taxonomic distinctions. These results highlight the importance of considering environmental factors when investigating the taxonomy and differentiation of *Larix* species. Furthermore, this research opens new avenues for further exploration in the field of environmental biochemistry concerning coniferous woody plants. This study may serve as a foundational reference for future investigations into metabolomics and chemotaxonomy in relation to plant adaptation to changing environmental conditions.

Keywords: larch, metabolomic analysis, *Larix*, chemotaxonomy, gas chromatography, chemical composition

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297–2021–0025, reg. No. AAAA-A21-121012190035–9), using scientific equipment provided by the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (grant No. 13.SCF.21.0016).

For citation: Rozhina S.M., Mestnikova A.A., Sleptsov I.V. Chemotaxonomic investigations of *Larix* species in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):250–259. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-250-259>

Введение

Лиственницы рода *Larix* Mill. занимают важное место в различных экосистемах России, особенно в тайге. Эти растения покрывают большие участки леса, общая площадь которых составляет около 263,2 млн га, что соответствует примерно 36,6 % лесных ресурсов страны [1]. Разнообразие видов лиственниц усложняет их систематизацию, особенно в регионах Северной Азии. Например, *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* получили подтверждение и признание в отечественных научных кругах. Известно, что на территории Сибири и Дальнего Востока выделяют девять видов рода *Larix*. Некоторые виды лиственниц, которые были описаны Сукачевым [2] и Колесниковым [3], все еще остаются предметом активных исследований и споров в ботаническом сообществе [4, 5].

Лиственница Гмелина (*L. gmelinii*) является одним из наиболее изученных видов и подразделяется на четыре подтипа [6]:

1. *Larix gmelinii* var. *gmelinii* — ареал распространения охватывает обширные территории от Енисея и до самого Берингова моря.

2. *Larix gmelinii* var. *japonica* — распространен преимущественно на островах Хоккайдо, Сахалине и южных Курилах.

3. *Larix gmelinii* var. *olgensis* — распространен в Приморском районе, но встречается и на севере Китая и в Северной Корее.

4. *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* — высокогорная форма, произрастающая преимущественно в Китае.

По современным литературным источникам, многие авторы [7–12] предположили, что все лиственницы, обитающие на Дальнем Востоке, могут быть объединены в один вид — *Larix gmelinii*.

Лиственницу Гмелина по международной систематике растений принято обозначать как *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen. Некоторые ученые относят *Larix cajanderi* к синонимам типовой разновидности *Larix gmelinii* так же, как и дальневосточные лиственницы, к которым относятся *Larix ochotensis*, *Larix kamtschatica*, *Larix olgensis* var. *Komarovii* Kolesn [9, 13].

Отечественные ученые подвергли критике систематику лиственниц, распространенных на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, которую выдвинули многие зарубежные исследователи [14, 15]. По мнению отечественных исследователей, лиственница Гмелина и Каяндера являются самостоятельными видами, что подтверждается накопленным за многие годы работы большим массивом данных экспедиций и лабораторных наблюдений по изменчивости признаков, а также ареалу распространения *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* на территории Дальнего Востока и Восточной Сибири [5, 13–17].

В последние годы возрастает интерес к использованию молекулярно-генетических методов в ботанических исследованиях различных видов, в том

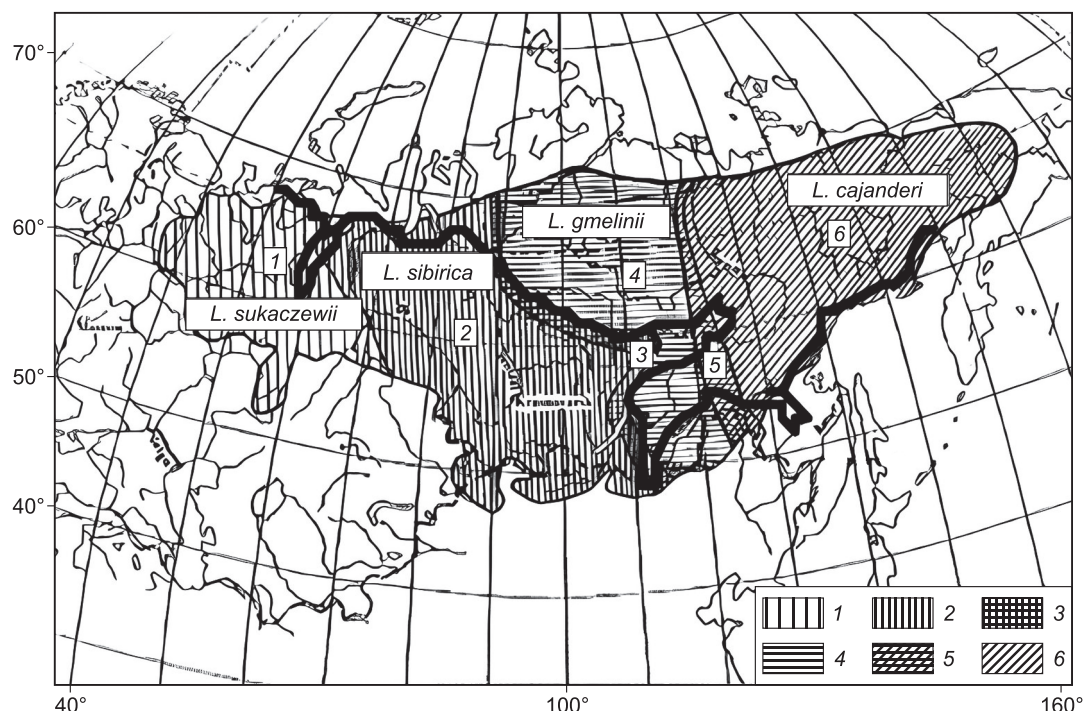


Рис. 1. Распространение различных видов лиственницы на территории Сибири и Дальнего Востока
1 – *Larix sukaczewii*, 2 – *Larix sibirica*, 3 – *Larix czekanowskii*, 4 – *Larix gmelinii*, 5 – *Larix gmelinii* x *Larix cajanderi*, 6 – *Larix cajanderi* [18]

Fig. 1. The distribution of various larch species in Siberia and the Far East
1 – *Larix sukaczewii*, 2 – *Larix sibirica*, 3 – *Larix czekanowskii*, 4 – *Larix gmelinii*, 5 – *Larix gmelinii* x *Larix cajanderi*, 6 – *Larix cajanderi* [18]

числе и таких спорных как лиственницы, произрастающие на территории Восточной Сибири и на Дальнем Востоке [18]. Применение передовых методов исследования, таких как молекулярно-генетические, позволяет глубже понять видовые особенности растений и оценить разнообразие семейств и родов.

С применением молекулярно-генетических методов анализа показано существенное разнообразие видов в популяции лиственниц в районе Охотского моря, на полуострове Камчатка и на территории Республики Саха (Якутия), Магаданской области и Забайкальского края [19–24].

По результатам, полученным с применением митохондриальных ДНК-маркеров [21], установлено, что лиственница Каяндера, произрастающая в верховьях р. Колыма, является самостоятельным видом. В популяции, найденной в Оротукской котловине, обнаружили шишки, которые не соответствуют признакам, наблюдающимся у *L. cajanderi* [25]. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что исследованный образец может быть гибридом между *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* либо представляет со-

бой уникальный экотип лиственницы Каяндера. Дальнейшие исследования генеративных и вегетативных структур, совместно с генетическим анализом, установили, что оротукская лиственница относится именно к виду *Larix cajanderi* [26]. Выявленные изменения могут указывать на существование экотипа, который, вероятно, следует рассматривать как отдельный внутривидовой таксон, характеризующийся высокой вариабельностью и фенотипических, и генетических признаков.

Целью данной работы являлось проведение хемотаксономического анализа методом метаболомного профайлинга на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором различных тканей *Larix cajanderi*, *Larix sibirica* и *Larix gmelinii*, произрастающих в однотипных эколого-географических условиях на территории Центральной Якутии.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись различные органы деревьев, к которым относятся хвоя, кора и шишки лиственницы сибирской (*Larix sibirica*),

лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*) и лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi*), относящихся к роду *Larix* и семейству Pinaceae. На территории Якутии основной лесобразующей породой является лиственница. Ареал обитания лиственницы на территории Якутии насчитывает 109,3 млн га [27].

Сбор образцов хвои, коры и шишек *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* проводили в начале лета (июнь) 2021 г. в Ботаническом саду Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, расположенном в г. Якутск с деревьев высотой от 4 до 5 м.

Для метаболомного анализа 10 мг воздушно-сухого сырья экстрагировали в 1 мл метанола. Полученный экстракт выпаривали при 40 °C на ротаторном испарителе, сухой остаток растворяли в 50 мкл пиридина. Для получения летучих триметилсилил-производных (ТМС) проводили процесс дериватизации с использованием 50 мкл N,O-бис-(триметилсилил)трифторацетамида (BSTFA) в течение 15 мин при 100 °C. Анализ проводили методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на хроматографе «Мэстро» (Россия) с квадрупольным масс-спектрометром Agilent 5975C (США), колонка HP-5MS, 30 м × 0,25 мм. Для хроматографии использовали линейный градиент температуры от 70 до 320 °C со скоростью 4 °C/мин при потоке газа (гелий) 1 мл/мин. Сбор данных осуществляли с помощью программного обеспечения Agilent ChemStation. Количественную интерпретацию хроматограмм проводили методом внутренней стандартизации по углеводороду C23 [28]. Обработка и интерпретация масс-спектрометрической информации проводилась с использованием стандартной библиотеки NIST 2011. Статистическую обработку метаболомных профилей выполняли методом главных компонент в программе MetaboAnalyst (www.metaboanalyst.ca).

Результаты и обсуждения

Известно, что на территории Якутии широко распространены два вида деревьев, относящихся к роду *Larix*, – *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* [18]. В однотипных эколого-географических условиях на территории Республики Саха (Якутия) три исследуемых вида лиственниц: *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*, произрастают только на территории Ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. Собранные образцы различных органов

трех исследуемых видов лиственниц были проанализированы на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором методом метаболомного профайлинга для выявления хемотаксономических особенностей *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*.

Для статистического анализа полученных метаболомных данных была создана матрица, на которой отражены метаболомные профили хвои, шишек и коры *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi* (рис. 2). Построенный профиль включал 15 наблюдений по 96 метаболитам для хвои, 15 наблюдений по 100 метаболитам для коры и 15 наблюдений по 100 метаболитам для шишек. Полученный массив данных был обработан методом главных компонент (PCA).

По полученным результатам установлено, что метаболомы образцов исследуемых органов *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi* сформировали две группы. В первую группу кластеризовались метаболомы *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, а в другую *L. sibirica* (см. рис. 2). Таким образом, по результатам, полученным при анализе графика счетов, рассчитанного методом главных компонент, выявлено, что метаболомы, являющиеся отражением биохимического состава хвои, шишек и коры *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, объединились в одну группу, что может быть вызвано незначительными различиями в химическом составе различных органов между исследуемыми видами деревьев рода *Larix* семейства Pinaceae.

Различия в биохимическом составе между *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, возможно, возникли из-за разницы в специфических генетических аллелях деревьев, которые отвечают за синтез первичных и вторичных метаболитов в организме. Так, известно, что основными отличительными особенностями *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi* являются форма, ширина и угол отклонения чешуй сформированных шишек [16, 19].

Отличительной особенностью *L. cajanderi* от *L. gmelinii* является отклонение чешуи на 70–80° от оси шишки и сплюснутая шаровидная форма. *L. gmelinii*, напротив, имеет преимущественно яйцевидную форму плода, и угол отклонения чешуи от оси шишки составляет 40–50° [15, 16]. Следует отметить, что *L. gmelinii* и *L. cajanderi* различаются также по многим физиологическим, морфологическим и фенологическим параметрам. Основными из них являются различия температур, необходимых для инициации процессов

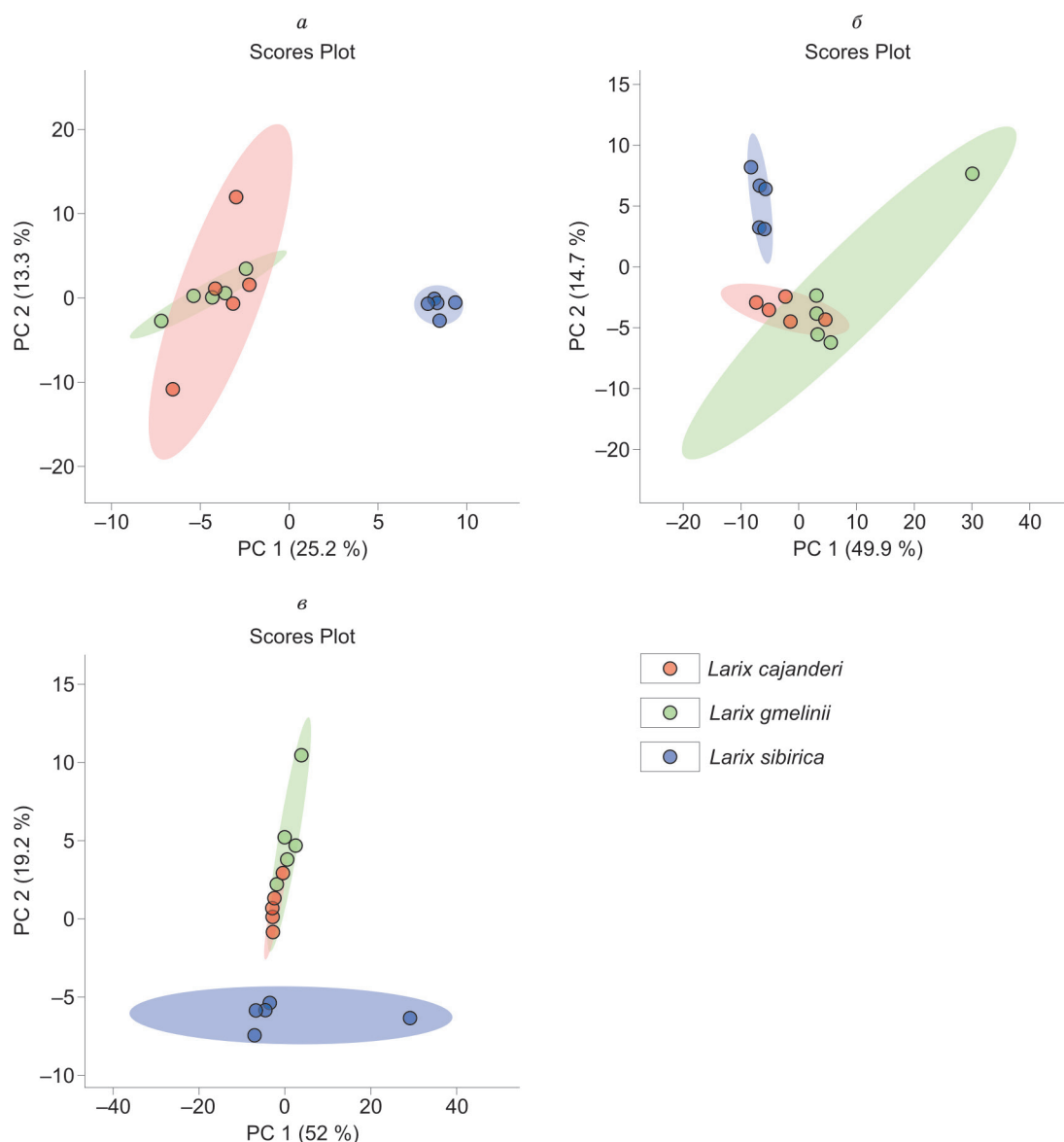


Рис. 2. Распределение метаболомов хвои (а), коры (б) и шишек (в) *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*, рассчитанное методом главных компонент (PCA) в условиях Якутии

Fig. 2. Distribution in metabolomes of needles (a), bark (б), and cones (в) of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii*, and *Larix cajanderi* in Yakutia calculated using principal component analysis (PCA)

цветения, но одним из основных отличий является то, что они имеют различные сроки рассеивания семян [16]. Современные исследования с применением молекулярно-генетических методов анализа установили отличительные признаки на генетическом уровне у *L. gmelinii* и *L. cajanderi* [23, 24]. Другие авторы [29] провели исследование, которое показало, что различия между лиственницами Гмелина и Каяндера не наблюдались на уровне кариотипа. Это может отражать адаптацию к экологии, генетическую ста-

бильность и уровень разнообразия в популяциях, что является основным доказательством близости исследуемых видов в роду *Larix*.

По результатам метаболомного профайлинга методом ГХ-МС была создана иерархическая кластеризация различных органов, таких как хвоя, кора и шишки, исследуемых видов лиственниц (рис. 3).

По полученным данным методом иерархической кластеризации, построенной на основе метаболомных профилей методом ГХ-МС, показана

но, что метаболомы исследуемых органов (хвоя, кора и шишки *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*) разделились на два основных кластера. Метаболиты *L. cajanderi* и *L. gmelinii* объединились в отдельный кластер, а *L. sibirica* кластеризовался отдельно.

Колесников Б.П. [3] и Бобров Е.Г. [6] установили, что лиственница Каяндера сформировалась в конце плейстоцена в популяциях лиственницы Гмелина. Напротив, *Larix sibirica* является наиболее ранее сформированным (конец плиоцена) видом на территориях Северо-Восточной Сибири. После формирования *Larix gmelinii* как отдельного вида в конце плейстоцена началось постепенное вытеснение *Larix sibirica* из территорий Северо-Восточной Сибири, но до сих пор данный вид местами можно встретить в этом регионе [30–32]. Из трех исследуемых видов *Larix cajanderi* считается самым молодым и окончательно сформировался в конце плейстоцена, появление данного вида может быть вызвано географическими особенностями, в частности, изоляцией Верхоянским хребтом [29].

В результате обработки метаболомных профилей выявлено, что наиболее весомый вклад в разделение кластеров методом главных компонент и иерархической кластеризации вносили вторичные метаболиты лиственницы *L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, такие как фенолы и терпены (см. таблицу).

Представленные результаты метаболомного профайлинга могут свидетельствовать о том, что по хемотаксономическим признакам *L. gmelinii* и *L. cajanderi* – близкие виды в роду *Larix*.

Ранее проведенные исследования показывают, что эколого-географические особенности среды произрастания способствуют разделению *L. gmelinii* и *L. cajanderi* [33]. Таким образом, климатические, географические и экологические особенности места произрастания оказывали более сильное воздействие на метаболические профили растений, чем видовые особенности лиственниц Каяндера и Гмелина.

Заключение

В ходе проведенного хемотаксономического исследования трех видов лиственниц (*Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi*), произрастающих в однотипных условиях, установлено, что метаболомы различных органов (хвоя, кора и шишки) *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* кластеризовались в одну группу по результатам обра-

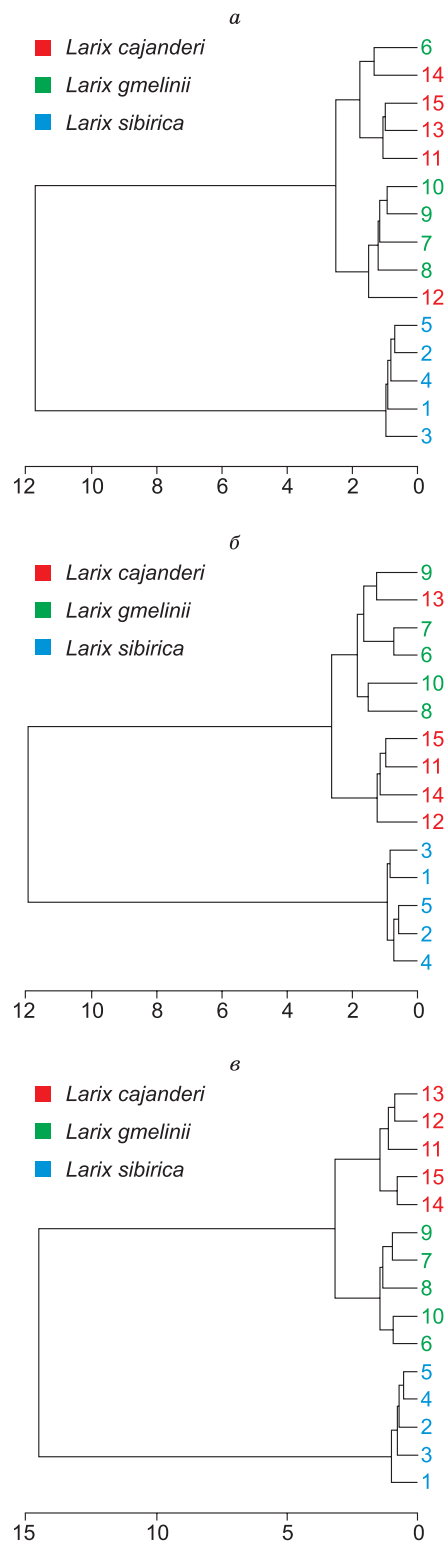


Рис. 3. Дендрограмма иерархической кластеризации метаболомов хвои (а), коры (б) и шишек (в) *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* и *Larix cajanderi* в условиях Якутии

Fig. 3. Dendrogram illustrating the hierarchical clustering of metabolomes in needles (а), bark (б), and cones (в) of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii*, and *Larix cajanderi* in Yakutia

Основные видоспецифичные вторичные метаболиты в тканях рода *Larix*

Main species-specific secondary metabolites present in the tissues of the genus *Larix*

Орган	Класс соединений*	t _R	Основные ионы**	<i>L. sibirica</i>	<i>L. gmelinii</i>	<i>L. cajanderi</i>
Хвоя	Терпен	28,793	270; 360; 537	—	+	+
	Фенол	38,960	487; 559; 683	+	—	—
Кора	Терпены	19,322	171; 212; 315	—	+	+
		25,404	265; 355; 456	—	+	+
		26,746	255; 270; 349	—	+	+
		27,610	255; 275; 396	—	+	+
		29,867	257; 270; 446	+	—	—
Шишки	Терпены	28,978	255; 270; 469	—	+	+
		29,859	257; 360; 392	+	—	—
		38,809	270; 460; 548	—	+	+
	Фенолы	20,094	220; 275; 323	—	+	+
		24,506	307; 355; 458	—	+	+
		38,004	369; 561; 633	—	+	+
		39,069	354; 458; 548	—	+	+
		39,153	245; 380; 516	—	+	+

Примечание. * — для обнаруженных вещества удалось идентифицировать только класс соединений в соответствии NIST 2020; ** — основные ионы веществ получены методом электронной ионизации (EI) на ГХ-МС.

Note. * For the detected substances, only the class of compounds could be identified according to NIST 2020; ** The main ions of the substances were obtained using electron ionization (EI) on GC-MS.

ботки данных методом главных компонент и иерархической кластеризации. Полученные данные могут свидетельствовать, что исследуемые виды являются близкими в роду *Larix*, что, скорее всего, вызвано аналогичными экологическими условиями их произрастания. Полученные данные подтверждают, что экологические факторы, такие как почвенные условия, влажность и температура, оказали более выраженное влияние на химический состав исследуемых тканей, чем таксономические различия, что подчеркивает значимость экологии при изучении систематики растений.

Данная работа также подтверждает, что хемотаксономические исследования, основанные на анализе метаболомных профилей, открывают новые горизонты для дальнейших исследований. Полученные данные могут стать основой для более глубокого понимания биохимических механизмов, определяющих адаптацию хвойных древесных растений к местным экологическим условиям. В будущем использование молекулярно-генетических методов вместе с метаболомным анализом может привести к более полному пониманию видового разнообразия и систематики рода *Larix*, а также помочь в разрешении существ-

ующих споров о таксономической принадлежности различных популяций и экотипов.

Список литературы / References

1. *Лесной фонд России*. Справочник. Книга для Лесного фонда Российской Федерации / Всероссийский научно-информационный центр лесных исследований Федеральной службы леса. М.: Рослесхоз; 1999. 280 с.
Forest Fund of Russia. Handbook. Book for the Forest Fund of the Russian Federation / All-Russian Scientific and Information Center for Forest Research of the Federal Forestry Service. Moscow: Rosleskhoz Publ.; 1999. 280 p. (In Russ.)
2. Сукачев В.Н. О двух новых ценных для лесного хозяйства древесных породах. *Труды и исследования по лесничему хозяйству и лесной промышленности*. 1931;(10):1–20.
Sukachev V.N. On two new valuable tree species for forestry. *Trudy i issledovaniya po lesnichemu khozyaystvu i lesnoy promyshlennosti* = *Works and research on forestry and forest industry*. 1931;(10):1–20. (In Russ.)
3. Колесников Б.П. К систематике и истории развития лиственниц секции *Pauciseriales* Patshke. В кн.: Комаров В.Л. (ред.) *Материалы по истории флоры и растительности СССР*. М.–Л.: Изд-во Акад. наук СССР; 1946. С. 21–86.
Kolesnikov B.P. On the systematics and development history of larches of the *Pauciseriales* Patshke section. In:

- Komarov V.L. (ed.) *Materials on the history of flora and vegetation of the USSR*. Moscow–Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1946, pp. 21–86. (In Russ.)
4. Коропачинский И.Ю. Голосеменные, Гречиховые, Камнеломковые, Бобовые, Рутовые, Крушиновые-Лоховые, Ворсянковые, Вьюнковые, Вербеновые. В кн.: *Сосудистые растения советского Дальнего Востока = Plantae vasculares orientis extremi sovietici*. Том. 4. Л.: Наука; 1989. С. 9–25.
- Koropachinsky I.Yu. Gymnosperms, Buckwheat, Saxifrage, Legumes, Rutaceae, Buckthorn-Fleecy, Villus, Convolvulus, Verbena. In: *Vascular plants of the Soviet Far East = Plantae vasculares orientis extremi sovietici*. Volume 4. Leningrad: Nauka; 1989, pp. 9–25. (In Russ.)
5. Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. *Древесные растения азиатской России*. Новосибирск: Изд-во СО РАН фил. «Гео»; 2002. 706 с.
- Koropachinsky I.Yu., Vstovskaya T.N. *Woody plants of Asian Russia*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, “Geo”; 2002. 706 p. (In Russ.)
6. Бобров Е.Г. *Лесообразующие хвойные СССР*. Л.: Наука; 1978. 189 с.
- Bobrov E.G. *Forest-forming conifers of the USSR*. Leningrad: Nauka; 1978. 189 p. (In Russ.)
7. Farjon A. *World checklist and bibliography of conifers*. Kew: Royal Botanic Gardens; 2001. 309 p.
8. Farjon A. *A bibliography of conifers: selected literature on taxonomy and related disciplines of the Coniferales*. Kew: Royal Botanic Gardens; 2005. 218 p.
9. Govaerts R., Farjon A. *World Checklist of Pinaceae*. Kew: Royal Botanic Gardens; 2010.
10. Farjon A., Filler D. *An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status*. Leiden, Boston: Brill; 2013. 524 p.
11. Christensen K.I. Coniferopsida. In: Jonsell B. (ed.) *Flora Nordica, vol. 1*. The Bergius Foundation, Stockholm; 2000, pp. 91–115.
12. *World Checklist Of Selected Plant Families*. Kew: Royal Botanic Gardens. 2018.
13. Ветрова В.П., Синельникова Н.В., Барченков А.П. Изменчивость и дифференциация *Larix cajanderi*, *L. dahurica* и *L. sibirica* по форме семенных чешуй шишек. *Turczaninowia*. 2018;21(2):86–100. <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.21.2.10>
- Vetrova V.P., Sinelnikova N.V., Barchenkov A.P. Variability and differentiation of *Larix cajanderi*, *L. dahurica* and *L. sibirica* on shape of cone scales. *Turczaninowia*. 2018;21(2):86–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.21.2.10>
14. Koropachinskii I.Y., Milyutin L.I. Botanical-geographical and forestry aspects of introgressive hybridization of the Gmelin's larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) and Cajander larch (*L. cajanderi* Mayr). *Contemporary Problems of Ecology*. 2011;4:167–177. <https://doi.org/10.1134/S1995425511020081>
15. Орлова Л.В. Конспект дикорастущих и некоторых интродуцированных видов рода *Larix* Mill. (Pinaceae) флоры Восточной Европы. *Новости систематики высших растений*. 2011;43:5–18.
- Orlova L.V. The synopsis of wild and some introduced species of the genus *Larix* Mill. (Pinaceae) in the flora of the East Europe. *Novitates Systematicae Plantarum Vascularium*. 2011;43:5–18. (In Russ.)
16. Абаймов А.П., Коропачинский И.Ю. *Лиственницы Гмелина и Каяндера*. Новосибирск: Наука; 1984. 121 с.
- Abaimov A.P., Koropachinsky I.Yu. *Larix gmelinii and Larix cajanderi*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 121 p. (In Russ.)
17. Барченков А.П., Милютин Л.И. Изменчивость генеративных органов лиственниц Гмелина и Каяндера в Восточной Сибири. *Хвойные бореальной зоны*. 2008;25(1–2):37–43.
- Barchenkov A.P., Milyutin L.I. Variability of generative organs of Gmelin and Cajander larches in Eastern Siberia. *Conifers of the Boreal Zone*. 2008;25(1–2):37–43. (In Russ.)
18. Abaimov A.P., Milyutin L.I., Lesinski J.A., Martinsson O. *Variability and ecology of Siberian larch species*. 1998. 123 p.
19. Semerikov V.L., Zhang H., Sun M., Lascoux M. Conflicting phylogenies of *Larix* (Pinaceae) based on cytoplasmic and nuclear DNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2003;27(2):173–184.
20. Kozyrenko M.M., Artyukova E.V., Reunova G.D., et al. Genetic diversity and relationships among Siberian and Far Eastern larches inferred from RAPD analysis. *Russian Journal of Genetics*. 2004;(40):401–409.
21. Семериков В.Л., Полежаева М.А. Структура изменчивости митохондриальной ДНК лиственниц Восточной Сибири и Дальнего Востока. *Генетика*. 2007;43(6):782–789.
- Semerikov V.L., Polezhaeva M.A. Structure of mitochondrial DNA variability of larches in Eastern Siberia and the Far East. *Genetics*. 2007;43(6):782–789. (In Russ.)
22. Polezhaeva M.A., Lascoux M., Semerikov V.L. Cytoplasmic DNA variation and biogeography of *Larix* Mill. in Northeast Asia. *Molecular Ecology*. 2010;19(6):1239–1252.
23. Ларионова А.Я., Орешкова Н.В. Генетический полиморфизм лиственниц. Изоэнзимный полиморфизм. В кн.: Ефремов С.П., Милютин Л.И. (ред.) *Биоразнообразие лиственниц Азиатской России*. Новосибирск: ГЕО; 2010. С. 51–71.
- Larionova A.Ya., Oreshkova N.V. Genetic polymorphism of larches. Isoenzyme polymorphism. In: Efremov S.P., Milyutin L.I. (eds.) *Larch biodiversity of Asian Russia*. Novosibirsk: GEO; 2010, pp. 51–71. (In Russ.)
24. Орешкова Н.В., Ветрова В.П., Синельникова Н.В. Генетическая и фенотипическая изменчивость *Larix cajanderi* Mayr в северной части Российской Федерации. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015;(8):9–20.

25. Синельникова Н.В., Пахомов М.Н. Морфологическая изменчивость лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) в Оротукской котловине (долина р. Колыма). *Turczaninowia*. 2011;14(3):62–68.
- Sinelnikova N.V., Pakhomov M.N. Morphological variability of Cajander larch (*Larix cajanderi* Mayr) in the Orotuk basin (Kolyma river valley). *Turczaninowia*. 2011;14(3):62–68. (In Russ.)
26. Журавлев Ю.Н., Козыренко М.М., Васюткина Е.А. и др. ДНК-полиморфизм. В кн.: Ефремов С.П., Милютин Л.И. (ред.) *Биоразнообразие лиственниц Азиатской России*. Новосибирск: ГЕО; 2010. С. 72–91.
- Zhuravlev Yu.N., Kozurenko M.M., Vasyutkina E.A., et al. DNA polymorphism. In: Efremov S.P., Milutin L.I. (eds.) *Biodiversity of larches of Asian Russia*. Novosibirsk: GEO; 2010, pp. 72–91. (In Russ.)
27. Максимов Т.Х. Круговорот углерода в лиственничных лесах якутского сектора криолитозоны: Дис. ... докт. биол. наук. Красноярск; 2007. 88 с.
- Maksimov T.Kh. Carbon cycle in larch forests of the Yakut sector of the cryolithozone: Diss. ... Doct. Sci. Krasnoyarsk; 2007. 88 p. (In Russ.)
28. Петрова Н.В., Сазанова К.В., Медведева Н.А., Шаварда А.Л. Особенности метаболомного профиля на разных стадиях онтогенеза *Prunella vulgaris* (Lamiaceae) при выращивании в климатической камере. *Химия растительного сырья*. 2018;(3):139–147. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033798>.
- Petrova N.V., Sazanova K.V., Medvedeva N.A., Shavarda A.L. Metabolomic profile at the different stages of *Prunella vulgaris* (Lamiaceae) ontogenesis at growing in the climate chamber. *Khimiya Rastitelnogo Syr'ya*. 2018;(3):139–147. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033798>.
- (3):139–147. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018033798>. (In Russ.)
29. Goryachkina O.V., Badaeva E.D. Muratova E.N., Zelenin A.V. Molecular cytogenetic analysis of Siberian *Larix* species by fluorescence in situ hybridization. *Plant Systematics and Evolution*. 2013;299:471–479. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s00606-012-0737-y>.
30. Сукачев В.Н. К истории развития лиственниц. *Лесное дело. М.–Л.; 1924. С. 12–44.*
- Sukachev V.N. On the development history of larches. *Forestry*. Moscow-Leningrad; 1924, pp. 12–44. (In Russ.)
31. Дылис Н.В. *Лиственница Восточной Сибири и Дальнего Востока*. М.: Издательство Академии наук СССР; 1961. 210 с.
- Dylis N.V. *Larch of Siberia and the Far East*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1961. 210 p. (In Russ.)
32. Бобров Е.Г. *История и систематика лиственниц*. Л.: Наука; 1972. 96 с.
- Bobrov E.G. *History and systematics of larches*. Leningrad: Nauka; 1972. 96 p. (In Russ.)
33. Слепцов И.В., Рожина С.М. Эколого-географические особенности накопления метаболитов в хвое *Larix cajanderi* на территории Якутии *Химия растительного сырья*. 2021;(2):275–280. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028322>
- Sleptsov I.V., Rozhina S.M. Ecological and geographical features of the accumulation of metabolite in the needles of *Larix cajanderi* in the territory of Yakutia. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*. 2021;(2):275–280. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028322>

Об авторах

РОЖИНА Сахаяна Михайловна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, ResearcherID: AAO-3383-2020, Scopus Author ID: 57208332809, SPIN: 7002-5247, e-mail: sahayana-rozhina@mail.ru

МЕСТНИКОВА Анна Александровна, лаборант, <https://orcid.org/0009-0005-5057-9713>, ResearcherID: rid87289, SPIN: 7988-7524, e-mail: manyawkaye@gmail.com

СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, ResearcherID: J-7736-2018, Scopus Author ID: 57200540770, SPIN: 9348-8311, e-mail: neroxasg@mail.ru

Вклад авторов

Рожина С.М. – создание черновика рукописи, редактирование рукописи, проведение исследования, проведение статистического анализа, визуализация; **Местникова А.А.** – создание черновика рукописи, проведение исследования, проведение статистического анализа; **Слепцов И.В.** – разработка концепции, методология, визуализация, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ROZHINA, Sakhaiana Mikhailovna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, ResearcherID: AAO-3383-2020, Scopus Author ID: 57208332809, SPIN: 7002-5247, e-mail: sahayana-rozhina@mail.ru

MESTNIKOVA, Anna Aleksandrovna, Laboratory Assistant, <https://orcid.org/0009-0005-5057-9713>, ResearcherID: rid87289, SPIN: 7988-7524, e-mail: manyawkaye@gmail.com

SLEPTSOV, Igor Vitalievich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, ResearcherID: J-7736-2018, Scopus Author ID: 57200540770, SPIN: 9348-8311, e-mail: neroxasg@mail.ru

Authors' contribution

Rozhina S.M. – writing – original draft, writing – review & editing, investigation, formal analysis, visualization; **Mestnikova A.A.** – writing – original draft, investigation, formal analysis; **Sleptsov I.V.** – conceptualization, methodology, visualization, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 12.12.2024

Поступила после рецензирования / Revised 06.05.2025

Принята к публикации / Accepted 14.05.2025