



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.892.2

DOI:10.19110/geov.2025.8.3

Мел-палеогеновые ископаемые смолы Якутии: молекулярный состав и термические свойства

О. В. Мартиросян¹, М. А. Богдасаров²

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия, mov@ginras.ru

² Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь, bahdasarau@gmail.com

Впервые проведено исследование ископаемых смол Якутии по данным инфракрасной спектроскопии и дифференциально-термического анализа. Показано, что смолы представлены преимущественно геданитами, но могут встречаться также ретиниты. Геданиты являются более окисленными по сравнению с ретинитами.

Впервые проанализирована информация по хвойным растительным остаткам в пределах местонахождения изучаемых ископаемых смол Якутии, что позволило подтвердить, что представители семейств *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* действительно могут являться основным ботаническим источником при генезисе геданита, а семейства *Pinaceae* — ретинита.

Ключевые слова: ископаемые смолы, ретинит, геданит, Якутия

Cretaceous-Paleogenic fossil resins of Yakutia: molecular composition and thermal properties

O. V. Martirosyan¹, M. A. Bogdasarov²

¹ Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

² Pushkin Brest State University, Brest, Republic of Belarus

A novel study of fossil resin from Yakutia has been conducted using infrared spectroscopy and differential thermal analysis. The resins are exclusively gedanites, although retinite may also be found. Gedanites are more oxidized than retinites.

For the first time, we analyze information on coniferous plant remains within the location of the studied fossil resins. This analysis confirms that conifers from the families *Cupressaceae* and *Taxodiaceae* can really be the main botanical sources of the formation of gedanite, while the *Pinaceae* family — of retinite.

Keywords: fossil resins, retinite, gedanite, Yakutia

Введение

Сибирская смолоносная провинция богата проявлениями ископаемых смол. Одним из таких местонахождений является территория Республики Саха (Якутия), расположенная на северо-востоке России. Находки ископаемых смол известны в дельте р. Лены, Лено-Вилюйской впадине (бассейн рр. Лены, Вилюй, Лямпушки), а также в пределах Яно-Индигирской низменности. Лено-Вилюйская впадина находится в Восточной Сибири, в бассейне нижнего течения р. Вилюй и прилегающих районах бассейна р. Лены. Яно-Индигирская низменность расположена вдоль побережья Северного Ледовитого океана, морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, на севере Республики Саха (Якутия).

К сожалению, ископаемые смолы Якутии редко привлекали пристальное внимание геологов, поэтому сведения об их находках немногочисленны. Необходимость изучения ископаемых смол Якутии обусловлена тем, что на сегодняшний день большинство известных находок смол данного региона исследованы крайне недостаточно или вовсе остаются неизученными. Также большое значение приобретает их надежная диагностика, поскольку многие из них не идентифицированы должным образом. В настоящей работе впервые приводятся результаты химического состава (по данным инфракрасной спектроскопии — ИКС) и термических свойств (по данным дифференциально-термического анализа — ДТА) ископаемых смол Якутии.

Для цитирования: Мартиросян О. В., Богдасаров М. А. Мел-палеогеновые ископаемые смолы Якутии: молекулярный состав и термические свойства // Вестник геонаук. 2025. 8(368). С. 14–24. DOI: 10.19110/geov.2025.8.3

For citation: Martirosyan O. V., Bogdasarov M. A. Cretaceous-Paleogenic fossil resins of Yakutia: molecular composition and thermal properties. Vestnik of Geosciences, 2025, 8(368), pp. 14–24. DOI: 10.19110/geov.2025.8.3



История изучения ископаемых смол Якутии

Среди первых научных экспедиций, побывавших в пределах Якутии в XVIII и XIX столетиях, сведения о находках ископаемых смол впервые появились в записках доктора Кибера, путешествовавшего в 1821 г. под командованием барона Ф. П. Врангеля для разыскания северных границ Колымского уезда и Чукотской земли. Смолы были найдены в озерах к востоку от Алазейских гор (Кибер, 1827, с. 185). Ископаемые смолы встречаются также к западу от р. Яны, возле берега Быковской губы на о. Ладаннах (рис. 1) Первым их описал А. Е. Фигурин как «янтарь большей частью тусклой и мало прозрачной» (Фигурин, 1823, с. 196). Ископаемые смолы встречаются и на оз. Тастах (Каменное озеро), в низовьях р. Хром. По замечанию А. Е. Фигурина, этот янтарь по наружному виду сходен с находимым у оз. Ладаннах (Фигурин, 1823, с. 197). Выходы угленосных отложений на берегу оз. Тастах впервые были установлены М. М. Геденштромом, в них он встречал куски «прозрачной смолы» (1830, с. 111). Достаточно полные сведения об отложениях оз. Тастах впервые были при-

ведены в 1909 г. К. А. Воллосовичем (1930). По сообщению Г. Швейгера, М. М. Геденштром, побывав на архипелаге Новосибирских островов в 1808—1809 гг., янтаря не встретил (Швейгер, 1822, с. 16). Однако мелкие зерна были найдены Э. В. Толлем на о. Новая Сибирь (Toll, 1890, с. 6). Янтарь был вкраплен в пласты миоценовых глин, содержащих лигнитизированные растительные остатки. Э. И. Эйхвальд сообщал о находке зерн «янтаря» при описании окаменелостей, обнаруженных в известняках на берегу р. Оленек к западу от р. Лены (Eichwald, 1841). Позднее в этом районе редкие комочки янтаревидной смолы находили в гумусовых углях укинской свиты (альб) (Гусев, 1950). Большая часть экспедиций имела рекогносцировочный характер.

Наиболее изученной на территории Якутии является та ее часть, которая занята бассейнами рр. Лены и Вилюй. Они оказались более доступными для исследователей. После экспедиции А. Л. Чекановского с целью географических и геологических исследований появились первые сведения о «янтаровидном смолистом веществе» в районе левого устья р. Лены (1873, с. 232). Позднее А. А. Бычков (1899) и П. В. Грунвальд

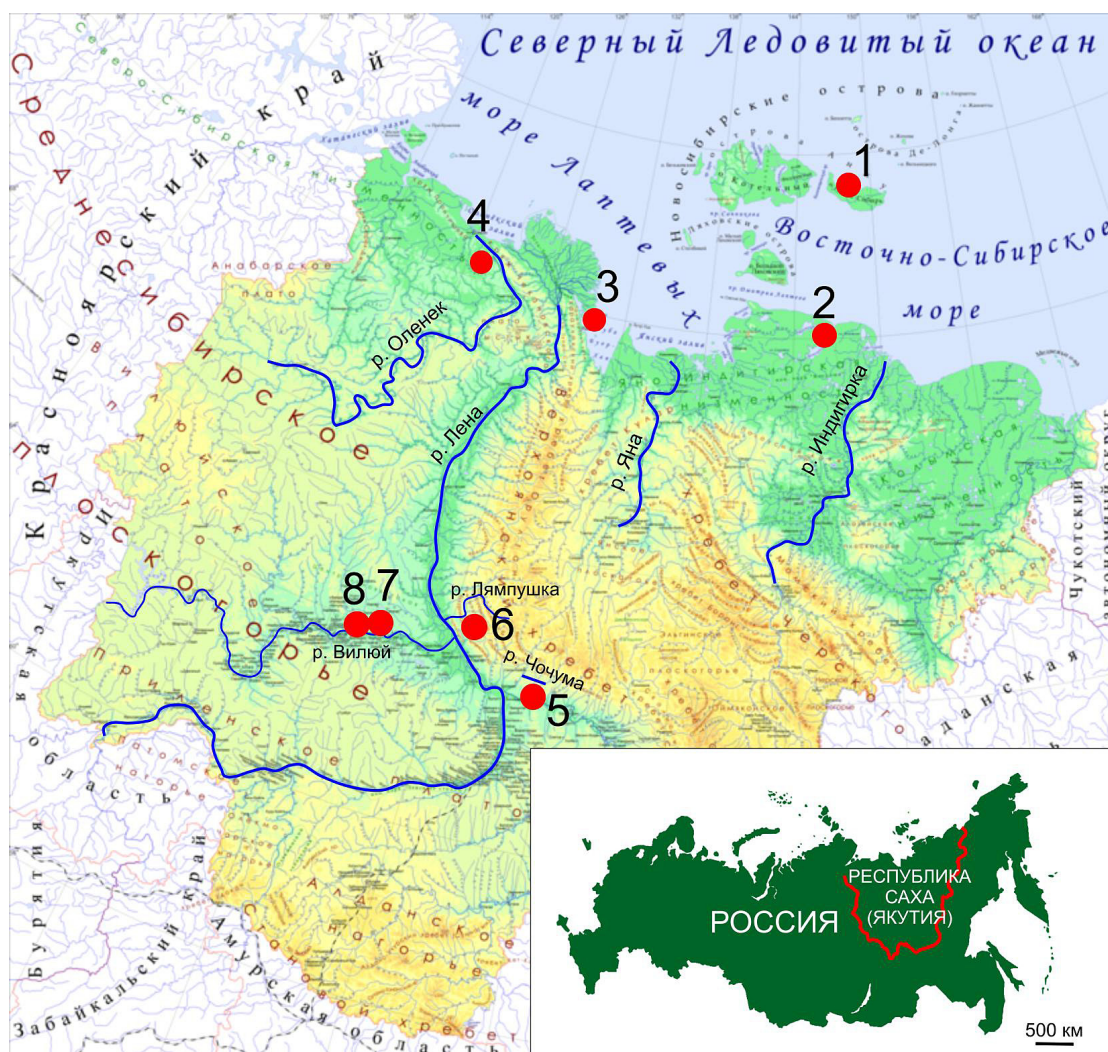


Рис. 1. Места находок ископаемых смол Якутии:

1 — о. Новая Земля; 2 — оз. Тастах; 3 — Быковская губа; 4 — р. Оленек; 5 — р. Чочума; 6 — р. Лямпущка; 7 — Опока-Хая; 8 — Тимирдяк-Хая

Fig. 1. Location of mineral finds in Yakutia:

1— Novaya Zemlya Island; 2 — Tastakh Lake; 3 — Bykovskaya Bay; 4 — Olenek River; 5 — Chochuma River; 6 — Lyampushka River; 7 — Opoka-Khaya; 8 — Timirdyakh-Khaya

(1927) также упомянули о том, что ископаемые смолы встречаются на Быковском мысе к востоку от устья реки Лены. Находки ископаемых смол в бассейне р. Лены встречаются, как правило, в угленосных верхнемеловых отложениях: в песчаниках тимирдяхской свиты (Тимирдях-Хая), линденской свиты (Опока-Хая), хатырыкской и тимирдяхской свит (р. Лямпущка (синонимы — Ляписке, Леписке)) (Вахрамеев, 1958, Болховитина, 1959, Пчелина, 1960, Кричкова, Сластенов, 1966). Ископаемые смолы встречаются в угленосных отложениях сангарской свиты по р. Чочуме (Вахрамеев, 1957). Большинство описанных выше находок ископаемых смол Якутии не подвергались минералогическим исследованиям. Только образцы смолы из Тимирдях-Хая были исследованы С. С. Савкевичем (1980), который отметил, что по ИК-спектрам эти смолы сходны со смолами из урочища Янтардах (Хатангской впадины).

Объекты исследования

В нашей работе были исследованы ископаемые смолы р. Вилюй (левый приток р. Лены) из местонахождений Тимирдях-Хая, Опока-Хая, р. Лямпущки

(правый приток р. Лены) и оз. Тастах (табл. 1). Ископаемые смолы обычно имеют размер от 5 до 15 мм, слегка округлые, уплощенные и удлиненные, иногда каплевидные. Прозрачность — от совершенной до отсутствия. Цвет желтый, оранжево-желтый, желто-коричневый.

Литологические и ботанические особенности. Находки ископаемых смол встречаются в пределах Лено-Вилюйской впадины в нижней части тимирдяхской свиты сеноманского возраста (Головнёва, 2005), которая представлена в обнажениях обрыва Тимирдях-Хая на левом берегу р. Вилюй (в 4 км выше пос. Кызыл-Сыр), а также в районе р. Лямпущки (табл. 2).

Нижняя часть тимирдяхской свиты по р. Вилюй сложена в основном косослоистыми песками и песчаниками с короткими линзами глин, алевролитов и галечников, содержит стяжения сидеритов и сидеритизированной древесины с редкими маломощными прослоями бурого угля (Вахрамеев, 1958; Пчелина 1960, Жерихин, 1978). Рассматриваемая свита по р. Лямпущке сложена преимущественно песчаниками серыми и светло-серыми с желтоватым, зеленоватым и бурым оттенками, крупными линзами глинистых



Рис. 2. Ископаемые смолы Якутии

Fig. 2. Fossil resins of Yakutia

Таблица 1. Физические характеристики ископаемых смол Якутии

Table 1. Physical characteristics of fossil resins of Yakutia

Образец Sample	Местонахождение / Location	Внешний вид Exterior	Возраст / Age	Разновидность по ИК Variety
МБ-017	оз. Тастах в низовьях р. Хромы Lake Tastakh in the lower reaches of the Khroma River	медово-желтый, сильно окисленный honey-yellow, strongly oxidized	Pg ₂₋₃ (палеоцен-эоцен) (Paleocene-Eocene)	геданит gedanite
МБ-018	обрывы Тимирдях-Хая, левый берег р. Вилюй, в 40 км ниже по течению от с. Кызыл-Сыр Timirdyakh-Khaya cliffs, left bank of the Vilyuy River, 40 km downstream from the village of Kyzyl-Syr	медово-желтый, полупрозрачный honey-yellow, translucent	K ₂ (сеноман) (Cenomanian)	
МБ-009	правый берег р. Лямпущки в 15—30 км от ее устья right bank of the Lyampushka River 15—30 km from its mouth	светло-желтый, полупрозрачный light yellow, translucent	K ₂ (сеноман) (Cenomanian)	
МБ-014	возвышенность Опока-Хая, левый берег р. Вилюй, примерно в 122 км выше его устья Opoka-Khaya upland, left bank of the Vilyuy River, approximately 122 km upstream from its mouth	желто-коричневый, непрозрачный yellow-brown, opaque	K ₂ (сантон-компан) (Santonian-Companian)	ретинит retinite



Таблица 2. Литологические и ботанические характеристики вмещающих ископаемые смолы отложений Якутии

Table 2. Lithological and botanical characteristics of fossil resin-bearing deposits in Yakutia

Система Series	Возраст Age	Местонахождение Location	Свита Formation	Характерные семейства и роды хвойных Characteristic coniferous families and genera	Литологический состав пород Lithological compositions of the rocks
ПАЛЕОГЕНОВАЯ PALEOGENIC	эоцен-палеоцен eocene-paleocene	оз. Тастах в низовьях р. Хромы Lake Tastakh in the lower reaches of the Khroma River	тастахская tastakhskaya	Taxodiaceae: <i>Taxodium</i> , <i>Sequoia</i> , <i>Metasequoia</i> , <i>Glyptostrobus</i> Pinaceae: <i>Pinus n/p</i> H, <i>Pinus n/p</i> D, <i>Larix</i> , <i>Picea</i> , <i>Tsuga</i>	пески, глины, сидеритовые конкреции, бурые угли с остатками лигнитизированной древесины sands, clays, siderite concretions, brown coals with remains of lignified wood
	кампан campanian	Опока-Хая, левый берег р. Вилюй Opoka-Khaya, left bank of the Vilyui River	линденская lindenskaya	Pinaceae: <i>Abies</i> sp., <i>Piceites</i> sp., <i>Cedrus pachyderma</i> Sauer, <i>Cedrus</i> cf. <i>crispa</i> Sauer, <i>Pinus insignis</i> (Naum) Bolkh., <i>Pinus triuialis</i> Bolkh., <i>Pinus aralica</i> Bolkh., <i>Pinus exegius</i> Bolkh., <i>Pinus solita</i> Bolkh., Pinaceae gen. sp. Taxodiaceae (Cupressaceae): <i>Taxodium rotundum</i> Bolkh., <i>Taxodium</i> sp., Taxodiaceae gen. sp., Cupressaceae gen. sp.	темно-серые песчаные глины, каолинизированные пески, тонкие пласты бурого угля dark grey sandy clays, kaolinized sands, thin layers of brown coal
МЕЛОВАЯ CRETACEOUS	сантон santonian	р. Лямпуща, правый берег р. Лены Lyampushka River right bank of the Lena River	тимирдяхская / timirdyakhskaya	Taxodiaceae: <i>Parataxodium wigginsi</i> Arn. et Lowt., <i>Sequoia</i> sp.	пески и песчаники с короткими линзами глин, алевролитов и галечников, наличие стяжения сидеритов, сидеритизированной древесины, с редкими прослоями бурого угля sands and sandstones with short lenses of clays, siltstones and pebbles, the presence of siderite concretions, sideritized wood, with rare interlayers of brown coal
	сеноман / senomanian	Тимирдя-Хая, левый берег р. Вилюй Timirdyakh-Khaya, left bank of the Vilyuy river		Taxodiaceae: <i>Sequoia minuta</i> Sveshn, <i>Sequoia</i> <i>fastigiata</i> Heer, <i>Sequoia sabulata</i> Heer, <i>Taxodium dubium</i> (Sternb.) Heer, <i>Taxodium tinajorum</i> Heer, <i>Taiwania</i> <i>microphylla</i> Budan, Cupressaceae: <i>Cupressinocladus</i> sp. 1 Pinaceae: <i>Pityostrobus lenaensis</i> Sveshn, <i>Pityophyllum</i> spp, <i>Pityospermum</i> sp.	

и алевроито-глинистых пород с редкими маломощными прослоями бурого угля. В песчаниках присутствуют сидеритовые конкреции (Вахрамеев, 1958; Пчелина, 1960; Жерихин, 1978; Головнева, 2004)¹. Кроме того, находки ископаемых смол встречаются в линденской свите, обнажающейся на возвышенности Опока-Хая (р. Вилюй, левый приток р. Лены, примерно в 122 км выше ее устья) и имеющей сантон-кампанский возраст (Головнева, 2005). Литологически свита представлена косослоистыми, мелко- и среднезернистыми сильно каолинизированными песками, в основании песчаников прослеживаются подчинен-

ные им цепочкообразные прослои галечника, тонкие пласты бурого угля и прослои глин (Вахрамеев, 1958; Самойлович, 1964).

Ископаемая смола попадает на берегу озера Тастах в низовьях р. Хромы (Яно-Индибирская низменность). Отложения на оз. Тастах В. И. Кайялайнен относил к тастахской свите (Кайялайнен, 1967), представленной глинами и бурыми углями с остатками лигнитизированной древесины, выше которых залегают светло-серые пески с угольной крошкой и железисто-карбонатными конкрециями (Гончаров, Кулькова, 1970). Относительно возраста тастахских отложений нет единого мнения. А. Н. Криштофович считал, что растительные остатки указывают на палеоценовый возраст (Криштофович, 1958), И. А. Кулькова (1973) относил их к эоцену, а Е. В. Воеводина (Баранова, Бискэ, 1964) даже к олигоцену. Зерна ископаемых смол во всех свитах встречаются в буром угле.

¹ Головнева Л. Б. Позднемиловая флора Сибири: Автореф. ... докт. биол. наук. СПб., 2004. 54 с.

¹ Golovneva L. B. Late Cretaceous Flora of Siberia: Abstract for the Candidate of Biological Sciences Degree. St. Petersburg, 2004, 54 p. (in Russian)



Источником ископаемых смол является растительность соответствующих эпох (в основном голосеменные подкласса хвойных), обладающие способностью к смолообразованию. Считается, что в северном полушарии эту роль могли выполнять представители трех семейств: *Araucariaceae*, *Cupressaceae* (*Taxodiaceae*) и *Pinaceae* (Langenheim, 1969). По данным газовой хромато-масс-спектрометрии, возможным ботаническим источником смол класса Ib (геданиты) являются хвойные семейства *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* или *Araucariaceae*. Считается, что смолы класса V (ретициты) производятся деревьями семейства *Pinaceae* (Seyfullah et al., 2018).

Среди осадков нижней части тимердахской свиты (табл. 1) господствуют хвойные, которые представлены преимущественно таксодиевыми (*Sequoia minuta* Sveshn, *Sequoia fastigiate* Heer, *Sequoia sabulata* Heer, *Taxodium dubium* (Sternb.) Heer, *Taxodium tinajorum* Heer, *Taiwania microphylla* Budan) и в меньшей степени кипа-

рисовыми и сосновыми (*Cupressinocladus* sp. 1, *Pityostrobus lenaensis* Sveshn, *Pityophyllum* spp, *Pityospermum* sp.), (Фрадкина, 1967; Головнева, 2004¹, 2005). В линзах и песчаных слоях в разрезах по р. Ляпмушке были собраны остатки растений, среди которых ведущая роль принадлежала таксодиевым (*Parataxodium wigginsii* Arn. et Lowt., *Sequoia* sp.) (Киричкова, 1985). В линденской свите в составе хвойных доминируют представители сосновых (*Abies* sp., *Piceites* sp., *Cedrus pachyderma* Sauer, *Cedrus cf. crispa* Sauer, *Pinus insignis* (Naum) Bolkh., *Pinus triuialis* Bolkh., *Pinus aralica* Bolkh., *Pinus exegius* Bolkh., *Pinus solita* Bolkh., *Pinaceae* gen. sp.) и в меньшей степени кипарисовые и таксодиевые (*Taxodium rotundum* Bolkh., *Taxidium* sp., *Taxodiaceae* gen. sp., *Cupressaceae* gen. sp.) (Самойлович, 1964). Среди хвойных тастахской свиты господствует семейство таксодиевых (*Taxodium*, *Sequoia*, *Metasequoia*, *Glyptostrobus*), в небольшом количестве представлены споры и пыльца семейства сосновых (*Pinus n/p* H, *Pinus n/p* D, *Larix*, *Picea*, *Tsuga*). Большое

Таблица 3. Характеристика полос поглощения различных функциональных групп
Table 3. Characteristics of absorption bands of different functional groups

Частота, см ⁻¹ Frequency, cm ⁻¹	Характеристика полос поглощения Characteristics of absorption bands
3644—3200	валентные колебания связанной OH в фенольных, спиртовых и карбоксильных группах stretching vibrations of bound OH in phenol, alcohol and carboxyl groups
2940—2960	валентные симметричные колебания групп CH ₃ stretching symmetric vibrations of CH ₃ groups
2850 и 2930	валентные симметричные колебания групп CH ₂ stretching symmetric vibrations of CH ₂ groups
1722—1736	валентные колебания C=O в эфирах, >C=C-OOR stretching vibrations of C=O in esters, >C=C-OOR
1700—1710	валентные колебания C=O карбоновых кислот stretching vibrations of C=O carboxylic acids
1640—1645	валентные колебания ненасыщенных связей C=C типа R ₁ HC=CHR ₂ в терпеноидах stretching vibrations of unsaturated C=C bonds of the R ₁ HC=CHR ₂ type in terpenoids
1500—1600	валентные колебания ароматических C=C-связей stretching vibrations of aromatic C=C-bonds
1460—1465	симметричные деформационные колебания CH ₂ -групп symmetric deformation vibrations of CH ₂ -groups
1452—1458	антисимметричные деформационные колебания групп CH ₃ antisymmetric deformation vibrations of CH ₃ groups
1377—1385	симметричные деформационные колебания групп -C-(CH ₃) ₂ абиединовой кислоты symmetric deformation vibrations of -C-(CH ₃) ₂ groups of abiatic acid
1250—1230	валентные колебания C-O карбоновых кислот stretching vibrations of C-O carboxylic acids
1160—1180	валентные колебания C-O в сложных эфирах и деформационные колебания OH в карбоксильных кислотах stretching vibrations of C-O in esters and deformation vibrations of OH in carboxylic acids
1085—1087	симметричные валентные колебания C-O-C-связей циклических эфиров symmetric stretching vibrations of C-O-C-bonds of cyclic esters
1026—1030	несколько перекрывающихся полос колебаний связей C-O в фенольных гидроксилах и S=O в сульфоксидных группах several overlapping bands of vibrations of C-O bonds in phenolic hydroxyls and S=O in sulfoxide groups
977—955	деформационные асимметричные колебания групп R ₁ HC=CHR ₂ с трансконфигурацией относительно двойной связи asymmetric deformation vibrations of R ₁ HC=CHR ₂ groups with trans configuration relative to the double bond
888	внеплоскостные деформационные колебания C-H в экзоциклической ненасыщенной связи >C=CH ₂ в терпеноидах out-of-plane deformation vibrations of C-H in the exocyclic unsaturated bond >C=CH ₂ in terpenoids
792	внеплоскостные деформационные колебания C-H в соединениях типа R ₁ R ₂ C=CHR ₃ сесквитерпенов out-of-plane deformation vibrations of C-H in compounds of the R ₁ R ₂ C=CHR ₃ type of sesquiterpenes



количество таксоидеивых свидетельствует о существовании пониженных увлажненных участков суши (Гончаров, Кулькова, 1970).

Методы исследования

Ископаемые смолы являются сложными рентгеноаморфными органическими веществами, в силу чего существуют значительные трудности при характеристике их структуры. Одним из методов, отражающих тонкие структурные особенности ископаемых смол (молекулярный состав и соотношение различных функциональных групп), является *инфракрасная спектроскопия* (ИКС). Это фундаментальный метод, используемый с 1960-х годов, наиболее востребованный для идентификации ископаемых смол. Независимо от возраста и местонахождения ископаемой смолы, ИК-спектр представляет собой своего рода «отпечаток пальца» с полосами поглощения, отражающими основные химические компоненты, которые можно сравнить, чтобы показать сходство или различие этих компонентов между смолами. Химический «отпечаток» смол может дать представление о путях их окаменения, на которые влияют первичные условия окружающей среды (биodeградация, температура, гидрорежим) и старение (низкомолекулярные компоненты со временем разлагаются, а высокомолекулярные соединения подвергаются трансформации). Было доказано, что в процессе созревания основными превращениями, влияющими на химическую структуру смолы, являются полимеризация и потеря летучих компонентов (Nissenbaum, Yaker, 1995).

ИК-спектры поглощения изученных образцов смол получены в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Образцы предварительно ретировали с бромидом калия, при помощи пресса изготавливали таблетки, которые исследовали на ИК-Фурье-спектрометре «Инфралюм ФТ-801» фирмы «Льюмэкс-Сибирь» (Россия) в диапазоне $4000\text{--}500\text{ см}^{-1}$, с разрешением 4 см^{-1} , числом сканирований 32. Оптическую плотность полос (D) определяли методом базисных линий по высоте пиков. Оптическая плотность — это безразмерная величина, равная десятичному логарифму отношения потока излучения F_0 , падающего на слой вещества, к потоку прошедшего излучения F , ослаблен-

ного в результате поглощения и рассеяния: $D = \lg(F/F_0)$. Расшифровку ИК-спектров проводили, ссылаясь на результаты подобных исследований (Kosmowska-Ceranowicz, 1999; Pagacz et al., 2020; Natkaniec-Nowak et al., 2023). В табл. 3 представлена расшифровка значений характеристических частот.

Дифференциально-термический анализ (ДТА). Теплофизические свойства относятся к числу показателей, чувствительных к особенностям молекулярного состава, степени полимеризации ископаемых смол. ДТА природных смол может обеспечить альтернативный подход к изучению процессов их созревания. Результаты предыдущих исследований ископаемых смол методом ДТА позволили сделать ряд интересных выводов.

Было высказано предположение, что термический анализ может помочь в определении возраста смолы, т. к. структура и состав смол изменяются в зависимости от степени их возраста (Ragazzi et al., 2003). Другие авторы (Jablonski et al., 1999; Pagacz et al., 2020; Garcia-Valles et al., 2023) показали, что возраст и степень зрелости смолы могут коррелировать с наблюдаемыми экзотермическими эффектами и теплофизическими свойствами (температурой размягчения и стеклования). Для того чтобы найти взаимосвязь между генезисом смолы и ее термическим поведением, необходимо сравнение с данными других методов, например ИК-спектроскопии.

Термическое поведение порошковых материалов ископаемых смол анализировали на дериватографе Q-1500. Образцы массой около 25–30 мг нагревали в платиновых тиглях от 25 до 1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин . Измерения повторяли дважды для каждого образца.

Обсуждение результатов исследований

Инфракрасная спектроскопия. Из теоретических основ ИКС известно, что интенсивность полос в ИК-спектре зависит от содержания соответствующей функциональной группы. Таким образом, оценка относительной интенсивности полос поглощения (или оптической плотности) каждой группы позволяет судить об их соотношении. Основные изменения в составе функциональных групп были рассчитаны методом ба-

Таблица 4. Содержание химических групп в молекулярном составе ископаемых смол Якутии

Table 4. Content of chemical groups in the molecular composition of fossil resins of Yakutia

Содержание химических групп, волновое число, см^{-1}									
Content of chemical groups, wave number, cm^{-1}									
Образец Sample	ОН- 3490	Алифатические группы* Aliphatic groups*	C=O к/ C=O э 1700/1730	C=C аром 1600	C–O к/ C–O э 1250/1160	C–O 1085	S–O 1035	>C=CH ₂ 888	R ₁ R ₂ C=CHR ₃ 792
геданит / gedanite									
МБ-017	0.30	6.91	1.52/1.12	0.30	0.81/0.71	0.31	0.67	0.50	0.54
МБ-018	0.34	6.59	1.11/1.01	0.18	0.68/0.58	0.50	0.60	0.28	0.24
МБ-009	0.28	5.74	1.34/1.16	0.17	0.63/0.64	0.47	0.56	0.28	0.17
ретинит / retinite									
МБ-014	0.41	4.60	0.86/0.67	0.14	0.37/0.40	–	0.20	0.12	0.06

Примечание: * — сумма оптических плотностей полос при 2975, 2845, 1460, 1450, 1380 см^{-1}

Note: * — sum of optical densities of bands at 2975, 2845, 1460, 1450, 1380 cm^{-1}

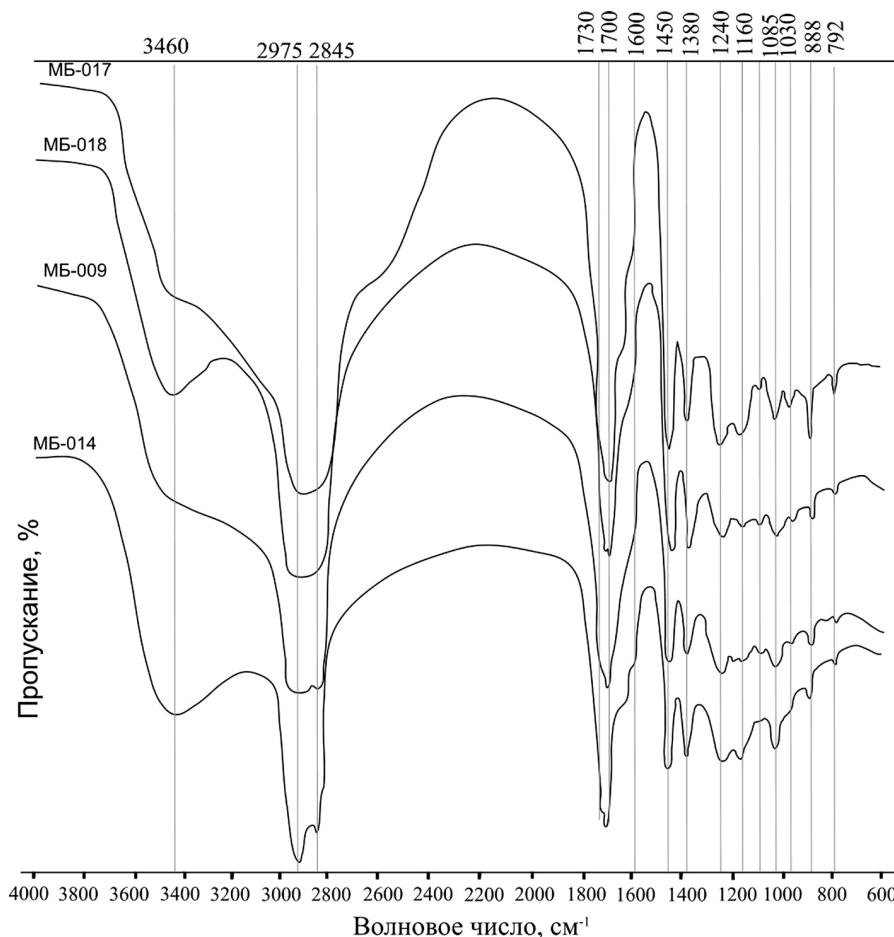


Рис. 3. ИК-спектры поглощения ископаемых смол Якутии

Fig. 3. IR spectra of fossil resins of Yakutia

зисных линий по оптической плотности полос (D) и представлены в таблице 4.

Сравнение инфракрасных спектров изученных ископаемых смол показывает, что они дают очень схожие ИК-спектры в высокочастотном диапазоне длин волн 3500–2600 см^{-1} (рис. 3). Эти сходства отражают их общее хвойное происхождение (Langenheim, 2003; Seyfullah et al., 2018). Тем не менее в спектрах существуют различия в положении и интенсивности специфических полос поглощения, которые могут быть использованы для диагностики и установления видов смол. Эти тонкие спектроскопические различия отражают прежде всего вариации в строении терпеноидных структур.

Спектры разделяются на две группы, отличающиеся интенсивностью некоторых полос. Первая группа (МБ-009, 017, 018) по спектральным признакам близка к геданиту, вторая (МБ-014) — к ретиниту. Геданиты и ретиниты имеют различия в химическом составе и структуре, что отражается на спектрах поглощения. ИК-спектры геданита отличаются от ретинита большей интенсивностью полос поглощения алифатических, гетеросодержащих и ароматических групп. Большее содержание алифатических групп в геданитах может указывать на наличие более длинных или разветвлённых алифатических цепей в их структуре (Lin, Ritz, 1993). Известно, что у смол на основе лабдана из-за диагенетических процессов часть терпенов подвергается процессам перекрестного сшивания, образуя полимерно-решетчатую структуру, которая очень

устойчива к химическому разрушению. В то же время смолы со скелетными структурами пимарана и абие-тана не обладают функциональными группами, необходимыми для образования стабильных полимеров, поэтому они склонны к разрушению и потере различных структурных компонентов (Langenheim, 2003). Для ретинитов наблюдается одинаковая интенсивность полос при 1250 и 1160 см^{-1} , в то время как для геданитов отмечается их разное отношение с максимумом при 1250 см^{-1} (Мартиросян, 2012). Отсутствие полосы поглощения при 1085 см^{-1} в ретинитах и наличие таковой в геданитах также свидетельствуют о различиях в их химическом составе.

Анализ содержания полос, связанных с карбонильным и карбоксильным растяжениями в сложных эфирах (1730 и 1250 см^{-1}) и карбоновых кислотах (1700 и 1160 см^{-1}), может применяться для оценки степени окисления, но не подходит для использования в качестве индикатора зрелости, поскольку соотношение карбонильных групп связано не только с процессом созревания, но и с ботаническим происхождением смол и процессами предзахороненного окисления, вызванными, например, воздействием солнечного света или процессами изменения в мелководных лагунах водах. По соотношению данных групп в эфирах и карбоновых кислотах геданиты являются более окисленными по сравнению с ретинитом (табл. 4).

Заметим, что молекулярный состав геданитов Якутии с возрастом (от эоцена до сеномана) меняет-



ся, но незначительно, что подчеркивает устойчивость смол в условиях диагенеза (табл. 4). Сочетание литологических и локальных гидродинамических условий осадочных пород, где встречаются ископаемые смолы, является фактором, оказывающим непосредственное влияние на окислительно-восстановительные условия захоронения ископаемых смол. Так, мелкозернистые отложения (глины), застойные воды с низким содержанием растворенного кислорода играют важную роль в сохранении ископаемых смол.

При этом можем заметить, что уменьшение числа кислородсодержащих групп происходит, видимо, за счет реакций декарбоксилирования и дегидратации. Насыщенные алифатические и ненасыщенные связи (например, $R_1R_2C=CHR_3$) также незначительно уменьшаются, возможно за счет образования новых циклических структур полимерной матрицы. Уменьшается ароматическая составляющая.

Как упоминалось нами ранее, породы, где встречаются изученные ископаемые смолы, представляют собой песчано-глинистые образования с содержанием такого типично диагенетического минерала, как сидерит, что свидетельствует об интенсивности процессов диагенеза в осадке, где захоронялась ископаемая смола. Геохимическая обстановка образования сидерита характеризуется слабощелочной реакцией среды. В такой среде содержащие кислород иловые воды могли взаимодействовать (гидролиз, полимеризация) с геданитом (с его ароматической составляющей) и способствовать образованию различных окисоединений ($-COOH$), активно участвующих в дальнейшем образовании полимерного каркаса через реакции этерификации с образованием, например, эфирных связей $C-O-C$ (1085 см^{-1}) с большими циклами, содержание которых у геданитов постепенно увеличивается (табл. 4).

Тем не менее, несмотря на то, что химическое воздействие среды, существовавшей в осадке, на живицу разных семейств хвойных происходило при одинаковых условиях — в анаэробной среде заболоченных почв и торфяников (что подтверждается видовым составом растений и насекомых (Жерихин, 1978; Головнева, 2005; Гончаров, Кулькова, 1970), указывающим на обширную заболоченную среду хвойного леса того времени), в результате образовались ископаемые смолы с похожими свойствами (хрупкость, плотность), но разной химической составляющей.

Дифференциально-термический анализ. Кривые ДТА изученных ископаемых смол демонстрируют явления, отражающие лишь общие черты их термических характеристик (например, эндотермичность для процессов испарения и экзотермические сигналы для

реакций разложения) (рис. 4). Такое поведение, с другой стороны, не так уж нетипично для такого многокомпонентного природного продукта, как ископаемые смолы. Однако ДТА-кривые позволяют выявить некоторые различия (табл. 5). Дегградация ископаемых смол в окислительной атмосфере представляет собой многоступенчатый процесс. Разложение ископаемых смол проходит в основном в четыре этапа.

Первый этап — экзотермическое явление, слабое и широкое, оно наблюдается для геданитов между 20 и 140—160 °C и для ретинита между 20 и 140 °C и объясняется процессами испарения воды, летучих компонентов и низкомолекулярных соединений (Feist et al., 2007). В первой температурной области наблюдается относительно небольшая потеря массы (около 10 %). Второй этап, отвечающий плавлению ископаемых смол, начинается у геданитов при 140—160 °C и заканчивается при 310—330 °C, а у ретинита начинается при 140 °C и заканчивается при 260 °C. Ему соответствует прямой участок на кривой ДТА, потеря массы от 12 до 16 %. Низкая температура конца второго эффекта у ретинитов по сравнению с геданитами объясняется отсутствием полимерной структуры.

ДТА-кривые изучаемых ископаемых смол на третьем этапе показывают несколько эндотермических эффектов. У геданитов, основанных преимущественно

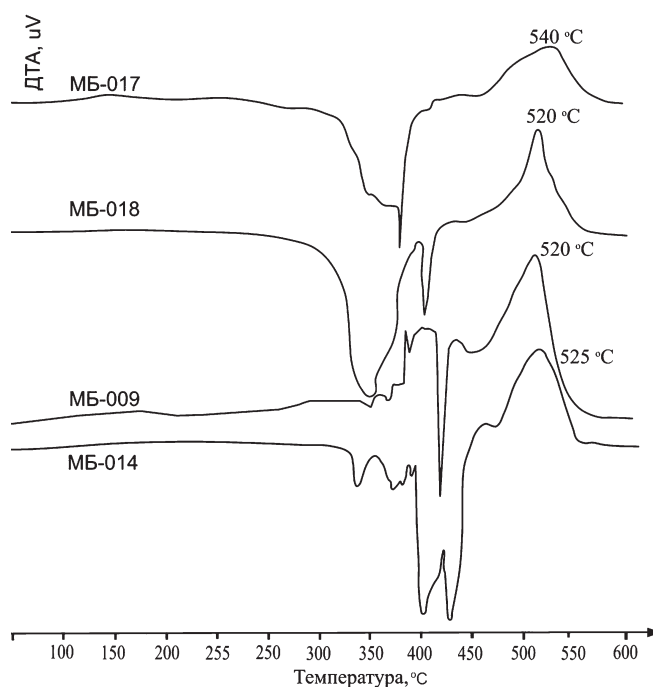


Рис. 4. ДТА-кривые ископаемых смол Якутии

Fig. 4. DTA curves of fossil resins of Yakutia

Таблица 5. Температурные характеристики ископаемых смол Якутии

Table 5. Temperature characteristics of fossil resins of Yakutia

Образец / Sample	T _{ДТА} , °C, этапы / stages			
	I	II	III	IV (max)
геданит / gedanite				
МБ-017	20—160	160—330	330—450	450—580 (540)
МБ-018	20—150	140—310	310—450	450—560 (520)
МБ-009	20—140	140—310	310—450	450—560 (520)
ретинит / retinite				
МБ-014	20—140	140—260	330—460	460—550 (525)

но на полимерах лабданоидных карбоновых кислот, в диапазоне 300–470 °С эти процессы могут быть связаны с диспропорционированием этих кислот, а также со сложными реакциями их разложения. Для ретинитов, содержащих в основном неполимерные структурные компоненты, в первую очередь абиетиновую кислоту, на данном этапе, вероятно, происходит ее декарбоксилирование, кипение образующегося расплава и испарение выделяющихся газообразных продуктов. Известно, что при температуре 300–310 °С абиетиновая кислота образует ретен — ароматический углеводород, алкилпроизводное фенантрена, который кипит при 340 °С. Потеря массы вещества на третьем этапе весьма значительна — 60–66 %.

Четвертый (заключительный) этап, связанный с горением, наблюдается при 440–600 °С с максимумом при 495–540 °С. Он протекает в одну широкую ступень, что хорошо согласуется с некоторыми литературными данными (Lühr, 2004). Потеря массы составляет около 20–22 %.

Данные ДТА показали, что нет прямой корреляции между возрастом ископаемой смолы и ее термической стабильностью (табл. 5). Тем не менее заметим, что самый зрелый образец ископаемой смолы из тимирдахской свиты (сеноман) демонстрирует наибольшую интенсивность экзотермического эффекта и меньший температурный максимум по сравнению с более молодой смолой из тастахской свиты (палеоцен-эоцен), имеющей низкую интенсивность экзотермического пика, но больший температурный максимум на последнем этапе разложения. Это можно объяснить тем, что ископаемая смола, содержащая в своем составе меньше ароматических компонентов, выгорает раньше и интенсивнее, и наоборот (табл. 4).

Ботаническое происхождение. Проведен анализ информации по остаткам хвойных пород, произрастающих в пределах Лено-Виллюйской впадины и Яно-Индибирской низменности в мел-палеогеновое время, с целью выявления предположительного ботанического источника встречающихся там ископаемых смол (табл. 2). В отложениях, где среди хвойных доминируют представители семейства *Pinaceae*, встречается ретинит, а там, где преобладает пыльца семейства *Cupressaceae* (*Taxodiaceae*), — геданит. Это позволило подтвердить, что представители семейств *Pinaceae* и *Cupressaceae* (*Taxodiaceae*) действительно могут являться основным ботаническим источником образования таких ископаемых смол, как ретинит и геданит соответственно. Таким образом, ретинит и геданит — разновидности ископаемых смол, имеющие различный ботанический источник, что сказывается на их химическом составе. Заметим, остатки пыльцы представителей семейства *Araucariaceae* не были найдены в приведенных выше отложениях, поэтому предположения, что данное семейство может быть источником таких ископаемых смол, как геданиты, по-прежнему до конца не обоснованы. Для однозначного определения ботанического источника данных ископаемых смол необходимы дальнейшие исследования.

Заключение

Впервые проведено исследование молекулярного состава (по данным инфракрасной спектроскопии)

и термических свойств ископаемых смол Якутии из местонахождений Опока-Хая, р. Лямпущи и оз. Тастах, что является важным для диагностики этих смол и дальнейшего стратиграфического сравнения со смолами других арктических регионов, а также выяснения их региональных особенностей. Результаты исследований с помощью ИКС показали, что ископаемые смолы представлены в основном хрупкими разновидностями — геданитами. При этом также могут встречаться ретиниты. Это обстоятельство интересно тем, что на севере Евразии геданит до сих пор был известен в основном лишь в палеогеновых отложениях Балтики, где он встречается в небольшом количестве совместно с сукцинитом. Это указывает на его значительно более широкое распространение, чем считалось ранее.

На основании полученных ИК-спектроскопических данных ископаемых смол Якутии сделаны выводы об особенностях молекулярного состава геданита и ретинита. Геданит по сравнению с ретинитом содержит в своем составе больше кислородсодержащих соединений (карбоновых кислот, спиртов и эфиров) и алифатических и ароматических углеводородов. Это можно объяснить разным ботаническим происхождением (т. е. изначально живица могла содержать больше таких компонентов), особенностями их химической структуры, различным воздействием на ископаемые смолы геохимической обстановки.

Замечено, что образцы ископаемой смолы, имеющие в своем составе меньше ароматических компонентов, выгорают раньше, данный процесс протекает более интенсивно, и наоборот.

Проанализирована информация по хвойным растительным остаткам в пределах местонахождения изучаемых ископаемых смол Якутии, что позволило подтвердить, что представители хвойных семейств *Cupressaceae*, *Taxodiaceae* действительно могут являться основным ботаническим источником при образовании геданита, а семейства *Pinaceae* — ретинита.

Молекулярная характеристика ископаемых смол будет оставаться основным направлением их исследований в обозримом будущем, поскольку изучение молекулярного состава может помочь более глубоко понять устойчивость и изменчивость смол в различных геологических условиях, что, в свою очередь, принесет новые знания о процессах, происходящих в земной коре на протяжении миллионов лет.

Литература / References

- Баранова Ю. Л., Бискэ С. Ф. Стратиграфия кайнозоя и история развития рельефа Восточно-Сибирской низменности // Четвертичная геология и геоморфология Северо-Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1964. С. 41–63.
- Baranova Yu. L., Biske S. F. Stratigraphy of the Cenozoic and the history of the development of the relief of the East Siberian Lowland: Quaternary Geology and Geomorphology of Northeastern Siberia. Novosibirsk: Nauka, 1964, pp. 41–63. (in Russian)
- Болховитина Н. А. Спорово-пыльцевые комплексы мезозойских отложений Виллюйской впадины и их значение для стратиграфии. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 186 с.
- Bolkhovitina N. A. Pollen-spore complexes of Mesozoic



- deposits of the Vilyuy Basin and their significance for stratigraphy. Moscow: USSR AS Publishing House, 1959, 186 p. (in Russian)
- Бычков А. А. Очерки Якутской области: С устья реки Лены: (путевые заметки). Томск: Паровая типо-лит. П. И. Макушина. 1899. 68 с.
- Bychkov A. A. Essays on the Yakutsk Region: from the mouth of the Lena River: (travel notes). Tomsk: Printing House of P. I. Makushin, 1899, 68 p. (in Russian)
- Вахрамеев В. А. Стратиграфия и ископаемая флора юрских и меловых отложений Вилуйской впадины и прилегающей части Приверхоянского прогиба. Региональная стратиграфия СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 3. 137 с.
- Vakhromeev V. A. Stratigraphy and fossil flora of Jurassic and Cretaceous deposits of the Vilyuy Basin and adjacent part of the Preverkhoyansk Fold. Regional Stratigraphy of the USSR. Vol. 3. Moscow: USSR AS Publishing House, 1958, 137 p. (in Russian)
- Вахрамеев В. А. Стратиграфия мезозойских отложений восточной и южной частей Сибирской платформы: Проект унифицированной и корреляционной схем // Труды Межвед. совещ. по разработке униф. стратигр. схем Сибири. Л.: Гостоптехиздат, 1957. С. 19–26.
- Vakhromeev V. A. Stratigraphy of Mesozoic deposits of the eastern and southern parts of the Siberian Platform: a project of unified and correlation scheme. Proceedings of the Interdepartmental Conference on the Development of Unified Stratigraphic Schemes of Siberia. Leningrad: Gostootizdat, 1957, pp. 19–26. (in Russian)
- Воллосович К. А. Геологические наблюдения в тундре между нижними течениями рр. Лены и Колымы // Тр. Комис. по изуч. ЯАССР. Вып. 15. Л.: Изд-во АН СССР, 1930. С. 299–357.
- Vollosovich K. A. Geological observations in the tundra between the lower reaches of the Lena and Kolyma rivers. Proceedings of the Commission for the Study of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic. Issue 15. Leningrad: USSR AS Publishing House, 1930, pp. 299–357. (in Russian)
- Геденшторм М. М. Записки о Сибири. СПб.: тип. Мед. деп. м-ва внутр. дел, 1830. 165 с.
- Gedensthorm M. M. Notes on Siberia. St. Petersburg: Medical Department Printing House, Ministry of Internal Affairs, 1830, 165 p. (in Russian)
- Головнева Л. Б. Фитостратиграфия и эволюция альб-кампанской флоры на территории Сибири // Меловая система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2005. С. 177–197.
- Golovneva L. B. Phytostratigraphy and evolution of the Alb-Campanian flora in Siberia. The Cretaceous System of Russia: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. St. Petersburg: SPb University Press, 2005, pp. 177–197. (in Russian)
- Гончаров В. Ф., Кулькова И. А. Об эоценовом возрасте тастахской свиты в Яно-Индибирской низменности // Геология и геофизика. 1970. № 11. С. 87–93.
- Goncharov V. F., Kulkova I. A. On the Eocene age of the Takhtakh suite in the Yano-Indigirka Lowland. Geology and Geophysics, 1970, No. 11, pp. 87–93. (in Russian)
- Грунвальд П. В. Горные богатства Якутии. Якутск: Типография Якутгосиздата, 1927. 127 с.
- Grunwald P. V. Mineral Resources of Yakutia. Yakutsk: Yakutgosizdat Printing House, 1927, 127 p. (in Russian)
- Гусев А. И. Геология, угленосность и нефтеносность низовьев реки Оленек. Л.; М.: Изд-во Главсевморпути, 1950. Т. 1. 99 с.
- Gusev A. I. Geology, coal and oil content of the lower reaches of the Olenek River. Vol. 1. Leningrad, Moscow: Publishing house of Glavsevmorput, 1950, 99 p.
- Жерихин В. В. Развитие и смена меловых и кайнозойских фаунистических комплексов (трахейные и хелицеро-вые). М.: Наука, 1978. 200 с.
- Zerikhin V. V. Development and change of Cretaceous and Cenozoic faunal complexes (tracheates and helicerates). Moscow: Nauka, 1978, 200 p. (in Russian)
- Кайялайнен В. И. Стратиграфия нижнего кайнозоя Яно-Индибирской (Приморской) низменности // Учен. зап. НИИГА. Регион. геология. 1967. Вып. 10. С. 23–34.
- Kailainen V. I. Stratigraphy of the Lower Cenozoic of the Yano-Indigirka (Primorsky) Lowland. Proceedings of the NIIGA. Regional Geology, 1967, 10, pp. 23–34. (in Russian)
- Кибер А. Извлечение из журнала путешествия доктора Кибера с мнением об оном академика Захарова // Зап. Госуд. адмиралт. департ. 1827. Ч. 13. С. 179–216.
- Kiber A. Extract from the travel journal of Dr. Kiber with an opinion about Academician Zakharov. Proc. of the State Admiralty Department, 1827, No. 13, pp. 179–216. (in Russian)
- Киричкова А. И. Фитостратиграфия и флора юрских и нижнемеловых отложений Ленского бассейна. Л.: Недра, 1985. 223 с.
- Kirichkova A. I. Phytostratigraphy and flora of Jurassic and Lower Cretaceous deposits of the Lena Basin. Leningrad: Nedra, 1985, 223 p. (in Russian)
- Киричкова А. И., Сластенов Ю. Л. Стратиграфия и флора нижнемеловых отложений р. Леписке (Западное Приверхоянье) // Тр. ВНИГРИ. 1966. Вып. 249. С. 147–169.
- Kirichkova A. I., Slastenov Yu. L. Stratigraphy and flora of the Lower Cretaceous deposits of the Lepiske River (Western Preverkhoyansk). Proceedings of VNIIGRI, 1966, 249, pp. 147–169. (in Russian)
- Криштофович А. Н. Ископаемые флоры Пенжинской губы, оз. Тастах и хр. Рарыткин // Тр. Ботан. ин-та АН СССР. Сер. 8. Палеоботаника. 1958. Вып. 3. С. 76–120.
- Kristofovich A. N. Fossil floras of the Penzyinsk Bay, Tastaakh Lake, and Rarytkin Ridge. Proceedings of the Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences. Series 8. Paleobotany, 1958, 3, pp. 76–120. (in Russian)
- Кулькова И. А. Палинологические исследования эоценовых отложений Яно-Индибирской низменности. Новосибирск: Наука, 1973. 115 с.
- Kulkova I. A. Palynological studies of Eocene deposits of the Yano-Indigirka Lowland. Novosibirsk: Nauka, 1973, 115 p. (in Russian)
- Мартirosян О. В. Факторы и механизмы структурной эволюции органических минералов и минералоидов. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 241 с.
- Martirosyan O. V. Factors and mechanisms of the structural evolution of organic minerals and mineraloids. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2012, 241 p. (in Russian)
- Пчелина Т. М. Литолого-петрографическая характеристика мезозойских пород сангарского района Ленского бассейна // Литологическая характеристика пород

- и состав углей Ленского бассейна. М.: Госгортехиздат, 1960. С. 24–92.
- Pchelina T. M. Lithological and petrographic characteristics of Mesozoic rocks of the Sangar District of the Lena Basin. Lithological characteristics of rocks and coal composition of the Lena Basin. Moscow: Gosgortekizdat, 1960, pp. 24–92. (in Russian)
- Савкевич С. С. Новое в минералогическом изучении янтаря и некоторых других ископаемых смол // Самоцветы. Л.: Наука, 1980. С. 17–28.
- Savkevich S. S. New findings in the mineralogical study of amber and some other fossil resins. Semiprecious Stones. Leningrad: Nauka, 1980, pp. 17–28. (in Russian)
- Фигурин А. Е. Замечания медико-хирурга Фигурина о разных предметах естественной истории и физики, учиненные в Устьянске и окрестностях оного в 1822 г. // Сиб. вестник. 1823. Ч. 20/ 21. С. 196–197.
- Figurin A. E. Remarks of the medic-surgeon Figurin on various subjects of natural history and physics, made in Ustyan and surrounding areas in 1822. Siberian Herald, 1823, No. 20/21, pp. 196–197. (in Russian)
- Фрадкина А. Ф. Спорово-пыльцевые комплексы мезозоя Западной Якутии. Л.: Недра, 1967. 124 с.
- Fradkina A. F. Spore-pollen complexes of the Mesozoic of Western Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 1967. 124 p. (in Russian)
- Швейгер Г. Исследование янтаря // Сиб. вестник. 1822. Ч. 17. С. 15–28.
- Schweiger G. Study of amber. Siberian Herald, 1822, No. 17, pp. 15–28. (in Russian)
- Eichwald E. Ueber Ichthyosauren und Ceratiten Russlands. Bull. Acad. Sci. St.-Ptb. 1841. Bd. 11. No. 8. Col. 108–119.
- Garcia-Valles I M., Mariano A. Di., Alfonso P. et. al. Differentiation between copal and amber by their structure and thermal behaviour. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. P. 13027–13037.
- Jablonski P., Golloch A., Borchard W. DSC-measurements of amber and resin samples. *Thermochim. acta*. 1999. Vol. 333. No. 1. P. 87–93.
- Kosmowska-Ceranowicz B. Succinite and some other fossil resins in Poland and Europe (deposits, finds, features and differences in IRS). *Estudios del Museo de ciencias naturales de Alava*. 1999. Vol. 14. No. 2. P. 73–117.
- Langenheim J. H. Plant resins: chemistry, evolution, ecology and ethnobotany. Portland, Cambridge: Timber Press, 2003. 586 p.
- Lin R., Ritz G. P. Studying individual macerals using IR micro-spectroscopy, and implications on oil versus gas/condensate proneness and «low-rank» generation. *Organic Geochemistry*. 1993. Vol. 20. P. 695–706.
- Lühr C. Charakterisierung und klassifizierung von fossilen Harzen (Characterisation and classification of fossil resins): Ph. D. Duisburg: University Duisburg-Essen, 2004. 258 p.
- Natkaniec-Nowak L., Drzewicz P., Stach P., et. al. The overview of analytical methods for studying of fossil natural resins. *Critical reviews in Analytical chemistry*. 2023. Vol. 21. P. 1–23.
- Nissenbaum A, Yaker D. Stable isotope composition of amber. In: *Amber, resinite, and fossil resins*. Washington: ACS, 1995. P. 32–42.
- Pagacz J., Naglik B., Stach P., Drzewicz P., Natkaniec-Nowak L. Maturation process of natural resins recorded in their thermal properties. *J. Materials Science*. 2020. Vol. 55. No. 10. P. 4504–4523.
- Ragazzi E., Roghi G., Giaretta A., Gianolla P. Classification of amber based on thermal analysis. *Thermochim. Acta*. 2003. Vol. 404. P. 43–54.
- Seyfullah L. J., Beimforde C., Corso J. D. et. al. Production and preservation of resins — past and present. *Biological reviews*. 2018. Vol. 93. No. 3. P. 1684–1714.
- Toll E. Tertiäre Pflanzen der Insel Neusibirien. Saint-Petersburg: Acad. Sci., 1890. 22 p. (Mem. Acad. sci. St.-Ptb.; Bd. 37. No. 5).

Поступила в редакцию / Received 14.07.2025