ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Исследование «колчеданского янтаря» с помощью ИК-спектроскопии

П.И.Алексеев✉, Е.А.Васильев
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Алексеев П.И., Васильев Е.А. Исследование «колчеданского янтаря» с помощью ИК-спектроскопии // Записки Горного института. 2026. Т. 280. С. 16-26. EDN JXBSZE

Аннотация
Работа посвящена исследованию ископаемых смол из коллекции Горного музея с помощью инфракрасной (ИК) спектроскопии. Были изучены образцы янтаря р. Исеть Среднего Урала, собранные в начале XIX в. и известные под названием «колчеданский янтарь». Для сравнения изучены ископаемые смолы из других местонахождений Севера Евразии: р. Песчанка побережья Баренцева моря, р. Амдерма Югорского полуострова и р. Хатанга п-ова Таймыр. Полученные данные показали, что «колчеданский янтарь» относится к самостоятельному и широко распространенному в Северной Евразии виду ископаемых смол, находки которого приурочены к отложениям мелового возраста. Ранее этот вид смол определялся как «кранцит» для местонахождения на р. Исеть или как «ретинит» для местонахождений побережья Северного Ледовитого океана. В работе проведено сравнение с другими минеральными видами ископаемых смол. Анализ пиков поглощения ИК-спектра позволил предположить, что по классификации смол К.Андерсона «колчеданский янтарь» относится к классу I, который представлен смолами с преобладанием дитерпеноидов лабданового типа. Отличительным и наиболее характерным признаком ИК-спектра «колчеданского янтаря» является «гребенка» из трех примерно равных пиков поглощения со значениями 936; 909 и 888 $см^{-1}$. Анализ систематически значимых признаков ИК-спектра показал, что наиболее вероятным биологическим источником этого вида ископаемых смол были растения из семейства сосновых. Дополнительным аргументом в пользу такого биологического происхождения является сравнение диагностического участка ИК-спектра «колчеданского янтаря» со спектром янтаря о-ва Аксель-Хейберг канадской Арктики, образовавшегося из смолы лжелиственницы *Pseudolarix*.

Ключевые слова
Горный музей; ископаемые смолы; ИК-спектры; колчеданский янтарь; источник янтаря

Финансирование
Отсутствует.

Поступила: 19.09.2025 ***Принята: 28.04.2026*** ***Онлайн: 17.06.2026*** ***Опубликована: 10.09.2026***

Введение

За счет устойчивости к химической деструкции ископаемые смолы сохраняются в осадочных отложениях сотни миллионов лет, начиная с каменноугольного периода [1]. В настоящее время для их изучения наиболее востребованными методами являются инфракрасная спектроскопия (FTIR) и газовая хроматография (Py-MsCS), которые позволяют получить данные химического состава смолы, на котором базируются современные классификации ископаемых смол [2, 3]. Эти методы могут точно разделять разные виды смол, что позволяет изучать их географическое и стратиграфическое распространение и в перспективе использовать ископаемые смолы в качестве геологических и палеонтологических маркеров. После определения смолы можно предположить возраст и стратиграфическую приуроченность отложений, из которых она происходит, а если известен биологический источник происхождения смолы, можно получить данные о распространении конкретных растительных сообществ и палеоклиматической зональности, поскольку разные смолоносные растения произрастают в различных климатических условиях. Для палеоботанических исследований ископаемые смолы являются альтернативным источником информации, дополняющим данные анализа спорово-пыльцевых комплексов и изучения листовых флор.

В Горном музее Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II хранятся обширные палеонтологические и минералогические коллекции [4, 5], которые служат базой для

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

современных научных исследований [6-8]. В фондах музея также хранятся образцы ископаемых смол, в том числе «колчеданский янтарь» – давно известный, но до сих пор слабо изученный минералогический объект. Проявления янтаря были найдены около с. Колчедан на р. Исеть Среднего Урала еще в конце XVIII в. В 1802 г. образец был исследован известным химиком, академиком Т.Е.Ловицем, который пришел к выводу, что эта смола не отличается от балтийского янтаря [9]. Специального минералогического наименования для нее не было предложено, и в дальнейшем в литературе она обозначается как «колчеданский янтарь» – по месту ее первых сборов. Отчет о геологическом разрезе его местонахождения был представлен горным инженером, управляющим Каменского завода капитаном Бароцци де Эльсом [9]. Образцы «колчеданского янтаря», собранные «из пластов песчаника Колчеданской волости в 18 верстах от Каменского завода», с 1835 г. хранятся в Горном музее.

В 1935 г. образцы Горного музея исследовались в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте Ленинграда – были проведены анализы на растворимость и вычислено относительное содержание химических элементов. По результатам исследований «колчеданский янтарь» был отнесен в «группу кранцита», совмещающую свойства «незрелых янтарей» с явными химическими преобразованиями материала [10].

В 1964 и 1966 годах образцы этого янтаря из Горного музея были взяты для исследований С.С.Савкевичем, который одним из первых в мире изучал ископаемые смолы с помощью инфракрасной спектроскопии. Об исследованиях свидетельствуют расписки о получении образцов, которые хранятся в фондах вместе с этикетками, однако результаты остались неизвестны, а позднее С.С.Савкевич относил янтарь Среднего Урала к геданиту [11, рис.1.3]. С 2020 г. «колчеданский янтарь» вновь попал в поле зрения ученых [12, 13]. Образцы из коллекции Горного музея не исследовались, но по описанным еще Бароцци де Эльсом [9] характерным физическим свойствам (эластичность, мягкость) была высказана версия об их принадлежности к кранциту – редкому виду ископаемых смол из палеогеновых отложений Европы [13]. В настоящее время данные о «колчеданском янтаре» противоречивы, а его ботаническое происхождение и химический состав неизвестны. Поэтому через 60 лет после исследований С.С.Савкевича образцы «колчеданского янтаря» из коллекции Горного музея были снова изучены с помощью инфракрасной спектроскопии и проведено сравнение янтаря с ископаемыми смолами из других местонахождений.

Материалы и методы

Все исследованные образцы ископаемых смол (40 образцов) хранятся в Горном музее (табл.1).

Таблица 1

Исследованные образцы ископаемых смол из коллекции Горного музея

Местонахождение	Возраст, геологическое происхождение	Номера образцов, коллекция МГС 930
р. Исеть, с. Колчедан, Средний Урал	Поздний мел (коньяк), камышловская свита, мелководные прибрежно-морские отложения	25/1, 25/2, 25/3, 25/4, 25/5, 25/6_2, 25/6_3, 25/6_4, 25/6_5, 25/6_6
р. Песчанка, Архангельская обл.	Поздний мел (?), шельф Северного Ледовитого океана	94/1, 94/2, 94/3, 94/4, 94/5, 94/6, 94/7, 94/8, 94/9
р. Амдерма, Югорский полуостров		41/1, 41/2, 41/3
р. Хатанга, п-ов Таймыр	Поздний мел (сантон), хеттская свита, прибрежно-морские отложения	95/1, 95/2, 95/3, 95/4, 95/5, 95/6, 95/7, 95/8, 95/9, 95/10, 95/11, 95/12, 95/13, 95/14, 95/15, 95/16, 95/17
пос. Янтарный, Калининградская обл.	Палеоген (эоцен), прусская свита, прибрежно-морские отложения	930/92/11

«Колчеданский янтарь» был собран в XIX в. на берегу р. Исеть в слоях глин и бурого угля, перекрытых красноватым песчаником [9] (рис.1). Современные авторы указывают, что возраст отложений, из которых он происходит, эоценовый [12], однако А.П.Карпинский указывал на распространение в районе с. Колчедан двух горизонтов меловых отложений – нижнего с остатками растений и верхнего с остатками морской меловой фауны [14]. По расположению местонахождения можно установить, что содержащие «колчеданский янтарь» слои относятся к мелководным

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

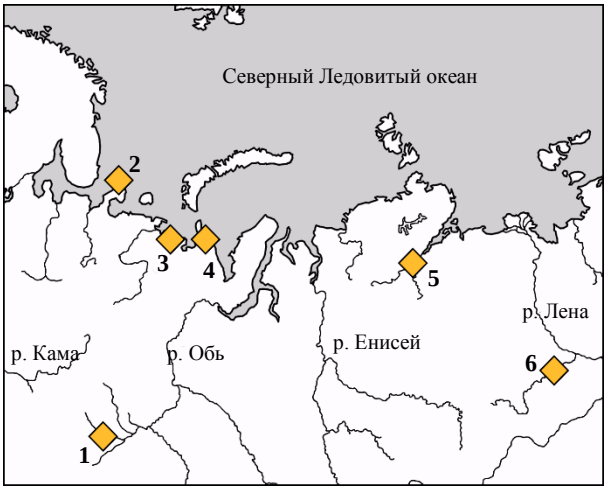


Рис.1. Местонахождения ископаемых смол с ИК-спектром «колчеданского янтаря»

1 – с. Колчедан, р. Исеть; 2 – п-ов Канин; 3 – р. Песчанка, Архангельская обл.; 4 – р. Амдерма, Югорский полуостров; 5 – р. Хатанга, п-ов Таймыр; 6 – р. Вилюй, пос. Хатырык-Хомо

морским отложениям камышловской свиты коньякского возраста и перекрываются более глубоководными отложениями фадюшкинской свиты кампанского яруса [15].

Местонахождение, обозначенное на этикетке как «река Песчанка, Архангельская область», предположительно находится на побережье Баренцева моря. Относительно недалеко, в районе р. Амдерма Югорского полуострова, находки ископаемых смол связаны с перемытыми шельфовыми отложениями Северного Ледовитого океана позднемелового возраста [16]. На п-ове Таймыр, р. Хета, приток Хатанги вскрывает несколько свит позднемелового возраста, наиболее богатое янтарем местонахождение Янтардах относится к хеттской свите сантон-кампанского яруса [17] (рис.1).

Образцы ископаемых смол были исследованы с помощью FTIR (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy) для получения ИК-спектров поглощения в диапазоне 4000-600 $см^{-1}$. Работа проводилась на спектрометре VERTEX 70 (Bruker, Германия) с микроскопом Hyperion 1000 в Центре коллективного пользования Горного университета. Прозрачные частицы образца, снятые со свежей поверхности, толщиной менее 50 мкм, были помещены на пластину KBr для снятия ИК-спектров. Данные в формате .dpt были конвертированы в графики с помощью библиотек Matplotlib, Pandas и NumPy в программной среде Python 3. Для визуализации спектральных данных использовался метод параллельных координат (parallel coordinates plot). Каждое из четырех спектральных отношений представлено отдельной осью, а образцы – тонкими линиями, соединяющими их значения по всем осям, что позволяет одновременно показать различия между разными видами ископаемых смол по всем параметрам.

Результаты и обсуждение

Физические свойства и ИК-спектр «колчеданского янтаря». Янтарь, собранный на р. Исеть, представляет собой грубо окатанные кусочки смолы размером до 3 см, покрытые непрозрачной коркой выветривания (рис.2). Цвет варьирует от светло-желтого до темно-оранжевого и красноватого, прозрачные участки смолы комбинируются с мутной фактурой «облачного янтаря» – непрозрачными белыми разводами. По аналогии с балтийским янтарем такие непрозрачные участки внутри смолы не связаны с ее химическим составом, а являются следствием попадания воды в еще не застывшую смолу. Для «колчеданского янтаря» характерна пластичность – материал режется скальпелем, а не крошится.



Рис.2. Ископаемая смола из с. Колчедан (р. Исеть) коллекции Горного музея (МГС 930/25)

Результаты спектроскопии показывают, что все образцы Горного музея из р. Исеть, с побережья Баренцева моря, часть образцов п-ова Таймыр и Югорского полуострова имеют идентичный набор полос поглощения в ИК-спектре и относятся к одному виду ископаемых смол (рис.3). В зависимости от степени выветривания график ИК-спектра может быть более или менее сглаженным, а слабые полосы поглощения становятся трудноразличимыми, но это не влияет на значения волнового числа и относительную высоту пиков на графике.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

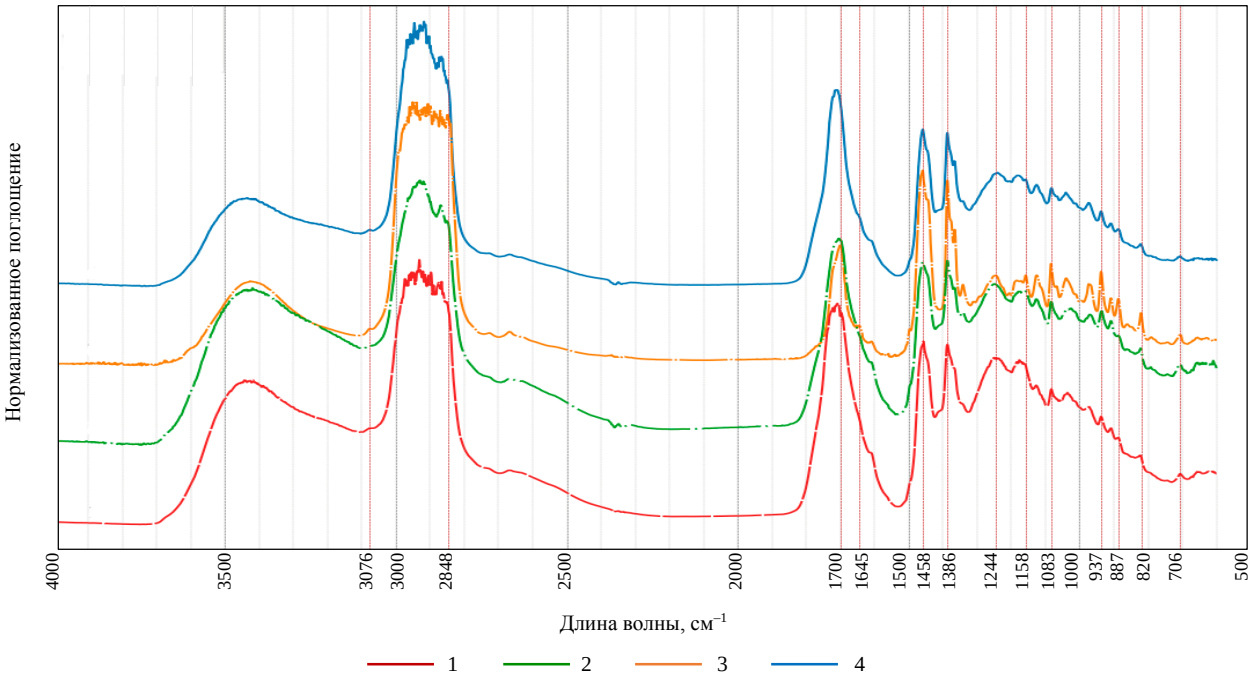


Рис.3. ИК-спектры образцов «колчеданского янтаря» из разных местонахождений в диапазоне 4000-600 $см^{-1}$

1 – обр. 930/25/4, с. Колчедан, Средний Урал; 2 – обр. 930/25/6/4, с. Колчедан, Средний Урал;
3 – обр. 930/41/1, р. Амдерма, Югорский полуостров; 4 – обр. 930/94/9, р. Песчанка, Баренцево море

Выявленные полосы поглощения ИК-спектра «колчеданского янтаря» показаны в табл.2, идентификация структурных групп в ИК-спектрах была проведена на основе литературных данных [2, 18, 19].

Таблица 2

Полосы поглощения ИК-спектра «колчеданского янтаря»

Значение, $см^{-1}$	Интенсивность	Функциональная группа
706	ΔΔ	Цис-конфигурация двойной связи –CH=CH–
743	Δ	Связи CH=CH. Замещение метила в α-положении
790	Δ	Полоса поглощения ненасыщенной связи $R_1R_2C=CHR_3$
820	ΔΔ	Цис-конфигурация группы CH=CH–COOR
861	Δ	Не идентифицировано
887	ΔΔ	Связь C–H в экзоциклической метиленовой группе $=CH_2$
909	ΔΔ	Связи C–O в первичных спиртах
937	ΔΔ	Связи C–O в первичных спиртах
972	ΔΔ	Группа OH карбоновых кислот в твердом состоянии
1001	Δ	Группы C–O в первичных спиртах или фенольных гидроксилах
1039	ΔΔ	Связь C–O во вторичных и третичных спиртах
1067	Δ	Связь C–O во вторичных и третичных спиртах
1083	ΔΔ	Связь C–O во вторичных и третичных спиртах
1125	ΔΔ	Связь C–O во вторичных и третичных спиртах
1158	ΔΔ	Связь C–O эфиров
1245	ΔΔ	Связь C–O карбоновых кислот
1293	Δ	Связи C–O
1310	Δ	Связи C–O
1365	ΔΔ	Связи C–H
1341	ΔΔ	Связи C–H

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Окончание табл.2

Значение, $см^{-1}$	Интенсивность	Функциональная группа
1386	ΔΔΔ	Связь С–Н в CH_3 рядом с карбонильной группой (кислоты, эфиры)
1458	ΔΔΔ	Связь С–Н в CH_2 рядом с карбонильной группой (кислоты, эфиры)
1496	Δ	Связь С–Н
1609	Δ	Связи между углеродом в ароматических соединениях
1645	Δ	Экзоциклическая метиленовая группа CH_2
1701	ΔΔΔ	Связь С=О в ненасыщенных карбоновых кислотах
1720	ΔΔ	Связь С=О в насыщенных карбоновых кислотах и эфирах
2667	Δ	Связанная группа ОН карбоксила
2727	Δ	Связанная группа ОН карбоксила
2900	ΔΔΔ	Связь С–Н в алифатических группах CH_2 и CH_3
3076	Δ	Вторичная связь С–Н в экзоциклической группе $=CH_2$
3426	ΔΔ	Связь О–Н воды и карбоновых кислот

Примечания: Δ – слабая, ΔΔ – средняя, ΔΔΔ – сильная интенсивность.

Полосы поглощения ИК-спектра «колчеданского янтаря» из Горного музея соответствуют спектрам типичных терпеноидных смол [20, 21]. Наиболее выраженные полосы поглощения связаны со следующими функциональными группами: ОН спиртов и карбоновых кислот (3400-3480 $см^{-1}$), алифатические группы CH_2 и CH_3 (2900 $см^{-1}$, 2840 $см^{-1}$), группы CH_2 и CH_3 органических кислот и эфиров (1370 $см^{-1}$, 1458 $см^{-1}$). По совместному присутствию полос поглощения 888, 1642 и 3076 $см^{-1}$ можно судить о присутствии соединения с экзоциклическими метиленовыми группами, вероятно бициклические дитерпеноиды лабданового типа. Это дает основание предполагать, что «колчеданский янтарь» относится к классу I по классификации Андерсона [3, 22] – самому распространенному среди ископаемых смол с оговоркой, что для окончательного вывода нужны исследования химического состава с помощью хроматографии. Отсутствие пиков поглощения 1735 $см^{-1}$ и 1160 $см^{-1}$ говорит об отсутствии полимерной матрицы сложных эфиров янтарной кислоты с лабдановыми компонентами [23]. По пику поглощения карбоксильных групп со значением 1720-1700 $см^{-1}$ можно определить, что материал относится к хрупким ископаемым смолам. Слабый пик около 1600 $см^{-1}$ показывает наличие в составе ароматических соединений, в ископаемых смолах их источником часто бывают производные абиетиновой кислоты (например, дегидроабиетиновая кислота).

Распространение «колчеданского янтаря». Изучение ИК-спектров образцов ископаемых смол из разных местонахождений показало, что этот вид часто встречается в субарктическом регионе Евразии, преимущественно в позднемеловых отложениях. Идентичные ИК-спектры имеют все исследованные образцы из р. Песчанка (побережье Баренцева моря). Несмотря на небольшие индивидуальные различия спектров, набор пиков поглощения у этих образцов такой же, как и у «колчеданского янтаря», особенно для этих смол характерна «гребенка» из трех отчетливых и примерно равных по высоте пиков со значениями 936, 909 и 888 $см^{-1}$ (рис.4). Данный вид смол встречается также среди образцов п-ова Таймыр и Югорского полуострова.

У некоторых образцов из бассейна р. Хатанга сильно выражена полоса поглощения со значением 1030 $см^{-1}$. По мнению М.А.Богдасарова, это характерно для ретинитов: «...особенностью ИК-спектров ретинитов является сильное поглощение в области 980-1300 $см^{-1}$ с преобладанием пика 1030 $см^{-1}$» [24]. Однако поскольку остальная часть спектра «ретинитоподобных» образцов не отличается от типичного «колчеданского янтаря» и «нормальных» образцов из р. Хатанга, некорректно считать их другим видом ископаемых смол. Таким образом, «колчеданский янтарь» не является специфическим для Среднего Урала видом ископаемых смол. Идентичные ископаемые смолы широко распространены во многих местонахождениях бассейна Северного Ледовитого океана (рис.4), но обычно относятся к другим видам ископаемых смол, чаще всего к ретинитам.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

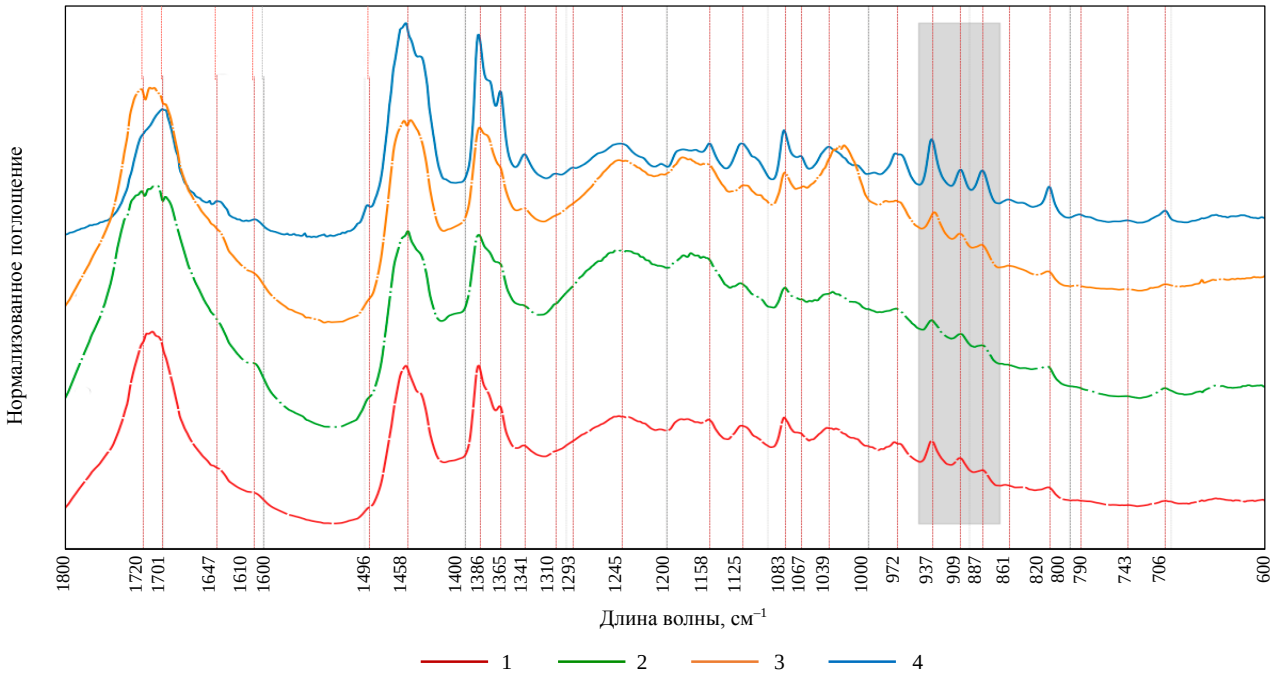


Рис.4. ИК-спектры «колчеданского янтаря» из разных местонахождений в диапазоне 1800-600 $см^{-1}$. Серым цветом выделен диагностический участок «гребенки»

1 – обр. 930/94/1, р. Песчанка, Югорский полуостров; 2 – обр. 930/25/4, с. Колчедан, Средний Урал; 3 – обр. 930/95/3, р. Хатанга, п-ов Таймыр; 4 – обр. 930/41/1, р. Амдерма, Югорский полуостров

Опубликованные в литературе ИК-спектры также подтверждают широкое распространение ископаемой смолы со спектром «колчеданского янтаря» в российской Субарктике. Он присутствует в сантонских отложениях хетской свиты горы Янтардах на п-ове Таймыр, в позднемеловых отложениях у пос. Хатырык-Хомо на р. Вилюй в Якутии и на п-ове Канин [16, 25, 26]. При этом «колчеданский янтарь» не распознают как отдельный вид ископаемых смол, за исключением работы С.С.Савкевича [25], который отмечает, что этот вид смолы «не имеет известных аналогов по ИК-спектрам», и предлагает относить его к «семейству ретинитов». Вероятно этот же вид смолы имеет в виду О.В.Мартиросян [17], которая пишет, что «смолы из района р. Хатанги по спектральным характеристикам близки как к ретиниту, так и геданиту».

Химический состав ископаемой смолы из бассейна р. Хатанга был исследован с помощью пиролитической хроматографии [24, 27], однако из-за совместного распространения разных видов смол в этом регионе и отсутствия ИК-спектров для исследованных образцов мы не можем точно сказать, что опубликованные данные могут быть соотнесены именно с «колчеданским янтарем». По данным К.Андерсона, ископаемые смолы месторождения Янтардах (р. Хатанга) имеют нетипичный химический состав – они относятся к Ib-классу ископаемых смол и состоят из смеси дитерпеноидов лабданового типа (биформена) и производных коммунола с отсутствием свободных мономеров коммуниковой кислоты [27].

Определение места «колчеданского янтаря» в классификации ископаемых смол. Для янтаря, найденного на р. Исеть, предполагалась принадлежность к балтийскому янтарю (сукциниту) или кранциту [9, 13], однако ИК-спектр «колчеданского янтаря» (кривая 1, рис.5) сильно отличается от спектров обоих видов ископаемых смол. ИК-спектр европейского кранцита из местонахождений Германии [26, 28] характеризуется очень сильными полосами поглощения со значениями 700 $см^{-1}$ и 750 $см^{-1}$ (кривая 2, рис.5) и слабой полосой 921 $см^{-1}$, которые не наблюдаются у «колчеданского янтаря», но при этом у кранцита отсутствуют пики поглощения 909 и 937 $см^{-1}$. Таким образом, свойство пластичности, которое наблюдается у обоих видов ископаемых смол, не является диагностическим признаком, по которому можно было бы подтвердить их минеральный вид.

Некоторые ученые считают, что у кранцита есть отдельная окисленная форма – оксикранцит [28, 29] (Гейзельталь, Германия), ИК-спектр которого характеризуется слабым выражением полос поглощения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

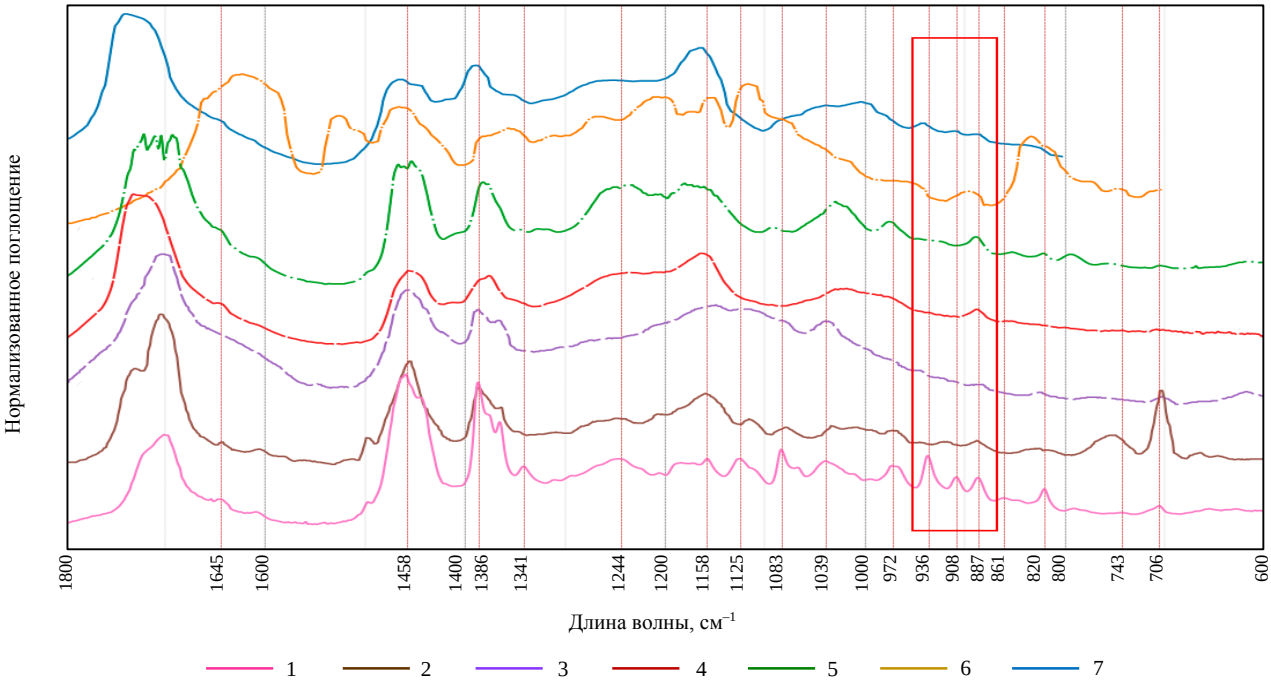


Рис.5. ИК-спектры «колчеданского янтаря» и других минеральных видов ископаемых смол в диапазоне 1800-600 $см^{-1}$. Красным прямоугольником выделен диагностический участок «гребенки», на котором у «колчеданского янтаря» наблюдается три характерных пика поглощения

1 – «колчеданский янтарь» (обр. 930/25/6); 2 – кранцит, Гейзельталь [28]; 3 – оксикранцит, Гейзельталь (ретинит) [28]; 4 – сукцинит, балтийский янтарь (обр. 930/92/11); 5 – геданит, р. Хатанга (обр. 930/95/13); 6 – ретинит из Халле [29]; 7 – янтарь о-ва Аксель-Хейберг (Арктическая Канада) из смолы лжелиственницы [30]

700 и 750 $см^{-1}$ (кривая 3, рис.5). Однако ИК-спектр оксикранцита похож на кранцит по набору полос поглощения и показывает сильную сглаженность по всему диапазону, чего не наблюдается у «колчеданского янтаря», а диагностические полосы последнего, в том числе 909 и 937 $см^{-1}$, у оксикранцита отсутствуют.

Спектр сукцинита сильно отличается по многим признакам – имеет значение максимума полосы карбоксильных групп 1735 $см^{-1}$ и ярко выраженный «балтийский зубец» с максимумом 1160 $см^{-1}$, кроме того у него отсутствуют характерные для «колчеданского янтаря» пики поглощения 907 и 937 $см^{-1}$ (кривая 4, рис.5).

По данным С.С.Савкевича, О.В.Мартиросян и М.А.Богдасарова, на побережье Северного Ледовитого океана встречаются два минеральных вида ископаемых смол – геданит и ретинит [17, 24], и логично было предположить, что «колчеданский янтарь» может относиться к одному из них. В данной работе было проведено сравнение с геданитом, образец которого происходит из верхнемеловых отложений п-ова Таймыр, где он встречается совместно с «колчеданским янтарем». По ИК-спектру геданит резко отличается отсутствием полос поглощения 909, 936, 1125 $см^{-1}$ и более сильными полосами поглощения 887 и 975 $см^{-1}$ (кривая 5, рис.5).

В отличие от предыдущих минеральных видов ископаемых смол, ретинит часто является синонимом для «хрупкой ископаемой смолы», и это название может объединять разные виды ископаемых смол с разным химическим составом [10]. Например, ИК-спектр «ретинита», приведенный в монографии [29], резко отличается от спектров любых современных и ископаемых смол (кривая 7, рис.5). Другой вид ископаемой смолы – оксикранцит [28] – также исторически определялся как «ретинит» (кривая 3, рис.5). Некоторые ученые вообще отрицают существование ретинита как отдельного минерального вида ископаемых смол [31].

Ретинит в качестве вида ископаемой смолы и отличительные признаки его ИК-спектра рассматриваются в ряде публикаций российских ученых [2, 18, 32]. Согласно классификации О.В.Мартиросян и М.А.Богдасарова [2], ретинит имеет пимаровый скелет и состоит из трициклических лабдановых дитерпеноидов (пимаровая, изопимаровая, абиетиновая кислоты), которые не полимеризуются. Это соответствует классу V классификации смол Андерсона [3]. При этом единственной ископаемой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

смолой, отнесенной к классу V по результатам данных газовой пиролитической хроматографии, является эоценовый лондонский копалит [3], для которого ИК-спектроскопия не была сделана. Широкое распространение ретинита в Евразии, по данным [2], нуждается в подтверждении, также необходимо определить «типичный» ретинит, на ИК-спектр которого можно опираться при диагностике видов ископаемых смол.

ИК-спектр «колчеданского янтаря» не соответствует признакам спектра ретинита [2, 18, 32] – его ИК-спектр имеет полосу поглощения 824 $см^{-1}$, характерную для незрелых смол и отсутствующую у ретинита, и полосу 1085 $см^{-1}$ более интенсивную, чем у геданита. Важная для диагностики ретинита полоса 1030 $см^{-1}$ очень интенсивна у некоторых образцов «колчеданского янтаря» с п-ова Таймыр, но слабо проявляется у образцов из других местонахождений. Отличительные полосы спектра «колчеданского янтаря» 936 и 909 $см^{-1}$ не наблюдаются у ретинита. Таким образом, «колчеданский янтарь» не может быть отнесен к признанным минеральным видам ископаемых смол, установленным для Северной Евразии.

Биологическое происхождение «колчеданского янтаря». Важным вопросом при изучении ископаемых смол является не только формальное определение их минерального типа, но и определение растения-продуцента смолы. В этом случае определенный вид ископаемой смолы может стать индикатором возраста, климата и ареала, которые были характерны для данного смолоносного растения. Кроме того, смолы накапливаются в почвах лесных биоценозов [3], поэтому сами по себе показывают наличие лесных ландшафтов в прошлом и могут быть источником данных о лесообразующих растениях, росших на плакорах, остатки которых редко попадают в «стандартные» наборы листовых флор из аллювиальных отложений.

Возможность сохранения в ископаемой смоле признаков, по которым ее можно соотнести с современным растением, разными авторами оценивается по-разному. В российской литературе доминирует точка зрения о том, что ключевую роль для формирования химического состава ископаемой смолы имеют геохимические условия окружающей среды, а различия в составе исходной смолы растения второстепенны [24, 32, 33]. В зарубежной литературе, наоборот, часто высказывается точка зрения, что химический состав терпеноидных смол чрезвычайно устойчив к внешним воздействиям, а их ИК-спектры в определенном диапазоне сохраняют характерный набор полос поглощения десятки или сотни миллионов лет [30, 34, 35]. Это подтверждается сравнением ИК-спектров ископаемых смол с установленным биологическим происхождением и их «аналогов» из современных растений [19, 30, 36], в том числе для местонахождений Южного полушария [37].

В ИК-спектре терпеноидных смол есть вариабельный регион спектра в интервале 1550-650 $см^{-1}$, так называемая «область отпечатков пальца» (fingerprint region) [34], имеющая уникальный набор полос поглощения для разных видов растений. Теоретически это дает возможность отличать одни виды растений от других по образцу смолы, но не позволяет классифицировать образец в рамках ботанической систематики, поскольку систематическое значение отдельных полос поглощения в ИК-спектре плохо изучено [38].

По данным Р.Тапперта [38], который исследовал смолы 60 видов современных хвойных, ИК-спектроскопия позволяет отнести смолу к одной из двух групп – смолам соснового типа или смолам кипарисового типа. Смолы первого типа продуцируют растения из семейств сосновых и тисовых, а второго – из кипарисовых, подокарповых, араукариевых и зонтичных сосен. Для определения типа смол Р.Тапперт предлагает использовать четыре соотношения значений полос поглощения: 832/791, 1460/1448, 1448/1385 и 2858/2848 [38]. Результаты исследования спектров «колчеданского янтаря», геданита и балтийского янтаря относительно базы данных современных смол* приведены на рис.6.

По результатам сравнения признаков ИК-спектров ископаемых смол с современными смолами можно сделать следующие выводы:

• «колчеданский янтарь» и геданит четко разделились на две отдельные группы, подтверждая, что это разные виды ископаемых смол, хотя часто встречаются вместе;

• образцы «колчеданского янтаря» ближе к смолам соснового типа, а геданит – к смолам кипарисового типа, что указывает на разные растительные источники происхождения этих смол;

* FTIR Spectral_ Database_Plant Exudates and Resins_Tappert et al 2011 IJPS. DOI: 10.13140/RG.2.1.3636.4645

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

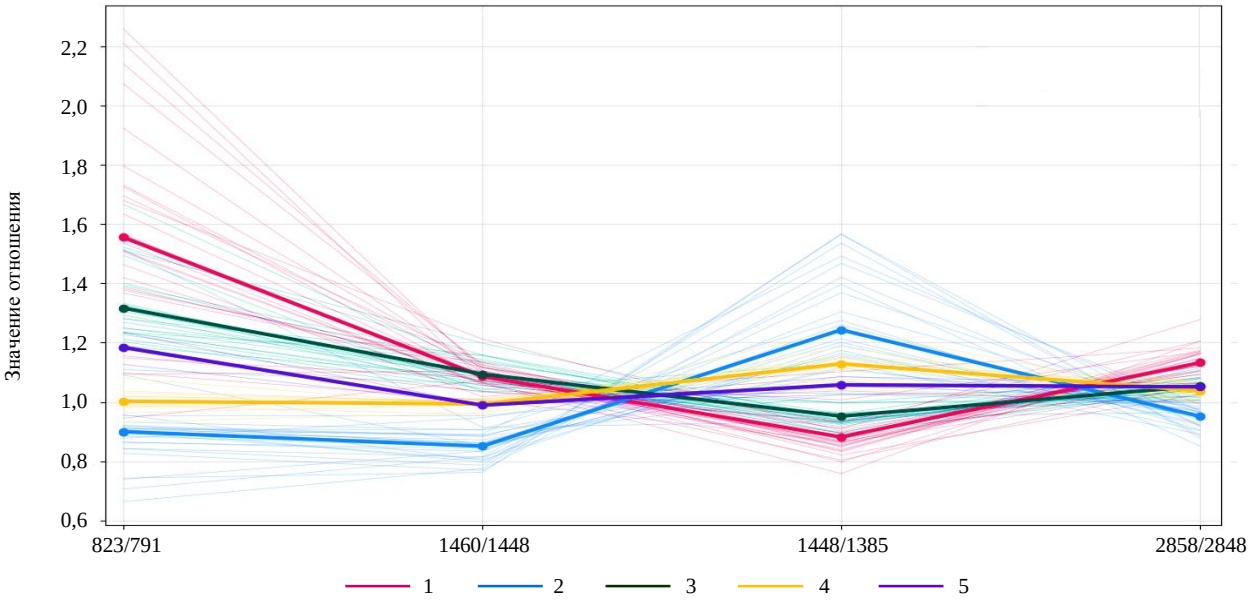


Рис.6. Диаграмма параллельных координат для визуализации различий ИК-спектров современных и ископаемых смол
1 – смола соснового типа; 2 – смола кипарисового типа; 3 – «колчеданский янтарь»; 4 – геданит; 5 – балтийский янтарь

• соотношение значений полос поглощения 2858/2848 в данной работе неинформативно, поскольку в этой части спектра сильные полосы связей С–Н создают шум, на фоне которого маленький пик 2858 см$^{-1}$ часто теряется;

• балтийский янтарь по данным признакам спектра невозможно отнести ни к смолам кипарисового типа, ни к смолам соснового типа.

Результаты данного сравнения также являются аргументом в пользу того, что источником «колчеданского янтаря» было какое-то растение из семейства сосновых, хотя ископаемые смолы соснового происхождения считаются более редкими [30].

При сравнении результатов ИК-спектроскопии «колчеданского янтаря» с другими ископаемыми смолами частичное сходство обнаружилось с янтарем о-ва Аксель-Хейберг Арктической Канады. Для него точно установлено материнское растение [39] – вымерший вид лжелиственницы *Pseudolarix wehrii* Gooch из семейства сосновых. ИК-спектры ископаемой смолы о-ва Аксель-Хейберг [39] так же, как и «колчеданский янтарь», имеют три характерных пика «гребенки» (936, 909 и 888 см$^{-1}$) в «области отпечатков пальца» (кривая 7, рис.5). Масс-спектроскопия канадских образцов показала [40], что их основу образуют мономеры лабданового типа не регулярной, а энанцио-конфигурации (в основном озиковая кислота и энанцио-биформены). Сходство ИК-спектров ископаемой смолы лжелиственницы и «колчеданского янтаря» является еще одним доводом в пользу его происхождения из смолы соснового типа. Однако в канадских образцах содержится большое количество связанной янтарной кислоты, и из-за этого их ИК-спектр отличается смещением пика карбоксильных групп к 1735 см$^{-1}$ и наличием «балтийского зубца» в диапазоне 1250-1160 см$^{-1}$. В свежих смолах хвойных янтарной кислоты не содержится, поскольку она является продуктом распада других соединений [40]. В «колчеданском янтаре» янтарная кислота отсутствует или, по крайней мере, не образует поперечных связей между молекулами дитерпеноидов. Хотя лжелиственница была широко распространена в высоких и средних широтах Евразии и Северной Америки в позднем мелу и палеогене [36], в том числе в местах находок «колчеданского янтаря», без его находок в органической связи с остатками *Pseudolarix* нельзя утверждать, что это растение было его источником.

Заключение

Проведенные исследования ископаемых смол из фондов Горного музея показали, что «колчеданский янтарь» относится не к кранциту, а к отдельному и широко распространенному на севере Евразии виду ископаемых смол. Наиболее ценным для диагностики признаком его ИК-спектра является «гребенка» из трех примерно равных пиков поглощения со значениями 936; 909 и 888 см$^{-1}$. Присутствие «колчеданского янтаря» в разных местонахождениях российской Субарктики

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

подтверждается как исследованиями смол из коллекции Горного музея, так и литературными данными. Большая часть его находок связана с отложениями позднемелового возраста, в том числе исследованное горными инженерами местонахождение у с. Колчедан. В фондах музея хранятся также образцы ископаемых смол этого вида из местонахождений р. Песчанка (Архангельская обл.), р. Амдерма (Югорский полуостров) и р. Хатанга (п-ов Таймыр). Образцы ископаемых смол с аналогичными ИК-спектрами зафиксированы также на п-ове Канин (побережье Баренцева моря) и на р. Вилюй (Якутия).

ИК-спектры «колчеданского янтаря» позволяют предположить, что по химическому составу он относится к классу I классификации смол Андерсона, который представлен смолами с преобладанием дитерпеноидов лабданового типа. Это самый распространенный класс для ископаемых смол, который включает четыре подкласса. К сожалению, признаков ИК-спектра недостаточно, чтобы установить к какому именно подклассу относятся исследуемые образцы.

Определение формального минерального вида по системе, предложенной О.В.Мартиросян и М.А.Богдасаровым, также оказалось невозможным из-за отсутствия примеров типовых спектров для конкретных видов ископаемых смол в этой классификации и противоречивой трактовки термина «ретинит». Данные ИК-спектроскопии показывают, что «колчеданский янтарь» р. Исеть Среднего Урала и многочисленных местонахождений Российской Арктики относится к самостоятельному виду хрупких ископаемых смол, который пока не обнаружен в местонахождениях Европы и Северной Америки. Специфические полосы поглощения ИК-спектра указывают на то, что источником этого вида ископаемых смол были растения из семейства сосновых. Дополнительным аргументом в пользу такого происхождения «колчеданского янтаря» является сходство его диагностических участков ИК-спектра с участками ИК-спектра ископаемой смолы лжелиственницы с о-ва Аксель-Хейберг канадской Арктики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bray P.S., Anderson K.B.* Identification of Carboniferous (320 Million Years Old) Class Ic Amber // Science. 2009. Vol. 326. № 5949. P. 132-134. DOI: 10.1126/science.1177539

2. *Мартиросян О.В., Богдасаров М.А.* Ископаемые смолы: диагностика, классификация и структурные преобразования в условиях термального воздействия // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2014. № 4 (232). С. 10-15.

3. *Seyfullah L.J., Beimforde C., Dal Corso J. et al.* Production and preservation of resins – past and present // Biological Reviews. 2018. Vol. 93. Iss. 3. P. 1684-1714. DOI: 10.1111/brv.12414

4. *Боровкова Н.В., Пилипенко А.Р., Якимаха М.Н.* Из Англии в Россию: флюоритовые вазы второй половины XVIII – начала XIX в. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение. 2022. Т. 12. Вып. 2. С. 380-395. DOI: 10.21638/spbu15.2022.208

5. *Алексеев П.И., Васильев Е.А.* Изучение румэнита и румэнитоподобных смол из коллекций Горного музея с помощью ИК-спектроскопии // Записки Российского минералогического общества. 2025. Ч. 154. № 4. С. 113-124. DOI: 10.7868/S2658435225040084

6. *Бажин В.Ю., Суслов А.П., Горшкова О.А.* Исследование структуры и свойств серебряного рубля 1823 года // Цветные металлы. 2023. № 8. С. 85-92. DOI: 10.17580/tsm.2023.08.14

7. *Сенников А.Г., Сенникова Е.А., Сабуров П.Г.* Первые динозавры в Горном музее Санкт-Петербургского горного университета // Природа. 2024. № 5 (1305). С. 26-45. DOI: 10.7868/S0032874X24050037

8. *Петров Д.А., Рыжкова С.О., Гембицкая И.М.* Редкие минералы благородных металлов в коллекции Горного музея: новые данные // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 493-500. DOI: 10.31897/PMI.2022.42

9. *Мамышев Н.Р.* О месторождении янтаря близ Каменского завода в Екатеринбургском округе // Горный журнал. 1836. Кн. 4. Ч. 2. С. 180-186.

10. *Орлов Н.А., Успенский В.А.* Минералогия каустобиолитов. М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1936. 198 с.

11. *Савкевич С.С.* Новое в минералогическом изучении янтаря и некоторых других ископаемых смол // Самоцветы: Материалы XI съезда ММА, 4-10 сентября 1978 г., Новосибирск, СССР. Л.: Наука, 1980. С. 17-28.

12. *Мартиросян О.В.* Есть ли янтарь на Среднем Урале? // Вестник геонаук. 2020. № 6 (306). С. 27-30. DOI: 10.19110/geov.2020.6.5

13. *Мартиросян О.В.* «Незрелый янтарь» – кранцит – на Среднем Урале // Вестник геонаук. 2022. № 3 (327). С. 25-30. DOI: 10.19110/geov.2022.3.3

14. *Карпинский А.П.* Собрание сочинений. В 4 томах. Т. 4. Геологические исследования на восточном склоне Урала. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1949. 464 с.

15. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:100000 (третье поколение). Лист О-41 – Екатеринбург. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 492 с.

16. *Крылов А.В., Васильев Е.А., Триколиди Ф.А. и др.* Янтарь и гагат Российской Арктики: новые находки и перспективы практического использования // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Вып. 8. С. 125-135. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-125-135

17. *Мартиросян О.В.* Ископаемые смолы Российской Арктики: к истории изучения // Записки Российского минералогического общества. 2020. Ч. 149. № 1. С. 131-138. DOI: 10.31857/S0869605520010098

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

18. *Мартиросян О.В., Богдасаров М.А.* Разновидности ископаемых смол Южного Сахалина и особенности их молекулярной структуры // Записки Российского минералогического общества. 2024. Т. 153. № 3. С. 97-112. DOI: 10.31857/S0869605524030061

19. *Wolfe A.P., Csank A.Z., Reyes A.V. et al.* Pristine Early Eocene Wood Buried Deeply in Kimberlite from Northern Canada // PLOS ONE. 2012. Vol. 7(9). № e45537. DOI: 10.1371/journal.pone.0045537

20. *Wolfe A.P., McKellar R.C., Tappert R. et al.* Bitterfeld amber is not Baltic amber: Three geochemical tests and further constraints on the botanical affinities of succinite // Review of Palaeobotany and Palynology. 2016. Vol. 225. P. 21-32. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2015.11.002

21. *Seyfullah L.J., Szwedo J., Schmidt A.R., Prestianni C.* Chemical and palaeoentomological evidence of a relationship between early Eocene Belgian and Oise (France) ambers // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 13705. DOI: 10.1038/s41598-024-64286-z

22. *Anderson K.B., Winans R.E., Botto R.E.* The nature and fate of natural resins in the geosphere–II. Identification, classification and nomenclature of resinites // Organic Geochemistry. 1992. Vol. 18. Iss. 6. P. 829-841. DOI: 10.1016/0146-6380(92)90051-X

23. *Poulin J., Helwig K.* Inside amber: New insights into the macromolecular structure of Class Ib resinite // Organic Geochemistry. 2015. Vol. 86. P. 94-106. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2015.05.009

24. *Богдасаров М.А.* Мезозойские ископаемые смолы Северной Евразии // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 7. С. 3-11. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-7-3-11

25. *Савкевич С.С., Попкова Т.Н.* Новые данные о «янтаре» правобережья рек Хеты и Хатанги // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 208. № 2. С. 427-429.

26. *Kosmowska-Ceranowicz B.* Infrared spectra atlas of fossil resins, subfossil resing and selected imitations of amber // Infrared Spectra of the World's Resins. Holotype Characteristics. Atlas. Warszawa: Polska Akademia Nauk Muzeum Ziemi w Warszawie, 2015. P. 4-214.

27. *Anderson K.B.* The nature and fate of natural resins in the geosphere–IV. Middle and Upper Cretaceous amber from the Taimyr Peninsula, Siberia–evidence for a new form of polylabdanoid of resinite and revision of the classification of Class I resinites // Organic Geochemistry. 1994. Vol. 21. Iss. 2. P. 209-212. DOI: 10.1016/0146-6380(94)90155-4

28. *Wimmer R., Galle H., Wagner-Wysiecka E.* Retinit im mittleren Geiseltal und in Nordwestsachsen // Mauritiana (Altenburg). 2019. Band 37. S. 32-41 (in German).

29. *Шакс И.А., Файзуллина Е.М.* Инфракрасные спектры ископаемого органического вещества. Л.: Недра, 1974. 131 с.

30. *Wolfe A.P., Tappert R., Muehlenbachs K. et al.* A new proposal concerning the botanical origin of Baltic amber // Proceedings of Royal Society B. Biological Sciences. 2009. Vol. 276. Iss. 1672. P. 3403-3412. DOI: 10.1098/rspb.2009.0806

31. *Vavra N.* Mineral names used for fossil resins, subfossil resins and similar materials // Infrared Spectra of the World's Resins. Holotype Characteristics. Atlas. Warszawa: Polska Akademia Nauk Muzeum Ziemi w Warszawie, 2015. P. 215-280.

32. *Мартиросян О.В., Богдасаров М.А.* Разновидности меловых ископаемых смол Закавказья и особенности их молекулярной структуры // Записки Российского минералогического общества. 2022. Ч. 151. № 1. С. 92-104. DOI: 10.31857/S0869605521060058

33. *Bogdasarov M.A., Rudko G.I.* The Geological-Evolutional Concept of Resin Genesis // Journal of Geological Resource and Engineering. 2018. Vol. 6. Iss. 3. P. 112-123. DOI: 10.17265/2328-2193/2018.03.003

34. *Beck C.W.* Spectroscopic investigations of Amber // Applied Spectroscopy Reviews. 1986. Vol. 22. Iss. 1. P. 57-110. DOI: 10.1080/05704928608060438

35. *Tappert R., McKellar R.C., Wolfe A.P. et al.* Stable carbon isotopes of C3 plant resins and ambers record changes in atmospheric oxygen since the Triassic // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2013. Vol. 121. P. 240-262. DOI: 10.1016/j.gca.2013.07.011

36. *Anderson K.B., LePage B.A.* Analysis of Fossil Resins from Axel Heiberg Island, Canadian Arctic // Amber, Resinite, and Fossil Resins. American Chemical Society, 1995. P. 170-192. DOI: 10.1021/bk-1995-0617.ch009

37. *Mays C., Coward A.J., O'Dell L.A., Tappert R.* The botanical provenance and taphonomy of Late Cretaceous Chatham amber, Chatham Islands, New Zealand // Review of Palaeobotany and Palynology. 2019. Vol. 260. P. 16-26. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2018.08.004

38. *Tappert R., Wolfe A.P., McKellar R.C. et al.* Characterizing Modern and Fossil Gymnosperm Exudates Using Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy // International Journal of Plant Sciences. 2011. Vol. 172. № 1. P. 120-138. DOI: 10.1086/657277

39. *Poulin J., Helwig K.* Class Id resinite from Canada: A new sub-class containing succinic acid // Organic Geochemistry. 2012. Vol. 44. P. 37-44. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2011.11.012

40. *Poulin J., Helwig K.* Inside Amber: The Structural Role of Succinic Acid in Class Ia and Class Id Resinite // Analytical Chemistry. 2014. Vol. 86. Iss. 15. P. 7428-7435. DOI: 10.1021/ac501073k

***Авторы*: Павел Игоревич Алексеев,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *Alexeev_PI@spmi.pers.ru, https://orcid.org/0000-0002-3741-355X*, **Евгений Алексеевич Васильев,** *д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-2216-0956*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0