

Эндогенное органическое вещество в эклогитах Беломорской провинции

Обнаружение, диагностика, верификация генезиса

А. Н. Конилов^{1,2,3}, И. А. Новиков⁴, Н. В. Пронина, к. г.-м. н.⁵,
М. М. Астафьева¹, к. г.-м. н.⁶, К. В. Ван, к. т. н.²

УДК 551.242.31(7)

Впервые инструментальными методами трехмерной электронной микроскопии, флуоресцентной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния исследовано эндогенное органическое вещество в эклогитах Салмы (Беломорская эклогитовая провинция на Балтийском щите). Установлены два типа вещества, одно из которых имеет явные признаки биогенного происхождения (бактерии, бактериальная целлюлоза). Экспонирование образца в герметичном контейнере с химическим маркером (спиртовой раствор пентабората цезия $Cs[B_5O_7(OH)_2] \cdot 0.5H_2O$) в условиях переменного температурного режима (600 циклов нагрева / охлаждения) показало, что раствор цезия способен проникать вглубь образца через естественные коллекторы, сообщаясь с поверхностью. Результаты маркирования скрытых микроколлекторов позволяют дифференцировать наложенные биогенные формы органического вещества, не связанные с петрологической эволюцией эклогитов, от «первичных» эндогенных включений. В микровключениях органического вещества, в которых отсутствуют морфологические признаки бактериальной природы, обогащение цезием ниже предела обнаружения энергодисперсионного детектора в режиме пониженного вакуума сканирующего электронного микроскопа. Предположительно такие формы сингенетичны с эклогитами.

Ключевые слова: эклогиты Салмы, Беломорская провинция, гора Куропачья, 3D-электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, органическое вещество, бактерии, бактериальная целлюлоза

Введение

В последние 20 лет на территории северо-восточной Карелии и центральной части Мурманской области были обнаружены тела коровых эклогитов. Их изучение в ряде ключевых проявлений позволили предположить существование Беломорской эклогитовой

провинции (БЭП) архейского возраста. В строении БЭП участвуют две эклогитовые ассоциации: Салма (Мурманская область), сформированная в результате субдукции мафитовых пород океанской литосферы, и Гридино (берег Белого моря, Карелия), образованная эклогитизированными мафитовыми дайками [1]. Петрологические признаки [1, 2] указывают на то, что архейская субдукция достигала значительных глубин (>60 км) и соответствовала условиям УНР-метаморфизма (Ultrahigh-pressure metamorphism).

Необычайные условия формирования Беломорской эклогитовой провинции, не имеющие аналогов в мире (подобие валовых химических составов ассоциации эклогитов Салмы толеитам медленно-спрединговых

¹ Геологический институт РАН.

² Институт экспериментальной минералогии РАН.

³ chalma@bk.ru.

⁴ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

⁵ Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова.

⁶ Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка РАН.

срединно-океанических хребтов, признаки проградной ветви эволюции, возраст пород и др.), имеют большое значение для понимания архейской эволюции Земли и геодинамики и поэтому привлекают большое внимание исследователей различных организаций, в том числе зарубежных. Результаты оригинальных независимых исследований [3, 4 и др.] и сопоставление эклогитов Салмы с эклогитами других регионов [5, 6] подтверждают наши выводы об их природе и условиях формирования, но расходятся относительно времени субдукции – т. е. времени УНР-метаморфизма.

Объект и методы исследования

За время полевых работ 2015–2021 годов были изучены два тела эклогитов в районе горы Куропачьей вблизи федеральной автодороги Санкт-Петербург – Мурманск с координатами N 67°33'54", E 32°29'22" у километровой разметки 1210 км. Изометричное 200 м в поперечнике (первое тело) и протяженное 100×400 м (второе) тела эклогитов располагаются среди гнейсов беломорской серии («серых гнейсов» тронджемит-тоналит-гранодиоритового состава) архейского возраста. В эндоконтакте эклогиты полностью преобразованы в гранатовые и плагиоклазовые амфиболиты.

Изученные в районе горы Куропачьей эклогиты уникальны, а по степени сохранности пиковой минеральной ассоциации являются наилучшими в сравнении со всеми другими изученными эклогитами Салмы. Во всех шлифах из первого тела на вершине горы (800 м к востоку от федеральной автодороги) обнаруживается индикаторный клинопироксен – омфацил с мольной долей жадеитового минала 29,5–31 мол. %. Типичные для эклогитов минералы гранат и омфацил парагенны – как в гранате присутствуют включения омфацила, так и наоборот, многочисленны и прямые контакты этих минералов. Давление оценивается по составу омфацила и составляет не менее 15 кбар. В псевдоморфозах по омфацилу – клинопироксен-плагиоклазовых симплектиках, отмечается ортопироксен. Это явно свидетельствует об изотермической декомпрессии и эксгумации эклогитов через P-T условия гранулитовой фации [1, 2].

Все образцы эклогитов для петрологических исследований, геохимические и геохронологические пробы были отобраны с помощью бензореза с алмазным диском. Опробование проводили в наименее измененных участках тел, которые, как правило, представляют собой «бараньи лбы».

В предыдущем исследовании эклогитов горы Куропачьей в них было обнаружено углеродное

вещество – «битум» [7]. Для его диагностики применялись электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния и флуоресцентная микроскопия. Эти же методы, наряду с новыми технологиями и оборудованием, были применены в настоящей работе для обнаружения и верификации углеродного вещества. Обнаружено, что в эклогитах второго тела его содержание чрезвычайно и необычайно высокое. Кроме этого углеродное вещество имеет морфологические признаки биогенного происхождения. В связи с этим в работе вместо термина «углеродное вещество» применяется термин «эндогенное органическое вещество».

В настоящей работе для исследований эндогенного органического вещества отобран образец из второго протяженного тела эклогитов. Отбор проводился непосредственно в точке предыдущего отбора. Результаты минералого-петрологических, геохимических и геохронологических исследований образца предшественника опубликованы ранее [8].

Электронная микроскопия, энергодисперсионный микроанализ флуоресцентная микроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния минералов

1. Изображения в отраженных (BSE) и вторичных (SE) электронах получены на сканирующих электронных микроскопах (1) Tescan VEGA II xmu и (2) CamScan MV 2300 (ИЭМ РАН, Черноголовка). Составы породообразующих минералов определяли в прозрачнополированных шлифах с помощью энергодисперсионных детекторов (EDS) INCA x-sight (1) и INCA Penta FET x3 (2) под управлением программ обработки спектров INCA 700 для обоих детекторов.
2. BSE-имиджи на ненапыленных сколах получены на настольном сканирующем электронном микроскопе Phenom XL (Thermo Scientific) в Геологическом институте РАН (Колесников А. В.). Прибор оборудован четырехсегментным детектором отраженных электронов, что позволяет получать трехмерные изображения; цветной цифровой навигационной камерой с увеличением $3\times$ – $16\times$, позволяющей синхронно получать микрофотографии образца, существенно облегчающих поиск цели и их анализ на других приборах – люминесцентном и рамановском микроскопах.
3. Специальные исследования органического вещества проводили в Палеонтологическом институте РАН на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA II zmu с системой рентгеновского

- энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450. Напыление золотом. Методика подробно описана в [9].
4. Специальные исследования органического вещества также проводили на сканирующем электронном микроскопе Zeiss EVO LS10 с ЭДС Oxford X-Max50 в режиме пониженного вакуума ($EP=70$ Па) без напыления. Исследовали исключительно сколы пластин из внутренней части штуфа кубической формы, размером $\sim 10 \times 10 \times 10$ сантиметров, выпиленного из эклогита с глубины 10 см от дневной поверхности. Сразу после извлечения образец помещали в контейнер и заполняли 0,9 молярным раствором пентабората цезия. Образец транспортировали в лабораторию и хранили при температуре 5°C , а затем проводили с ним 600 циклов нагревания до 80°C с последующим естественным охлаждением до 25°C на автоматизированном термостолу.
 5. Люминесценцию органического вещества регистрировали с помощью флуоресцентного микроспектрофотометра CRAIC (США) на базе микроскопа Leica DM 2500P (ФРГ). Исследования проводили в отраженном свете и в отраженном ультрафиолетовом свете (источник – ртутная лампа, $\lambda=365$ нм). Для возбуждения люминесценции использовали зеленый и голубой фильтры. Характеристики фильтров: голубой – возбуждение в интервале 340–380 нм, дихроизм 400 нм; зеленый – 515–560 нм, дихроизм 580 нм. Объективы: увеличение $40\times$ – воздух, увеличение $50\times$ – иммерсионное масло, размер метки 5×5 мкм [10].

6. Спектры комбинационного рассеяния снимали на конфокальном рамановском микроскопе (микроспектрометре) XPlORA производства компании Horiba Scientific (Япония) в микрорамаповской лаборатории геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (Щербаков В. Д.). Пространственное разрешение микроскопа 0,5 мкм. В настоящем исследовании органического вещества из эклогитов использованы лазеры, работающие в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне на длинах волн 532 и 785 нм, и объектив Olympus $50\times$ LWD.

Результаты исследования

На предварительном этапе применяли стандартный метод исследования минерального состава эклогита на сканирующих электронных микроскопах с энергодисперсионными детекторами в прозрачно-полированных шлифах на эпоксидном клее. На рис. 1а представлен BSE-имидж с углеродными выделениями на сколе кварца. После снятия углеродного напыления этот участок прозрачно-полированного шлифа изучали на флуоресцентном микроскопе (рис. 1б). Из петрологии осадочных пород давно известно явление индуцированной люминесценции ряда углеродных/органических веществ при облучении ультрафиолетом. Эффект активно используется при поисках горючих полезных ископаемых [12, 13]. С зеленым фильтром люминесценция включений органического вещества наблюдается в красном цвете (рис. 1б) и голубое свечение с голубым

фильтром. В обоих случаях свечение яркое. Ранее при изучении углеродного включения в кварце в эклогите горы Куропачьей (первое тело) наблюдалась аналогичная люминесценция включения на этом же спектрометре – источник света ртутная лампа, зеленый и голубой фильтры [7]. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света вещество было диагностировано как битум.

В стандартном электронно-микроскопическом методе проявляется критический недостаток при исследовании углеродсодержащих органических веществ, так как возможно загрязнение внешней органикой при изготовлении шлифа, при напылении углеродом, которое невозможно полностью

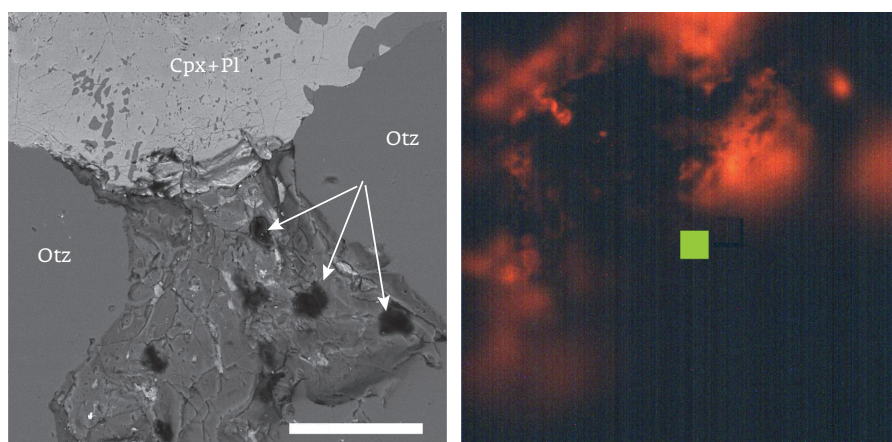


Рис. 1. а – BSE имидж углеродного вещества (битума, стрелки) в эклогите. (SEM Tescan VEGA II, ИЭМ РАН, прозрачно-полированный шлиф, углеродное напыление), длина масштабной линейки 100 мкм, аббревиатура минералов по [11]; б – люминесценция углеродного вещества в отраженном УФ-свете с зеленым фильтром. Размер центральной метки 5×5 мкм

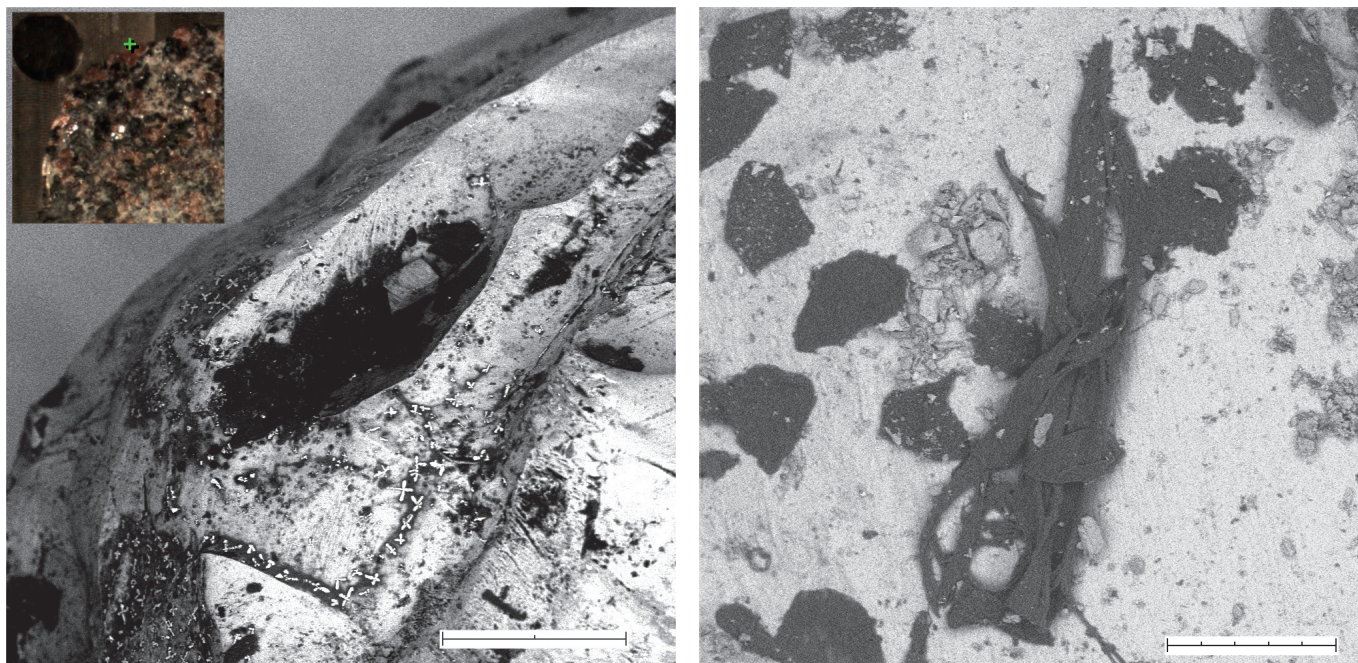


Рис. 2. Скол пластинки эклогита под сканирующем электронным микроскопом (Phenom XL, ГИН РАН, без напыления, низкий вакуум): а – 3D имидж в отраженных электронах. Черное – органическое вещество, светлые скрещенные кристаллы – двойники сильвина (KCl). Длина масштабной линейки 100 мкм. На врезке – синхронная оптическая микрофотография этого участка, зеленый крест отмечает центр BSE имиджа; б – 3D имидж в отраженных электронах. Длина масштабной линейки 50 мкм

удалить и оно потом проявится, например, при КР-спектроскопии. Наилучшим выходом является поиск органического вещества в ненапыленных сколах на сканирующих электронных микроскопах при низком вакууме.

На рис. 2а представлено трехмерное изображение в отраженных электронах косоугольного скола пластинки эклогита толщиной около 5 мм. SEM Phenom XL дает достаточно четкое изображение на разных уровнях скола. На врезке представлена микрофотография в отраженном свете этого участка. Такие синхронные изображения чрезвычайно полезны при поиске цели, намеченной BSE-имиджем, на микроспектрометре комбинационного рассеяния. Выделения, обладающие пониженной яркостью, представляют собой органическое вещество, часто покрытое крестообразными частицами. На предварительной стадии мы исследовали включения органического вещества также в кристаллах, отделившихся от кусочка эклогита в процессе ультразвуковой вибрации в дистиллированной воде. Кристаллы помещали на токопроводящий графитовый скотч и напыляли углеродом. В них были найдены углеродные включения, в которых присутствовали крестообразные частицы, морфологически идентичные представленным на рис. 2а. Микроразондовыми

ЭДС-анализами установлено, что это минерал сильвин (KCl).

На рис. 2б представлен BSE-имидж скола (рис. 2а) с большим увеличением. Из рисунка видно два морфологических типа органического вещества, один из которых имеет биогенную форму «витые волокна». Такой участок не единственный. Эти формы изучены методом спектроскопии комбинационного рассеяния.

Зарегистрированы два типа спектров КР. Спектры первого типа представлены на рис. 3а. В двух точках были получены спектры, на которых отсутствовали какие-либо линии, за исключением одной с максимумом 485 см^{-1} при возбуждении лазером 532 нм, на спектрах с лазером 785 нм эта линия отсутствует. Для сравнения на рисунке представлен КР-спектр кварца из базы данных RRUFF. В этой базе данных волновые числа наиболее интенсивной линии этой части спектра варьируют в диапазоне $465\text{--}473\text{ см}^{-1}$. Расхождение значительное, причина этого не выяснена. Отсутствие линий на КР-спектрах, возможно, объясняется тем, что в обеих точках анализа был сильвин. Из-за кристаллографической симметрии этого минерала линии на спектрах комбинационного рассеяния запрещены (примечание к спектру сильвина

в базе данных RRUFF, спектр сильвина для сравнения представлен на рис. 2а).

Хорошие спектры второго типа с пиками колебаний удалось получить у «витых» выделений на сколе пластины (рис. 3б), волновые числа максимумов вынесены в таблицу 1. В таблице приводится интерпретация химических связей для органических соединений по [14], распределенных по трем диапазонам волновых чисел в соответствии с [15]. В изученных КР-спектрах второго типа в диапазоне волновых чисел 100–3 900 см⁻¹. выявляются колебания (ν) и растяжения (δ) химических связей С-О-С, С-Н, О-Н и групп атомов СН₂ и СН₃. Очевидно, КР-спектры (рис. 3б) характеризуют органическое вещество, которое мы наблюдаем, например, на рис. 2б. В таблице 1 приведено сравнение полученных нами данных со спектрами целлюлозы по данным [16, таблица 1]. Графическое представление КР-спектров целлюлозы приведено в [17], спектры растительной целлюлозы не отличаются от КР-спектров бактериальной целлюлозы [18]. Как видно из таблицы наши спектры и спектры целлюлозы совпадают во всем диапазоне волновых чисел от 300 до 3 900 см⁻¹ с отличиями в несколько обратных сантиметров. Отношение интенсивности линий 380 и 1 096 см⁻¹ служит для расчетов степени кристалличности целлюлозы. Как видно из рис. 3б эти линии проявлены на всех полученных нами спектрах и обладают высокой интенсивностью.

В Институте Палеонтологии РАН независимо были проведены целенаправленные поиски органического вещества в эклогитах второго тела района горы Куропачьей. Электронные изображения представлены

на рис. 4. На рис. 4а удлиненные нитевидные выделения скорее всего также являются фоссилизированной бактериальной целлюлозой. Поскольку образец напылен золотом, то не было возможности оценить класс углеродного вещества. Поэтому только морфологические признаки стали основой диагностики. На BSE-имидже рис. 4б, возможно, представлена псевдоморфоза по бактериям. Предположение основано на опыте изучения нанобактерий в кейвских парасланцах Мурманской области [9].

На поверхности сколов пластин из внутренней части штуфа кубической формы (рис. 5), предварительно экспонированного в растворе пентабората цезия, выявлены многочисленные микроскопические от субмикронных до первых десятков микрон включения на сколах каждого крупного изометричного зерна, обладавшие относительно окружающей силикатной матрицы резко пониженной яркостью в обратно-рассеянных электронах. Для каждого включения оценен химический состав. Учитывая рельефную поверхность естественного скола, режим пониженного вакуума, нормирование анализа к 100% и отсутствие эталонирования, метрологический класс анализа можно считать «качественным». На диаграмму (рис. 6) вынесены точки, оценочное измерение углерода в которых превышало возбуждение углерода остаточной атмосферы в условиях пониженного вакуума при зондировании окружающей силикатной матрицы.

Учитывая низкую яркость в обратно-рассеянных электронах допустимо интерпретировать эти объекты как включения органического вещества различного

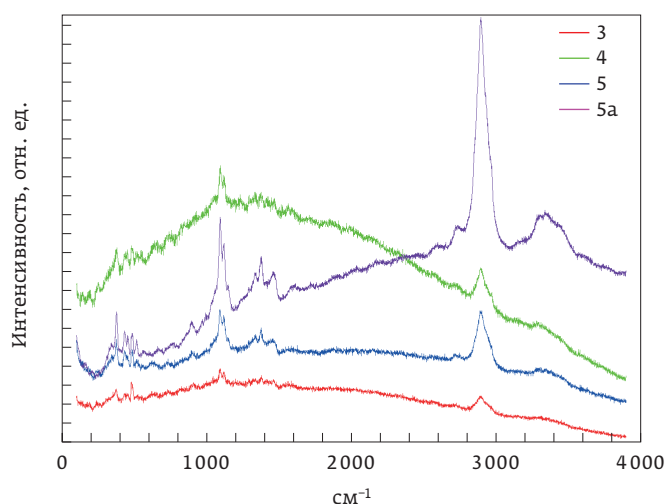
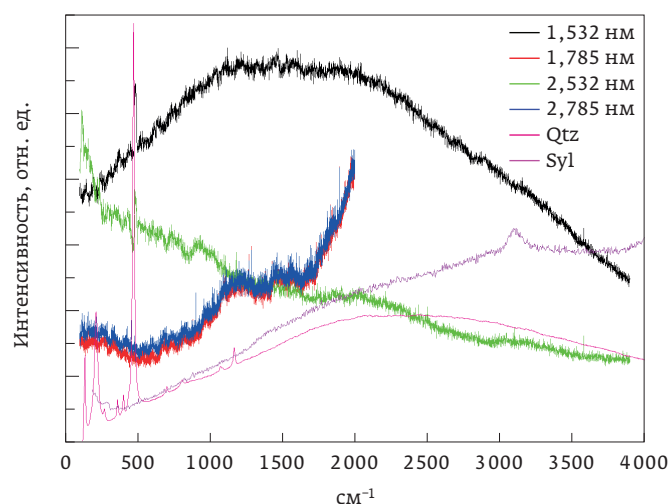


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния органического вещества в эклогите: а – спектры I типа в сравнении со спектрами кварца и сильвина из базы данных RRUFF, аббревиатура минералов по [11]; б – спектры II типа. Смотрите текст для пояснения. Все спектры получены на сколе образца, представленном на рис. 2а

генезиса. Можно отметить две популяции объектов. Для первой популяции цезий находится на пороге и ниже порога чувствительности прибора. Высокая дискретность вычислений при деконволюции спектра при около нулевых значениях содержаний, а также присутствие цезия в окружающих порах и низкая локальность анализа, позволяют рассматривать эту популяцию объектов в качестве включений органического вещества с условно нулевым содержанием цезия, несмотря на некоторые отличные от нуля результаты деконволюции спектра. Для второй популяции характерно присутствие измеряемых количеств цезия (рис. 6). Мы предполагаем, что данная популяция включений органического вещества связана с существующими микроколлекторами, позволившими цезию проникнуть от поверхности вглубь образца при циклическом нагревании/охлаждении.

Такое разделение органического вещества по отношению к химическому маркеру (цезию) было целью нашего исследования. Привлекая результаты,

Таблица 1. Положение пиков спектров комбинационного рассеяния органического вещества II типа в эклогите и интерпретация химических связей

Волновое число, см ⁻¹	Встречаемость	Интерпретация	Agarwal, 2014
340	1/4		348
370-380	4/4		381
430	2/4		437
455	2/4		459
485	4/4		492
515	1/4		520
1. Область характеристических линий (fingerprint region), 600–1 800 см ⁻¹			
890-900	2/4	ν(C-O-C)	898
1 090	4/4	ν(C-O-C) asym	1 096
1 120	4/4	ν(C-O-C) asym	1 121
1 340	2/4		1 339
1 380	2/4	δ(CH ₃)	1 380
1 460	3/4	δ(CH ₂), δ(CH ₃) asym	1 456
2. Область без характеристических линий (silent region), 1 800–2 800 см ⁻¹			
Нет линий			
3. Область с высокими волновыми числами (high wavenumber), 2 800–3 800 см ⁻¹			
2 900	4/4	ν(C-H)	2 895
2 960–2 970	2/4 (?)		2 966
3 220–3 500	1/4	ν(O-H)	3 264

Примечания: Волновое число – положение максимума линии спектра комбинационного рассеяния; Встречаемость – число спектров из четырех (рисунок 3б), в которых линия присутствует; Интерпретация химических связей соответствует схеме [14]. Agarwal, 2014 – данные для целлюлозы (волновые числа, см⁻¹) [16]. Три области спектров колебаний (ν) и растяжений (δ) химических связей органических веществ выделены в соответствии с [15].

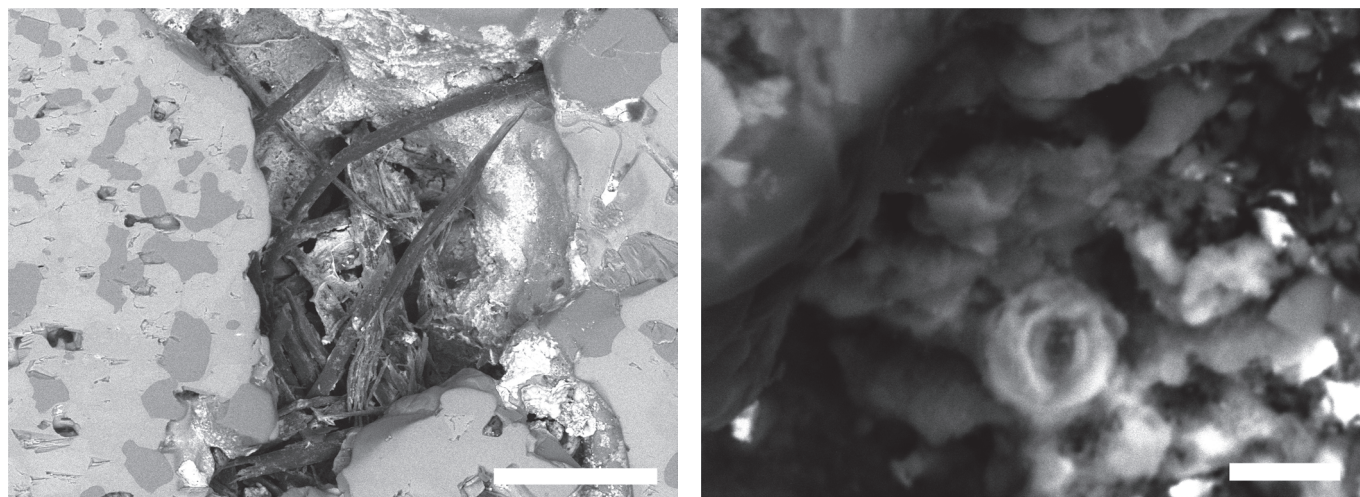


Рис. 4. BSE имиджи органического вещества в эклогите (Палеонтологический Институт РАН, SEM Tescan VEGA II, напыление золотом): а – игольчатые формы органического вещества, длина масштабной линейки 200 мкм; б – слизистые капсулы бактерий (?), длина масштабной линейки 5 мкм



Рис. 5. Образец эклогита в полипропиленовом контейнере в растворе пентабората цезия. Размеры ~10×10×10 см

полученные другими методами – спектроскопия комбинационного рассеяния, флуоресцентная микроскопия, можно оценить генезис обеих популяций. Первая не связана с микроколлекторами, органическое вещество находилось в виде включений в породообразующих минералах эклогита и, вероятно, представляло собой битум и было эндогенным. Вторая популяция имела связь с поверхностью, по микропорам происходили обмен веществ и биогенез – рост бактерий и продуктов их жизнедеятельности – бактериальной целлюлозы/экзополисахаридов. Последние не устойчивы при повышенных температурах, что подтверждает наличие каналов связи с дневной поверхностью.

Обсуждение результатов и выводы

В результате проведенного исследования подтверждено присутствие в эклогитах эндогенного органического вещества. С привлечением новых методов и приборов для исследований, позволяющих исключить загрязнение образцов органикой, установлено, что содержание вещества довольно значительное. Об этом свидетельствует тот факт, что разные авторы данной работы независимо обнаружили органические вещества в образцах эклогитов горы Куропачей.

Эндогенное органическое вещество могло быть исходным материалом, необходимым для

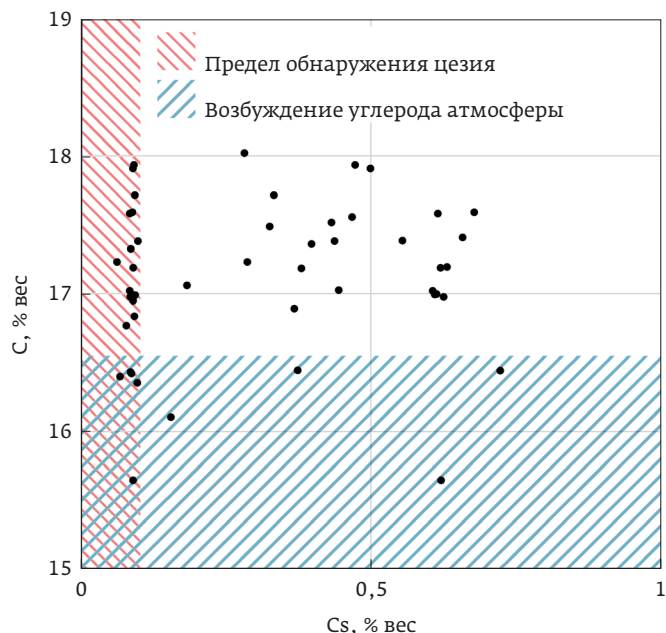
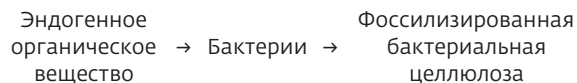


Рис. 6. Условные весовые отношения углерода и цезия в точках с пониженной яркостью на изображениях в обратно-рассеянных электронах

кристаллизации муассанита и алмаза [7]. Принимая во внимание многочисленность включений органического вещества и их размеры, содержание алмаза/муассанита может быть очень высоким. Модель субдукционного канала предполагает эксгумацию эклогитовых тел с разных глубин [1], не исключено, что могут быть обнаружены тела, испытавшие при ультравысокобарном метаморфизме давление, соответствующее полю стабильности алмаза.

Обнаружено органическое вещество, имеющее морфологические признаки биогенного происхождения. Химическим признаком могут быть крестообразные двойники сильвина в органическом веществе (рис. 2а). Экспериментально установлено, что бактерии эффективно выщелачивают калий из породообразующих минералов – из слюд и калиевых полевых шпатов [19].

По имеющимся сведениям фоссилизированная бактериальная целлюлоза в горных породах высоких ступеней метаморфизма обнаружена впервые. Эволюцию органического вещества в эклогите Беломорской провинции можно представить диаграммой:



Применение четырехсегментных детекторов обратно-рассеянных электронов открывает новые возможности в исследовании образцов горных пород с необработанной поверхностью.

Литература / References

- Konilov A.N., Shchipansky A.A., Mints M.V., Dokukina K.A., Kaulina T.V., Bayanova T.B., Natapov L.M., Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. The Salma eclogites of the Belomorian Province, Russia: HP/UHP metamorphism through the subduction of Mesoarchean oceanic crust // *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: 25 years after the discovery of Coesite and Diamond*. Eds. Dobrzhinetskaya L., Faryad S.W., Wallis S., Cuthbert S. Elsevier. 2011. Chapter 19. P. 635–682. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385144-4.00018-7>.
- Dokukina K.A., Konilov A.N. 2011. Metamorphic evolution of the Gridino mafic dyke swarm (Belomorian eclogite province, Russia) // L. Dobrzhinetskaya, S. Cuthbert, W. Faryad, S. Wallis (Eds), *Ultrahigh-pressure metamorphism. 25 years after the discovery of coesite and diamond*. Amsterdam, Elsevier, p. 579–621. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385144-4.00017-5>.
- Imayama T., Oh Ch.-W., Baltybaev S.K., Park Ch.-S., Yi K., Jung H. Paleoproterozoic high-pressure metamorphic history of the Salma eclogite on the Kola peninsula, Russia. *Lithosphere*. 2017;9(6):855–873. <https://doi.org/10.1130/L657.1>.
- Li X., Zhang L., Wei C., Slabunov A.I., Bader T. Quartz and orthopyroxene exsolution lamellae in clinopyroxene and the metamorphic P-T path of Belomorian eclogites. *Journal of Metamorphic Geology*. 2018;36:1–22. <http://dx.doi.org/10.1111/jmg.12280>.
- Helmstaedt H.H. Tectonic relationships between E-type Cratonic and Ultra-High-Pressure (UHP) diamond: implications for Craton formation and stabilization // D. G. Pearson et al. (eds.), *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference, Special Issue of the Journal of the Geological Society of India*. 2013;1:45–58. http://dx.doi.org/10.1007/978-81-322-1170-9_4.
- Shchukina E.V., Agashev A.M., Zedgenizov D.A. Origin of Zircon-bearing Mantle eclogites entrained in the V. Grib Kimberlite (Arkhangelsk Region, NW Russia): Evidence from mineral geochemistry and the U-Pb and Lu-Hf Isotope Compositions of Zircon. *Mineralogy and Petrology*. 2018;112 (Suppl. 1): S85–S100. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-018-0581-z>.
- Кониллов А.Н., Пожиленко В.И., Ван К.В., Голованова Т.И., Пронина Н.В., Шкляр Н.Е., Понкратов К.В. Исследование эклогитов Беломорской провинции современными аналитическими методами. *АНАЛИТИКА*. 2018;8(4):364–375. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.41.4.364.375
Konilov A.N., Pozhilenko V.I., Van K.V., Golovanova T.I., Pronina N.V., Shklyar N.E., Ponkratov K.V. Study of eclogites from the Belomorian province by using of modern analytical methods. *Analytics*. 2018;8(4):364–375.
- Кониллов А.Н., Шешуков В.С., Пожиленко В.И., Ван К.В., Бондаренко Г.В., Голованова Т.И., Ермолаев Б.В., Дубенский А.С., Понкратов К.В., Шкляр Н.Е. Цирконология и возраст Fe-Ti эклогитов Беломорской провинции. *АНАЛИТИКА*. 2020;10(5):386–402. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2020.10.5.386.402>
Konilov A.N., Sheshukov V.S., Pozhilenko V.I., Van K.V., Bondarenko G.V., Golovanova T.I., Ermolaev B.V., Dubensky A.S., Ponkratov K.V., Shklyar N.E. Zirconology and Age of the Fe-Ti Eclogites from Belomorian Province. *Analytics*. 2020;10(5):386–402.
- Астафьева М.М., Балаганский В.В. Кейвские парасланцы (архей-ранний протерозой), нанобактерии и жизнь. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2018;26(3):117–126. <http://doi.org/10.7868/S0869592X18030080>.
Astafieva M.M., Balaganskii V.V. Keivy Paraschists (Archean–Early Proterozoic): Nanobacteria and Life. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2018;26(3):354–363.
- Пронина Н.В., Лужбина М.С., Макаров Д.В. Возвращение к оценке катагенеза осадочной толщи Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна углепетрографическими методами. *Георесурсы*. 2017. Спецвыпуск. Ч. 1. С. 80–87. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.19.9>.
Pronina N.V., Luzhbina M.S., Makarov D.V. Return to the catagenesis assessment of the sedimentary stratum in the Timan-Pechora oil and gas basin by means of coal petrographical methods. *Georesursy [Georesources]*. 2017. Special issue. Part 1. P. 80–87.
- Whitney D., Evans B. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*. 2010;95:185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.
- Калмыков А.Г., Карпов Ю.А., Топчий М.С., Фомина М.М., Мануилова Е.А., Шереметьева Е.В., Третьякова И.О., Пронина Н.В., Шишков В.А., Балушкина Н.С., Фадеева Н.П., Ступакова А.В., Калмыков Г.А. Влияние катагенетической зрелости на формирование коллекторов с органической пористостью в баженовской свите и особенности их распространения. *Георесурсы*. 2019;21(2):159–171. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.159-171>.
Kalmykov A.G., Karpov Yu.A., Topchiy M.S., Fomina M.M., Manuilova E.A., Sheremeteva E.V., Tret'yakova I.O., Pronina N.V., Shishkov V.A., Balushkina N.S., Fadeeva N.P., Stupakova A.V., Kalmykov G.A. The effect of catagenetic maturity on the formation of reservoirs with organic porosity in the Bazhenov formation and peculiarities of their extension. *Georesursy = Georesources*. 2019;21(2):159–171.
- Khatibi S., Ostadhassan M., Tuschel D., Gentzis T., Carvajal-Ortiz H. Evaluating Molecular Evolution of Kerogen by Raman Spectroscopy: Correlation with Optical Microscopy and Rock-Eval Pyrolysis. *Energies*. 2018;11(6):1406. <https://doi.org/10.3390/en11061406>.
- Raman Data and Analysis – Raman Bands // HORIBA Jobin Yvon. https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Technology/M Measurement_Techniques/Molecular_Spectroscopy/Raman_Spectroscopy/Raman_Academy/Raman_Tutorial/Raman_bands.pdf
- Raman Spectroscopy of Organic and Molecules // PhysicsOpenLab. 2022. <https://physicsopenlab.org/2022/01/11/raman-spectroscopy-of-organic-and-inorganic-molecules/>
- Agarwal U.P. 1064nm FT-Raman spectroscopy for investigations of plant cell walls and other biomass materials. *Frontiers in Plant Science*. V.5. 490. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00490>
- Agarwal U.P. Analysis of Cellulose and Lignocellulose Materials by Raman Spectroscopy: A Review of the Current Status. *Molecules*. 2019;24:1659. <https://doi.org/10.3390/molecules24091659>
- Szymańska-Chargot M., Cybulska J., Zdunek A. Sensing the Structural Differences in Cellulose from Apple and Bacterial Cell Wall Materials by Raman and FT-IR Spectroscopy. *Sensors*. 2011;11:5543–5560. <https://doi.org/10.3390/s110605543>.
- Anjanadevi I.P., John N.S., John K.S., Jeeva M.L., Misra R.S. Rock inhabiting potassium solubilizing bacteria from Kerala, India: characterization and possibility in chemical K fertilizer substitution. *Journal of Basic Microbiology*. 2016;56:67–77. <http://doi.org/10.1002/jobm.201500139>

Благодарности

Выражаем благодарность д.г.-м.н. Виктору Балаганскому (Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты) за отбор образца с помощью бензореза, к.г.-м.н. Антону Колесникову (Геологический институт РАН, Москва) за исследование на сканирующем электронном микроскопе Phenom XL, к.г.-м.н. Василию Щербакову (Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова) за исследование методом комбинационного рассеяния света.

Статья подготовлена в соответствии с планами исследований по темам Государственных заданий ГИН РАН.

Статья получена 15.09.2022

Принята к публикации 20.10.2022