УДК 552.313.8 + 550.4 + 551.3.051:553:9

М. М. ФИЛИППОВ, Ю. Е. ДЕЙНЕС (ИГ КарНЦ РАН), К. И. ЛОХОВ (СПбГУ), А. В. ПЕРВУНИНА (ИГ КарНЦ РАН), О. В. ЛОХОВА (ИИМК РАН (СПб)

Новый генетический тип шунгитоносных пород палеопротерозоя Онежской структуры

Приведены данные о шунгитоносных породах участка Тетюгино, имеющих основные признаки флюидогенного генезиса: форму проявления, текстуру, минеральный, химический и изотопный состав углерода. К таким породам отнесены брекчии в надкупольных разломах (диапировый меланж) и локальные субпластовые тела – инъекции метасапропелитов. Показано, что наиболее вероятный источник флюидолитов – Мельничный купол, а основная движущая сила перемещения вещества – аномально высокое пластовое давление, развивающееся при катагенеза органического вещества и генерации углеводородов. Краткие сведения по геологии участка и геофизические материалы служат доказательством того, что Мельничный купол – это складка нагнетания, сформированная по шестому шунгитоносному горизонту, аналогичная детально исследованному Максовскому месторождению.

Ключевые слова: *органоглины, диапиры, инъекции, аномально высокое пластовое давление.*

M. M. FILIPPOV, YU. E. DEJNES (IG KarRC RAS), K. I. LOKHOV (SPbU), A. V. PERVUNINA (IG KarRC RAS), O. V. LOKHOVA (Institute of History of Material Culture RAS)

A new genetic type of shungite-bearing rocks of the Palaeoproterozoic Onega structure

Data on shungite-bearing rocks from Tetyugino locality, which display the main signs of fluid genesis such as mode of occurrence, texture, mineral and chemical composition and the isotope composition of carbon, are reported. Examples of such rocks are breccia in superdomal faults (diapir melange) and local subsheeted bodies (injections of metasapropelites). It is shown that Melnichny Dome is the most probable source of fluidolites, and abnormally high formation pressure, which develops during the katagenesis of organic matter and the generation of hydrocarbons, is a major driving force. Brief geological and geophysical information on the locality proves that Melnichny Dome is an injection fold which was formed after the sixth shungite-bearing horizon and is similar to the Maksovo deposit which has been studied in detail.

Keywords: *organoclay, diapirs, injections, abnormally high formation pressure.*

Форму проявления, состав и геохимические характеристики пород палеопротерозоя Онежской структуры с шунгитовым веществом [1], особенно высокоуглеродистых, не удается объяснить известными закономерностями осадочного литогенеза. Так, куполообразное Максовское месторождение высокоуглеродистых пород приурочено к своду антиклинали третьего порядка Толвуйской синклинальной структуры, на его периферии выявлена краевая синклиналь; признаки слоистости максовитов [2] в центре купола отсутствуют, текстура пород флюидальная, наблюдаются интрузии (протрузии) вещества с более высоким содержанием углерода; в центре купола локальные области сложены шунгитами, а периферия шунгитоносными алевролитами. Структурные особенности месторождения связаны с процессами формирования диапирового тела, а внутренняя литологическая зональность с развитием полидиапировых складок. По классификации Г. А. Беленицкой [2], породы Максовского месторождения следует отнести к флюидолитам реидно-осадочного генезиса. Перекрывающие Максовский купол породы и его апикальная часть срезаны эрозией, поэтому для изучения посткупольной стадии развития таких структур был выбран уч. Тетюгино, расположенный на расстоянии около 2 км северо-западнее Максовского месторождения, на котором разведана аналогичная структура – Мельничный купол, не разрушенный эрозией. На уч. Тетюгино с помощью геофизических наблюдений и по керну двух скважин выявлены основные признаки складки нагнетания по органоглинистым и органокремнистым сапропелевым отложениям. В перекрывающих Мельничный купол горизонтах развита система локальных разломов [4], в которых обломки брекчий сцементированы шунгитом и антраксолитом, местами аналогичные брекчии встречены в виде локальных субпластовых тел. Этот тип брекчий отнесен к флюидогенным инъекциям метасапропелитов. В статье приведено их детальное описание.

История изучения уч. Тетюгино. В 1965–1966 гг. Институтом геологии КарНЦ РАН (В. И. Горлов)

[1] Шунгитовое вещество – органическое вещество, находящееся на апоантрацитовой стадии углефикации.

[2] Максовиты и шунгиты – шунгитоносные породы (метасапропелиты) – содержат 10–45 и 45–80 % углерода ($C_{орг}$), плотные, пелитоморфные. Максовиты массивные и брекчированные, шунгиты имеют параллелепипедальную отдельность, напоминают антрацит.

© М. М. Филиппов, Ю. Е. Дейнес, К. И. Лохов, А. В. Первунина, О. В. Лохова, 2016

проведены геологическое картирование участка с проходкой шурфов и канав, а также технологические испытания лидитов в качестве сырья для получения карбида кремния, кремния, теплоизоляционных огнеупоров и пробирного камня. В 1972–1974 гг. Карельской поисково-съемочной экспедицией ПГО «Севзапгеология» на участке пробурены скважины, в том числе скв. 19, вскрывшая в шестом шунгитоносном горизонте на глубине 111,6–153,0 м Мельничную залежь максовитов и шунгитов мощностью около 42,0 м. В 1979 и 1981–1983 гг. Кольской партией СПО «Северкварцсамоцветы» выполнены детальные поисково-разведочные работы с проходкой шурфов, канав и двух траншей для опробования верхнего пласта лидитов, в 1993 г. отобраны технологические пробы лидита из двух карьеров. В 2005–2014 гг. сотрудниками ИГ КарНЦ РАН проведены геофизические наблюдения (методами естественного электрического потенциала, срединного градиента, гамма-съемкой, магниторазведкой), с помощью экскаватора расчищены уступы рельефа и траншея (Т-1), оставшаяся с 1983 г. В 2007 г. по проекту FAR-DEEP, нацеленному на исследование перехода архей–протерозой, на участке была пробурена скв. 12. Имеющийся керновый материал, данные по геологии, геохимии и геофизике позволяют рассматривать участок в качестве полигона для изучения закономерностей осадкообразования, вулканизма, развития жизни в нижнем протерозое и формирования купольных шунгитоносных структур.

Общие сведения о геологии уч. Тетюгино. Схематические геологические карты участка с указанием основных горных выработок и скважин приведены на рис. 1 и 2. Около 70 % территории покрыто четвертичными отложениями (мореной) мощностью 0,2–3,0 м. Антиклинальная складка третьего порядка погружается в северо-западном направлении под углом около 15°, она осложнена складками мелкого порядка. В центре участка находятся естественные обнажения лидитов и доломитов (рис. 2). Мельничный купол (рис. 3) перекрыт породами, входящими в седьмой и восьмой шунгитоносные горизонты второй пачки верхней подсвиты заонежской свиты: массивными среднезернистыми доломитами (7–8 м), лидитами с редкими будинами доломитов (5–6 м), массивными доломитами (1,5–2 м), слабобрекчированными максовитами (8–10 м). На северо-западе участка в разрезе появляются шунгитоносные алевролиты девятого горизонта. В 1983 г. Е. А. Афанасьевой были намечены разломы (рис. 2), ориентированные на северо-запад 300–330° и северо-восток 30–70°. Один из них подсечен скв. 19 на глубине 11,6–22,1 м, вскрывшей крупнообломочную брекчию доломитов, лидитов и алевролитов, сцементированную шунгитом и антраксолитом.

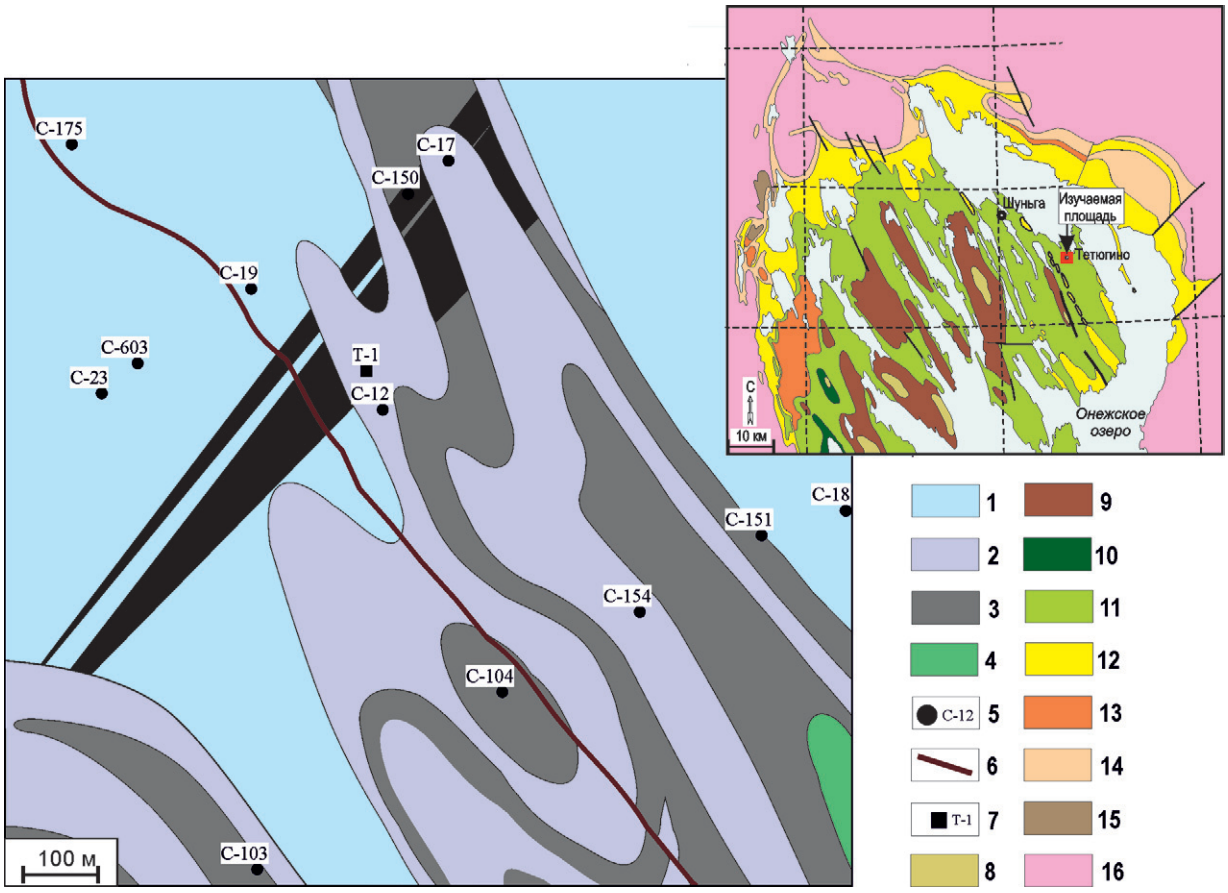


Рис. 1. Геологическая карта-схема северной части Максовского купола Толвуйской синклинали (по С. В. Купрякову, 1988), на врезке – геологическая карта Онежского синклинория [5]

1 – алевролиты и доломиты; *2* – туфы алевритовые, карбонатные, альбито-кремнистые, лидиты; *3* – шунгитоносные породы; *4* – габбродолериты; *5* – скважина и ее номер; *6* – дорога; *7* – траншея и ее номер; *8–15* – свиты (на врезке): *8* – шокшинская, петрозаводская, вашозерская, *9* – падосская, кондопожская, нигозерская, мунозерская, *10* – суйсарская; *11* – заонежская, *12* – туломозерская, *13* – медвежьегорская, *14* – янгозерская, *15* – кумсинская, палеозерская; *16* – архейский фундамент

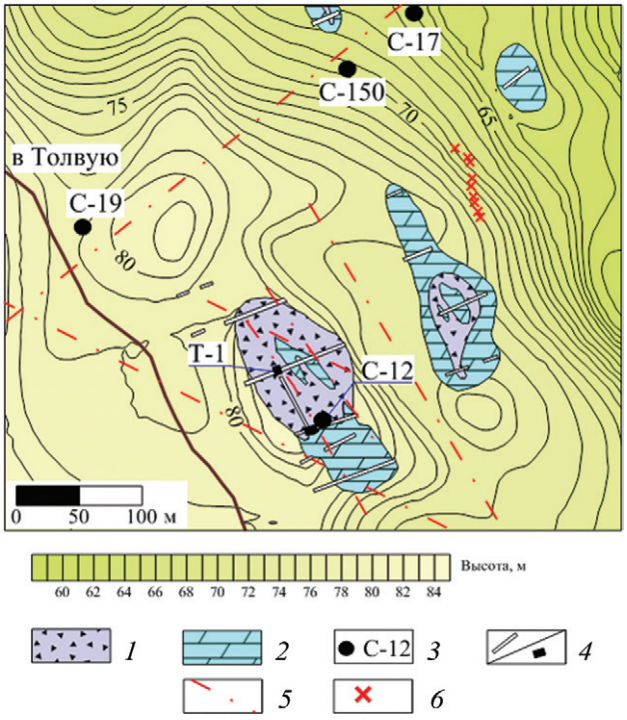


Рис. 2. Геологическая карта-схема уч. Тетюгино (по Е. П. Афанасьевой, 1983)

1 – лидиты; *2* – доломиты; *3* – скважина и ее номер; *4* – канавы/траншеи 1983 г.; *5* – предполагаемые тектонические нарушения; *6* – расчистки 2014 г.

Аналогичная брекчия встречена и в скв. 12 на глубине 3,5–4,5 м. Азимуты простирания и падения слоев в пределах участка резко меняются, что ранее объяснялось развитием брахиформ и ундуляцией осей складок. Другой вариант трактовки причин брекчирования пород и контрастов в элементах залегания слоев [4] основан на представлениях о блоковом строении участка (рис. 3).

Мельничный купол, как и Максовский, имеет структурные, литологические и литохимические признаки складки нагнетания: краевую синклиналь, фрагменты которой ясно просматриваются в современном рельефе участка; флюидальные текстуры максовитов и шунгитов; краевые брекчии; увеличенную мощность высокоуглеродистых пород шестого горизонта по направлению к предполагаемому центру складки – в скв. 12 около 14, а в скв. 19 уже 42 м (рис. 3) при расстоянии между скважинами около 180 м; зональность в распределении углерода и минерального вещества, объясняемую дифференциацией органоминерального вещества по плотности в процессе развития складки нагнетания; крутые углы падения слоев (до 35°), не характерные для Толвуйской синклинали; большую мощность силла долеритов, разделяющего шестой и седьмой горизонты в области развития краевой синклинали; мощность шестого горизонта в таких участках, наоборот, намного меньшую за счет предполагаемого выжимания вещества из этой области; содержание углерода в породах залежи существенно выше фонового (среднее 46, максимальное до 55 %).

Локальные разломы, сформированные над купольной структурой в процессе ее развития, выделены на геоэлектрических разрезах [4]. Многочисленные уступы рельефа высотой до 1,5 м, видимые на аэрофотоснимках (рис. 4), трассируют два типа таких разломов: опоясывающие апикальную часть структуры и радиальные, расходящиеся от предполагаемого центра купола. Уступы рельефа, где находятся расчистки, вероятно, трассируют внешний контур локальных разломов.

Материалы и методы исследования. Исследованы керны скважин 12 и 19, штуфные пробы из

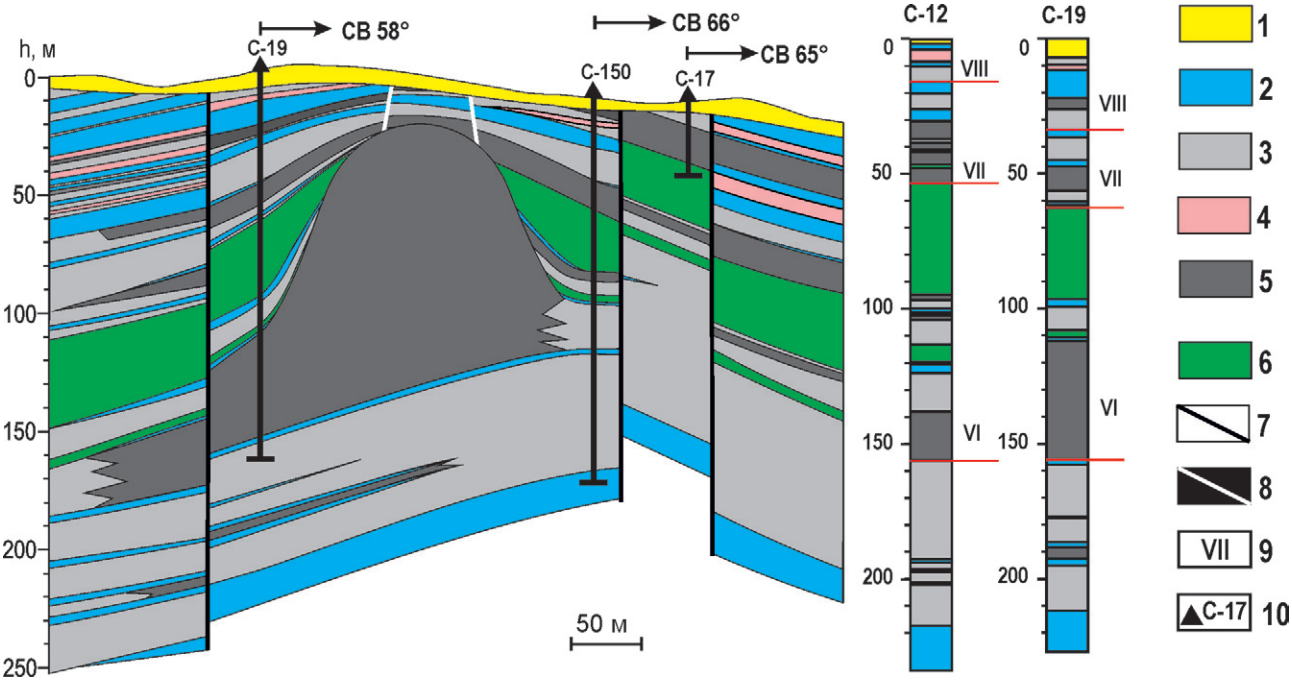
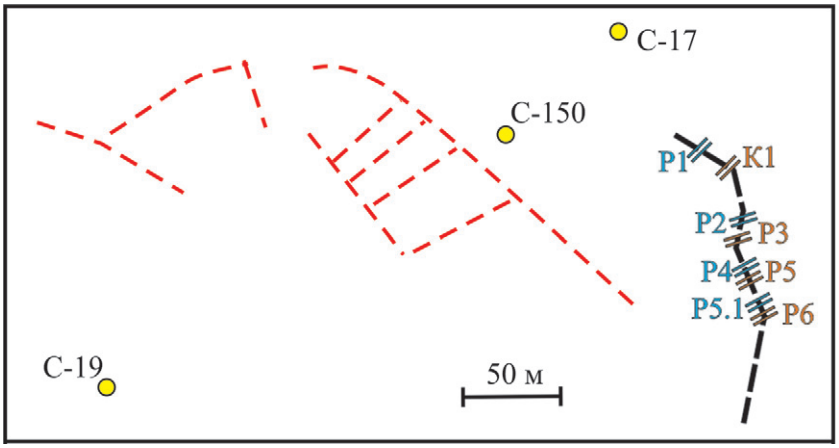


Рис. 3. Геологический разрез уч. Тетюгино и литологические колонки скважин

1 – четвертичные отложения; *2* – доломиты, известняки; *3* – алевролиты, мергели, сланцы; *4* – лидиты; *5* – максовиты, шунгиты; *6* – долериты; *7*, *8* – разломы (*7* – региональные, *8* – локальные); *9* – номер шунгитоносного горизонта; *10* – скважина и ее номер



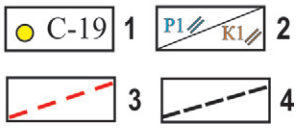


Рис. 4. Положение уступов рельефа на уч. Тетюгино

1 – скважина и ее номер; *2* – расчистка/канава и ее номер; *3* – уступы, выделенные по аэрофотоснимкам; *4* – вскрытые уступы

естественных и искусственных обнажений участка. Для определения минерального состава образцов использован микрозонд Tescan 5130 LS SED. Петрогенные элементы определены методами мокрой химии в аналитической лаборатории ИГ КарНЦ РАН. Содержание редких и редкоземельных элементов определялось методом ICP-MS Thermo Scientific X Series 2 в ИГ КарНЦ РАН (аналитик А. С. Парамонов). Разложение пород осуществлялось путем кислотного вскрытия в открытой системе. Пределы обнаружения для РЗЭ 0,02–0,03 г/т. Изотопный состав углерода измерен в радиоуглеродной лаборатории Института истории материальной культуры РАН (СПб) на масс-спектрометре Thermo Delta V по одноканальной схеме с элементным анализатором CE/NA-1102. Система *burst combustion* позволила окислять образцы в атмосфере кислорода при 850 °С; для доведения температуры в зоне сжигания до 1200–1300 °С исследуемый образец заворачивали в оловянную фольгу. Минимизация систематических ошибок осуществлялась путем выбора условий сжигания шунгитоносных пород при повторных измерениях шуньгского антраксолита ($\delta^{13}C = -37{,}6 \pm 0{,}1$ ‰ PDB). Использовались аттестованные международные стандарты – графит MPG ($\delta^{13}C = -29{,}78 \pm 0{,}03$ ‰ PDB) и полиэтиленовая пленка PEF-1 ($\delta^{13}C = -31{,}49 \pm 0{,}03$ ‰ PDB). Воспроизводимость анализов ±0,1 ‰.

Флюидолиты уч. Тетюгино. В брекчиях известняков и лидитов из скв. 19 присутствуют обломки, сместившиеся со своего первоначального положения, что указывает на движение флюида под давлением. На макро- и микроуровнях (рис. 5) по краям обломков известняка повсеместно выявлены пограничные области, пропитанные битумом, что также свидетельствует о существовании повышенного давления флюида во время заполнения трещин углеводородами.

Типичный для участка разрез вскрыт расчистками P1 и P2 (рис. 4). В их основании черные рыхлые доломиты, затем лидиты (1,1 м), доломиты серые массивные (0,9 м), далее лидиты с редкими будинами доломита, раздробленные снизу и массивные сверху. На контакте с лидитами доломиты расслацованы, азимут простирания контакта 160°.

В разрезе, вскрытом канавой K1 (рис. 6), присутствуют инъекции метасапропелитов. В нижней части уступа (0,0–2,0 м) – интенсивно брекчированные черные доломиты (рыхлая масса с сохранившимися от выветривания округлыми останцами), простирание 330°, падение 58°; брекчия черных

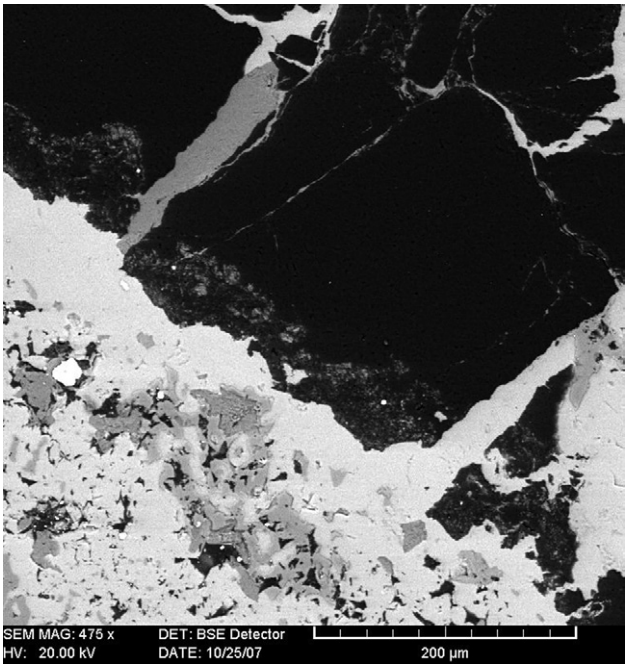


Рис. 5. Пример пропитки углеводородами краевой части обломка известняка (Tescan 5130 LS SED)

доломитов с бороздами скольжения (2,0–2,5 м), сцементированная шунгитом и антраксолитом; лидиты (2,5–3,7 м), простирание 65°; брекчия лидита, цемент – шунгит и антраксолит (3,7–6,4 м); темно-серые доломиты, неслоистые, среднезернистые, трещиноватые (6,4–7,35 м). Как и в скв. 19, остроугольные обломки брекчии лидитов развернуты относительно своего первоначального положения. Процесс цементации брекчии развивался в два этапа: первый представлен органоминеральным веществом, близким по составу к шунгитам, второй – антраксолитом, заполняющим трещины в цементе. Антраксолиты указывает на активную генерацию углеводородов, приуроченную к завершающей стадии развития Мельничного купола. В нижней части канавы стенка разлома трассируется брекчированными доломитами с характерными для участка элементами залегания, а в верхней части неслоистыми доломитами.

Расчистка P3 отстоит от расчистки P2 всего на 4 м. Внизу доломит, затем инъекция кавернозного метасапропелита шириной 20 см, над ней рыхлый черный доломит (50 см), далее лидит с будиной

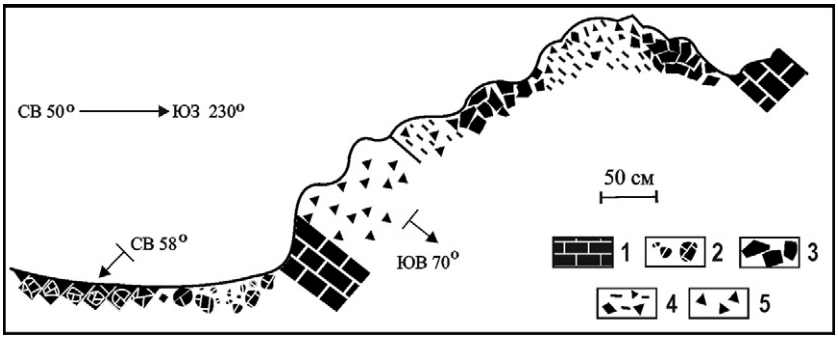


Рис. 6. Зарисовка канавы К1 (по В. И. Горлову, 1984)

1 – черные выветрелые доломиты; *2* – доломитовые конгломераты, цемент шунгитовый; *3* – лидитовые брекчии, цемент, шунгит, антраксолит; *4* – шунгит с редкими обломками лидитов; *5* – лидиты

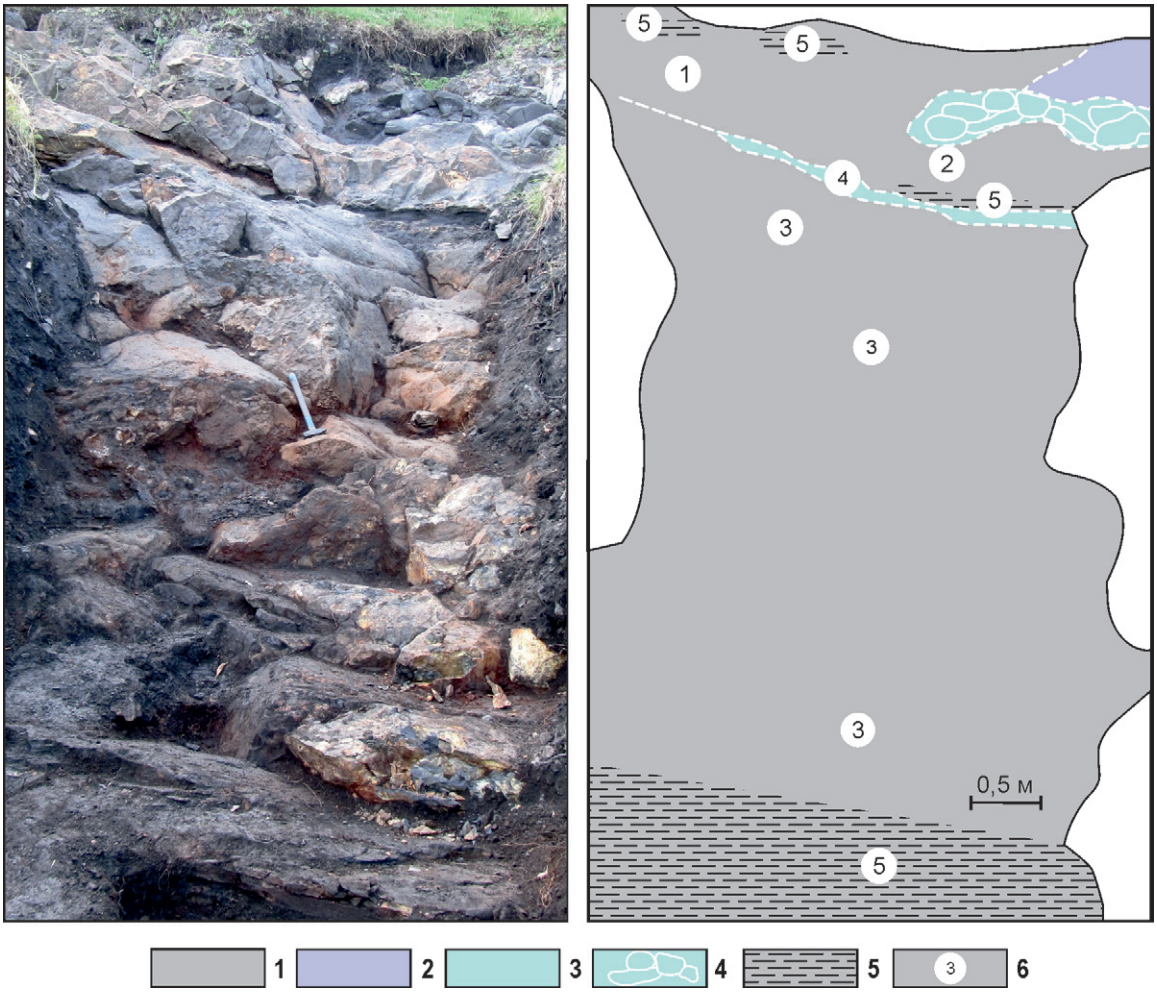


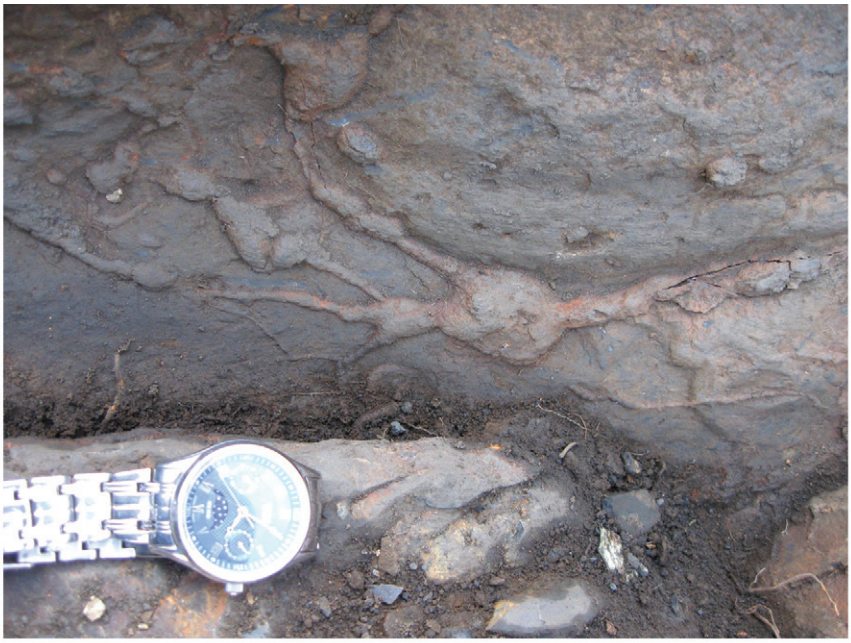
Рис. 7. Общий вид расчистки Р5 (длина молотка 40 см) и схема отбора проб на анализ

1 – инъекционные метасапропелиты; *2* – брекчия лидита; *3* – доломиты; *4* – будины доломита; *5* – участки интенсивного кливажа метасапропелитов; *6* – места, указанные в тексте; *7* – задернованные участки

доломита, аналогичный встреченному в расчистках Р1 и Р2. Лидит трещиноватый, азимут простирания крупных трещин 140°, азимут падения 50°; простирание инъекции также 140°.

Наиболее крупная инъекция метасапропелита вскрыта расчистками Р4, 5, 5.1 и 6 (рис. 7), которые приурочены к одному уступу (рис. 4). Общая длина инъекции 21,5 м, видимая мощность 13 м. В средней части расчистки породы массивные с признаками развития складок течения и визуально выраженными границами, фиксирующими разные порции вещества. На поверхности породы обычна сеть выпуклых кварцевых прожилков (рис. 7, *1*, рис. 8, *а*). В инъекции встречаются угловатые включения лидита и округлые доломита самых разных размеров. На поверхности часто встречаются слепки от удаленных при выветривании включений вмещающих инъекцию пород (рис. 7, *2–3*, рис. 8, *б*, *в*). В центре расчистки фрагменты слоя рыхлого черного глиноподобного, пропитанного шунгитовым веществом доломита (рис. 7, *4*). Метасапропелит на контакте с доломитом рассланцован, ярко-желтого цвета. Азимут простирания плоскостей отдельности инъекции 310–330°. В верхней и нижней частях расчистки Р5 есть участки с хорошо выраженными трещинами кливажа (рис. 7, *5*), имеющими азимут простирания 340° и углы падения, близкие к вертикальным. Очевидно, кливаж развит вдоль

а



б

в

Рис. 8. Характерный вид поверхности инъекций

а – выпуклые прожилки кварца; *б* – слепок шарообразного включения доломита; в – слепки угловатых обломков лидита

стенок разлома. Аналогичные кливажированные метасапропелиты присутствуют в центре расчистки Р5.1, азимуты простирания плоскостей отдельности 310–330°, а углы падения близки к вертикальным. В юго-западной части расчистки Р6 появляется мелкодробленый лидит, что, по-видимому, связано с влиянием субширотного разлома.

Поверхность инъекционных метасапропелитов покрыта желтой, буро-ржавой охрой, текстура брекчиевидная, ясно подчеркнутая прожилками кварца. Брекчирование связано с процессом сокращения объема инъекции при дегидратации минерального и дегидрогенизации органического вещества – это трещины синерезиса. Края трещин, как правило, четкие, в жильном материале антраксолит отсутствует. В краевых частях расчистки трещины субпараллельны контактам с вмещающими породами.

В траншее Т-1 (рис. 2) вскрыт «слой шунгитов» (по Е. А. Афанасьевой), приуроченный к будинированному слою плитчатого доломита, расположенному между верхним слоем лидитов и слоем массивного доломита (рис. 9). Флюидолиты северо-восточной стенки траншеи залегают непосредственно под лидитами и представлены сажистым глиноподобным веществом мощностью от 0,05 до 0,6 м. Основной же слой флюидолитов – это крепкие породы с резко меняющейся мощностью даже в пределах одной стенки траншеи (от 0,3 до 0,8 м). Будины доломита и лидита во флюидолитах (от 2 см до 0,8 м), как правило, покрыты слоем бурых и желтых охр толщиной до 1,5 см. Часть будин доломита превращена в рыхлую массу. Пространство между будинами верхнего слоя доломита заполнено лидитом. В северо-западной и юго-западной стенках траншеи Т-1 под будинированным слоем доломита залегает выклинивающийся слой лидита мощностью 0,2–1,0 м, замещающийся метасапропелитом. Промежутки между крупными блоками слоя массивного доломита заполнены рыхлой глиноподобной массой. Ни в траншее Т-2,

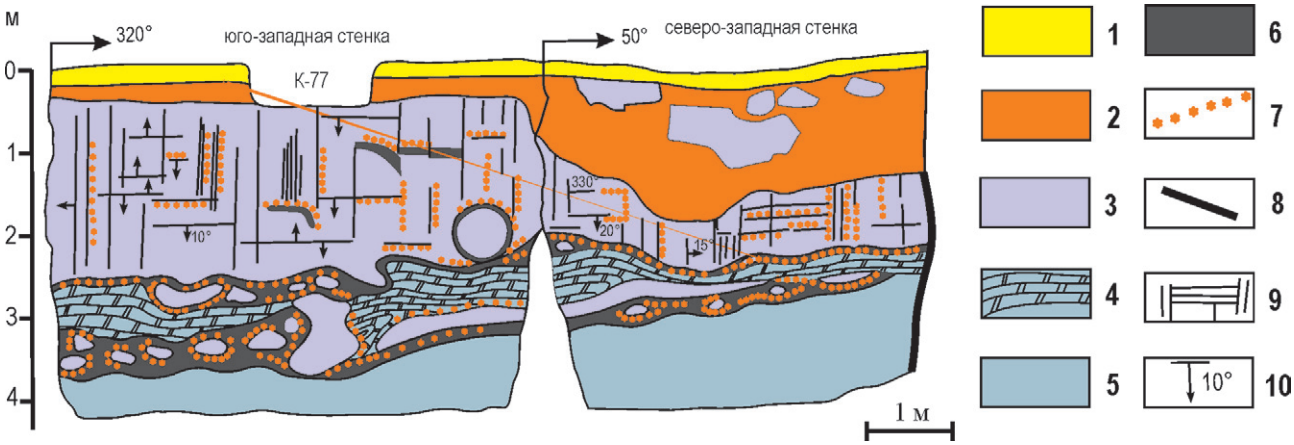


Рис. 9. Зарисовка стенок траншеи Т-1 (по Е. П. Афанасьевой, 1983, с изменениями)

1 – почвенно-растительный слой; *2* – делювий; *3* – лидит; *4* – доломит; *5* – выветрелый доломит; *6* – шунгитовый сланец; *7* – гидроокислы железа; *8* – тектонические нарушения; *9* – трещины; *10* – элементы залегания

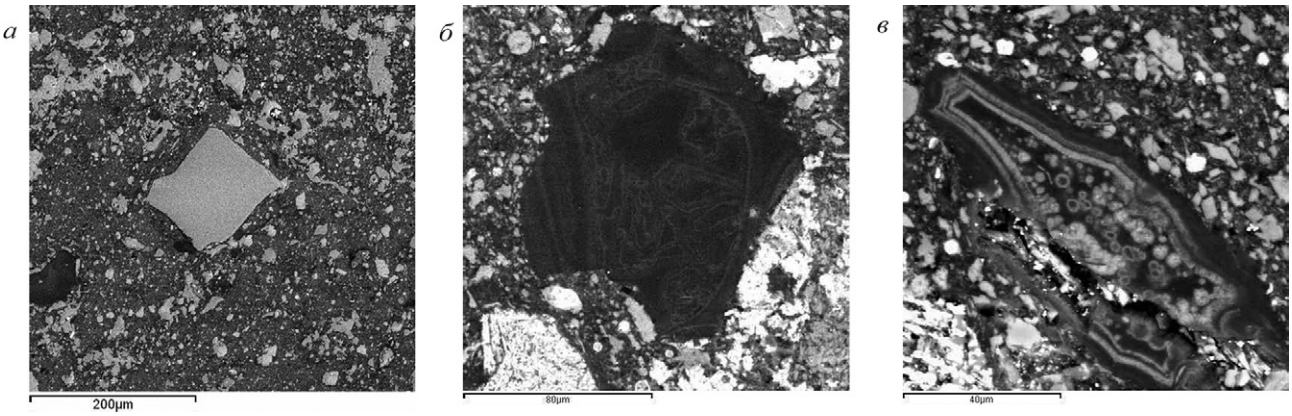


Рис. 10. Микроструктурные особенности инъекционных метасапропелитов

а – типичная микроструктура, в центре обломок лидита; *б* – метаколлоидные структуры; *в* – зональные миндалины (Tescan 5130 LS SED)

вскрывшей пласт лидита на всю мощность, ни в карьерах, ни в шурфах, отстоящих от траншеи Т-1 на расстояние не более 80 м, под слоем лидита метасапропелиты не встречены. По-видимому, внедрение инъекции метасапропелита связано с разломом, который зафиксирован Е. А. Афанасьевой в траншее на северо-восточной стенке.

Контрастность литологических разрезов в канаве К1 и в расчистках Р1–Р6, а также различия в простирании уступов, в которых они вскрыты, свидетельствуют о том, что уступы рельефа трассируют границы различных блоков, смещенных относительно друг друга по вертикали. Следовательно, основная инъекция метасапропелитов (расчистки Р4–Р6) приурочена к субмеридиональному тектоническому разлому и ограничена зонами субширотных разломов.

На микроуровне инъецированные метасапропелиты, отобранные из расчисток, содержат относительно крупные угловатые или округлые включения вмещающих пород (рис. 10, *а*). Во включениях чаще, чем в матрице, обнаруживаются метаколлоидные структуры, характерные для максовитов в купольных телах (рис. 10, *б*), а также зональные миндалины, заполненные органоминеральным веществом (рис. 10, *в*), указывающие на активное выделение газообразных углеводородов.

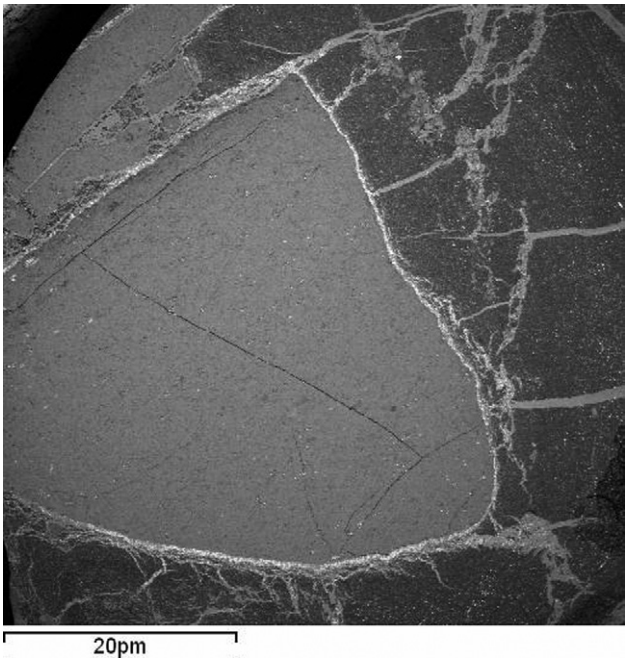


Рис. 11. Зерно лидита во флюидолите, обломок разбит на две части, по краям оболочка иллита (Tescan 5130 LS SED)

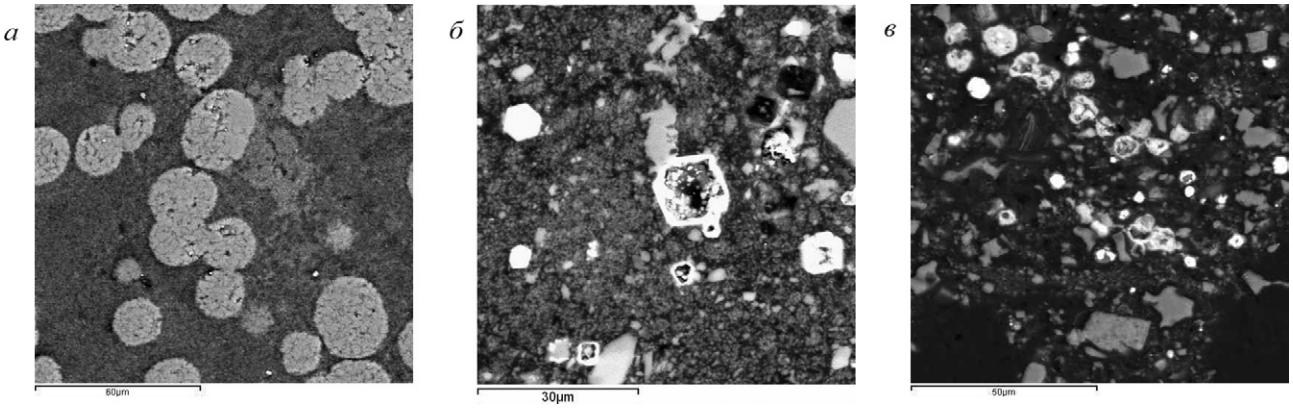


Рис. 12. Микроструктура инъекционных метасапропелитов

а – округлые выделения кварца; *б* – пример замещения пирита ярозитом (в центре); *в* – поры, образованные при выщелачивании пирита (Tescan 5130 LS SED)

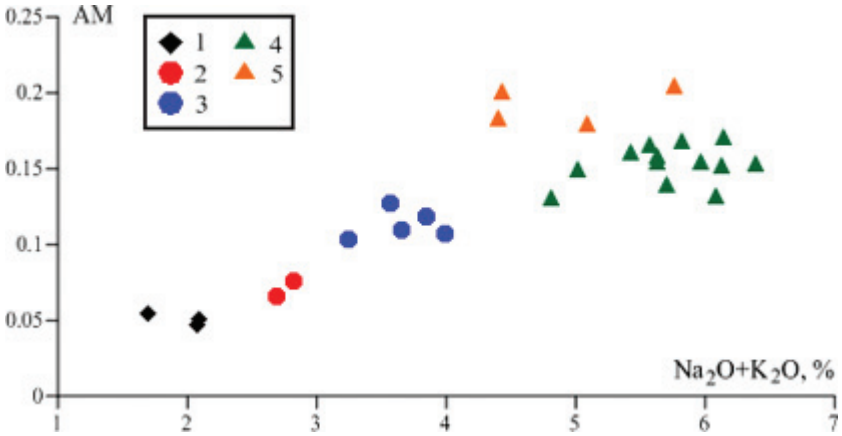


Рис. 13. Модульная диаграмма АМ (алюмокремниевый модуль Al_2O_3/SiO_2) – сумма щелочей (Na_2O +K_2O, %) максовитов уч. Тетюгино

1 – из верхней части расчистки Р5.1; *2* – из расчистки Р4; *3* – из скв. 19 (седьмой шунгитоносный горизонт) и из верхней части расчистки Р5; *4* – из центра расчистки Р5; – из скв. 19 (шестой шунгитоносный горизонт – Мельничный купол)

Таблица 1

Средний состав зольного остатка (%) максовитов уч. Тетюгино

Элементы	Группа (кол-во образцов)				
	1 (3)	2 (2)	3 (5)	4 (13)	5 (4)
SiO_2	82,11	79,24	78,95	73,75	68,14
TiO_2	1,18	0,89	0,55	1,19	0,79
Al_2O_3	4,16	5,55	8,9	11,27	13,08
$(Fe_2O_3)_{общ}$	5,78	6,75	6,32	6,27	9,70
MnO	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04
MgO	2,86	3,8	1,28	1,26	2,59
CaO	0,67	0,56	0,29	0,22	0,61
Na_2O	0,06	0,34	0,86	0,47	0,28
K_2O	1,89	2,41	2,81	5,24	4,64
P_2O_5	1,27	0,44	0,03	0,30	0,12
Сумма	100	100	100	100	100
п.п.п.	35,82	49,02	37,87	41,38	51,24

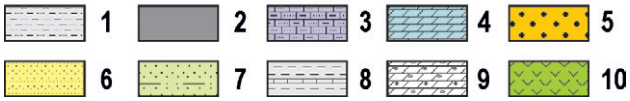
Примечание. Анализы выполнены в лаборатории ИГ КарНЦ РАН. Данные анализов пересчитаны на безуглеродистую основу.

В миндалинах отмечены признаки разделения сложной флюидной фазы на органическое и глинистое вещество. В инъекциях присутствуют следы как механического, так и химического воздействия флюидного вещества на захваченные обломки вмещающих пород (рис. 11).

В инъекционных метасапропелитах основным минералом является кварц. Обычно это округлые выделения без признаков кристаллизации (рис. 12, *а*). Второй по значимости минерал – слюда (иллит). Достаточно часто встречаются полевой шпат, апатит и пирит, который в ряде случаев замещается ярозитом (рис. 12, *б*). Более редкие минералы – монацит и золото. В матрице метасапропелита имеются поры самого разного размера, в том числе образованные при выщелачивании пирита (рис. 12, *в*).

Модульная диаграмма АМ – сумма щелочей построена по данным силикатного анализа образцов из расчисток и скв. 19. На ней можно выделить пять групп максовитов (рис. 13). Средний состав пород, входящих в группы, приведен в табл. 1. Первая группа отличается максимальным содержанием SiO_2, MgO и P_2O_5. В породах 4- и 5-й групп содержание SiO_2 минимальное, Al_2O_3, K_2O и Fe_2O_3 максимальное. Следовательно, данные о составе пород позволяют рассматривать Мельничный купол как наиболее вероятный источник флюидолитов расчистки Р5.

Источники вещества флюидолитов. Выявленные особенности инъекционных метасапропелитов позволяют рассматривать их как результат



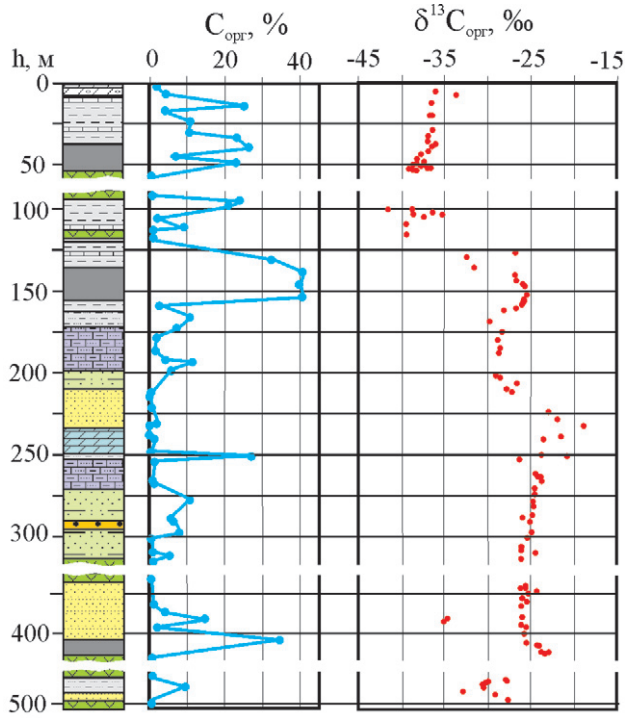


Рис. 14. Распределение $C_{орг}$ и $\delta^{13}C_{орг}$ по скв. 12 [7] с изменениями

1 – алевролиты; *2* – максовиты; *3* – известняки; *4* – доломиты; *5* – конгломераты; *6* – граувакки, алевролиты; *7* – карбонатные граувакки; *8* – мергели, известняки; *9* – доломиты, лидиты; *10* – габбродолериты

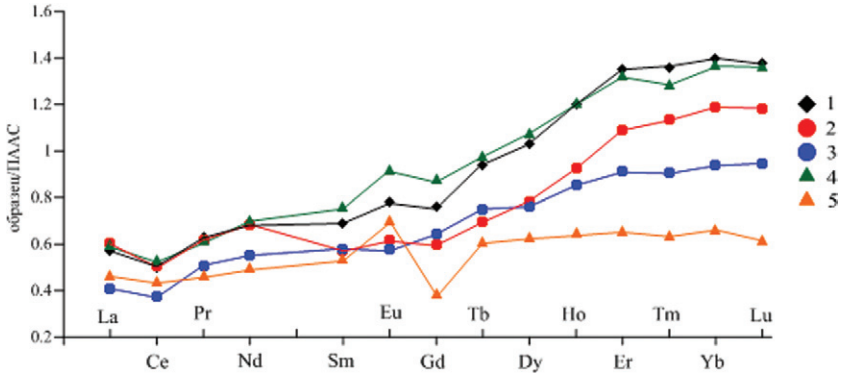


Рис. 15. Нормированное к PAAS (постархейские австралийские сланцы [6]) распределение РЗЭ в максовитах уч. Тетюгино (*1–5* см. на рис. 13)

Таблица 2

Среднее содержание РЗЭ (г/т) в максовитах уч. Тетюгино

Группа	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	25,445	44,30	6,37	25,52	4,74	0,95	4,59	0,83	5,50	1,26	4,16	0,61	4,21	0,60
2	26,87	44,44	6,29	25,50	3,95	0,75	3,63	0,62	4,17	0,97	3,35	0,51	3,58	0,52
3	18,21	33,08	5,158	20,66	3,98	0,70	3,88	0,67	4,05	0,90	2,80	0,41	2,82	0,41
4	26,61	47,10	6,26	26,18	5,24	1,12	5,30	0,87	5,74	1,27	4,07	0,58	4,14	0,60
5	20,79	38,99	4,73	18,57	3,69	0,85	2,34	0,55	3,37	0,68	2,03	0,29	2,01	0,27

Таблица 3

Среднее содержание биофильных элементов (г/т) в максовитах уч. Тетюгино

Группа	V	Ni	As	Mo	Th	U	Th/U	V/Ni
1	999,53	108,14	443,80	202,62	6,21	50,28	0,124	9,243
2	884,45	147,78	417,65	207,75	3,04	41,94	0,072	5,985
3	1100,00	295,30	409,60	213,70	2,18	31,99	0,068	3,725
4	1143,43	83,13	267,07	195,26	5,65	33,42	0,169	13,754
5	266,42	393,04	111,47	13,34	4,99	8,31	0,601	0,678

внедрения под давлением органоминерального вещества в долгоживущие трещины растяжения. В его состав предположительно входили коллоидные смеси органического и минерального (первично-глинистого) вещества, вода, углеводороды. Наиболее вероятные источники вещества – седьмой и шестой шунгитоносные горизонты, в том числе собственно Мельничный купол. Рассмотрим эти два возможных варианта, опираясь на полученные данные о содержании в породах $C_{орг}$, редких земель и биофильных элементов, а также на сведения о распределении $\delta^{13}C_{орг}$ по разрезу заонежской свиты.

Если сопоставить содержание $C_{орг}$ в метасапропелитах участка с имеющимися сведениями о распределении углерода по разрезу (рис. 14), то следует указать на наиболее вероятный источник вещества – шестой шунгитоносный горизонт (Мельничный купол).

На рис. 15 приведены нормированные геохимические спектры редкоземельных элементов (РЗЭ) для образцов пяти групп, выделенных на диаграмме АМ–сумма щелочей (рис. 13). По характеру распределения и абсолютному содержанию РЗЭ (табл. 2) инъекционные метасапропелиты из центра расчистки (группа 4) наиболее близки к породам из траншеи и верхней части расчистки Р5.1 (группа 1). Пробы из верхней части расчистки Р5 (группа 3) и из ее центра отличаются по отношению суммы тяжелых и легких элементов, т.е. локальный разлом заполнялся в два этапа (возможно, больше) и несколько разным по составу флюидизированным веществом. Пробы из скв. 19 (Мельничный купол) отличаются от всех групп пониженным содержанием тяжелых РЗЭ. Вариации содержания легких РЗЭ обусловлены прежде всего колебаниями первично-глинистого вещества (слюд) – основного носителя этих элементов – шунгитового вещества в меньшей степени, в большей апатита. Эти особенности вполне вписываются в общие закономерности накопления РЗЭ в черных сланцах [3].

По содержанию ряда биофильных элементов породы расчистки Р5 и траншеи резко отличаются от пород Мельничного купола (табл. 3), следовательно, его периферийная часть не могла служить источником вещества флюидолитов.

В заонежской свите наблюдаются (рис. 14) высокие вариации $\delta^{13}C_{орг}$ при очевидной тенденции снижения от подошвы к кровле. Породы седьмого шунгитоносного горизонта характеризуются наиболее низкими значениями $\delta^{13}C_{орг}$, эта изотопная аномалия является региональной [5, 8]. На восьмом шунгитоносном горизонте $\delta^{13}C_{орг}$ лидитов и доломитов, вмещающих инъекции метасапропелитов, –32,7 и –33,6 ‰ [5], а проб метасапропелитов, отобранных из расчисток Р3–5, от –33,6 до –36,0 ‰. Вариации $\delta^{13}C_{орг}$ инъекционных метасапропелитов из расчисток Р3–6 незначительны: от –36,5 до –36,9 ‰ (среднее по 9 образцам –36,7 ‰); цемент брекчий лидитов из скв. 12 имеет $\delta^{13}C_{орг}$ –36,6 ‰ [7], а брекчий известняков из скв. 19 –34,0 ‰. Следовательно, источник вещества для разных порций инъекционных метасапропелитов, несмотря на вариации их химического состава и содержания РЗЭ, находился в одном стратиграфическом интервале.

Апикальная часть Мельничного купола, как уже было отмечено, неэродированная, однако она до сих пор не вскрыта скважинами: $\delta^{13}C_{орг}$ метасапропелитов из скв. 12 – 25,81 ‰ (среднее по 13 образцам [7, 8]), из скв. 19 в интервале 128,4–151,3 м –25,4 ‰ (среднее по трем образцам). Очевидно, что по изотопному составу углерода периферийная часть купольного тела не могла быть источником вещества для цемента брекчий и для инъекционных метасапропелитов из расчисток, несмотря на положительный вывод, сделанный на основании анализа состава пород. Могла ли апикальная часть Мельничного купола быть таким источником?..

По данным А. М. Ахмедова [1], в пределах Максовского месторождения наблюдается постепенное уменьшение $\delta^{13}C_{орг}$ от –27,3 ‰ на периферии до –36,9 ‰ в центральной части (среднее из 6 определений). При исследовании получены дополнительные данные по изотопному составу пород Максовского месторождения (керн скв. 205, пробуренной в центре купола). Дифференциация $\delta^{13}C_{орг}$ в пределах купольного тела подтверждается (от –20,3 ‰ в подошве залежи до –25,2 ‰ в его кровле), однако она не такая резкая, как это следует из работы А. М. Ахмедова. Таким образом, в разных сечениях Максовского месторождения дифференциация $\delta^{13}C_{орг}$ разная. В основном данные указывают на то, что в апикальной части купола изотопный состав углерода должен быть значительно легче, чем на периферии.

Причины дифференциации изотопного состава углерода в пределах купола пока не исследованы. По крайней мере это не результат обогащения верхних частей купола миграционными углеводородами, поскольку разница $\delta^{13}C_{орг}$ между остаточным керогеном и антраксолитом, например на Максовском месторождении, не превышает 1,2 ‰; то же зафиксировано по всему разрезу заонежской свиты [5, 7]. На Максовском месторождении выявлены очевидные признаки дифференциации метасапропелитов по составу: верхние и центральные части купольного тела в большей степени обогащены углеродом, породы здесь более слюдистые по сравнению с периферийными участками; они имеют более выраженные пелитоморфность и графитоидный облик. На этом основании можно предполагать, что в керогене апикальной части купола доля полярных соединений была более высокой, что обеспечило повышенное содержание изотопа ^{12}C. По аналогии в апикальной части Мельничного купола $\delta^{13}C_{орг}$ метасапропелитов должно быть намного ниже –33,5 ‰ (скв. 19, глубина 104,0 м), и, вероятно, иметь значения –36...–37 ‰, т. е. купол потенциально мог быть источником цементирующего вещества брекчий, вскрытых скважинами 12 и 19, а также инъекций метасапропелитов в расчистках и в субпластовом теле траншеи Т-1.

Обсуждение материалов. Описанные примеры проявления инъекционных метасапропелитов, по-видимому, генетически связаны с определенной стадией формирования Мельничного диапира. Во-первых, вполне очевидна приуроченность флюидолитов к локальным разломам в надкупольном пространстве; во-вторых, купол мог служить основным источником вещества, заполняющего разломы, а также для локального субпластового тела в будинированном слое доломитов. Полученные сведения о флюидолитах траншеи Т-1 свидетельствуют о том, что эти породы по составу, текстурно-структурным и геохимическим характеристикам практически сходны с флюидолитами из

расчисток, в основном они разные по форме проявления. Судя по изотопным данным, источники вещества для этих флюидолитов несколько отличаются, возможна и гипотеза об одном источнике, задействованном в разное время.

Флюидолиты относятся к тонкодисперсным средам, которые на ранних стадиях развития обладали высокой способностью к течению и, вероятно, высокой физико-химической (реакционной) активностью. Об этом свидетельствуют примеры воздействия флюидолитов на краевые части обломков доломитов и лидитов. Большинство особенностей флюидолитов по сравнению с типичными максовитами купольных структур, вероятно, можно объяснить тем, что они не проходили стадии генерации углеводородов, т. е. их внедрение шло после мезокатагенеза органического и минерального вещества органоглин питающего слоя. Вероятно, при появлении углеводородов вязкость вещества значительно снизилась, а давление в питающем слое в то же время, наоборот, существенно возросло. При раскрытии надкупольных разломов в первую очередь из питающего слоя мигрировали флюиды, содержавшие газообразные и жидкие углеводороды, а затем и относительно менее подвижное органоглинистое вещество благодаря эффектам пластифицирования органоминеральных соединений поверхностно-активными веществами (углеводородами).

Флюидогенный тип шунгитоносных пород в палеопротерозойских отложениях выявлен впервые. От типичных максовитов купольных структур они отличаются текстурой и структурой, составом, формой проявления. Перемещение флюидизированных органоглин проявляется на микро- и макроуровнях. На макроуровне – это будинирование вмещающих пород, образование доломитовых псевдоконгломератов (канава К1 и расчистка Р5) и характерный для диапировых структур меланж (мелкие обломки на периферии инъекций, крупные в центре); появление слоистости за счет развития мелких складок волочения и плойчатости; локальное гофрирование и катаклазирование инъекций. На микроуровне – это присутствие мелких угловатых ксенолитов вмещающих пород, наличие зон пропитки коренных пород углеводородами, корродирование поверхности ксенолитов агрессивными флюидами. Подобные образования предлагается рассматривать в качестве самостоятельного генетического типа шунгитоносных пород. Для них характерны форма и размеры тел, нарушающие стратификацию осадков, текстура и структура, минеральный состав ксенолитов и основной массы, признаки интеграции и дезинтеграции минеральных фаз и агрегатов, геохимические особенности, аномальный по отношению к вмещающей среде состав (Г. А. Беленицкая, 2011), следы воздействия флюидных потоков на вмещающую среду, связь с тектоническими нарушениями.

Шунгитоносные флюидолиты могут представлять промышленный интерес, поскольку содержание шунгитового вещества в них существенно выше, чем в породах разрабатываемого в настоящее время Максовского месторождения. Конечно, их потенциальные запасы менее значительны, чем в купольных залежах, однако, судя по известным данным о Шуньгском месторождении, генезис которого авторы статьи также связывают с флюидогенными процессами, они могут достигать 2 млн т на одном проявлении. Локальные субпластовые тела шунгитов на этом месторождении залегают, как и на уч. Тетюгино, между слоями лидитов и будинированных доломитов восьмого шунгитоносного горизонта, мощность пластов шунгита не выдержана, наблюдаются непараллельное залегание, утолщения и пережимы, ветвление и выклинивание, в них нередки линзы и прослои доломитов и слюдяных сланцев. Поверхность пластов шунгитов волнисто-гофрированная за счет мелких куполовидных складок, апикальные части которых обогащены углеродом, очевидны следы течения вещества, присутствуют структуры будинажа, в том числе крупные фрагменты доломита и максовита, распределенные в пластах шунгита без видимой закономерности.

Приведенные примеры протерозойских флюидолитов, фиксирующих перемещение вещества из первичного слоя на значительное расстояние, указывают на необходимость пересмотра представлений о геохимических маркирующих горизонтах (в том числе изотопных), о причинах появления аномалий и характерных трендов изменения $\delta^{13}C$, о корреляции разрезов скважин, пройденных по породам верхней подсвиты заонежской свиты, где активно проявлены флюидные процессы. Всё это может быть востребовано при поисках и разведке месторождений высокоуглеродистых пород.

Работа проведена по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., госзадание № 0222-2014-0006, тема 205 «Геология, минералогия и технология шунгитовых пород», реализуемая ФГБУН Институтом геологии КарНЦ РАН.

1. *Ахмедов А.М.* Закрытые металлоносные углеродаккумулирующие системы вулканогенно-осадочных бассейнов раннего протерозоя Балтийского щита // Регион. геология и металлогения. 1995. № 4. – С. 122–135.

2. *Беленицкая Г.А.* Инъекционно-осадочные типы седиментогенеза // Материалы VII Междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле». – М.: 2005. – С. 124–125.

3. *Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г., Красавчиков В.О.* Редкоземельные элементы в баженовской свите Западно-Сибирского осадочного бассейна // Литосфера. 2011. № 6. – С. 38–54.

4. *Филиппов М.М., Дейнес Ю.Е.* Традиционные и эвристические подходы к интерпретации геолого-геофизических материалов на перспективном для открытия месторождения максовитов участке Толвуйской синклинали // Уч. зап. ПетрГУ. Серия: Естеств. технич. науки. 2012. № 2. – С. 49–56.

5. *Melezhik V.A., Fallick A.E., Filippov M.M., Larsen O.* Karelian shungite – an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry // Earth Sci. Rev. 1999. Vol. 47. – P. 1–40.

6. *Pourmand A, Dauphas N., Ireland T.J.* A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances // Chem. Geol. 2012. Vol. 291. – P. 38–54.

7. *Qu Y., Črne A.T., Lepland A., Van Zuilen M. A.* Methanotrophy in a Paleoproterozoic oil field ecosystem, Zaonega Formation, Karelia, Russia // Geobiology. 2012. Vol. 10. – P. 467–478.

8. *Strauss H., Melezhik V.A., Lepland A.* Enhanced accumulation of organic matter: The Shunga event // Reading the Archive of Earth's Oxygenation. 2013. Vol. 3. – P. 1195–1273.

1. Akhmedov A.M. Closed metalliferous carbon-accumulating systems in volcanogenic sedimentary Early Proterozoic basins of the Baltic Shield. *Region. geologiya i metallogeniya.* 1995. No 4, pp. 122–135. (In Russian).

2. Belenitskaya G.A. Injection-sedimentary types of sedimentation. *Materials of the VII Intern. Conf. "New Ideas in Earth Sciences".* Moscow: 2005. Pp. 124–125. (In Russian).

3. Zanin Yu.N., Zamirailova A.G., Eder V.G., Krasavchikov V.O. Rare-earth elements in the Bazhenov Fm. of the West Siberian sedimentary basin. *Litosfera.* 2011. No 6, pp. 38–54. (In Russian).

4. Filippov M.M., Deynes Yu.E. Traditional and heuristic approaches to the interpretation of geological and geophysical materials on promising for maksovite deposit discovery Tolvoja syncline site. *Uch. zap. PetrGU. Seriya: Yestestv. tekhnich. nauki.* 2012. No 2, pp. 49–56. (In Russian).

5. Melezhik, V.A., Fallick, A.E., Filippov, M.M., Larsen, O. 1999: Karelian shungite – an indication of 2.0Gaold metamorphosed oilshale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry. *Earth Sci. Rev., vol. 47.* 1–40.

6. Pourmand, A, Dauphas, N., Ireland, T.J. 2012: A novel extraction chromatography and MCICPMS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revising CIchondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances. *Chem. geol., vol. 291.* 38–54.

7. Qu, Y., Črne, A.T., Lepland, A., Van Zuilen, M.A. 2012: Methanotrophy in a Paleoproterozoic oil field ecosystem, Zaonega Formation, Karelia, Russia. *Geobiology, vol. 10.* 467–478.

8. Strauss, H., Melezhik, V.A., Lepland, A. 2013: Enhanced accumulation of organic matter: The Shunga event. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation, vol. 3.* 1195–1273.

Филиппов Михаил Михайлович – доктор геол.-минер. наук, зав. лабораторией, ИГ КарНЦ РАН [1]. <filipov@krc.karelia.ru>

Дейнес Юлия Евгеньевна – мл. науч. сотрудник, ИГ КарНЦ РАН [1]. <deines@krc.karelia.ru>

Лохов Кирилл Игоревич – канд. геол.-минер. наук, зав. кафедрой, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Институт наук о Земле. Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия. <k.lokhov@spbu.ru>

Первунина Аэлита Валериевна – канд. геол.-минер. наук, ст. науч. сотрудник, ИГ КарНЦ РАН [1]. <pervunina@krc.karelia.ru>

Лохова Ольга Владимировна – науч. сотрудник, Институт истории материальной культуры РАН (ИИМК РАН). Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, 191186, Россия. <o.lohova@yandex.ru>

Filippov Mikhail Mikhailovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the laboratory, IG KarRC RAS [1]. <filipov@krc.karelia.ru>

Dejnes Yulia Evgen'evna – Junior Researcher, IG KarRC RAS [1]. <deines@krc.karelia.ru>

Lokhov Kirill Igorevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Chair, St. Petersburg State University (SPbU), Institute of Earth's Sciences. 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russia. <k.lokhov@spbu.ru>

Pervunina Aelita Valerievna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, IG KarRC RAS [1]. <pervunina@krc.karelia.ru>

Lokhova Olga Vladimirovna – Researcher, Institute of History of Material Culture RAS. 18, Dvotsovaya emb., St. Petersburg, 191186, Russia. <o.lohova@yandex.ru>

[1] Институт геологии Карельского научного центра РАН. Ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, 185910, Россия.
Institute of Geology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 11, Pushkinskaya St., Petrozavodsk, 185910, Russia.