

УДК 553.9+001.8

БИОГЕННАЯ ГИПОТЕЗА ГЕНЕЗИСА ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ МЕТАСАПРОПЕЛИТОВ

М. М. Филиппов

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Изложены методологические принципы научной дискуссии по проблемам генезиса высокоуглеродистых пород (метасапропелитов) нижнего протерозоя Онежской структуры. Проанализированы доводы сторонников биогенной гипотезы с включением диапировой модели формирования залежей максовитов и шунгитов. Породы представлены как следствие многоэтапного процесса – от накопления сапропелевых осадков до дифференциации органоминерального вещества по плотности при развитии складок нагнетания. Рассмотрена возможность открытия крупных залежей максовитов на территории Толвуйской синклинали. Представлен краткий анализ доводов сторонников абиогенной гипотезы.

Ключевые слова: метасапропелиты, шунгит, максовит, шунгитоносные породы, нижний протерозой, генезис, методология исследования, биогенная гипотеза, диапировая модель.

M. M. Filippov. THE BIOGENIC HYPOTHESIS OF THE GENESIS OF PALEOPROTEROZOIC METASAPROPELITE

The author discusses the methodology of the diapir model – a new hypothesis of the genesis of maxovites and shungites. The rocks appear as the result of a complex multistage process: from accumulation of sapropel matter to its differentiation by density as diapirs developed. Comprehensive consideration of all arguments in support of application of the diapir model to the geochemical, lithological, and geological (structural localization) aspects of shungite matter, shungite bearing rocks, and their deposits leads to the conclusion that the biogenic hypothesis is more relevant than the non-biogenic one.

Key words: metasapropelite, shungite, maxovite, shungite bearing rocks, the Paleoproterozoic, genesis, research methodology, biogenic hypothesis, diapir model.

Введение

Научный и практический интерес к шунгитоносным породам и твердым битумам протерозоя Карелии выражается в многочисленных публикациях как в отечественных, так и в зарубежных изданиях. Это не случайно, поскольку до настоящего времени в полной мере не исследован генезис органического вещества (ОВ), которое

из-за высокой степени углефикации утратило многие генетические признаки. Породы, содержащие шунгитовое вещество*, востребованы практикой, поэтому важно понять закономерности формирования и локализации залежей, факторы метаморфизма, определяющего направления их использования. За длительную

* Шунгитовое вещество – ОВ, находящееся на апоантрацитовой стадии углефикации.

историю изучения шунгитоносных пород сформулировано несколько гипотез их генезиса, однако полноценная и развернутая дискуссия по этой проблеме до сих пор не состоялась. Приходится сталкиваться с тем, что в ряде публикаций дается взаимоисключающая интерпретация одних и тех же фактов, приводятся расплывчатые доводы в пользу высказываемых мнений, нередко точка зрения абсолютно не подкреплена объективной информацией. Авторы допускают вольное обращение с терминами и базовыми понятиями, выводы в некоторых публикациях носят налет наивного мифотворчества. Широкое обсуждение нерешенных вопросов, к сожалению, до настоящего времени не проведено даже на специальных конференциях [Углеродсодержащие формации..., 1998; Органическая минералогия, 2005], поскольку их программы были перегружены, тематика очень разнообразная, для работы «круглых столов» отводилось ограниченное время. Все это не способствовало выработке общепринятых терминов, отбору достоверных фактов и, в конечном счете, развитию базовых гипотез. В статье с позиций биогенной гипотезы изложены основные методологические принципы и способы организации экспериментальных и теоретических исследований метасапропелитов Онежской структуры, что, по мнению автора, позволит начать профессиональное, непредвзятое обсуждение, продвигнуться в решении проблемы генезиса шунгитового вещества, шунгитоносных пород и их месторождений.

Система доказательств в биогенной гипотезе генезиса шунгитов и максовитов*

Основная масса шунгитового вещества заключена в верхней подсвите заонежской свиты людиковийского надгоризонта Онежской синклиниальной структуры, расположенной на юго-востоке Карельского кратона. На архейском основании залегают осадочно-вулканогенные образования карельского комплекса: морские ятулийские и заонежские, субаэральные суйсарские и калевийские, общей мощностью до 3,0 км. По мнению ряда исследователей [Геология..., 1982; Билибина и др., 1991; Ахмедов, 1997], структура является наложенной прото-платформенной впадиной, контролируемой системой глубинных разломов; другие исследователи рассматривают ее как часть долгожи-

вущей рифтовой системы [Суйсарский..., 1999], либо как не получивший развития авлакоген, геодинамически связанный с людиковийскими структурами растяжения коры [Хейсканен, 1990]. Осадконакопление сопровождалось базальтовым платформенным вулканизмом и разнообразным вулканизмом рифтогенного типа. Возраст людиковийского надгоризонта определен (РМСК 1992 г.) интервалом 2080 ± 20 млн лет – нижний и 1950 ± 10 млн лет – верхний. Накопление ОВ приурочено к формированию глинисто-карбонатных осадков и происходило в условиях мелководного бассейна. На территории Толвуйской синклинали в подсвите выделено три пачки углеродсодержащих пород и девять горизонтов с содержанием $C_{орг}$ более 20 % [Михайлов, Купряков, 1985]. Первая пачка – туфогенно-осадочные породы с карбонатными прослоями и сульфидной вкрапленностью, покровы и отдельные потоки базальтов и андезитобазальтов, базальтовые туфы и туффиты [Геология..., 1982]. В пачке выделено три горизонта углеродсодержащих пород мощностью от 12 до 35 м, среди которых известны локальные залежи метасапропелитов с содержанием углерода до 45 %. Вторая пачка – углеродсодержащие алевролиты, кварц-серицит-биотитовые породы, доломиты, лидиты, силлы габбродолеритов. В ней шесть горизонтов метасапропелитов мощностью от 5 до 20 м, среди которых также известны локальные залежи метасапропелитов с содержанием $C_{орг}$ 15–80 %. Третья пачка сложена туфоконгломератами, углеродсодержащими алевролитами, кварц-биотит-серицитовыми, биотит-альбит-кварцевыми породами с прослоями доломитов. Горизонты высокоуглеродистых пород не обнаружены. Мощность верхней подсвиты 600–650 м. Все породы дислоцированы и испытали метаморфизм фации зеленых сланцев.

Месторождения максовитов представлены купольными телами и детально изучены на примере Максовского месторождения. В структурном отношении это близкая к изометричной антиклинальная складка четвертого порядка, которая в центральной части имеет амплитуду до 120 м. Складка приурочена к антиклинальной структуре третьего порядка (к Максовскому валу Толвуйской синклинали), имеет зональность в распределении углерода и минерального вещества. Особенности строения тел шунгитов достаточно полно исследованы на примере месторождения Шуньга. Это субпластовые тела небольшой мощности (до 4,5 м), субсогласные с вмещающими породами, слагающими северо-восточное крыло антиклинальной складки третьего порядка Хмельозерской синклинали.

* Максовиты и шунгиты – шунгитоносные породы (метасапропелиты), содержат соответственно 10–45 и 45–80 % углерода (шунгитового вещества), плотные, пелитоморфные. Максовиты – массивные и брекчированные, шунгиты имеют параллелепипедальную отдельность, напоминают антрацит.

За длительную историю изучения шунгитоносных пород получен обширный материал, подтверждающий биогенную природу ОБ метасапропелитов. Н. И. Рябов [1933] рассматривал шунгиты как древнейшие органогенные образования – сапропелиты. Н. А. Орлов и др. [1934] высказали предположение о прижизненном накоплении V и Ni «морскими растениями и животными». Я. Э. Юдович и М. П. Кетрис [1988] на основе геохимических признаков (содержание биофильных элементов) обосновали аналогию между шунгитоносными породами протерозоя Карелии и сапропелитами разного возраста. К. Ранкама [Rankama, 1948], опираясь на методологически выдержанный анализ изотопного состава широкого круга природных ОБ, сделал вывод о биогенном происхождении шунгитов Шуньгского месторождения. П. А. Борисов [1956] считал, что шунгитоносные породы – это метаморфизованные сапропелиты; их накопление происходило «в обстановке стоячих мелководных водоемов», где интенсивно развивалась примитивная жизнь, преимущественно водоросли. Осадки «постоянно обогащались растительными остатками богатой флоры»; в дальнейшем превращались в «сапропели» и «битуминозные» породы. А. В. Сидоренко и С. А. Сидоренко [1971] обосновали аналогию накопления ОБ в докембрии и в фанерозое. Шунгитоносные породы отнесены к биолитогеенным образованиям; среди аналогов шунгитоносных пород названы сапропелевые осадки Черного моря, горючие сланцы формации Грин-Ривер, сланцы Волжско-Печерского региона, кукерситы Эстонии, протерозойские сланцы Оутокумпу, т. е. доманикоидные формации разного возраста. Для доказательства биогенного происхождения шунгитового вещества использован состав остаточных битумоидов. Микрофоссилии в шунгитоносных породах впервые обнаружены В. И. Горловым в 1965 г. [1984]. Среди факторов, способствовавших накоплению ОБ, указываются: вулканизм и активные поствулканические процессы, благоприятный температурный режим и фациальные условия осадконакопления, сорбция ОБ глинистыми частицами. А. Г. Вологдин [1970] в шунгитоносных породах заонежской свиты идентифицировал два семейства сине-зеленых водорослей. Г. С. Калмыков [1974] подтвердил присутствие фоссилий в максовитах и указал, что породы прошли путь «от рыхлого сапропелевого осадка... через песчано-глинисто-карбонатные горючие сланцы до современного шунгита – метаморфического сланца». С. И. Жмур и др. [1993]

главным источником ОБ морских сланцев, начиная с раннего протерозоя до неогена, считают цианобактериальные маты, которые развивались в прибрежно-морских условиях (сублитораль, литораль, супралитораль) с глубинами, где возможен фотосинтез. В диагенезе преобразование первичной биомассы, осуществляемое сульфатредукторами и метаногенами, проходило в анаэробных условиях, в основном, по пути липидизации, гумификации и полимеризации, ведущему к образованию керогена с высоким нефтяным потенциалом. В хлороформном экстракте из максовитов Зажогинского месторождения выявлено [Бондарь и др., 1987] унимодальное распределение *n*-алканов с максимумом на C₁₅, отношение низших изопреноидов к сумме содержания пристана и фитана >1, отношение суммы пристан+фитан к сумме нормальных алканов C₁₇ и C₁₈ составляет 1,46, что типично для катагенетически зрелого биогенного ОБ. В максовитах обнаружены жирные кислоты, главным образом C₉-C₁₈, характерные для липидов низших водных организмов. По И. Р. Клесменту, Е. Б. Бондарю [1988], «высокая биопродуктивность фитоплактона 1,9–2,3 млрд лет тому назад была обусловлена переходом от атмосферы бескислородной к атмосфере окислительной». Предполагается, что часть ОБ имеет бактериальное происхождение. Б. Миком и др. [Муске et al., 1987] зафиксированы стераны (C₂₉), чье происхождение обычно связывают с цианобактериями или примитивными водорослями. Аналогичные данные получены в исследовании разреза Онежской параметрической скважины [Тарханов, Фрик, 2011].

Важным генетическим признаком древнего ОБ является изотопный состав углерода. Метасапропелиты Максовского месторождения имеют среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ –26,61 ‰, шунгиты Шуньгского месторождения –37,37 ‰, шунгитовое вещество природного кокса участка Декнаволоков –43,3 ‰ [Melezhik et al., 1999]. Основной причиной фракционирования изотопов углерода сапропелитов является жизнедеятельность продуцентов (водорослей и бактерий). Морские карбонаты, которые образуются из растворенной в морской воде HCO₃, имеют $\delta^{13}\text{C}$, близкое к нулю. Организмы, использующие для фотосинтеза растворенный CO₂, предпочитают, чем HCO₃, сдвигают изотопное отношение в пользу ¹²C [Mossman et al., 2001]. По этой причине весьма маловероятен какой-либо неорганический процесс, который бы дал очень низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ максовитов и шунгитов.

Известно, что с увеличением возраста керогенов и нефтей наблюдается общая тенденция понижения их $\delta^{13}\text{C}$, что обычно объясняется изменением интенсивности фотосинтеза, за счет чего в составе атмосферного CO_2 повышается содержание изотопа ^{12}C . Так, у керогенов с возрастом 2,5–2,0 млрд лет $\delta^{13}\text{C}$ находится в интервале от –20 до –46 ‰ [Strauss et al., 1992]. Например, протерозойские черные сланцы серии Франсевиль Габона [Weber et al., 1983; Mossman et al., 2001] в основании формации имеют $\delta^{13}\text{C}$ около –21 ‰, в верхних горизонтах –37 ‰ и даже –46 ‰. Предполагается, что накопление ОВ шло в замкнутом бассейне с прогрессирующим режимом стагнации и возрастающим использованием фитопланктоном биогенного метана. В раннем и среднем протерозое в течение временного интервала до 200 млн лет изменения $\delta^{13}\text{C}$ редко превышают 5 ‰, любые большие вариации обусловлены термальными эффектами [Strauss et al., 1992]. Обычные значения $\delta^{13}\text{C}$ ОВ осадочного происхождения находятся в интервале -28 ± 2 ‰, а остаточный кероген в регионах с высоким уровнем метаморфизма может иметь значения от –25 до –10 ‰, что связано прежде всего с выходом метана. Если принять для максовитов Максовского месторождения значение $\delta^{13}\text{C}$, равное –27 ‰, $\text{H/C} = 0,05$, то исходное для них ОВ должно было иметь $\delta^{13}\text{C} = -46$ ‰, а для шунгитов –50 ‰. Разница в возрасте шунгского и максовского керогенов не превышает 50 млн лет, а степень углефикации вещества примерно одинаковая. Следовательно, наблюдаемое различие их изотопного состава невозможно объяснить относительным возрастом керогенов или термальными эффектами.

Изотопный состав углерода керогена зависит от солёности бассейна осадконакопления. Например, различия в $\delta^{13}\text{C}$ эоценовых горючих сланцев формации Грин Ривер, отложенных в условиях солёного и пресноводного этапа развития озера, составляет около 5 ‰ [Ruble et al., 1994]. Однако при различной солёности Онежского бассейна минеральный состав максовитов и шунгитов должен был бы также заметно отличаться, чего в реальности не наблюдается, т. е. контраст в $\delta^{13}\text{C}$ не является следствием стратификации водного бассейна. Разницу лишь частично можно объяснить тем, что шунгиты в отличие от максовитов преимущественно состоят из полимеризованных продуктов катагенеза керогена. На это указывают величины $\Delta\delta^{13}\text{C}$ между природными битумами (антраксолитами) и породами Максовского и Шунгского месторождений. Для первого $\Delta = 1,2$ ‰, а для второго – 0,14 ‰. Таким образом, наиболее вероятной причиной наблюдаемых отличий в $\delta^{13}\text{C}$ может

быть смена видового состава биоты с автотрофной на метанотрофную, которая осуществлялась на временном отрезке, когда формировались седьмой и восьмой шунгитоносные горизонты. Действительно, из продуктов преобразования керогенов наиболее легкий изотопный состав имеет метан: в неизмененных осадках – менее –60 ‰, на стадии генерации нефти – около –45 ‰, в заключительную стадию преобразования керогена – около –30 ‰ [Strauss et al., 1992]. По-видимому, не случайно $\delta^{13}\text{C}$ шунгитоносных пород заонежской свиты проходит свой минимум на стратиграфическом интервале, соответствующем Шунгскому месторождению. Биогенное происхождение шунгитового вещества подтверждается также данными, полученными при реализации международного бурового проекта FAR-DEEP*.

Ряд сторонников биогенной гипотезы придерживались мнения о гумусовой природе исходного ОВ метасапропелитов. Известна полемика по этому вопросу между А. А. Иностранцевым, К. И. Лисенко и В. Н. Алексеевым [Иностранцев, 1886]. Б. Ф. Мефферт [1919, с. 282] отмечал: «...Спорадические тонкие прослойки... блестящего антрацита, названного проф. Иностранцевым „шунгитом“... не представляют какого-либо особого... минерала, а тем более похожей на смолу особой разновидности углисто-го вещества». И. Б. Волкова, М. В. Богданова [1985, с. 100], на основании изучения поверхностей травления, считают, что «не только полуматовая, но и блестящая разность шунгитов Шунгского месторождения образовались *in situ*... за счет гелификации древних растений». В действительности это надмолекулярные (мезофазные) структуры керогена [Khavari-Khorosani, Murchison, 1979]. Некоторые сторонники биогенной гипотезы иногда принимают за онколиты частично сохранившиеся в метасапропелитах коллоидные структуры, а глобулы кремнисто-углеродистого вещества, встречаемые в жеодах и прожилках в составе максовитов и шунгитов, – за микрофоссилии.

В целом биогенная гипотеза достаточно обоснована: ОВ имеет в основном первично-осадочную природу, а исходный углерод прошёл биогенный цикл (циклы) ассимиляции. Не только в Онежской структуре, но и в одновозрастных, близких по характеру заложения и развития структурах в период 2,1–2,0 млрд лет шло активное накопление ОВ. На Канадском щите – в бассейне Айрон Ривер-Кристалл Фоллс, в западной Африке – в уже упоминавшемся бассейне Франсвилль, на территории

* Эти данные включены в коллективную монографию, выход которой из печати предполагается в конце 2012 г.

Воронежского массива – в Тим-Ястребовской структуре. В бассейнах-аналогах фиксируются однотипные формы проявления ОВ, палеонтологические остатки, хемофоссилии, геохимические аномалии биофильных элементов, легкий изотопный состав углерода, следы генерации углеводородов (УВ), локальные проявления пород, аналогичных максовитам и шунгитам.

Правда, в научной литературе отсутствуют единые научные представления о генезисе пород с аномально высоким содержанием углерода. По Н. И. Рябову [1933], Шуньгское месторождение – это результат воздействия давления вышележащих пород на горизонты с ОВ, когда наиболее подвижное вещество выдавливалось в верхние горизонты и осуществлялась дифференциация исходного вещества по составу в пределах слоя. В. И. Горлов [1984] образование месторождений связывает с неравномерными вспышками биопродуктивности в мелководных участках бассейна с относительно спокойным гидродинамическим режимом (заливы, лиманы, лагуны), достаточным поступлением CO , CO_2 и минимальным – кремнезема, терригенного и пирокластического материала. А. М. Ахмедов [1997] объясняет образование локальных тел максовитов за счет накопления сапропелевых осадков в локальных депрессиях стагнационных стратифицированных бассейнов в супервосстановительной зоне с пассивной сульфатредукцией и за счет бактериального восстановления углерода. Т. е., по А. М. Ахмедову, высокие концентрации ОВ присутствовали в первичном осадочном материале, а развитие депрессий было связано с блоковым строением дна бассейна. В диапировой модели формирования месторождений максовитов и шунгитов [Филиппов, 2000] купольные структуры максовитов представлены как промежуточные, а субпластовые тела шунгитов – завершающие (экструзивные) стадии развития складок нагнетания по горизонтам сапропелитов. Предположение о генетической родственности месторождений, контрастно отличающихся формой, размерами, литологическими особенностями и содержанием шунгитового вещества, базируется на том, что в пределах Максовской залежи фиксируются локальные области, сложенные шунгитами, появляющимися, вероятно, при дифференциации вещества по плотности, которая сопровождает процесс развития основного купола, а в перекрывающих шунгитоносных горизонтах, сохранившихся на периферии, есть признаки экструзии из купола материала, близкого по составу к шунгитам.

Методологические принципы доказательств диапировой модели базируются на том, что подобные структуры должны иметь ряд характерных признаков: обязательную приуроченность структур четвертого порядка (куполов) к антиклиналям третьего порядка; наличие краевых синклиналей; литологические особенности пород, фиксирующие перемещение и дифференциацию органоминерального вещества в пределах купола (непостоянство состава, флюидалные текстуры, следы интрузий вещества); в случае вероятной деформации покровы – локальные разломы. Интерпретация фактического материала проводилась с учетом современных достижений в исследовании закономерностей образования, катагенеза и метаморфизма природных коллоидов (сапропелевых осадков), изменения их реологических свойств во времени, данных нефтяной геологии в изучении керогенов, генерации и миграции углеводородов, роли магматизма в накоплении осадочных пород, явлений контактового метаморфизма сапропелитов, закономерностей фракционирования изотопного состава углерода.

Основные положения диапировой модели подробно отражены в публикациях. Первичный состав минерального вещества исследован в работе [Филиппов и др., 1995], признаки первичного коллоидного состояния минерального и шунгитового вещества максовитов и шунгитов, особенностей катагенеза органоминеральных комплексов рассмотрены в [Филиппов и др., 1998; Атлас текстур..., 2007], теоретическое обоснование возможности развития купольных структур по горизонтам сапропелитов, а также текстурные, структурные, литохимические, геохимические и геофизические признаки, интерпретируемые как следствие формирования складок нагнетания и полидиапировых внутренних структур, – в работе [Филиппов, 2000]. Экспериментально подтверждено существование системы купольных структур в Толвуйской синклинали [Филиппов и др., 2004]. Для субпластовых проявлений шунгитов, рассматриваемых в модели в качестве элементов диапировых шляп, выявлены структурные признаки (мелкая гофрированность пластов, флюидалные текстуры), свидетельства движения вещества под давлением (будинирование слоя доломитов, следы течения), литологические (состав, текстура, структура шунгитов) и геохимические признаки (повышенное содержание биофильных элементов). В таблице приведены факты, привлекаемые для доказательства диапировой модели. Видно, что далеко не все они могут быть объяснены в границах традиционной логики сторонников био-генной гипотезы.

Трактовка геологических фактов, свидетельствующих о генезисе шунгитов и максовитов

	Факты	Трактовка в диапировой модели	Традиционная трактовка
		А. Литологические	
1	Экстремально высокое содержание углерода в породах, слагающих купольные (до 50 %) и локальные субпластовые (до 80 %) тела	Разная степень дифференциации органокремнистого вещества по плотности в процессе развития складок нагнетания	Исключительно высокая биопродуктивность бассейна, исключительно благоприятные условия захоронения и сохранности ОВ
2	Присутствие микро- и хемофоссилий (биомаркеров). Фрамбоиды пирита с шунгитовым веществом	Биогенная природа ОВ. Признаки жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий	Характерные признаки горючих сланцев
3	Метаколлоидные структуры, характерные для сапропелитов	Коллоидно-дисперсные системы, способные течь под нагрузкой с пластической вязкостью не выше 200 Па·с	Типичные горючих сланцев различного возраста
4	Преимущественно кремнистый состав минерального вещества. Признаки дегидратации гелей водного кремнезема	Вероятные источники кремнезема: гальмиролиз вулканического пепла, поствулканическая деятельность гидротерм	Для горючих сланцев редкое явление. Пример: менелитовые сланцы Карпат, в которых преобладает кремнезем с примесью гидрослюд и карбонатов; ОВ гумусовое, признаки органокремнистых соединений отсутствуют
5	Дефицит калия в сериците, избыток кислорода в кремнеземе	Признак, указывающий на то, что между минеральным и ОВ существовала химическая связь (органоглинистые и органокремнистые соединения)	Известное для сапропелитов явление
6	Слоистая текстура максовитов на участках выклинивания купольных тел и массивная, без признаков макро- и микрослоистости – в центральных частях куполов	Постепенное обособление органоминерального вещества от осадочного материала с низким содержанием ОВ	Труднообъяснимый факт
7	Наличие на периферии купола примеров нарушения первичной слоистости и обособления вещества с большим и меньшим содержанием углерода	Зарождение процесса дифференциации органокремнистого вещества	Труднообъяснимый факт
8	Большая мощность пород с высоким содержанием углерода: в центре Максовского купола – до 120 м, при этом купол частично срезан эрозией	Типичное явление для складок нагнетания	Мощность слоев горючих сланцев редко превышает 5–8 м
9	Зональность распределения углерода в купольных структурах: на периферии – меньшие концентрации, в центре – существенно большие	Дифференциация вещества по плотности в процессе формирования складки нагнетания, подтверждаемая при физическом моделировании	Труднообъяснимый факт
10	Зональность распределения параметра кварц/мусковит в купольных структурах: на периферии – меньшие значения, в центре – существенно большие	То же	Труднообъяснимый факт
11	Контрастное распределение углерода в шунгитоносных породах, перекрывающих купол, и близкое к среднему – на удалении от центра купола	Выжимание органокремнистого вещества из купола под влиянием аномально высокого давления	Труднообъяснимый факт
12	Флюидальные текстуры шунгитов Шуньгского месторождения; очевидные признаки выжимания органокремнистого вещества	Формирование диапировой «шляпы»	Труднообъяснимый факт
13	Будинированный слой шунгитоносных пород в составе субпластового тела шунгита Шуньгского месторождения	Экструзия органокремнистого вещества под давлением в слой с невысокой вязкостью и плотностью	Труднообъяснимый факт
14	Неравномерное распределение углерода в мелких складках Шуньгского месторождения	Известное явление для пликативной складчатости. Подтверждение низкой вязкости выдавливаемого материала	Не требуется альтернативного объяснения
		Б. Геохимические	
1	Повышенное содержание биофильных элементов: V, Ni, U, Se, As, Mo	Типичный признак для сапропелитов	Не требуется альтернативного объяснения
2	Снижение $\delta^{13}\text{C}$ от периферии купола к центру	Повышение доли подвижных УВ; возможное преобладание в составе дифференцированного по плотности вещества соединений кремнезема с полярными группами жирных кислот	Нет альтернативного объяснения
3	Резкое снижение $\delta^{13}\text{C}$ при движении по стратиграфической колонке от шестого к более высоким горизонтам	То же; вероятное присутствие полимеризованных газообразных УВ	Смена видового состава биоты и др.

Окончание табл.

	Факты	Трактовка в диапировой модели	Традиционная трактовка
		В. Структурные	
1	Большая первичная мощность слоев с ОВ (по расчетам – до 80 м)	Реальная возможность развития складок нагнетания	Редкое явление для осадочных бассейнов
2	Максовский купол – складка бескорневая	Слишком большая разница в мощности слоя в центре и на периферии купольных тел	Локальные депрессии дна бассейна
3	Очевидные признаки краевой синклинали	Обязательный элемент диапировых тел	Труднообъяснимый факт
4	Приуроченность купольных структур к анти-	Антиклинали в диапировой тектонике расте-	Труднообъяснимый факт
		тве первичных валов	
		а объясняется как	
		мейств) генетически	Труднообъяснимый факт
6	Очевидные признаки аномально высокого давления в купольных телах: массовое развитие автокластических брекчий, миндалин. Вероятная плотность пород с ОВ в начале катагенеза не превышала 1,8 г/см ³	Следствие катагенеза органического и минерального веществ. Появление вторичной пористости приводило к снижению плотности вещества, что должно было ускорять процесс развития диапиров	Не требуется альтернативных объяснений
7	Общий повышенный региональный и локальный тепловой фон, способствующий снижению вязкости осадочных пород с ОВ	Благоприятные условия для развития складок нагнетания	Не требуется альтернативных объяснений
8	На участке Тетюгино выявлены прямые и косвенные признаки локальной тектоники. Разломы сложены брекчиями, в которых цементом является максовит, в центральных частях он преобладает	Достаточно известное явление для соляной тектоники; характер заполнения трещин свидетельствует о выжимании органокремнистого вещества под давлением	Труднообъяснимый факт
9	Краевые брекчии на границе купол – вмещающая среда	Известное явление в диапировой тектонике	Труднообъяснимый факт

Диапировая модель не требует жесткой пространственной связи тел с тектоническими разломами, особых локальных активных источников ОВ, высокой биопродуктивности в докембрии на ограниченном временном отрезке и в локальных участках бассейнов, специфичных условий его стратификации, как это наблюдается, например, для эоценовой формации Грин Ривер*. Породы с большим содержанием ОВ, согласно модели, формируются в процессе длительной дифференциации органо-минеральных комплексов и частично за счет обогащения пород УВ на стадии мезокатагенеза исходного керогена. Появляется возможность объяснить наблюдаемые закономерности пространственного положения купольных структур максовитов и субпластовых тел шунгитов.

Эвристический потенциал диапировой модели

Любая гипотеза должна обладать возможностью получения новых фактов, о существовании которых трудно было или невозможно

* В бассейне Уинта (США) пласт Мехогени эоценовых горючих сланцев формации Грин Ривер имеет местами мощность до 43 м и содержание ОВ до 50 % [Verbeek, Grout, 1993]. Это биогенные озерные отложения, сформированные в условиях повышенной солености и экстремальной щелочности вод (содовые рассолы в наддонной части). Пласт является маркирующим, имеет признаки сезонной слоистости, распределение ОВ в нем неравномерное по горизонтали и вертикали, обусловленное меняющимся режимом трансгрессии и регрессии озера; сланцы мергелистые, в них также присутствует пирокластика.

предполагать до ее выдвижения. В качестве примера, нацеленного на апробацию и развитие положений диапировой модели, разрабатывается вспомогательное гипотетическое положение о существовании в синклинальных структурах куполов, аналогичных Максовскому месторождению. Детальные исследования проведены [Филиппов, Дейнес, 2012] на участке Тетюгино, расположенном на расстоянии около 2 км к северо-западу от Максовского месторождения. Здесь в период с 1967 по 2011 г. проведены картировочные работы, разведочное бурение, пройдены шурфы и каналы, выполнен большой объем геофизических наблюдений. Приповерхностный разрез участка представлен массивными среднезернистыми доломитами, лидитами с редкими будинами доломитов, массивными доломитами, слабо-брекчированными максовитами восьмого горизонта. По данным бурения, в шестом-восьмом шунгитоносных горизонтах вскрыты максовиты и шунгиты [Михайлов, Купряков, 1985], а в шестом горизонте – локальное тело с максимальной мощностью в центре около 42 м (Мельничная залежь), приуроченное, как и Максовский купол, к одной и той же антиклинальной складке третьего порядка. На участке выявлены структурные, литологические и литохимические признаки складки нагнетания: краевая синклиналь, флюидальные текстуры максовитов и шунгитов, краевые брекчии, быстрое увеличение мощности высокоуглеродистых пород шестого горизонта по направлению

к предполагаемому центру складки (в скв. 12 – около 14 м, а в скв. 19 – уже 42 м, при расстоянии между скважинами около 180 м), существенное превышение кларков концентрации углерода в породах шестого горизонта (55 %).

На участке встречаются уступы рельефа высотой до 2,5 м, имеющие разную длину и направление и расположенные на разных гипсометрических отметках. Они отождествляются со стенками блоков, смещенных по вертикали относительно друг друга. Между блоками выявлены зоны мощностью до 4 м, края которых сложены интенсивно брекчированными лидитами и доломитами, сцементированными шунгитом и антракосолитом, а центральная часть – породой, по составу близкой к шунгитам. Предполагается, что процесс брекчирования развивался при механическом воздействии купола на перекрывающие горизонты. Не случайно интенсивность брекчирования затухает при удалении от предполагаемого центра структуры. Края обломков брекчированных доломитов пропитаны битумом, что свидетельствует о высоком давлении флюидов. Шунгит брекчий рассматривается как следствие дифференциации первичного органоглинистого и органокремнистого вещества в куполе и последующей экструзии за его пределы. Уступы рельефа отмечаются высокими градиентами потенциалов естественной поляризации; о наличии разломов свидетельствует также контрастное распределение скорости прохождения преломленных волн. По данным электропрофилирования, на участке выделена достаточно симметричная область с пониженным сопротивлением, сохраняющая в основном свою форму при пересчете данных на глубину, которая интерпретируется как проекция центра купольной структуры. Относительное смещение по вертикали блоков-грабенов фиксируется на участке с помощью регионального геофизического репера (интервал с повышенной радиоактивностью). Сложная система деформации надкупольной толщи пород по своему характеру аналогична известным примерам из солянокупольной тектоники [Brinkman, Lücters, 1968]. При физическом моделировании процесса [Davison et al., 1993] в покрывке формируется центральный горст, обрамленный симметрично расположенными грабенами, причем периферийные грабены могут быть развернуты вплоть до обратного залегания слоев; в сводовом горсте горизонтальное залегание пород сохраняется; в грабенах – залегание слоев всегда нарушено, слои сильно деформированы.

Из теории диапиризма следует, что зарождение купола и краевой синклинали сопровождается распространением по питающему слою гравитационной неустойчивости, тем самым создается

возможность формирования соседних куполов и появления системы таких структур. Для расчета доминирующей длины волны использовано аналитическое решение уравнения Навье-Стокса [Selig, 1965]. Были приняты следующие начальные условия: вероятное время – поздняя стадия диагенеза, питающий слой – сапропелевый ил с алюмосиликатной, кремнистой и частично карбонатной минеральной основой; расчетная мощность питающего слоя от 40 до 60 м; общая мощность покрывки, начиная от кровли шестого горизонта, 500 м; средневзвешенная плотность питающего слоя $1,79 \text{ г/см}^3$. Сапропелиты в раннем диагенезе являются коллоидно-дисперсными системами, их вязкость могла быть равной 10^7 – $10^8 \text{ Па}\cdot\text{с}$, предел текучести $6,2 \cdot 10^3 \pm 1,1 \cdot 10^4 \text{ Па}$, при котором они могли течь с невысокой и постоянной пластической вязкостью [Горькова, 1975; Осипов, 1979]. Породы покрывки на заключительной стадии диагенеза могли иметь вязкость соответственно 10^{11} – $10^{13} \text{ Па}\cdot\text{с}$ и плотность не выше $2,6 \text{ г/см}^3$ [Горькова, 1975]. Расчетная длина волны для системы купольных структур, развивавшихся по питающему горизонту, составляет от 1600 до 2400 м. Экспериментально измеренное расстояние между Максовским и Мельничным куполами [Филиппов и др., 2004] в среднем равно $1750 \pm 50 \text{ м}$, т. е. находится в интервале теоретической оценки.

Итак, методологические основания дополнительной гипотезы, призванной подтвердить эвристический потенциал диапировой модели, сводятся к следующему: 1) гипотеза сформулирована в результате изучения предшествующих работ и анализа новых фактов; 2) выбор методов исследования сделан с учетом изучаемого явления (диапиризма) для реологических сред, представленных органокремнистым и органоглинистым веществом; 3) теоретические суждения и выводы в гипотезе образуют относительно непротиворечивую систему доказательств; 4) проверка гипотезы осуществлена в ранее не встречавшихся условиях. В результате удалось выявить прямые и косвенные признаки нового диапирового тела, получить доказательство существования шунгитов и максовитов экструзивного (инъекционного) типа, высказать обоснованное предположение о многоуровневых диапировых шляпах, оценить ведущую длину волны для соседних купольных структур. Дальнейшую апробацию диапировой модели планируется провести путем детального изучения синклинали структур, аналогичных Толвуйской синклинали, в которых также предполагается существование систем генетически связанных купольных и субпластовых залежей метасапропелитов.

Абиогенная гипотеза образования максовитов и шунгитов

Методологически было бы неверно обойти вниманием абиогенную гипотезу образования высокоуглеродистых пород и их месторождений. Ю. К. Калинин и др. [Шунгиты Карелии..., 1975] предполагали, что механизм накопления шунгитового вещества в основном связан с сорбцией УВ глинистым веществом. Позже Ю. К. Калинин [1984] уточняет, что накопление протошунгитового вещества в осадках заонежской свиты шло в форме «силикатно-органического комплекса, образование которого происходило в результате химического взаимодействия в растворе сложносилкатного вещества и шунгитоматеринских УВ». Концентрированные формы ОВ (максовиты и шунгиты) возникали при минимальном поступлении в осадок кремнезема, терригенного и пирокластического материала. В публикации [Калинин, 1990] уже утверждается, что формирование высокоуглеродистых пород шло в «эндогенном очаге в результате ликвационного процесса». В монографии [Калинин и др., 2008] выдвигается еще одна гипотеза: «У нас... имеются факты*, указывающие на то, что... шунгитовые залежи – это следы очень древнего грязевого вулканизма».

Ссылки на грязевые вулканы трудно признать основательными. Известно, что в породах максовитового типа отсутствуют признаки слоистости. Грязевые же вулканы, связанные либо с нефтяными залежами, либо с глиняными диапирами, развиваются циклично, и потому в их разрезе есть ясные признаки слоистости. В сопочной брекчии очень мало ОВ. В купольных структурах максовитового типа зафиксированы признаки развития аномально высокого пластового давления, обусловленного процессами катагенеза керогена и глинистых минералов. В качестве одного из них можно указать многочисленные зоны разгрузки УВ, хорошо видимые на естественных обнажениях (Максово, Подсосонье и др.). Под влиянием повышенного давления образуются автокластические брекчии, а также инъекции органокремнистого вещества в породах, перекрывающих диапировые структуры. Не исключено, что следы грязевого вулканизма со временем будут обнаружены, но в отложениях, перекрывающих залежи максовитов [Филиппов, Бискэ, 2010].

Л. П. Галдобина [1987, 1991] утверждает, что образование «караваеобразных тел высокоуглеродистых пород» связано с «газово-

флюидными» процессами, завершающими две фазы заонежского вулканизма. Поступление эндогенных углеводородов шло «на пересечении разломов нескольких направлений», «обнаружен объект, отвечающий по всем параметрам каналу поступления флюидов» [1991, с. 19]. Здесь следствие принимается за причину: контактовые изменения максовитов интерпретируются как следы первичной миграции УВ из эндогенных источников. В действительности внедрение силлов габбродолеритов было более поздним по отношению к завершению формирования купольных структур [Филиппов и др., 2009]. До их внедрения породы были слабо литифицированы, а ОВ еще не прошло стадию главной фазы образования нефти. Под влиянием тепла интрузий сапропелиты приобретали способность к течению за счет уменьшения вязкости, появления УВ и повышения пористости. Внедрение интрузий во влагонасыщенные, слабо литифицированные, обогащенные ОВ породы сопровождалось разнообразными экзо- и эндоконтактовыми явлениями, признаки которых хорошо сохранились, несмотря на развитие регионального метаморфизма. Шунгитовое вещество в габбродолеритах ассимилировано из вмещающих максовитов.

Механизм образования шунгитовых пород в работе П. Ф. Иванкина и др. [1987] представлен как процесс замещения (шунгитизации) осадочных пород УВ, поступающими в бассейн осадконакопления в результате активной мантийной дегазации. Скопления максовитов, по мнению авторов, локализируются в «бортах коробчатых синклиналей, ограничиваясь по восстанию разломами и ядрами узких приразломных антиклиналей» в «дислоцированных и рассланцованных складчатых породах близкосовершенно с внедрением силлов габбродиабазов» (с. 42). Авторы признают, что «остается неясным процесс эндогенного концентрирования углерода в форме компактных тел с содержанием на массу более 20–40 %» (с. 46). Заметим, что крупные залежи максовитов (Максовская, Калейская, Мельничная) локализируются не в бортах Толвуйской структуры, а в ее центре; по геолого-геофизическим данным, они приурочены к антиклиналям третьего порядка [Филиппов, 2000].

По гипотезе С. В. Купрякова и В. П. Михайлова [1988, с. 55], «УВ типа асфальта», скапливающиеся в кровле очагов базальтовой магмы, по глубинным разломам поступали на дно морского бассейна, где накапливались совместно с осадочным материалом. Локальные тела формировались вблизи источников

* Правда, факты ни в цитируемой книге, ни в других публикациях до настоящего времени не опубликованы.

вещества «из пересыщенных кремнеземом асфальтовых терм». Гипотеза не обоснована, поскольку при известных температурах базальтового расплава асфальтены, в лучшем случае, были бы преобразованы в антраксолит либо в кокс, т. е. потеряли бы способность к миграции. В. И. Березкин [2001] высказал идею о вероятном происхождении месторождений максовитов за счет горения метана. При этом не были приняты во внимание геологические условия осадкообразования, температурные границы существования подвижных УВ, неверно истолкованы имеющиеся фактические материалы. Полемическая статья В. В. Ковалевского [2009] содержит общие рассуждения об импактном событии и мантийной дегазации.

Заключение

Сторонники биогенной гипотезы для ее доказательства привлекают характерные признаки метасапропелитов: микрофоссилии, хемофоссилии (биомаркеры), метаколлоидные структуры в максовитах и шунгитах, изотопный состав углерода, серы, кислорода. В диапировой модели решается проблема необычно высокого содержания шунгитового вещества в локальных залежах максовитов и шунгитов; для доказательства привлекаются структурные, литологические признаки развития складок нагнетания, дифференциации органоминерального вещества по плотности; используются основные положения теории диапиризма для объяснения закономерностей пространственного расположения купольных структур; сведения из нефтяной геологии о катагенезе органического и минерального вещества для объяснения наблюдаемых текстурных и структурных особенностей высокоуглеродистых пород. В результате появляется возможность использования принципов биогенной гипотезы на практике, что повышает достоверность прогноза, поисков и разведки новых месторождений максовитов и шунгитов*.

У сторонников эндогенной гипотезы отсутствует развернутое обсуждение ключевых проблем генезиса максовитов и шунгитов (первичный состав ОВ, его источники, процессы формирования залежей максовитов и шунгитов), нет подробного анализа фактических материалов (изотопных, биогеохимических, текстурных) с последовательным выстраиванием взвешенных контраргументов биогенной гипотезе. Между отдельными высказываниями трудно

* Представление о системе генетически связанных залежей максовитов было успешно реализовано на практике при поисках и разведке месторождения «Мироновская-1».

уловить взаимосвязь, взаимодополнение, логичное поступательное развитие идей.

Учитывая все сказанное, автор приглашает к полемике по затронутым вопросам, которая должна базироваться на *общепринятых* в науке методологических принципах. В частности, любая гипотеза (вероятностное предположение о причинах изучаемого явления, открывающее возможное направление исследования) должна обладать принципиальной проверяемостью, вводиться не только для объяснения конкретного факта, но и более широкого спектра наблюдаемых явлений; логически вытекать из полученных знаний, служить организации фактического материала, выявлению противоречий, быть полезной науке и практике. Доказательство гипотезы проводится обоснованными фактами, в совокупности представляющими аргументы истинности или ложности выводов. Гипотеза должна обладать эвристическим потенциалом [Кондаков, 1971]. В исследовании вырабатывается трактовка наблюдаемых явлений, определяется система методов исследования, адекватных особенностям изучаемого явления, складывается категориально-терминологический аппарат, в котором каждый новый термин должен естественно входить в практику научного общения. Работа над гипотезой формирует глубокое понимание объекта, процессов его развития.

Литература

- Атлас текстур и микроструктур шунгитоносных пород Онежского синклинория* / Ред. М. М. Филиппов, В. А. Мележик. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 80 с.
- Ахмедов А. М. Бассейны черносланцевой седиментации раннего протерозоя Балтийского щита (этапы развития, режимы седиментации, металлоносность): Дис. ... докт. геол.-минер. наук. СПб., 1997. 353 с.
- Билибина Т. В., Мельников Е. К., Савицкий А. В. О новом типе месторождений комплексных руд в южной Карелии // Геология рудных месторождений. 1991. № 6. С. 3–14.
- Березкин В. И. К вопросу о генезисе карельских шунгитов в связи с особенностями их структуры // Геохимия. 2001. Т. 39, № 3. С. 253–260.
- Бондарь Е. Б., Клесмент И. Р., Кузик М. Г. Исследование структуры и генезиса шунгита // Горючие сланцы. 1987. 4/4. С. 377–393.
- Борисов П. А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: КФАН СССР, 1956. 92 с.
- Волкова И. Б., Богданова М. В. Шунгиты Карелии // Сов. геология. 1985. № 10. С. 93–100.
- Вологдин А. Г. Остатки организмов из шунгитов докембрия Карелии // ДАН СССР. 1970. Т. 193, № 5. С. 1163–1166.

Галдобина Л. П. Металлогения шунгитосодержащих и шунгитовых пород Онежской мульды // Материалы по металлогении Карелии. Петрозаводск: КФАН СССР, 1987. С. 100–113.

Галдобина Л. П. Предполагаемый канал поступления углеводородных флюидов в нижнем протерозое Онежской структуры // Геология и рудогенез докембрия Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1991. С. 18–23.

Геология шунгитоносных вулканогенно-осадочных образований протерозоя Карелии / Ред. В. А. Соколов. Петрозаводск: КФАН СССР, 1982. 208 с.

Горлов В. И. Онежские шунгиты: Дис. ... канд. геол.-минер. наук. Петрозаводск, 1984. 226 с.

Горькова И. М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 151 с.

Жмур С. И., Горленко В. М., Розанов А. Ю. и др. Цианобактериальная система – продуцент углеродистого вещества шунгитов нижнего протерозоя Карелии // Литология и полезные ископаемые. 1993. № 6. С. 122–127.

Иванкин П. Ф., Галдобина Л. П., Калинин Ю. К. Шунгиты: проблемы генезиса и классификации нового вида углеродистого сырья // Сов. геология. 1987. № 12. С. 40–47.

Иностранцев А. А. О шунгите // Горн. журн. 1886. № 2. С. 35–45.

Калинин Ю. К. Классификация шунгитовых пород // Шунгиты – новое углеродистое сырье / Ред. В. А. Соколов. Петрозаводск: КФАН СССР, 1984. С. 4–16.

Калинин Ю. К. Шунгитовые породы: структура, свойства и области практического использования // Записки ВМО. 1990. Ч. 119, вып. 5. С. 1–8.

Калинин Ю. К., Калинин А. И., Скоробогатов Г. А. Шунгиты Карелии – для новых стройматериалов, в химическом синтезе, газоочистке, водоподготовке и медицине. СПб.: СПбГУ, 2008. 218 с.

Калмыков Г. С. Свойства метаморфизованного сапропелита (на примере Карельского шунгита) // Проблемы геологии нефти. Вып. 4. М., 1974. С. 264–274.

Клесмент И. Р., Бондарь Е. Б. Биогеохимические аспекты эволюции сапропелитов по данным молекулярной палеонтологии // Горючие сланцы. 1988. 5/2. С. 129–146.

Ковалевский В. В. Шунгит или высший антраксолит? // ЗРМО. 2009. № 5. С. 97–105.

Кондаков Н. И. Гипотеза. Законы. Истина. Термин: Логический словарь. М.: Наука, 1971. 649 с.

Купряков С. В., Михайлов В. П. Забогинское месторождение шунгитовых пород // Новое в геологии Северо-Запада РСФСР. М., 1988. С. 9–86.

Мефферт Б. Ф. Шунгитское месторождение антрацита в Повенецком уезде Олонецкой губернии // Естественные производительные силы России. 1919. Т. 4, вып. 20. С. 275–288.

Михайлов В. П., Купряков С. В. Отчет о результатах детальной разведки юго-восточной (Максовской) залежи Забогинского месторождения шунгитовых пород за 1982–1985 гг. // Фонды ККГРЭ (Петрозаводск). 1985. 138 с.

Негруца В. З., Негруца Т. Ф. Черносланцевые реперы в докембрийской предистории материков // Углеродсодержащие формации в геологической истории. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1998. С. 9–10.

Органическая минералогия: Сб. материалов совещ. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. 271 с.

Орлов Н. А., Успенский В. А., Шаховцев И. Н. Опыт химического исследования шунгита // ХТТ. 1934. Т. 5, вып. 7. С. 601–619.

Осипов В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: МГУ, 1979. 232 с.

Рябов Н. И. Отчет о геолого-разведочных работах на Шуныгском месторождении шунгита за 1932–1933 гг. // Фонды КарНЦ РАН (Петрозаводск). 1933. С. 22–25.

Сидоренко А. В., Сидоренко Св. А. Органическое вещество в докембрийских осадочно-метаморфических породах и некоторые геологические проблемы // Сов. геология. 1971. № 5.

Суйсарский пикрит-базальтовый комплекс палеопротерозоя Карелии / Ред. В. С. Куликов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1999. 96 с.

Тарханов Г. В., Фрик М. Г. Остаточные битумоиды в породах протерозоя Онежской структуры // Онежская структура / Ред. Л. В. Глушанин и др. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2011. С. 266.

Углеродсодержащие формации в геологической истории: Тез. докл. междунар. симпоз. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1998. 145 с.

Филиппов М. М. Модели формирования месторождений шунгитоносных пород Онежского синклинали: Дис. ... докт. геол.-минер. наук. СПб., 2000. 310 с.

Филиппов М. М., Бискэ Н. С. Признаки АВПД в метасапропелитах заонежской свиты палеопротерозоя Карелии // Материалы конф. М.: ИПНГ РАН, 2010. С. 599–603.

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

Филиппов М. М., Голубев А. И., Ромашкин А. Е., Рычанчик Д. В. Минеральная составляющая шунгитовых пород Карелии: первичный состав, источники вещества и связь с шунгитовым углеродом // Литология и полезные ископаемые. 1995. № 5. С. 513–524.

Филиппов М. М., Медведев П. В., Ромашкин А. Е. О природе шунгитов Южной Карелии // Литология и полезные ископаемые. 1998. № 3. С. 323–332.

Филиппов М. М., Клабуков Б. Н., Суханов А. В. Экспериментальное определение основных параметров системы купольных шунгитоносных структур Толвуйской синклинали // Российский геофизический журнал. 2004. № 3. С. 25–30.

Филиппов М. М., Бискэ Н. С., Первунина А. В., Дейнес Ю. Е. Сопоставление известных и новых данных о геологическом строении Максовского месторождения шунгитоносных пород // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 12. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2009. С. 130–142.

Хейсканен К. И. Палеогеография Балтийского щита в карельское время. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1990. 128 с.

Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования / Ред. В. А. Соколов, Ю. К. Калинин. Петрозаводск: КФАН СССР, 1975. 240 с.

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 271 с.

Brinkman R., Löcters H. Diapirs in western Pyrenees and Foreland, Spain // Eds. J. Braunstein, G. O'Brien. Diapirism and diapirs. Tulsa, 1968. P. 275–292.

Davison I., Insley M., Harper M. et al. Physical modeling of overburden deformation around salt diapirs // Tectonophysics. 1993. Vol. 228. P. 255–274.

Khavari-Khorosani G., Murchison D. G. The nature of Karelian shungite // Chem. Geology. 1979. Vol. 26, N 1/2. P. 165–182.

Melezhih 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 Science Reviews. 1999. Vol. 47. P. 1–40.

Mossman D. J., Gauthier-Lafaye F., Jackson S. E. Carbonaceous substances associated with the paleoproterozoic natural nuclear fission reactors of Oklo, Gabon: paragenesis, thermal maturation and

carbon isotopic and trace element composition // Precambrian Research. 2001. Vol. 106. P. 135–148.

Mycke B., Michaelis W., Degens E. T. Biomarkers in sedimentary sulfides of Precambrian age // Adv. Org. Geochem. 1987. Vol. 13, N 4. P. 619–625.

Rankama K. New evidence of the origin of Precambrian carbon // Bull. Geol. Soc. Amer. 1948. Vol. 59, N 5. P. 389–416.

Ruble T. E., Bakel A. J., Philp R. P. Compound specific isotopic variability in Uinta Basin native bitumens: paleoenvironmental implications // Org. Geochem. 1994. Vol. 21. P. 661–671.

Selig F. A theoretical prediction of salt dome patterns // Geophysics. 1965. Vol. 30. P. 633–643.

Strauss H., Des Marais D. J., Hayes J. M. et al. Proterozoic organic carbon – its preservation and isotopic record // Early organic evolution: implications for mineral and energy resources / Eds. M. Schidlowski et al. Berlin, 1992. P. 176–210.

Verbeek E. R., Grout M. A. Geometry and structural evolution of gilsonite dikes in the eastern Uinta basin, Utah // U. S. Geological survey bull. 1993. N 1787. P. 1–42.

Weber F., Schidlowski M., Arnes J. D. et al. Carbon isotope geochemistry of the lower Proterozoic Francevillian series of Gabon (Africa) // Terra Cognita. 1983. Vol. 3. P. 22.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Филиппов Михаил Михайлович

зав. лаб. генезиса шунгитовых месторождений,
докт. геол.-минер. наук
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: filipov@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 570080

Filippov, Mikhail

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian
Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: filipov@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 570080