

УДК 553.9(470.22)

ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ МЕДВЕДЕВ

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и геофизики физико-технического факультета ПетрГУ, старший научный сотрудник Института геологии КарНЦ РАН
pmedved@krc.karelia.ru

**ИСКОПАЕМАЯ НЕФТЬ, ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ФОССИЛИИ
В ОТЛОЖЕНИЯХ НИЖНЕГО ПРОТЕРОЗОЯ ОНЕЖСКОГО СИНКЛИНОРИЯ**

В статье излагаются материалы, полученные в ходе выполнения раздела «Биопродуктивность осадочных бассейнов палеопротерозоя и эпигенез органического вещества» программы Президиума РАН № 18 «Происхождение и эволюция биосферы» в 2006–2008 годах. Проведены работы по изучению масштабов накопления и перераспределения органического вещества в палеопротерозойском Онежском осадочном бассейне (Фенноскандинавский щит) и предполагаемым биопродуцентам.

Ключевые слова: органическое вещество, шунгиты, фоссилии, нижний протерозой, Онежский синклиний, Фенноскандинавский щит

ВВЕДЕНИЕ

Среди известных осадочных бассейнов протерозоя Онежский синклиний уникален по масштабу накопления органического вещества (ОВ) [16]. В его пределах открыты необычные купольные структуры и локальные тела высокоуглеродистых пород (шунгитов и максовитов) с признаками дифференциации первичного органического вещества и миграции углеводородов [15]. На этой территории фиксируются разнообразные формы петрифицированных нафтоидов, позволяющие изучать особенности генерации и миграции нефти в докембрии. В верхних стратиграфических горизонтах очевидны процессы разрушения и переотложения первичных залежей ОВ. Оценка продуктивности биоты в докембрийских бассейнах осложнена тем, что не решена проблема учета потерь ОВ на стадии формирования осадков, в диагенезе, катагенезе и при метаморфизме, не всегда возможно определение даже его типа (первичное, миграционное или переотло-

женное); недостаточно изучены процессы рассеивания и вторичного концентрирования ОВ. Предполагается, что исследование указанных процессов возможно на примере Онежского синклиния, поскольку относительно низкий уровень метаморфизма обусловил сохранность генетических признаков ОВ, а также следов первичного взаимодействия гелей водного кремнезема, глины и ОВ. Это позволило установить основные этапы формирования локальных купольных структур; определить развитие процесса генерации и миграции углеводородов в пределах залежей, их участие в формировании куполов; выяснить особенности разрушения залежей и рассеивания ОВ. В данной статье приведены доказательства биогенной природы ОВ, свидетельства его эпигенетического перераспределения, в том числе вторичного концентрирования в купольных структурах и рассеивания при миграции и переотложении. Все многообразие процессов, обусловивших накопление огромных масс ОВ, а также не менее впечатляющую по масштабам генерацию углеводородов, которые оказа-

ли влияние на становление современной биосферы, объединено термином «палеопротерозойский феномен “Шуньга”» [22].

Огромные объемы ОВ на территории Онежского синклинория приурочены к формированию глинисто-карбонатных осадков заонежской свиты мощностью до 1 км (людикийский надгоризонт региональной стратиграфической шкалы, 2100–1920 млн лет [4]) в условиях мелководного бассейна с синхронным базальтовым вулканизмом. В настоящее время это метаморфизованные в зеленосланцевой фации шунгитоносные породы: алевролиты, аргиллиты туфы и туффиты, а также известняки, доломиты и силициты (лидиты). В составе свиты выделено девять горизонтов высокоуглеродистых пород, среди которых известны локальные залежи с исключительно высоким (30–80 %) содержанием свободного углерода (древнего ОВ). Согласно развиваемой гипотезе [15], породы с таким высоким содержанием древнего ОВ образованы в течение нескольких этапов. В начальный этап шло накопление сапропелевых илов, содержащих ОВ биогенного происхождения, водный кремнезем, глинистые минералы, в подчиненном количестве карбонатный, терригенный и пирокластический материал. В диагенезе ОВ взаимодействовало с водным кремнеземом и глинистыми минералами, в результате чего были образованы органо-минеральные соединения. После литификации осадков и перекрытия их более плотными породами в локальных участках структуры возникали благоприятные условия для развития складок нагнетания (куполов-диapiroв) по горизонтам с ОВ. В этом процессе наблюдается постепенное вторичное обогащение ОВ центральных и верхних частей диапировых структур за счет дифференциации осадочного материала по плотности. Третий этап связан с обогащением верхних частей купольных структур миграционными углеводородами. Позднее породы заонежской свиты подверглись эрозии, и терригенный материал, содержащий ОВ, накапливался уже в составе вышележащей кондопожской свиты (калевийский надгоризонт региональной стратиграфической шкалы, 1920–1800 млн лет [13]).

1. МАСШТАБЫ НАКОПЛЕНИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО ОВ

О масштабах накопления ОВ в Онежском бассейне (рис. 1) можно судить по ряду ранее сделанных оценок запасов сохранившегося углерода. Так, по данным Н. В. Лопатина, эта величина составляет $65 \times 10^9 \text{ м}^3$ [7]; по Л. П. Галдобинной [4] – $25 \times 10^{10} \text{ т}$. При этом объем исходного ОВ измерялся $650 \times 10^9 \text{ м}^3$, а ежегодная биопродуктивность палеопротерозойского бассейна достигала 2–4 кг $\text{C}_{\text{орг}}/\text{м}^2$ [8], что возможно при чрезвычайно благоприятных условиях. В расчетах Н. В. Лопатина принято, что мощность шунгитоносных отложений составляет 600 м, площадь распространения – 8000 км^2 , мини-

мальное содержание шунгитового вещества 2 %, а в зоне раннего метабазита сохранилось 10 % от объема исходного ОВ. Как видно, расчеты биопродуктивности были сделаны без учета факторов эпигенетического перераспределения ОВ.

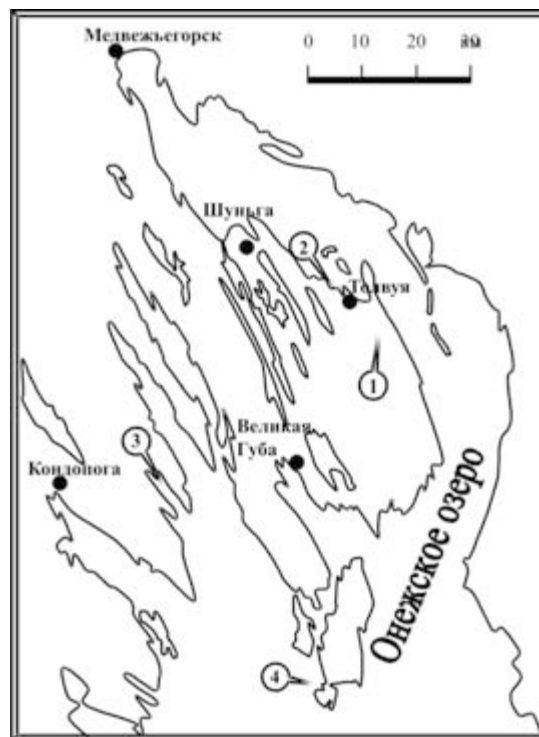


Рис. 1. Схема расположения залежей шунгитов в Онежском синклинории

Примечание. 1 – Максowo, 2 – Подсосонье, 3 – Чеболакса, 4 – о. Березовец.

Косвенным признаком огромных объемов отложения ОВ и генерации углеводородов в заонежских образованиях может служить легкий изотопный состав углерода карбонатных пород калевия ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ до 17,6 ‰). Минимум значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ совпадает с максимальными концентрациями антраксолитовых включений в отложениях кондопожской свиты. Отрицательные значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, достигающие до -11,8 ‰, становятся устойчивыми уже к верхней части заонежской свиты, что объясняется существованием мощного источника органического углерода, имеющего низкие значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$. Последствие заонежского резервуара проявляется в изотопном составе углерода вышележащих карбонатных пород суйсарской и кондопожской свит. Для суйсарских карбонатных конкреций $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ достигает -12,4 ‰, в нижней части кондопожской свиты карбонатные породы имеют -18,1 ‰, а в верхней -14,9 ‰. Нормальный изотопный состав углерода карбонатных пород ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}} = 0$ ‰) устанавливается лишь к верхам вазезерской свиты. Поскольку ни суйсарские, ни кондопожские отложения не содержат значимых количеств сингенетического ОВ, аномалии изотопного состава углерода можно объяснить лишь

влиянием его массового накопления в заонежское время. В процессе катагенеза и метаморфизма ОВ длительное время продуцировало жидкие и газообразные углеводороды и CO_2 , которые частично и были ассимилированы карбонатными породами.

Аналогичная закономерность известна для отложений нижнего протерозоя Курской магнитной аномалии: отрицательные значения изотопного состава углерода карбонатных пород наблюдаются не во время накопления ОВ (рыльская свита), а в последующее время (тимская свита). Известно также, что карбонатные породы и бикарбонаты пластовых вод над нефтяными залежами обычно имеют легкий изотопный состав углерода. Поскольку максимум выхода газовой компоненты приходится на этап мезокатагенеза, а ее общее количество в этот период достигает 30 % от исходного ОВ, можно предположить, что временное распределение количества катагенетических углеводородов коррелируется с распределением изотопного состава свободного и карбонатного углерода вышележащих отложений.

Данные по изотопному составу углерода шунгитового вещества пород заонежской свиты и антраксолитов [16] свидетельствуют, во-первых, о том, что вверх по разрезу $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ существенно меняется (от -26,4 до -39,5 ‰ для Максковского месторождения) и, во-вторых, что не все антраксолиты по $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ контрастно отличаются от потенциальных материнских пород (шунгиты и антраксолиты Шуньгского месторождения имеют практически одинаковые значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$: -37,07 и -37,36 ‰ соответственно). Можно предположить, что доля миграционного органического вещества (углеводородов) в шунгитоносных породах верхних частей разреза заонежской свиты очень большая, причем первоначально оно было частично газообразным.

О существовании масштабного процесса расщепления органического вещества в постзаонежское время свидетельствуют данные по изотопному составу углерода шунгитоносных пород калевия: $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ углеродсодержащих сланцев месторождения Нигозеро (г. Кондопога) равно -33,1 ‰, а пород третьей пачки заонежской свиты – -33,4 ‰. Близость значений может служить признаком переотложенного характера генезиса шунгитового вещества калевийских пород, источником терригенного шунгитоносного материала которых, очевидно, служили верхние горизонты заонежской свиты.

2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВИДЕТЕЛЬСТВАХ ЖИЗНИ В ПАЛЕОПРОТЕРО- ЗОЙСКОМ ОНЕЖСКОМ БАССЕЙНЕ

Биогенная природа ОВ (теперь – свободного углерода) пород заонежской свиты обоснована общими геологическими фактами, палеонтологическими, геохимическими (в том числе биогеохимическими) и физическими признаками [15]. В шунгитоносных толщах Онежского синклиория к настоящему времени установлен пол-

ный набор палеонтологических объектов докембрия: в карбонатных породах – строматолиты и онколиты, в шунгитоносных пелитах и алевролитах – микрофоссилии, в кремнистых породах – стириолиты и микрофоссилии; в высокоуглеродистых породах найдены следы цианобактериальных матов и хемофоссилии (биомаркеры).

Многообразие порообразующих строматолитов и онколитов в подстилающих карбонатных толщах ятулия Карелии свидетельствует о развитой цианобактериальной жизни и сильном ее влиянии на осадконакопление во время, предшествовавшее накоплению ОВ в осадках заонежской свиты [9]. В эвапоритовых условиях мелководных ятулийских водоемов жизнедеятельность многочисленных цианобактериальных сообществ способствовала осаждению и накоплению мощных (в сотни метров) толщ доломитов. При этом цианобактерии в ископаемом состоянии не сохранились, до нас дошли только следы их жизнедеятельности в виде построек строматолитов и онколитов. ОВ не уцелело из-за относительно высокого окислительного потенциала среды, способствовавшего «выгоранию» органики. Процесс накопления органических карбонатных пород продолжался вплоть до начала заонежского времени и был прерван интенсивной магматической деятельностью, изменившей характер осадконакопления с существенно карбонатного на вулканогенно-терригенный и хемогенный. При этом исчезли строматолитообразующие цианофицеи и появились новые сообщества, в том числе бактерии-метаногены. Вулканические процессы способствовали жизнедеятельности микробных сообществ, а восстановительные условия среды обитания – сохранению ОВ в ископаемом состоянии.

Качественное и количественное многообразие фоссилий в шунгитоносных породах Онежского синклиория позволяет утверждать, что первичным источником ОВ в осадках является биомасса, накопленная в восстановительных условиях при сильном влиянии основного (базальтового) вулканизма. В шунгитоносных породах найдены микрофоссилии, интерпретируемые как остатки бентосных цианобактерий [6]. Последние являются представителями донных сообществ, обитающих в фотической зоне. Следовательно, и содержащие их остатки шунгитоносные породы образовались в мелководных, а не в глубоководных условиях из оседавших планктонных организмов, как предполагают некоторые исследователи [12]. Бентосные цианобактерии развиваются в составе сложных, хорошо структурированных микробных сообществ – цианобактериальных матов. Они известны сейчас во многих прибрежных местообитаниях и озерах. Продуктивность современных цианобактериальных матов достаточно высока: 8–12 г/м² органического углерода в сутки [18]. Таким образом, признание цианобактериальных матов как источника органического углерода [20] делает весьма возможным накопление больших объемов углеродсодержащих отложений.

3. НОВЫЕ ДАННЫЕ

Спороподобные органостенные микрофоссилии, или акритархи, в изобилии встречаются в докембрийских, палеозойских и более молодых отложениях. По современным представлениям, они являются остатками одноклеточного фитопланктона, на что указывает их приуроченность исключительно к морским фациям и химический состав, близкий кутину или спорополленину. Микрофоссилии известны с верхнего архея. Наиболее целенаправленно и систематически микрофитологическому изучению подвергались дорифейские породы Карелии, поэтому собран сравнительно полный материал, позволяющий судить о распределении микрофоссилий в разрезе раннего докембрия этого региона. Б. В. Тимофеевым в нигозерских сланцах (кондопожская свита) были обнаружены *Protosphaeridium densum* Tim., *P. tuberculiferum* Tim., *P. flexuosum* Tim., округлые силуэтные формы и обломки органических пленок [14]. В «глинисто-алевролитовых черных сланцах» бесовецкой свиты им установлены многочисленные «микрофитофоссилии», часть из которых была интерпретирована как эукариоты (*Nucellosphaeridium minutum* Tim.). Впоследствии многие из ранее описанных форм были критически пересмотрены. В последнем каталоге дорифейского комплекса акритарх оставлены как реально обоснованные лишь два вида: *Leiosphaeridia crassa* (Naum.), *Stictosphaeridium sinapticuliferum* (Tim.), а также *Symplassosphaeridium* sp. [10]. В ходе наших работ была предпринята попытка повторить находки микрофоссилий, сделанные Б. В. Тимофеевым. Изучались шлифы и препараты из коллекции образцов, отобранных из керна буровых скважин, а также из карьеров и естественных выходов горных пород. Поиск и изучение микрофоссилий проводились в отделе палеоботаники геологического департамента Льежского университета (Бельгия) с использованием современного оборудования по методике, разработанной профессором Э. Жаво при исследовании протерозойских акритарх Австралии [19]. Обнаружены микрофоссилии (акритархи) в мацерированных препаратах из метаглинистых прослоев пород верхней подсвиты кондопожской свиты Онежского синклинория. Находки предварительно отнесены к роду *Stictosphaeridium* (рис. 2). Микрофоссилии найдены и в породах верхней части калевийского надгоризонта (шуйская, вашезерская свиты и их аналоги в синклиналях второго порядка). Находки микрофоссилий (акритарх) стратиграфически приурочены к средней (верхняя подсвита кондопожской свиты) и верхней частям разреза калевийского надгоризонта в пределах Онежского синклинория. Фациально акритархи находятся в глинистых прослоях, накопившихся в бассейне до 200 м глубиной в удаленных от берега спокойных условиях во время отсутствия привноса грубозернистых продуктов переработки вулканического материала, а также ОВ (углерода).

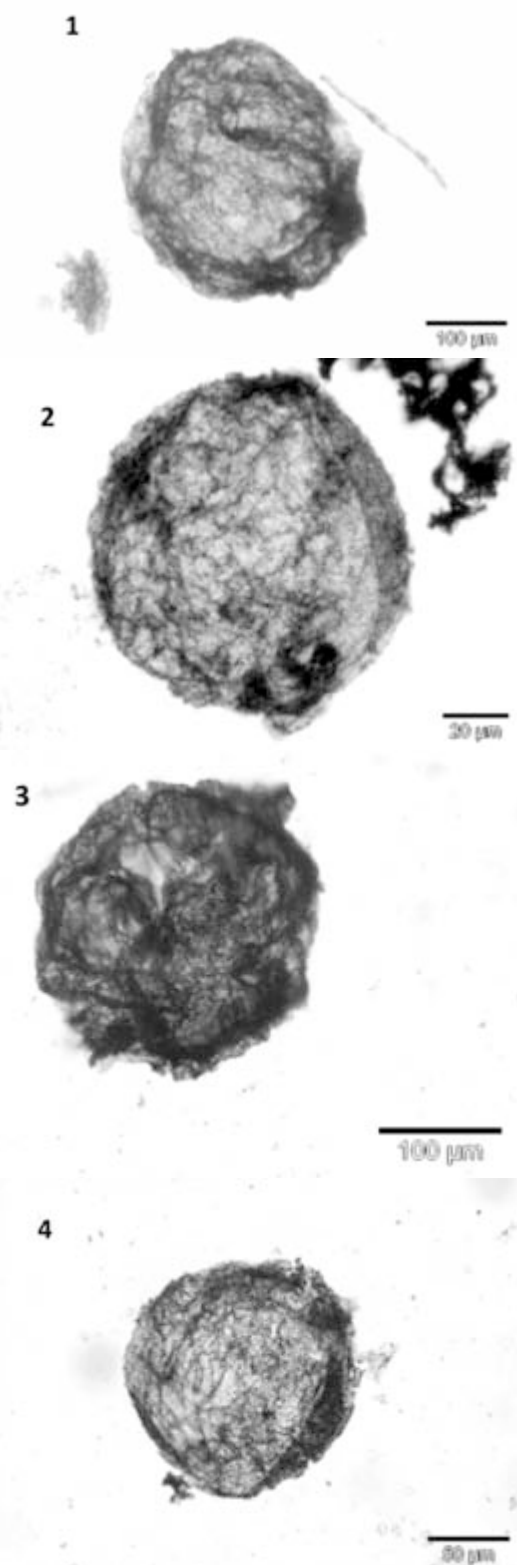


Рис. 2. Микрофоссилии (акритархи) рода *Stictosphaeridium* (Timofeev, 1966), emend. Mikhailova et Jankauskas, 1989 из метаглинистых прослоев верхов кондопожской свиты

Примечание. 1, 2 – скважина 110, глубина 17,0 м. 3, 4 – скважина 1, глубина 53,0 м.

В препаратах, изготовленных из шунгитоносных метапелитов верхнезаонежской подсвиты, были обнаружены единичные экземпляры акритарх плохой сохранности, определяемые как *Protosphaeridium* sp., и обрывки углефицированных водорослевых пленок.

В дальнейшем будет определена биологическая принадлежность найденных микрофоссилий (прокариоты-цианобактерии или эукариоты-протисты). Планируется исследование кернового материала, полученного по проекту ICDP FAR-DEEP [21], с целью обнаружения новых морфологических признаков в шунгитоносных породах Онежского синклинория. Предполагается провести изучение их фациальной приуроченности, связи с осадконакоплением, закономерностей стратиграфического и площадного распространения, а также корреляционных возможностей. Будет продолжена работа по выявлению в шунгитоносных породах нижнего протерозоя геохимических признаков существования микробиальных сообществ.

4. АРТЕФАКТЫ

Процессы регионального метаморфизма зеленосланцевой фации и низкотемпературного гидротермального метаморфизма, проявленные в Онежском синклинории, вызвали перекристаллизацию фоссилизированных остатков предполагаемых микроорганизмов и следов их жизнедеятельности. Часть выделенных ранее форм впоследствии была подвергнута критическому пересмотру. Ошибки в палеонтологическом определении могли возникнуть и возникали также из-за неправильной или неполной оценки геологического положения того или иного объекта исследований. Поскольку подобные просчеты подвергают сомнению биогенную гипотезу об источнике углерода в шунгитоносных породах в целом, предлагается альтернативный вариант трактовки происхождения ряда образований, описанных в литературе как морфофоссилии.

В лититах заонежской свиты описаны колониальные коккоидные микрофоссилии [3]. Достоверность их идентификации в настоящее время подвергается сомнению. Поскольку лититы диагнетического «литит-доломит-шунгитового» комплекса имеют гидротермальную природу и секущие контакты с осадочными породами, скорее всего, это метаколлоидные глобулярные формы, образованные в процессе старения органокремнистых гелей. Метаколлоидными образованиями, вероятно, являются и «округлые онколитоподобные» формы, выявленные в высокоуглеродистых породах Зажогинского месторождения [5].

В антракосолитах Шунги, заполняющих субпластовую жилу, оптическими методами были обнаружены и описаны структурные элементы, «схожие со строением древесины» [2], которые, по-видимому, обусловлены мезофазным состоянием углефицированного природного битума.

Известны обломочные включения антракосолита (рис. 3) в алевролитах кондопожской свиты, интерпретировавшиеся ранее как проблематичные отпечатки водорослей, близких к классу багряных, «обитавших в мелких теплых бассейнах» [17]. Сейчас они отнесены к бывшим плавающим на поверхности бассейна сгусткам тяжелой нефти, окисленной сначала до мальты, и погруженным затем на дно [11]. В их составе много окатанного терригенного материала, захваченного битумом при его захоронении в условиях мелководной, волноприбойной зоны.

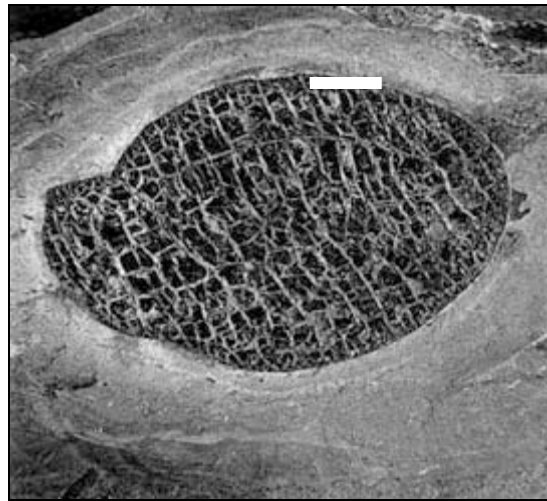


Рис. 3. Антракосолитовые включения в метаалевролите кондопожской свиты. Фото В. А. Мележика

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы исследований по программе Президиума РАН № 18 «Происхождение и эволюция биосферы» отражены в «Атласе текстур и микроструктур шунгитоносных пород Онежского синклинория» [1]. Это систематизация накопленных за многие годы материалов о формах проявления шунгитового вещества, о его распределении в породах, о признаках происхождения минерального и шунгитового вещества, шунгитоносных пород и месторождений. Вместе с таблицами фотографий он дает наглядное представление о разнообразии проявления шунгитового вещества в раннепротерозойских отложениях; демонстрирует возможность выявления и изучения генетических признаков первичного ОВ (сапропелевое, миграционное, смешанное, переотложенное), основных процессов его преобразования, ведущих к появлению миграционных форм углеводородов. Исключением являются лишь максовиты и шунгиты, которые по ряду генетических признаков отнесены к экструзивным сапробитумолитам. Именно они образуются в процессе дифференциации первичного осадочного вещества по плотности и его выжимания (экструзии) в складки нагнетания, а шунгитовое вещество в них является смешанным (са-

пропелевым и миграционным). Этой группе пород в атласе уделено основное внимание. Шунгитоносные породы благодаря низкому уровню метаморфизма являются благодатным объектом для исследования условий осадконакопления в протерозое, для изучения потенциальных источников ОВ, процессов взаимодействия и взаимовлияния органического и минерального вещества в катагенезе и при метаморфизме; исходное ОВ пород является сапропелевым (биогенным), в изверженных породах оно либо ассимилированное (результат преобразования ксенолитов), либо миграционное. Одновременно показано, что многие экзотичные формы минерального вещества шунгитоносных пород, принимаемые за палеонтологические свидетельства происхождения ОВ, являются результатом химического взаимодействия и взаимного влияния коллоидов органического и минерального веществ.

Очевидна необходимость продолжения исследований осадочных пород ятулийского, людиновского и калевийского надгоризонтов нижнего протерозоя Онежского синклинория с целью уточнения характера биоты, давшей первичное ОВ. Следует определить динамику ее развития, выявить причинно-следственные связи между ростом содержания кислорода в атмосфере и процессами накопления ОВ в осадках, изучить в стратиграфической последовательности изотопные данные, молекулярные биомаркеры, морфологические фоссилии начиная с первых проявлений захороненного ОВ. Предполагаемые морфологические и биопленки уже описывались из кремней, сланцев и фосфоритов нижнего протерозоя Карелии и Кольского полуострова, но их природа остается невыясненной. Для того чтобы исключить такие формы, как газово-жидкие включения и пустоты, необходимо убедиться, что предполагаемые микрофоссилии имеют органическую природу. Помимо простых форм, небиологические процессы могут также формировать микроскопические образования, способные абсорбировать простые абиогенные органические соединения. После метаморфизма подоб-

ные структуры могут демонстрировать морфологию и Рамановский спектр типичной микрофоссилии. Поэтому изучаются дополнительные химические, минералогические и изотопные свидетельства биологической активности. Интеграция морфологических характеристик с результатами, полученными различными неразрушающими методами, будет решающей как для распознавания самих микрофоссилий, так и для определения их эволюционного значения. Применение масс-спектрометрии для изучения состава отдельных углеродистых микрообразований в породах архея и протерозоя уже имеет положительный опыт. Эти неразрушающие методы анализа могут быть использованы для характеристики других предполагаемых биогенных образований, таких как строматолитовые наслоения, а также для установления связи между микрофоссилиями и вмещающей породой.

Необходимо также продолжение исследований эпигенетического перераспределения ОВ в пределах отдельных горизонтов и между горизонтами как процесса, ведущего к образованию высокоуглеродистых пород.

Эти проблемы предполагается изучить при реализации программы международного проекта «Архейско-палеопротерозойский переход: возникновение современной земной системы» в рамках Международной программы континентального бурения (ICDP). В период с 2009 по 2012 год интернациональным коллективом специалистов будут выполнены междисциплинарные исследования полученного в 2007 году керна буровых скважин по проблемам становления окислительной атмосферы, глобального изменения углеродного цикла в ятулии, образования самых древних гигантских залежей нефти (феномен «Шуньга») и ряда других событий, важных для понимания закономерностей формирования современной биосферы [23].

Исследования проведены при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 18 (2006–2008 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бискэ Н. С., Медведев П. В., Мележик В. А., Ромашкин А. Е., Рычанчик Д. В., Филиппов М. М. Атлас текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклинория / Под науч. ред. М. М. Филиппова, В. А. Мележика. Петрозаводск: Скандинавия, 2007. 80 с.
2. Волкова И. Б., Богданова М. В. Шунгиты Карелии // Сов. геология. 1985. № 10. С. 93–100.
3. Вологдин А. Г. Остатки организмов из шунгитов докембрия Карелии // ДАН СССР. 1970. Т. 193. № 5. С. 1163–1166.
4. Галдобина Л. П. Шунгитовые породы // Докембрийские индустриальные минералы Карелии. Петрозаводск, 1993. С. 45–51.
5. Горлов В. И. Онежские шунгиты (геология, генезис, прогнозная оценка): Дисс. ... канд. г.-м. наук. Петрозаводск, 1984. 226 с.
6. 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. № 2. С. 122–127.
7. Лопатин Н. В. Эволюция биосферы и горючие ископаемые // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1979. № 7. С. 5–22.
8. Лопатин Н. В. Образование горючих ископаемых. М.: Недра, 1983. 192 с.
9. Макарихин В. В., Кононова Г. М. Фитолиты нижнего протерозоя Карелии. Л.: Наука, 1983. 156 с.
10. Микрофоссилии докембрия СССР. М.: Наука, 1989. 191 с.
11. Мишунин А. З. А. Литогенез органического вещества и первичная миграция нефти в карбонатных формациях. Л.: Недра, 1978. 152 с.
12. Негруца В. З. Раннепротерозойские этапы развития восточной части Балтийского щита. Л.: Недра, 1984. 270 с.

13. Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России: Объяснительная записка. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 13 с.
14. Тимофеев Б. В. Микрофитофоссилии раннего докембрия. Л.: Наука, 1982. 128 с.
15. Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 280 с.
16. Филиппов М. М., Голубев А. И., Медведев П. В. и др. Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. 208 с.
17. Яковлева В. В. О находках проблематических отпечатков водорослей в сланцах среднего протерозоя Карелии // Остатки организмов и проблематика протерозойских образований Карелии. Петрозаводск, 1966. С. 19–25.
18. Cohen Y., Aisenshat Z., Stoler A., Joergensen B. B. The microbial geochemistry of Solar Lake, Sinai // Biogeochemistry of ancient and modern environments / J. B. Ralph, P. Trudinger, M. R. Walter (Eds.). Berlin: Heidelberg; N.-Y.: Springer, 1980. P. 167–172.
19. Javaux E. J., Marshall C. P. Deciphering the record of early life in Precambrian oceans using combined microscopy and microchemistry of organic-walled microfossils. Goldschmidt Conference Abstracts. 2007. A 442.
20. Lanier W. P. Approximate growth rates of Early Proterozoic microstromatolites as deduced by biomass productivity // Palaios. 1986. № 1. P. 525–542.
21. Melezhik V. A., Fallick A. E., Hanski E. et al. Emergence of the Modern Earth System during the Archean-Proterozoic Transition // GSA Today. 2005. Vol. 15. P. 4–11.
22. Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M. et al. 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.
23. Melezhik V. A., Filippov M. M., Medvedev P. V. et al. Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project: Emergence Of The Aerobic Biosphere During The Archean-Proterozoic Transition; Recent Achievements And Future Challenges // Северная Европа в XXI веке: природа, культура, экономика: Матер. междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 324–327.