ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

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



Научная статья

Об особенностях состава и свойств древних нефтегазоматеринских отложений

М.А.Большакова✉, К.А.Ситар, Д.Д.Кожанов
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Большакова М.А., Ситар К.А., Кожанов Д.Д. Об особенностях состава и свойств древних нефтегазоматеринских отложений // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 700-707. EDN MKTALQ

Аннотация. Породы докембрийского возраста широко распространены на всех континентах земного шара, при этом осадочные ассоциации этих отложений представляют особый интерес при поиске новых месторождений нефти и газа. Для проведения комплексного геолого-геохимического анализа и оценки исходного генерационного потенциала органического вещества нефтегазоматеринских пород докембрия применяется широкий комплекс палеонтологических, литологических, геохимических методов. Исследовались особенности обстановок накопления органического вещества, специфики его состава в осадочных горных породах и генерационных характеристик. Проведены собственные исследования и обобщение публикаций других авторов по докембрийским толщам, обогащенным органическим веществом, – их распространению, биомаркерным и изотопным характеристикам и схемам реализации генерационного потенциала органического вещества докембрия в катагенезе. На различных примерах проиллюстрированы геохимические особенности исходного органического вещества, определен его тип и характер эволюции реализации генерационного потенциала.

***Ключевые слова*:** протерозой; нефть; нефтегазоматеринские породы; органическое вещество; нефтегазоносные бассейны

Поступила: 22.04.2024 ***Принята: 24.09.2024*** ***Онлайн: 12.11.2024*** ***Опубликована: 12.11.2024***

Введение. Нефтегазоматеринские (НГМ) свойства, или нефтегазоматеринский потенциал, осадочных пород – это интегральная величина, которая зависит в первую очередь от количества органического вещества (ОВ) в породе и его качества, т.е. генетического типа керогена. Органическое вещество протерозойских пород имеет в большей части близкий исходный биоценотический состав. Несмотря на то, что уже в раннем рифее появились донные строматолитообразующие и бурые водоросли, основная роль в формировании ОВ протерозойских пород принадлежит остаткам водорослей, в основном планктонных сине-зеленых (Gloecapsamorpha) и акритарх (Acritharcha), и бактериям [1]. Следствием этого явился довольно однообразный состав ОВ древних отложений – оно представлено сапропелитами и его окисленными разностями – оксисапропелитами. В разной степени окисленное сапропелевое ОВ характерно для пород практически всех подразделений докембрия. НГМ породы присутствуют на разных стратиграфических уровнях рифея. Они отмечены в отложениях нижнего, среднего и верхнего рифея в осадочных и нефтегазоносных бассейнах (НГБ) практически всех континентов.

Одни из самых древних НГМ пород обнаружены в нижнем рифее. Эти толщи представлены темно-серыми и черными аргиллитовыми, аргиллито-алевритистыми, аргиллито-известняковыми и глинисто-доломитовыми ассоциациями. Максимальные концентрации органического углерода ($C_{орг}$) в них варьируются в широком диапазоне, достигая 6-7 % (на примере НГМ пород Восточной Сибири [2, 3]). Ранний рифей характеризуется господством прокариотов, в основном сине-зеленых водорослей – донных строматолитообразующих и планктонных, а также бактерий. Встречаются представители планктонных водорослей, относимые к Acritharcha, сине-зеленых Gloeocapsamorpha. Кроме того, в нижнерифейских отложениях обнаружены остатки донных водорослей, похожих на бурые (?) водоросли Vendotaenia. Вероятно, уже в раннем рифее появились

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 700-707
© М.А.Большакова, К.А.Ситар, Д.Д.Кожанов, 2024

эукариотные и даже многоклеточные водоросли Phaeophita [4]. В концентратах ОВ раннего рифея встречаются фитомицеты (грибы). Остатки бурых (?) наряду с остатками сине-зеленых водорослей встречены и в отложениях среднего и верхнего рифея. В среднем и особенно позднем рифее широко развиты планктонные водоросли Acritharcha, часть из них (одноклеточные с ядром), вероятно, относится к группе Chlorophita [5].

В среднерифейских разрезах, сохранившихся до наших дней, также выделяются интервалы, содержащие повышенные концентрации ОВ, которые характеризуются сильной изменчивостью не только содержаний $C_{орг}$, но и степени его преобразования. Например, в Восточной Сибири к нефтегазоматеринским породам относятся темноцветные аргиллиты и мергели стрельногорской, деревнинской и нижнетунгусской (буровая) свит, распространенные в Туруханском районе; шунтарской свиты Енисейского кряжа и черные глинистые известняки и доломиты с прослоями аргиллитов малгинской свиты в Алдано-Майском прогибе на востоке Сибирской платформы. Самые высокие содержания ОВ отмечены в малгинской свите ($C_{орг}$ до 5-8 % [5]). При этом углерод керогена шунтарской свиты наиболее изотопно-легкий, а значения $\delta^{13}C_{НОВ}$ снижаются в западном направлении от –26,0 до –26,3 ‰ (горбилокско-глушихинская зона) до –31,0 ‰ (каменская зона), что отражает более высокую степень катагенетического преобразования ОВ в первых двух зонах [6]. Кроме того, в Куюмбинском районе в ряде скважин вскрыты темно-серые глинистые известняки, доломиты и мергели тайгинской свиты, содержание ОВ в которых достигает иногда 4,5 % (при средней концентрации 0,25 %). На юго-востоке Сибирской платформы породы хайвергинской свиты среднего рифея представлены глинистыми сланцами в нижней части, а средняя концентрация $C_{орг}$ составляет 1,7 %, достигая 3,95 % в районе р. Хайверга.

Верхнерифейско-вендские нефтегазоматеринские породы (НГМП) также выделяются в протерозойской части разреза. Несмотря на активное проявление на постседиментационных этапах эрозионных событий в бассейнах практически на всех континентах, где они были идентифицированы, остаются разрезы (части разрезов), в пределах которых выделяются обогащенные ОВ интервалы. По сравнению с более древними интервалами, они изучены лучше (например, осадочные бассейны Восточной Сибири [7], Волго-Уральский, Бохай, Амадеус, Карпентария [8, 9], Северный Оман – Хауши и Шуайба, Южный Оман – Раджастан, Винхян [10], Кохат – Потвар, Маккензи и др.). В верхнем рифее в разных частях Сибирской платформы встречаются терригенные и реже карбонатные породы, содержащие повышенные концентрации $C_{орг}$ в Туруханском районе, Патомском нагорье, в пределах Байкитской антеклизы (здесь выделяется ирэмэкэнская свита, представленная черными аргиллитами с коричневатым оттенком, концентрации $C_{орг}$ в которой достигают 8-9 %).

В венде резко возрастает разнообразие органического мира [11]. Вендская биота включает большое разнообразие водорослей, бесскелетные и примитивные скелетные Metazoa, в основном табулярные. Бесскелетные Metazoa возникли еще в рифее, но до сих пор не найдены ни их остатки, ни отпечатки. Обнаружены лишь их следы жизнедеятельности, что объясняется непрочностью защитных и покровных оболочек [4]. Однако в вендских концентратах рассеянного ОВ, особенно из пород, относительно обогащенных, преобладают те же сине-зеленые водоросли, в меньшей степени бурые [5].

По литофациальным условиям седиментации, развитию разных форм гидробионтов и степени их диагенетической превращенности в венд-кембрийских отложениях Тунгусского бассейна выделяются два района. ОВ преимущественно морской фациальной зоны (Игаро-Норильский район) формировалось в большей степени за счет неминерализующихся водорослей, в то время как в условиях солеродных лагун (большая часть Тунгусской синеклизы) – за счет минерализующихся планктонных водорослей тех же классов. Присутствие в вендском разрезе пород, обогащенных ОВ, связано скорее всего с «эдиакарским» бурным развитием биоценозов. При анализе вертикальной зональности обогащенных $C_{орг}$ толщ выделяются несколько интервалов с повышенным содержанием ОВ. При этом концентрации $C_{орг}$ гораздо выше зафиксированных в нижне- и среднерифейских породах. По данным работы [6], на Байкитской антеклизе Восточной Сибири в черных аргиллитах тирской свиты концентрации $C_{орг}$ достигают 14 % (хотя и варьируются в очень широких пределах). В Китае в породах формации Датанго (бассейн Сичуань) концентрации $C_{орг}$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

достигают местами 21 % [12, 13]. Такие обогащенные уровни накопления органического вещества связываются с планетарными причинами, в частности с активным проявлением геодинамических процессов [14].

Цель статьи – показать особенности состава и нефтегенерационных свойств древнейшего ОВ и несколько расширить имеющиеся представления об этом вопросе.

Результаты и их обсуждение. *Особенности химического состава ОВ докембрия.* Основными биопродуцентами докембрия являлись прокариоты, представленные бактериями, цианобактериями и археями. Их развитие началось примерно 3,8-3,7 млрд лет назад. Основные события, отразившиеся на геохимическом составе ОВ того времени, связаны с развитием фотосинтеза прокариот [15-17], благодаря которому происходило фракционирование и селективное накопление в организмах и продуктах их жизнедеятельности легкого изотопа углерода ^{12}C. Поэтому в отложениях докембрийского возраста наблюдается облегченный изотопный состав углерода – 32-34 ‰ [18]. Появление примерно 2,7 млрд лет назад эукариот также отразилось на индивидуальном геохимическом составе докембрийского ОВ. Помимо облегченного изотопного состава углерода, для древнего ОВ характерны специфические биомаркерные черты, например значения отношений содержания стеранов [19, 20] (тетрациклических углеводородов (УВ), образованных из стеролов, продуцируемых эукариотами) и гопанов [21] (пентациклических УВ, построенных из липидов клеточных мембран, синтезируемых прокариотами).

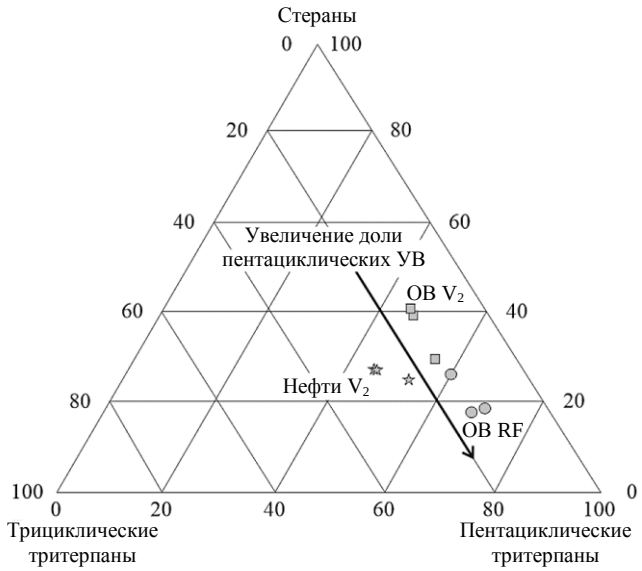


Рис.1. Тригонограмма распределения три-, тетра- и пентациклических УВ

В составе ОВ докембрийских осадочных пород мира (бассейн Макартур, Трансваальская группа, бассейн Восточной Сибири и др.) гопаны преобладают над стеранами (рис.1). Это отражает широкое развитие в докембрии микробиальных сообществ, а также их главенствующую роль в образовании исходного ОВ нефтегазоматеринских пород.

Отмечаемое во многих работах [22-24] преобладание стеранов C_{29} над стеранами C_{27} и C_{28} также является признаком докембрийского ОВ (рис.2). Такую особенность, обычно характерную для ОВ III типа, в данном случае, как правило, связывают с доминированием зеленых водорослей в сообществе эукариотического фитопланктона [25, 26]. Отметим, что III тип ОВ определяется для некоторых докембрийских пород и по результатам пиролиза или элементного анализа керогена [27]. Согласно исследованиям в работе [28], это связано с тем, что исходное ОВ содержало небольшое количество липидов, а осадконакопление происходило в окислительных морских и мелководно-морских условиях. Однако часть ОВ (I, II, IIS типы) накапливалась в восстановительных морских обстановках. Таким образом, определение типа исходного ОВ этих древних отложений является достаточно проблематичным. Проиллюстрировать это явление могут результаты исследования (рис.3, 4).

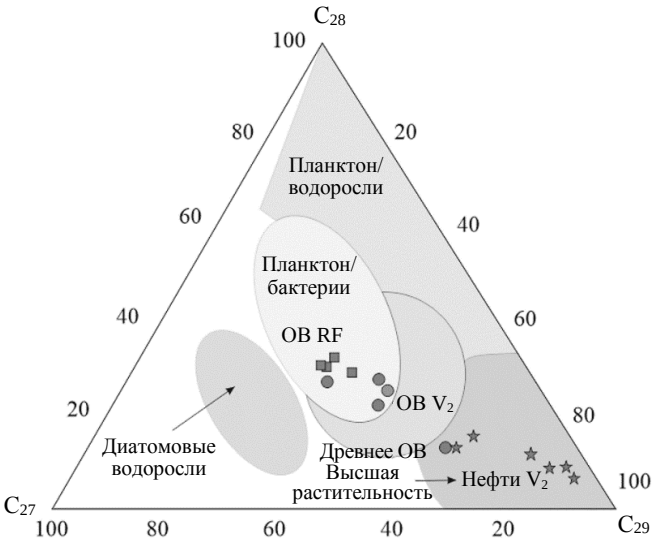


Рис.2. Тригонограмма распределения стерановых УВ в рифей-вендских отложениях

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 700-707
© М.А.Большакова, К.А.Ситар, Д.Д.Кожанов, 2024

Специфичными алканами, характерными для ОВ докембрия, являются некоторые метилалканы. Например, 12- и 13-монометилалканы, идентифицированные [29] в ОВ и нефтях докембрийских отложений Восточной Сибири.

Такие индивидуальные соединения были выявлены [30] и в нефтях группы Ара (Оман). Рассматриваемые УВ образуют два гомологических ряда: 12-метилалканы состава C_{24}-C_{30} и 13-метилалканы состава C_{26}-C_{30}. Одним из потенциальных маркеров докембрия является наличие в составе насыщенной фракции ОВ разветвленных моно- и диметилалканов [3], появление которых, видимо, связано со специфическими бактериями раннего эдиакария. Помимо перечисленных выше особенностей докембрийского ОВ, в публикациях обсуждаются признаки, свойственные докембрийскому ОВ (см. таблицу). Таким образом, ОВ докембрийских НГМП обладает специфичными характеристиками состава: преобладанием стеранов C_{29}, наличием разветвленных алканов, преобладанием пентациклических УВ над трициклическими и тетрациклическими. Появление этих особенностей в первую очередь связано со значительным вкладом бактерий в составе исходного ОВ.

Показано, что оценка типа исходного ОВ древних отложений по пиролизу является проблематичной. Вероятно, определяемый этим методом III тип ОВ связан в первую очередь с постседиментационной окисленностью ОВ. Исходная же органика, согласно данным хромато-масс-спектрометрии и изотопного анализа углерода, имела II (морской, сапропелевый) тип ОВ.

Принципиальная закономерность реализации нефтегазоматеринского потенциала ОВ докембрия. Зачастую древнее ОВ по своему элементному составу обеднено водородом по сравнению с типичным фанерозойским ОВ и относится к керогену типа III (см. рис.3). С целью численного моделирования процессов формирования нефтегазоносности используются программы для бассейнового (геолого-геохимического) моделирования [31].

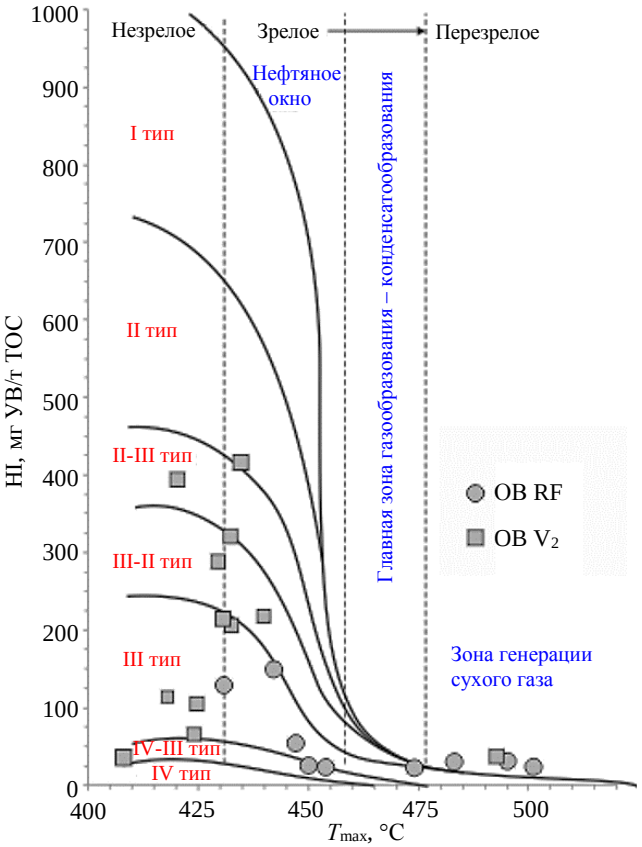


Рис.3. Пиролитические характеристики рифей-вендских отложений на модифицированной диаграмме Ван Кревелена

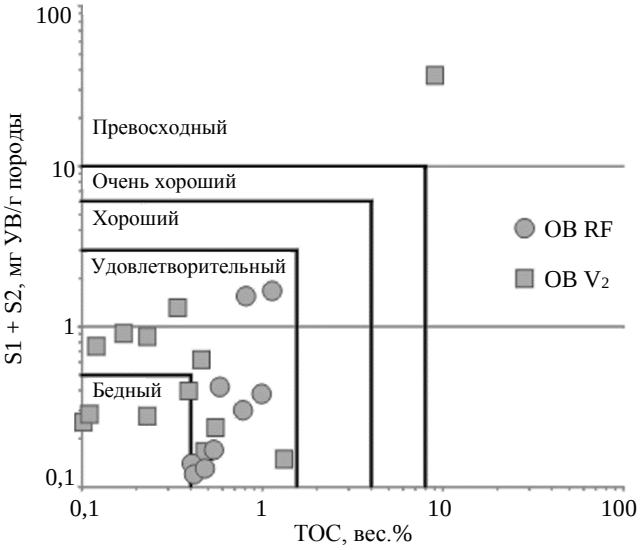


Рис.4. Пиролитические характеристики рифей-вендских отложений на диаграмме генерационного потенциала

В таких программах свойства ОВ НГМП описываются при помощи трех характеристик, присущих катагенетически непреобразованным породам:

• исходное содержание в породе органического углерода (Total Organic Carbon (TOC), вес.% – мера содержания в породе ОВ);

• исходный водородный индекс ОВ НГМП (Hydrogen Index (HI), мгУВ/гТОС) – генерационный потенциал ОВ породы);

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• кинетический спектр деструкции керогена (закон, описывающий генерацию нефтегазоматеринскими породами нефти и газа в катагенезе).

Молекулярные маркеры докембрийского ОВ

Ключевая характеристика	Источник ОВ	Источник
Преобладание этилхолестанов в составе стеранов	Водоросли, цианобактерии	[22]
Высокие отношения 24-изопропил/n-пропилхолестан	Археоциаты	[32-34]
Преобладание регулярных структур над перегруппированными, αββ-изостеранов над ααα-стеранами	–	[35]
Доминирование C_{29} гомологов в составе αββ-изостеранов	–	[35]
Преобладание 18α(H)-неогопанов над 17α(H)-21β(H)-гопанами	Бактерии	[36]
В составе терпанов преобладают трицикланы (∑T)	–	[37]
Трициклановый индекс $2T_{19-20}/T_{23-26}$ <1	–	[37]
Преобладание гомогопанов Hh_{35} над Hh_{34}	–	[37]
Доминирование 2α-метильного ряда	Метилотрофные бактерии и цианобактерии	[38]
Доминирование 3β-метильного ряда	Бактерии типа Acetobacter	[38]
Наличие 2- и 3-метилзамещенных алканов	Бактерии	[39]

Одна из задач этого исследования – выяснить, сходными ли генерационными характеристиками обладает ОВ НГМП докембрия; как такое ОВ реализует свой потенциал во времени в качестве классического сапропелевого; значительно ли обедненность водородом влияет на механизм реализации потенциала такого ОВ в катагенезе. Этот вопрос крайне важен при оценке перспектив нефтегазоносности бассейнов, в которых присутствуют протерозойские углеводородные системы, а публикаций, посвященных ответу на него, практически нет. В библиотеках коммерческих программных пакетов по бассейновому моделированию отсутствуют кинетические спектры деструкции керогена, полученные на образцах пород протерозоя. При моделировании исследователи вынуждены пользоваться предоставляемыми им возможностями заменить данные по такому ОВ на «стандартные» кинетические спектры, и в пользу какого типа ОВ сделать выбор – довольно трудное решение.

Органическое вещество протерозоя привлекает внимание геохимиков уже более 50 лет. За это время исследователи показали, что ОВ этого возраста генерировало нефть и газ в различных НГБ на протяжении геологической истории нашей планеты. Публикаций, которые бы отражали кинетику процесса реализации потенциала ОВ протерозоя, крайне мало. Их можно условно разделить на две неравнозначные части: работы, в которых исследователи-геологи (занимающиеся преимущественно бассейновым геолого-геохимическим моделированием) «синтезируют» кинетику для моделирования генерации породами рифея-венда, опираясь на здравомыслие, результаты стандартных пиролитических исследований и информацию о том, как обычно реализуется потенциал ОВ того или иного типа. Таким подходом вынуждены пользоваться большинство исследователей. Второй тип работ – публикации, в которых представлены результаты авторских кинетических исследований обогащенных ОВ докембрийских пород [30, 40, 41].

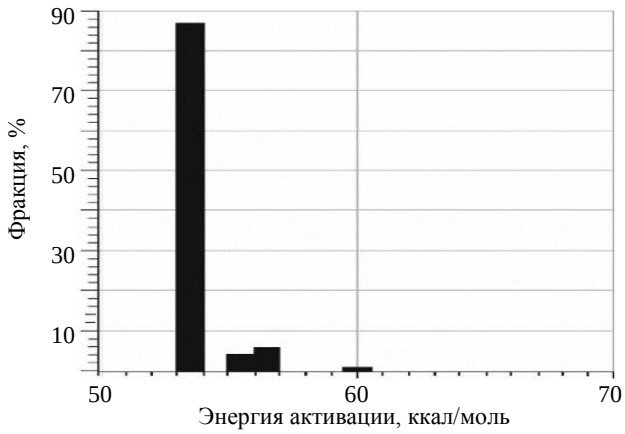


Рис.5. Кинетический спектр преобразования позднерифейского ОВ ирэмэкэнской свиты Восточной Сибири, A = 5,3E +13 [40]

Например, в статье [40] отражены результаты экспериментальных исследований аргиллита рифейского возраста (ирэмэкэнская свита верхнего рифея, скв. Юрубченская 104, 2182-2186 м, Восточная Сибирь), обогащенного ОВ. Авторами проделано множество интересных исследований этого образца – от гидропиролиза в разных вариантах до анализа изотопного состава углерода. Восстановлен однокомпонентный кинетический спектр (рис.5). Исследованный образец содержит

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 700-707
© М.А.Большакова, К.А.Ситар, Д.Д.Кожанов, 2024

12,6 % органического углерода, водородный индекс составляет 463 мгУВ/гТОС, T_{max} – 445 °С [40], т.е. изучаемая порода уже частично реализовала свой генерационный потенциал, что несколько снижает ценность этой кинетики при использовании ее в численном моделировании.

Полученный спектр характеризуется максимумом выхода углеводородных флюидов при энергии активации 54 ккал/моль. Предэкспоненциальный множитель (А) равен $5{,}3 \cdot 10^{13}$ $с^{-1}$. В работе [30] исследован образец катагенетически незрелой неопротерозойско-раннекембрийской нефтегазоматеринской породы бассейна Южного Омана. Этот образец характеризуется высоким потенциалом ОВ, водородный индекс 714,7 мгУВ/гТОС. ОВ в нем существенно обогащено водородом и относится к I типу. Кинетический спектр, полученный в статье [30], представлен на рис.6.

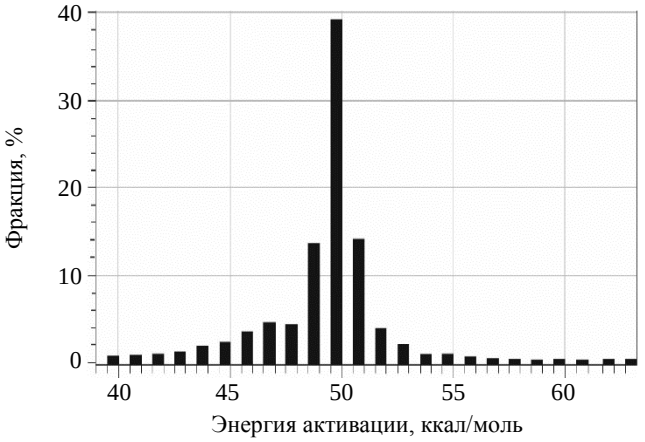


Рис.6. Кинетический спектр преобразования ОВ неопротерозойско-раннекембрийских нефтематеринских пород Южного Омана, A = 1,1E + 13 $с^{-1}$ [30]

Более низкая величина энергии активации для максимума выхода УВ флюидов (50 ккал/моль – для Омана) может быть связана как с разницей в зрелости исследованных материалов, так и с тем, что ОВ сибирского образца могло быть частично окислено в седиментодиагенезе. Широкий диапазон энергий, при которых происходит преобразование ОВ, вероятно, связан с сернистостью этого ОВ, о которой упоминают авторы исследования. Сера в составе ОВ приводит к тому, что оно становится более реакционноспособным и начинает трансформироваться на более ранних градациях катагенеза [42].

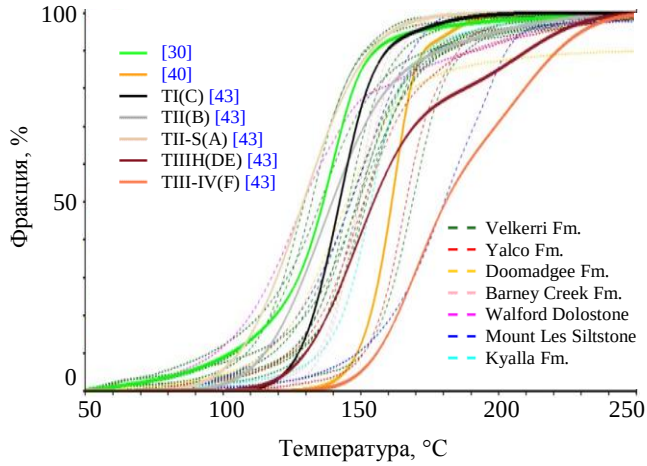


Рис.7. Изменение коэффициента трансформации в зависимости от температуры для протерозойских НГМП и ОВ «классических» органофаций

Закономерности преобразования ОВ протерозойских НГМП изучены по породам бассейнов Австралии [41], проведены исследования многочисленных катагенетически малопреобразованных образцов протерозойского возраста. Выполнено сравнение изменения коэффициента трансформации ОВ протерозоя с поведением «стандартных» типов ОВ (выбраны типы по органофациям из работы [43]). На рис.7 пунктиром показано изменение коэффициента трансформации для НГМП пород бассейнов Австралии, а сплошными линиями – трансформация «стандартных» органофаций пород Омана (зеленая линия [30]) и Восточной Сибири (оранжевая линия [40]). На рис.7 видно, что, несмотря на то, что часть образцов из Австралии обогащена ОВ типа III, все образцы демонстрируют трансформацию, свойственную для ОВ сапропелевого генезиса. Все тренды изменения коэффициента трансформации ОВ докембрия схожи с трендами сапропелевого (или смешанного) ОВ органофаций А, В и С.

Заключение. Обзор литературы и собственные исследования показывают, что НГМП довольно широко распространены в породах протерозойского возраста. Они были идентифицированы в различных осадочно-породных бассейнах мира и могут быть приурочены к различным стратиграфическим подразделениям протерозоя.

Органическое вещество докембрия обладает спецификой молекулярно-изотопного состава – в растворимой части ОВ нередко идентифицируются специфические метилалканы, стераны C_{29}, среди циклоалканов доминируют пентациклические соединения, изотопный состав углерода, как правило, легкий.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Пиролитические исследования ОВ докембрия зачастую приводят к тому, что оно относится к III типу (псевдогумусовому).

Обобщение немногочисленных исследований кинетики преобразования ОВ докембрия позволяет сделать вывод о том, что тренд его преобразования в катагенезе соответствует тренду преобразования сапропелевого ОВ (даже для оксисорбосапропелевого псевдогумусового ОВ).

В целом для ОВ докембрия характерна схема преобразования в катагенезе, сходная с закономерностью, описанной в работе [43] для ОВ типа I (органофация С).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Summons R.E., Welander P.V., Gold D.A.* Lipid biomarkers: molecular tools for illuminating the history of microbial life // Nature Reviews Microbiology. 2022. Vol. 20. Iss. 3. P. 174-185. DOI: 10.1038/s41579-021-00636-2

2. *Фадеева Н.П., Морозов Н.В., Бакай Е.А., Фролов С.В.* Геохимические предпосылки нефтегазоносности Березовской впадины (Восточная Сибирь) // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 2. С. 44-55. DOI: 10.18599/grs.2021.2.4

3. *Тимошина И.Д., Болдушевская Л.Н.* Геохимия органического вещества неопротерозоя на юго-востоке Сибирской платформы // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 4. С. 41-54. DOI: 10.18599/grs.2020.4.41-54

4. *Дзевановский Ю.К.* Докембрий, его границы и принципы расчленения // Записки Горного института. 1969. Т. 58. № 2. С. 9-15.

5. *Баженова Т.К., Белецкая С.Н., Беляева Л.С. и др.* Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности. Л.: Недра, 1981. 211 с.

6. *Тимошина И.Д.* Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, филиал «Гео», 2005. 166 с.

7. *Конторович А.Э.* Эволюция нафтидогенеза в истории Земли // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 7. С. 784-802.

8. *Fengli Yang, Xiaofeng Zhou, Yuyang Hu et al.* Neoproterozoic extensional basins and its control on the distribution of hydrocarbon source rocks in the Yangtze Craton, South China // Geosystems and Geoenvironment. 2022. Vol. 1. Iss. 1. № 100015. DOI: 10.1016/j.geogeo.2021.100015

9. *Sanzhong Li, Xiyao Li, Guangzeng Wang et al.* Global Meso-Neoproterozoic plate reconstruction and formation mechanism for Precambrian basins: Constraints from three cratons in China // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 198. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102946

10. *Singh A.K., Chakraborty P.P.* Geochemistry and hydrocarbon source rock potential of shales from the Palaeo-Mesoproterozoic Vindhyan Supergroup, central India // Energy Geoscience. 2023. Vol. 4. Iss. 3. № 100073. DOI: 10.1016/j.engeos.2021.10.007

11. *Bobrovskiy I., Hope J.M., Golubkova E., Brocks J.J.* Food sources for the Ediacara biota communities // Nature Communications. 2020. Vol. 11. № 1261. DOI: 10.1038/s41467-020-15063-9

12. *Wenzhi Zhao, Suyun Hu, Zecheng Wang et al.* Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China // Petroleum Exploration and Development. 2018. Vol. 45. Iss. 1. P. 1-14. DOI: 10.1016/S1876-3804(18)30001-6

13. *Dongya Zhu, Quanyou Liu, Jingbin Wang et al.* Transition of seawater conditions favorable for development of microbial hydrocarbon source – Reservoir assemblage system in the Precambrian // Precambrian Research. 2022. Vol. 374. № 106649. DOI: 10.1016/j.precamres.2022.106649

14. Ancient Supercontinents and the Paleogeography of Earth / Ed. by L.J.Pesonen, J.Salminen, S.-Å.Elming et al. Elsevier, 2021. 662 p. DOI: 10.1016/C2018-0-03855-4

15. *Zimorski V., Mentel M., Tielens A.G.M., Martin W.F.* Energy metabolism in anaerobic eukaryotes and Earth's late oxygenation // Free Radical Biology and Medicine. 2019. Vol. 140. P. 279-294. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2019.03.030

16. *Qing Tang, Ke Pang, Xunlai Yuan, Shuhai Xiao.* A one-billion-year-old multicellular chlorophyte // Nature Ecology & Evolution. 2020. Vol. 4. Iss. 4. P. 543-562. DOI: 10.1038/s41559-020-1122-9

17. *Кузнецов В.Г.* Геохимические обстановки седиментации докембрия // Литология и полезные ископаемые. 2020. № 2. С. 117-130. DOI: 10.31857/S0024497X20010036

18. *Сидоренко С.А., Сидоренко А.В.* Органическое вещество в осадочно-метаморфических породах докембрия. М.: Наука, 1975. 114 с.

19. *Brocks J.J., Nettersheim B.J., Adam P. et al.* Lost world of complex life and the late rise of the eukaryotic crown // Nature. 2023. Vol. 618. Iss. 7966. P. 767-773. DOI: 10.1038/s41586-023-06170-w

20. *Hallmann C., Nettersheim B.J., Brocks J.J. et al.* Reply to: Sources of C_{30} steroid biomarkers in Neoproterozoic–Cambrian rocks and oils // Nature Ecology & Evolution. 2020. Vol. 4. Iss. 1. P. 37-39. DOI: 10.1038/s41559-019-1049-1

21. *Van Maldegem L.M., Sansjofre P., Weijers J.W.H. et al.* Bisnorgammacerane traces predatory pressure and the persistent rise of algal ecosystems after Snowball Earth // Nature Communications. 2019. № 10. № 476. DOI: 10.1038/s41467-019-08306-x

22. *Brocks J.J., Jarrett A.J.M., Sirantoine E. et al.* The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals // Nature. 2017. Vol. 548. Iss. 7669. P. 578-581. DOI: 10.1038/nature23457

23. *Кожанов Д.Д., Большакова М.А.* Оценка вклада докембрийских отложений в формировании нефтеносности восточной части Волго-Уральского бассейна по результатам моделирования // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 199-217.

24. *Bazhenova O.K., Bazhenova T.K., Fadeeva N.P.* Upper Proterozoic Formations of Russian Plate-Independent Petroleum Systems / 67th EAGE Conference & Exhibition, 13-16 June 2005, Madrid, Spain. European Association of Geoscientists & Engineers, 2005. № cp-1-00262. DOI: 10.3997/2214-4609-pdb.1.P143

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

25. *Knoll A.H., Summons R.E., Waldbauer J.R., Zumberge J.E.* Chapter 8 – The Geological Succession of Primary Producers in the Oceans / Evolution of Primary Producers in the Sea. Academic Press, 2007. P. 133-163. DOI: 10.1016/B978-012370518-1/50009-6

26. *Kodner R.B., Pearson A., Summons R.E., Knoll A.H.* Sterols in red and green algae: quantification, phylogeny, and relevance for the interpretation of geologic steranes // Geobiology. 2008. Vol. 6. Iss. 4. P. 411-420. DOI: 10.1111/j.1472-4669.2008.00167.x

27. *McKirdy D.M.* Organic geochemistry in Precambrian research // Precambrian Research. 1974. Vol. 1. Iss. 2. P. 75-137. DOI: 10.1016/0301-9268(74)90019-9

28. *Pehr K.* Investigation of the Composition and Preservation Potential of Precambrian Sedimentary Organic Matter and Lipid Biosignatures: Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Geological Sciences. Riverside, 2020. 188 p.

29. *Макушина В.М., Арефьев О.А., Забродина М.Н., Петров Ал.А.* Новые реликтовые алканы нефтей // Нефтехимия. 1978. Т. XVIII. № 6. С.847-854.

30. *Kowalewski I., Carpentier B., Huc A.-Y. et al.* An unconventional Neoproterozoic – Early Cambrian source rock interval in southern Oman: Implications for oil and gas generation // GeoArabia. 2009. Vol. 14. № 4. P. 53-86. DOI: 10.2113/geoarabia140453

31. *Прищепа О.М., Боровиков И.С., Грохотов Е.И.* Нефтегазоносность малоизученной части северо-запада Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции по результатам бассейнового моделирования // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 66-81. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.8

32. *Bobrovskiy I., Hope J.M., Nettersheim B.J. et al.* Algal origin of sponge sterane biomarkers negates the oldest evidence for animals in the rock record // Nature Ecology & Evolution. 2021. Vol. 5. Iss. 2. P. 165-168. DOI: 10.1038/s41559-020-01334-7

33. *Nettersheim B.J., Brocks J.J., Schwelm A. et al.* Putative sponge biomarkers in unicellular Rhizaria question an early rise of animals // Nature Ecology & Evolution. 2019. Vol. 3. Iss. 4. P. 577-581. DOI: 10.1038/s41559-019-0806-5

34. *van Maldegem L.M., Nettersheim B.J., Leider A. et al.* Geological alteration of Precambrian steroids mimics early animal signatures // Nature Ecology & Evolution. 2021. Vol. 5. Iss. 2. P. 169-173. DOI: 10.1038/s41559-020-01336-5

35. *Дахнова М.В., Жеглова Т.П., Можегова С.В.* Генерационные характеристики ОВ и распределение биомаркеров в битумоидах нефтематеринских пород рифея, венда и кембрия Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5-6. С. 953-961. DOI: 10.15372/GiG20140517

36. *Chao Li, Ping'an Peng, Guoying Sheng, Jiamo Fu.* Precambrian organic matter // Chinese Science Bulletin. 2000. Vol. 45. Iss. 4. P. 295-303. DOI: 10.1007/BF02909757

37. *Конторович А.Э., Тимошина И.Д., Филипцов Ю.А.* Состав углеводородов-биомаркеров в нефтях рифея Байкитской антеклизы // Геология нефти и газа. 2011. № 5. С. 78-83.

38. *Summons R.E., Jahnke L.L.* Identification of the methylhopanes in sediments and petroleum // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1990. Vol. 54. Iss. 1. P. 247-251. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90212-4

39. *Kissin Y.V.* Catagenesis and composition of petroleum: Origin of *n*-alkanes and isoalkanes in petroleum crudes // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1987. Vol. 51. Iss. 9. P. 2445-2457. DOI: 10.1016/0016-7037(87)90296-1

40. *Меленевский В.Н., Конторович А.Э., Вуу-Лианг Хуанг и др.* Аквапиролиз органического вещества рифейского аргиллита // Геохимия. 2009. № 5. С. 504-512.

41. *Jarrett A., MacFarlane S., Palu T. et al.* Source rock geochemistry and petroleum systems of the greater McArthur Basin and links to other northern Australian Proterozoic basins / Annual Geoscience Exploration Seminar 2019 Proceedings, 20-21 March 2018, Alice Springs, Northern Territory of Australia. Darwin: NT Geological Survey, 2019. P. 92-105.

42. *Тиссо Б., Вельте Д.* Образование и распространение нефти. М.: Мир, 1981. 504 с.

43. *Pepper A.S., Corvi P.J.* Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen // Marine and Petroleum Geology. 1995. Vol. 12. Iss. 3. P. 291-319. DOI: 10.1016/0264-8172(95)98381-E

***Авторы*: М.А.Большакова,** *канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, m.bolshakova@oilmsu.ru, https://orcid.org/0000-0001-9240-291X* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*), **К.А.Ситар,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-1386-8442* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*), **Д.Д.Кожанов,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0002-2641-918X* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0