

УДК 551.311.8
DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art49

НОВЫЕ ДАННЫЕ О БИОТРАНСФОРМАЦИИ ГЛУБИННЫХ ФЛЮИДНЫХ ПОТОКОВ МИКРООРГАНИЗМАМИ ПОДЗЕМНОЙ БИОСФЕРЫ

Чудецкий М.Ю., ИПНГ РАН
E-mail: chudetsky@mail.ru

Аннотация. С геохимией глубинных флюидных потоков связан ряд феноменов. Один из них закономерное изменение с глубиной изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в метане, который формирует восходящий флюидный поток. Другой феномен заключается в закономерной корреляции расчетного бета-фактора молекул-хемофоссилий и их изотопного, по углероду, состава. Эти феномены могут быть объяснены исходя из положения, что в нефтяных резервуарах происходит биотрансформация неравновесных флюидных потоков флюидотрофными микроорганизмами с биосинтезом микробиальных биомаркеров.

Ключевые слова: микробиальные сообщества, подземная биосфера, хемофоссилии.

NEW DATA ON BIOTRANSFORMATION OF DEEP FLUID FLOWS BY THE MICROORGANISMS OF SUBSURFACE BIOSHERE

Chudetsky M.Yu., OGRI RAS
E-mail: chudetsky@mail.ru

Abstract. A number of phenomena are associated with the geochemistry of deep fluid fluxes. One of them is a regular change with the depth of the isotope composition of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) in methane, which forms an upward fluid stream. Another phenomenon lies in the regular correlation of the calculated beta-factor of molecules-chemofossils and their isotopic carbon composition. These phenomena can be explained on the basis of the fact that the biotransformation of nonequilibrium fluid fluxes by fluidotrophic microorganisms with the biosynthesis of microbial biomarkers occurs in the oil reservoirs.

Keywords: microbial communities, subsurface biosphere, chemofossils.

С геохимией глубинных флюидных потоков связан целый ряд феноменов. Один из них закономерное изменение с глубиной изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в метане, который формирует восходящий флюидный поток.

Для глубин от километра и глубже характерен более тяжелый изотопный состав углерода метана со значениями $\delta^{13}\text{C}$ -25...-45‰, а для меньших глубин характерно облегчение изотопного состава со значениями $\delta^{13}\text{C}$ -45...-60‰. Этот феномен был детально описан при исследовании грязевых вулканов. В основополагающих работах Б.М.Валяева и Г.И.Войтова были показаны вариации изотопного состава в потоках метана, вырывающихся из грязевых вулканов. Этот феномен наблюдался для грязевых вулканов Азербайджана, Крыма, Керчи и Сахалина, вне зависимости от региона и возраста подстилающих пород. Такие вариации логично интерпретировались, как прорыв метана с больших глубин (для газов с более тяжелым изотопным составом) и поступление газов из приповерхностных резервуаров (для газов с более легким изотопным составом). Причем уже на этом этапе изучения, предполагалось, что это изменение изотопного состава углерода может быть связано с влиянием микроорганизмов.

Справедливость предложенной интерпретации причины изотопных вариаций была подтверждена с началом исследований изотопного состава метана при морском бурении. В колонках морских осадков, в скважинах глубиной более километра прослеживается закономерное изменение изотопного состава углерода в метане с глубиной (работы Matsumoto и других японских геохимиков по материалам морского бурения в нанкинском трогее). На графиках $\delta^{13}\text{C}$ построенных вдоль скважины по направлению движения флюидных потоков просматриваются ступени постепенного облегчения изотопного состава метана от $\delta^{13}\text{C}$ -30...-35‰, на глубине около километра, до $\delta^{13}\text{C}$ -55...-60‰ у поверхности.

Параллельно с работами геохимиков, накапливались данные о метаболических процессах у микроорганизмов подземной биосферы у микробиологов. Хотя сообщества микроорганизмов, осуществляющих анаэробное окисление метана, до сих пор не удалось культивировать, секвенирование геномов и липидные биомаркеры позволяют выделять три типа с подтипами архей (архебактерий) составляющих основу таких сообществ. Это типы ANME-1, ANME-2, ANME-3 родственные с культивированной группой архей Methanosarcinales. Наконец в работах микробиологов последних лет (Н.В. Пименов) индикаторы активности архей ANME-1 были найдены и в сообществах микроорганизмов из морских осадков на глубинах от поверхности до километра. Создается картина многослойного микробиального фильтра, расположенного в морских осадках на этих глубинах. Причем воздействие такого фильтра на потоки метана определяет изотопное

облегчение углерода при движении флюида сквозь микробиальные сообщества. Для оценки масштабов этого природного процесса можно исследовать компенсационное утяжеление изотопного состава хемофоссилий-биомаркеров синтезированных такими микробиальными сообществами подземной биосферы.

В рамках интерпретации хемофоссилий, как следов микроорганизмов подземной биосферы, получают логичное объяснение многие феномены тонкой биохимии биомаркеров. Один из таких феноменов - феномен, открытый Э. М. Галимовым. Этот феномен заключается в закономерной корреляции расчетного бета-фактора молекул хемофоссилий и их изотопного, по углероду, состава. Если интерпретировать хемофоссилии с позиции их синтеза в наземных организмах, то этот феномен доказывал бы единство хемофоссилий-биомаркеров с остальным веществом нефти. (Иногда говорят «единство биомаркеров с *телом нефти*»). В рамках представлений о том, что биомаркеры образованы микроорганизмами подземной биосферы этот феномен получает альтернативное объяснение, не связанное с захоронением организмов наземных экосистем. Если мы предполагаем, что представленные хемофоссилии синтезировались подземными микроорганизмами, то при таком биосинтезе бета-фактор хемофоссилий будет согласован с остальным веществом углеводородного флюида. В этой интерпретации феномен, открытый Э.М.Галимовым, подтверждает подземную жизнедеятельность микроорганизмов и протекание процессов биотрансформации углеводородных флюидов.

Проанализируем эти закономерности более подробно. Э.М.Галимовым приводятся данные о линейной связи бета-фактора с изотопным составом углерода молекул для конкретных нефтей: сургутская нефть - от -33‰ $\delta^{13}\text{C}$ для нормальных алканов (бета-фактор 1,150), до -30‰ $\delta^{13}\text{C}$ для порфиринов (бета-фактор 1,162), кокуйская нефть - от -31‰ $\delta^{13}\text{C}$ для нормальных алканов, до -28‰ $\delta^{13}\text{C}$ для порфиринов. Особенности изотопного состава биомаркеров (изопреноидов и порфиринов) указывают на генетическое единство биомаркеров и окружающих их углеводородов (н-алканов, нафтен, ароматических углеводородов). Это не позволяет предполагать, что биомаркеры были заимствованы углеводородами нефти из РОВ окружающих пород. С другой стороны, такая закономерность четко согласуется с синтезом биомаркеров микроорганизмами в процессе жизнедеятельности в ходе биотрансформации потока углеводородного флюида, поступающего с глубины, причем при этом углерод в метановом потоке будет ступенчато изотопно облегчаться, а тела микроорганизмов,

особенно порфириновые биомолекулы, будут пропорционально обогащаться тяжелым изотопом ^{13}C , что мы и видим при определении изотопного состава биомаркеров.

Прямые поиски наиболее глубинных микроорганизмов в литосфере ведутся уже более полувека, но пока не получены однозначные результаты. Сообществ, сопоставимых с микробиальными сообществами «черных курильщиков» в глубинах океанов, в глубоких слоях литосферы до сих пор не обнаружено. Однако можно сделать и иной вывод: типичные, адаптированные исключительно для жизни на больших глубинах сообщества прокариот, каким-то образом, до сих пор ускользали от большинства микробиологических исследований.

Данные, накопленные в нефтяной геологии и геохимии, указывают на то, что следы жизнедеятельности самых глубинных из микробиальных сообществ, существующих исключительно за счет продуктов, поступающих из недр, можно увидеть, если проанализировать особенности изменения химического состава нефтей с глубиной.

Модель подземной гидросферы включает три зоны, последовательно сменяющие друг друга с глубиной: зону свободного водообмена, зону затрудненного водообмена и зону весьма затрудненного водообмена. По современным данным, в осадочных бассейнах зона затрудненного водообмена — это зона подземных вод с близкими их характеристиками в пределах отдельных пластов; а зона весьма затрудненного водообмена характеризуется неоднородным, часто аномальным составом подземных вод, а также их параметрами. На нижней границе третьей зоны обособленная водная фаза смешивается с поступающими из глубин геофлюидами. Тектонические нарушения способствуют прорывам таких флюидов из нижних зон в верхние. Перемещение потоков углеводородно-водных флюидов от зарождения до аккумуляции в залежах происходит из нижних горизонтов с большими значениями давления и температуры, в верхние — с меньшими значениями. По мере изменения РТ условий поднимающиеся потоки переходят в состояние химического и термодинамического неравновесия. Такие флюиды являются потенциально реакционноспособными и могут содержать компоненты, поддерживающие питание микроорганизмов [Чудецкий, 2002]. Питательными компонентами для микроорганизмов флюидотрофов могут быть смеси CO , H_2O ; CO_2 , H_2 ; оксиды азота и железа, а также ненасыщенные углеводороды, метанол и газы, генерированные при реакциях, протекающих в зонах серпентинизации [Разницын, Савельева, Федонкин, 2018]. Однако для существования флюидотрофным подземным микроорганизмам, как и

микроорганизмам «черных курильщиков», приходится балансировать между несовместимыми с жизнью температурами (по современным данным около 150°C) и реакционной способностью флюидов.

Процесс формирования нефтяной залежи и питание микроорганизмов, подобных гипертермофильным архебактериям *Methanobacterium thermoautotrophicum* и *Methanopyrus kandleri*, происходит в результате поступления питательных веществ не с поверхности, а из глубокозалегающих подстилающих пород. Микроорганизмы, способные питаться за счет неравновесного флюида, либо за счет образования метана из смеси водорода с углекислым газом, либо за счет анаэробного окисления метана и, а также за счет потребления других низкомолекулярных субстратов в основном принадлежат к самому гипертермофильному таксону архей (архебактерий). В результате ациклические изопреноиды характерные для мембран этих архебактерий попадают, в состав углеводородов нефти. Вследствие жизнедеятельности архебактерий образуются нефти типа A^1 и A^2 , по классификации А.А.Петрова, за исключением тех, которые были отнесены к категории A^0 . Реконструкция, предложенная автором [Чудецкий, 2004], создает следующую аналогию. Если жизнедеятельность микробиального сообщества «черных курильщиков» можно определить в геологических структурах по отложениям специфических колчеданных брекчий, остающихся от труб, по которым разгружались на морское дно гидротермы - то жизнедеятельность микробиального сообщества, спутника образования нефтяных месторождений, можно определить по формированию специфического типа нефтей – (A^2).

Нефти типа A^2 встречаются не очень часто. Важно геотектоническое положение месторождений этих нефтей. В нем должно сочетаться близость к рифтовым зонам или участкам утончения земной коры, откуда могут поступать неравновесные флюиды и, при этом, температура флюидных ловушек, где накапливаются углеводороды, не должна превышать допустимые для жизни микроорганизмов значения. Такие условия характерны для проницаемых геологических структур, выделенных П.Н. Кропоткиным [1986] как трубы дегазации, к которым часто приурочены находки указанных нефтей: Нефти типа A^2 найдены в кайнозойских и в мезозойских отложениях на глубинах от 3500 до 500 м (меньше, чем для нефтей A^1 и больше, чем для нефтей B^1 и B^2).

В качестве типичных представителей нефтей A^2 могут служить нефти из месторождений:

- Южного Каспия глубиной залегания от 3500 до 850 м (Сураханы – 867м, Нефтяные Камни – 1400м, Дуванный-море – 3500м);
- Западной Сибири от 2500 до 1500 м (Самотлор, пласт АВ2 – 1777м, Новопортовское – 1828м, Соленинское – 2408м);
- Прикаспия от 900 до 300 метров (Каражанбас- 300м, Каламкас – 847м);
- Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна от 2200 до 1500 м (Дуринское – 1870м, Лабитовское – 1600-2200 м);
- Тимано-Печерского нефтегазоносного бассейна от 2000 до 500 м (Джерское – 800м, Западный-Тобук – 1900);
- Припятского нефтегазоносного бассейна около 3400-3300 м (Мозырское – 3350 м).

Для многих из этих месторождений исследователи указывали отсутствие признаков биодеградаций нефтей, что вполне объяснимо, поскольку микроорганизмы развивались в них не на этапе разрушения залежи, а на этапе ее формирования. Это сингенетичное формированию и заполнению углеводородной залежи сообщество микроорганизмов.

Для жизнедеятельности микроорганизмов в анаэробных условиях необходим сброс восстановителя в геохимически нейтральной форме. Обычно в этой роли выступает метан, имеющий четыре атома водорода и способный покидать систему за счет высокой летучести. В условиях, изолированных газонепроницаемыми породами подземных биоценозов метан теряет это свойство, накапливаясь в системе, он смещает равновесие и делает биосинтез метана энергетически менее выгодным. В этой ситуации в роли катаболизируемого восстановителя (сбрасываемого конечного метаболита) могут выступать липоиды. Липоиды содержат значительную долю водорода и могут образовывать отдельную нерастворимую фазу. Если подобный механизм используется микроорганизмами, то липоиды у прокариота в подземных обитаниях могут образовываться не только для синтеза биомассы (мембран), но и в качестве конечного продукта метаболизма, и, следовательно, синтезироваться в значительных количествах, много превосходящих собственно структурные потребности микроорганизмов. В синтезе липоидов задействован один из древнейших ферментов - протеидный комплекс с коферментом А, согласно современным данным сохранившийся с момента каталитической активности ферментов на рибосомальной основе. Это также

свидетельствует о чрезвычайной древности этого метаболического пути, ровесника анаэробных условий на поверхности Земли и времени происхождения живых организмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Валяев Б.М., Титков Г.А., Чудецкий М.Ю.* О генезисе изотопно-легкого метана в скоплениях углеводородов // Сб. ИПНГ РАН “Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений” М. «ГЕОС», 2002. С.108-134.
2. *Галимов Э.М.* Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 1973. 384 с.
3. *Разницин Ю.Н., Савельева Г.Н., Федонкин М.А.* Углеводородный потенциал палео- и современных надсубдукционных областей: тектонический, геодинамический, минералого-геохимический и биохимический аспекты // Тихоокеанская геология, 2018, т.37, №2, с.3-16.
4. *Кропоткин П.Н.* Дегазация Земли и генезис углеводородов // Журнал всесоюзного химического общества. 1986. Т.XXXI. С.540-546.
5. *Чудецкий М.Ю.* Микробиальный генезис изопреноидных хемофоссилий – ключ к расшифровке полигенности и вертикальной зональности нефтей. В кн.: Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С.152-170.
6. *Чудецкий М.Ю.* Индикаторы бактериального участия в генезисе скоплений углеводородов. // Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. 2004. 20 с.