

УДК 552.144:552.578

Макарова И.Р., Суханов А.А.ФГУП «Всероссийский нефтяной научно-исследовательский геологоразведочный институт» (ФГУП «ВНИГРИ»), Санкт-Петербург, Россия, ins@vniagri.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ КАТАГЕНЕЗА САПРОПЕЛЕВОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В СВЯЗИ С ОЦЕНКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

Оценка уровня катагенеза сапропелевого органического вещества из отложений раннего палеозоя и позднего протерозоя представляет собой определенную методологическую трудность. С целью выбора оптимальных методов определения состава и оценки уровня катагенеза органического вещества проведен сравнительный анализ различных методов исследования органического вещества. Обоснован рациональный комплекс методов, основанный на совместном применении палинологического метода и ИК-спектроскопического метода, что способствует системному изучению органического вещества на трех взаимосвязанных уровнях: таксономическом; геополимерном; молекулярном. Предложенный комплекс в целом может повысить эффективность проведения нефтегазопоисковых работ.

Ключевые слова: *нижнепалеозойские и верхнепротерозойские отложения, уровень катагенеза, нерастворимое органическое вещество, палинологический метод, ИК-спектроскопический метод, эффективность нефтегазопоисковых работ.*

1. Проблема определения катагенеза органического вещества различного состава из отложений фанерозоя позднего протерозоя

На сегодняшний день в России одними из наиболее перспективных для дальнейшего освоения углеводородов в Лено-Тунгусской, Волго-Уральской, Прикаспийской нефтегазоносных провинциях, Калининградской области являются силурийские ордовикские, кембрийские отложения фанерозоя и верхнепротерозойские отложения. В связи с этим встает проблема объективной оценки их нефтегазоносности.

Одним из важных условий, необходимых для осуществления корректной оценки нефтегазоматеринского потенциала пород, является надёжное и детальное определение степени катагенетической преобразованности (степени катагенеза) содержащегося в них органического вещества (ОВ). Степень катагенеза ОВ в настоящее время определяется на основе ряда методов исследования осадочных пород: физико-химических, физических (рентгеноструктурный анализ, ИК-спектроскопический), геохимических методов (хромато-масс-спектрометрический и др.), а также палинологического и углепетрографического. Расхождения в определении степени катагенеза в одних и тех же пробах, в первую очередь, могут быть обусловлены различиями в масштабе и единицах измерений.

Здесь следует отметить также различие, касающееся определения катагенеза породы в целом и катагенеза ОБ. В первом случае оценивается преимущественно степень катагенеза, которая является мерой термобарического воздействия на рассматриваемую породу (систему, включающую минеральную и органическую составляющие), т.е. катагенез породы, в ряде случаев, может оцениваться через палеотемпературу. Во втором случае для органической составляющей породы – ОБ – оценивается уровень катагенеза, являющийся мерой изменения непосредственно самого ОБ. Понятно, что для верхнепалеозойских и более молодых отложений, содержащих гумусовые и сапропелевые микрокомпоненты, при одном и том же термобарическом воздействии на породу, ОБ будет изменено в различной степени. Это различие, в свою очередь, существенно повлияет на значения аналитических показателей, используемых при оценках катагенеза ОБ тем или иным методом (например, углепетрографическим, пиролизическим и другими методами). Проблема определения катагенеза мезозойских отложений снимается «контролем» по витринитовой и по спорополлениновой составляющей (по спорам и пыльце), для которых разработаны соответствующие шкалы катагенеза, увязанные между собой.

Однако при определении уровня катагенеза ОБ пород более древних отложений раннего палеозоя и позднего протерозоя часто возникает проблема, выражающаяся в значительном расхождении значений этого показателя, получаемых различными методами [Богородская, Ларичев, 1991], что неизбежно приводит к понижению достоверности итоговых результатов оценки нефтематеринского потенциала пород. Указанные расхождения значений показателей уровня катагенеза ОБ, на наш взгляд, связаны не только с отсутствием витринита и спорово-пыльцевых микрокомпонентов, но, в первую очередь, с различиями исходного состава сапропелевого ОБ, которые не учитываются в полной мере в ходе исследований ОБ пород геохимическими и физико-химическими методами.

2. Постановка задачи по комплексированию методов исследования органического вещества

Из-за разного рода ограничений на сегодняшний день ни один метод из обширного арсенала физических, физико-химических, химических, литологических и палеонтологических методов исследования осадочных пород, взятый по отдельности, не является достаточным для получения надёжной и детальной оценки уровня катагенеза ОБ безвитринитовых нижнепалеозойских и верхнепротерозойских отложений. Следовательно, разработка методики определения катагенеза ОБ на основе комплексного подхода чрезвычайно актуальна.

По-настоящему надёжная и детальная оценка уровня катагенеза ОБ нижнепалеозойских и верхнепротерозойских отложений может быть осуществлена лишь на основе методического подхода, в рамках которого будут выполнены следующие два условия:

- оценка степени катагенеза проводится на основе анализа количественных физико-химических показателей нерастворимой части ОБ исследуемых пород;

- оценка уровня катагенеза проводится с обязательным детальным учётом исходного (биоценотического и таксономического) состава ОБ.

Реализация предложенного методического подхода достигается путём решения следующих задач, нацеленных на выполнение вышеперечисленных условий:

Первая задача состоит в выборе и обосновании оптимального метода определения максимально полного состава (биоценотического) нерастворимой части ОБ.

Вторая задача состоит в выборе и обосновании оптимального метода достоверной количественной оценки катагенетического преобразования ОБ нижнепалеозойских и докембрийских отложений. Ниже рассмотрены материалы, позволяющие подойти к решению этих задач.

В результате проведенных нами сравнений наиболее распространенных методов исследования ОБ были определены два метода: ИК-спектроскопический и палинологический, которые не только позволяют успешно решить эти задачи, но также применить системный подход в исследовании ОБ.

Этот подход включает изучение ОБ на трех соподчиненных уровнях:

- таксономическом (изучаются сохранившиеся органостенные таксоны, фрагменты организмов, экологические и биоценотические особенности прижизненного существования таксонов, а также фациальные условия их захоронения);

- геополимерном (оцениваются геополимерные особенности микрокомпонентов, входящих в состав ОБ, определяющие тот или иной характер катагенетических преобразований геополимеров);

- молекулярном (оцениваются спектральные характеристики колебания молекул и др.).

Кроме того, открылась новая возможность сопоставления данных, получаемых оптическими методами, с результатами геохимических исследований, поскольку крупные таксоны характеризуются специфическими хемотаксономическими признаками, последние сохраняются в ископаемом состоянии в виде геополимеров и переходят в виде «хемофоссилий» или биомаркеров в состав углеводородного сырья. Одновременное сопоставление геополимеров и биомаркеров с хемотаксономическими признаками повышает

достоверность прогнозной оценки определения нефтематеринских пород и соотнесения с ними генерируемых осадочными толщами нефтяных углеводородов.

Приведем подробно сравнительную характеристику различных методов определения состава и уровня катагенеза ОВ, на основе которых был выбран наиболее оптимальный и комплекс оптических методов, рассмотренный нами в качестве рационального комплекса определения сапропелевого ОВ нефтегазоносных толщах фанерозоя и позднего протерозоя.

2.1. Выбор и обоснование оптимального метода определения состава ОВ (решение первой задачи)

Известно, что при определении состава нерастворимой части ОВ – керогена из средне-верхнепалеозойских, мезозойских и кайнозойских отложений, содержащих как сапропелевое, так и гумусовое вещество, – применяется классификация по структурно-химическому признаку, разработанная Б. Тиссо и Д. Вельте [Тиссо, Вельте, 1981], которая основывается на определении соотношения витринитовых и лейптинитовых компонентов, имеющего “чисто гумусовое” происхождение, и сапропелевых компонентов. В зависимости от содержания того или иного компонента выделяются три основных типа керогена (нерастворимого ОВ). Однако, данная классификация фактически неприменима для нижнефанерозойских и верхнепротерозойских отложений, так как в них ОВ представлено керогеном преимущественно сапропелевого типа.

С целью детализации состава ОВ морского генезиса петрографическим методом Г.М. Парпаровой была разработана детальная петрологическая классификация сапропелевого ОВ [Парпарова, Жукова, 1990], которая предназначена для оценки структурно-химического состава ОВ более древних отложений. Вместе с тем, петрографический метод, основанный на изучении ОВ в шлифах, имеет ограниченные возможности диагностики таксономического состава представителей органостенной биоты, из которой образовалось нерастворимая часть ОВ пород. В связи с этим петрографическая классификация не позволяет учитывать совокупность вещественно-химических показателей ОВ нижнепалеозойских и докембрийских толщ в той мере, которая необходима для надёжной оценки его катагенетической преобразованности.

Учитывая вышеизложенное, мы обратили внимание на палинологический метод, как на необходимое дополнение углепетрографического метода применительно к детальному определению исходного биоценотического состава сапропелевого ОВ нижнепалеозойских и верхнепротерозойских отложений. Возможности палинологического метода достаточно широки в отношении изучения состава ОВ и выходят далеко за рамки определения спор,

пыльцы, водорослей и акритарх. Данный метод позволяет учитывать ряд таких важных показателей ОВ, как таксономический состав организмов растительного и животного происхождения, его биоценотическую и экологическую характеристики, а также позволяет реконструировать палеоэкологические условия и проследивать биофациальные комплексы в осадочных бассейнах [Петросьянц, Овнатанова, Мусина, 1990; Макарова, 2009].

В табл. 1 представлена составленная нами схема комплексной характеристики ОВ, в основу которой положены разные принципы выделения типов и видов ОВ, последние могут быть установлены только при палинологических исследованиях [Определение исходного типа..., 1984; Петросьянц, Овнатанова, Мусина, 1990]. Такая детальность состава ОВ необходима для оценки вещественно-химического состава и последующей достоверной оценки степени катагенеза ОВ. Что же касается определения по таксонам при палинологических исследованиях вещественно-химического состава ОВ, то эти характеристики установлены биохимическими и геохимическими исследованиями современных видов и таксонов, встречающихся в ископаемом состоянии (табл. 2). Так, в настоящее время установлено, что разные таксоны водорослей, не говоря уже о беспозвоночных, имеют в пределах близких групп не только выраженные морфологические различия, но и четкие хемотаксономические различия [Геология и геохимия..., 2000; Конторович и др., 2009]. Таким образом, когда таксономический и биоценотический состав ОВ пород определен, то может быть установлен и химический состав исходного ОВ.

Причина, по которой мы не рассматриваем возможность определения исходного состава ОВ нижнепалеозойских и верхнепротерозойских отложений по показателям пиролиза, биомаркерам битумоидов, характеристике инфракрасных спектров, заключается в том, что эти методы являются “косвенными” по отношению к определению состава ОВ [Богородская, Ларичев, 1991; Геология и геохимия..., 2000] и, поэтому непригодны для осуществления количественных оценок состава ОВ.

Таким образом, в ряду рассмотренных методов определения состава ОВ, их следует расположить в соответствии с возрастанием информативности следующим образом: (пиролитический + хромато-масс-спектрометрический + ИК-спектроскопический) – петрографический – палинологический.

Таблица 1

Типизация органического вещества при определении степени катагенеза палинологическим методом

Критерии выделения типов и видов органического вещества пород	Основные показатели органического вещества	
Содержание	Рассеянное органическое вещество	Концентрированное органическое вещество
Растворимость	Нерастворимое органическое вещество	Растворимое органическое вещество
Размерность	Детритное	Дисперсное
Структура	Структурированное	Бесструктурное
Сохранность	Хорошая, средняя, плохая	
Таксономический состав	Естественная систематика (тип, отдел, класс, семейство, род, вид); Искусственная систематика (в основном род, вид)	Фрагменты организмов
Биохимический состав (геополимеры)	Склеропротеиновые, спорополлениновые, хитиновые, целлюлозные	
Биоценотическая и/или экологическая характеристики	биоценозы открытого бассейна, шельфа, биострома, лагуны, прибрежно-морских и континентальных обстановок (озерно-болотные), морские, пресноводные, галофильные и др.	
Характеристика ОВ по месту и времени образования осадка	По отношению к месту осадкообразования: автохтонное, аллохтонное	По отношению ко времени осадкообразования: in situ, переотложенное
Вид и степень преобразованности:		
а) химико-минералогический	Восстановленное (следы пирита)	Окисленное (темный цвет)
б) био- микробактериальный	Наличие следов жизнедеятельности животных Наличие следов жизнедеятельности бактерий	Отсутствие следов жизнедеятельности животных Отсутствие следов жизнедеятельности бактерий
в) катагенетический (уровень катагенеза ОВ)	Для спорополлениновых микрокомпонентов в соответствии с РД-39-11-1142-84 [Определение исходного типа.,1984]	Для сапропелевых микрокомпонентов (коллохитинит, колоальгинит) [Парпарова, Неручев, Жукова, 1989; Парпарова, Жукова,1990]

Таблица 2

**Уровни изучения рассеянного органического вещества и их показатели
(для нижнепалеозойских и докембрийских отложений)**

Первый уровень – таксономические показатели	Второй уровень – геополимерные показатели**	Третий уровень – молекулярные показатели**
Бактерии	Пептидогликан	Стеро́лы C ₂₇ -C ₂₉ , гопаны
Цианобактерии (синезеленые водоросли)	Целлюлоза, пектиновые вещества**	Гопаны, метилгопаны
Кишечнополостные (губки)	Нет данных	24-изопропилхолестены
Граптолиты	Склеропротеин	Высокоуглеродные стерены, холестен
Красные водоросли	Гемицеллюлоза	Нормальные алканы с преобладанием C ₁₅ , C ₁₇ , C ₁₉ , C ₂₁ , фукостераны (бурые водоросли)
Бурые водоросли	Альгулеза	
Зеленые водоросли (протококковые)	Водорослевая целлюлоза, спорополленин	Алифатические углеводороды, нормальные алканы C ₁₄ —C ₃₂ , изо- и антеизоалканы
Празиофитовые водоросли (тасманацей)	Спорополленин	Трицикланы (хейлантаны), н- алкилбензолы

**[Петров, 1984; Журавлев, 2003; Иванова, 2008; Конторович и др., 2009]

2.2. Выбор и обоснование оптимального метода достоверной оценки катагенетического преобразования ОВ (решение второй задачи)

Ниже нами рассмотрены те же методы, но уже применительно к оценке катагенеза ОВ.

Пиролитический и хромато-масс-спектрометрический методы. Данные пиролитического и хромато-масс-спектрометрического методов считаются наиболее информативными для оценки зрелости ОВ. Вместе с тем, на примере нефтематеринских пород баженовской свиты, в породах которой часто отсутствует витринитовая составляющая, показано, что определение зрелости ОВ хроматомасс-спектрометрическим и пиролитическим методами представляет некоторую методическую сложность. Так, применение этих двух методов для определения зрелости ОВ потребовало предварительного соотнесения (калибровки) ряда показателей, получаемых указанными методами (T_{max} и около 40 углеводородных и гетероатомных соединений), с общепринятым показателем катагенетической преобразованности ОВ – значением отражательной способности витринита - R₀ [Гончаров и др., 2004]. В экспериментальных исследованиях И.В. Гончаровым, В.В. Самойленко, С.В.Носовой, Н.В. Обласовым были установлены существенные разбросы

значений показателей, полученных этими методами, в диапазоне изменения R_0 от 0,50 до 0,95%.

Этот диапазон в соответствии со шкалой катагенеза, разработанной Н.Б. Вассоевичем, С.Г. Неручевым и др. [цит. по Парпарова, Жукова, 1990] отвечает изменению градаций катагенеза от МК₁ до МК₃, а именно: МК₁ – (R_0 0,45-0,60); МК₂ – (R_0 - 0,60-0,85); МК₃ – (R_0 - 0,85 -1,15). В результате из 40 основных геохимических показателей, используемых при оценке катагенетической преобразованности ОБ пород в разных регионах [Виноградова и др., 2001], для баженовской свиты наиболее информативными оказались следующие:

- 4МБДТ/1МБДТ, (4МБДТ – 4-метилдибензотиофен; 1МБДТ – 1-метилдибензотиофен);
- ТА (I)/ТА(I+II), (ТА(I) – сумма триароматических стеранов состава C₂₀ и C₂₁; ТА(II) – сумма триароматических стеранов состава C₂₆ – C₂₈;
- Ts/ Ts +Tm, (Ts-18 α (H)-22,29,30-триснорнеогопан; Tm – 17 α (H)-22,29,30-трисноргопан).

Однако и для этих параметров в области их минимальных значений наблюдался также широкий разброс значений R_0 - от 0,51 до 0,76%.

Таким образом, в результате экспериментальной работы был получен вывод о неэффективности применения большинства из характеристических параметров масс-спектров битумоидов, выделенных из пород баженовской свиты.

При этом важно отметить, что значения показателей катагенеза ОБ, основанные на данных хромато-масс-спектрометрии, были также сопоставлены со значениями T_{max} , полученными в ходе экспериментов по пиролизу ОБ. «Разброс» значений показателей хромато-масс-спектрометрии, наблюдаемый при попытке установить корреляционную зависимость с T_{max} , оказался близким по величине их «разбросу» при сопоставлении с R_0 . Таким образом, можно считать, что значения T_{max} также малоинформативны при значениях R_0 от 0,50 до 0,95% (или в диапазоне градаций катагенеза от МК₁ до МК₃ включительно).

К.Е. Peters при сопоставлении данных, полученных пиролитическим методом, со значениями R_0 пришел к сходному выводу еще в 1986 г. на основании того, что в области низких градаций катагенеза (при T_{max} ниже 430⁰С) широкий разброс значений T_{max} , был обусловлен совсем другими причинами, а не катагенезом ОБ [цит. по Гончаров и др., 2004].

Такие детальные исследования привели И.В. Гончарова, В.В. Самойленко, С.В. Носову, Н.В. Обласова к выводам о том, что значения R_0 не в полной мере отражают характер катагенеза ОБ пород баженовской свиты, при этом авторами была прослежена большая

строгость в изменении состава и соотношении молекулярных показателей, в том числе и их стереоизомеров, при последовательной стадильности катагенетических изменений ОВ.

Здесь необходимо отметить, что в целом геохимические методы «не дают четких градаций катагенеза», они «позволяют определить преобразованность рассеянного органического вещества на уровне: незрелое, малозрелое, зрелое, высокозрелое (перезрелое)» [Геология и геохимия., 2000].

Петрографический метод. Для определения катагенеза ОВ безвитринитовых толщ Г.М. Парпаровой и А.В. Жуковой [Парпарова, Неручев, Жукова, 1989; Парпарова, Жукова, 1990] разработана шкала катагенеза рассеянного ОВ сапропелевого происхождения, основанная на измерениях показателя преломления коллоальгинита и коллохитинита. В отличие от шкалы катагенеза ОВ, предложенной Н.Б. Вассоевичем и др. данная шкала основана не только на изменении значений показателя преломления микрокомпонентов сапропелевой природы (коллохитинита, коллоальгинита), присутствующих в исследуемом образце, но и на учёте геологических данных. Так, авторы, создавшие шкалу, отмечают, что она разрабатывалась на «единой палеоглубинной основе», где были «объединены данные по показателям преломления коллоальгинита, коллохитинита, элементному составу и выходу летучих веществ ОВ из отложений *древних и эпипалеозойских платформ, а также в районах со складчатыми осадками палеозоя*» [Парпарова, Жукова, 1990]. В целом это привело к неоднозначности определений по шкале, поскольку при одних и тех же значениях показателя преломления коллоальгинита ($N_{КА}$) градации катагенеза могут быть разными. Например, значение $N_{КА}$ - 1,660 для древних платформ соответствует подстадии ПК, а для эпипалеозойских платформ этому же значению $N_{КА}$ (1,660) соответствует уже подстадии мезокатагенеза (градация МК₁). На наш взгляд, такая шкала не может служить основой для детального определения уровня катагенеза ОВ.

Одним из перспективных решений проблемы надёжности оценки преобразованности ОВ безвитринитовых морских толщ мезозоя Западной Сибири, а также более древних отложений, стала шкала, разработанная в 2005 г. А.В. Фоминым на основе отражательной способности псевдовитринита [Фомин, 2005]. Однако область применения этой шкалы для нижнепалеозойских и верхнепротерозойских отложений, на наш взгляд, существенно ограничена из-за локального распространения в этих отложениях псевдовитринита - остатков бурых водорослей.

Палинологический метод. Палинологический метод (ПМ) позволяет оценивать уровень катагенеза ОВ на основе шкалы цветовой изменчивости микрофоссилий (спор и пыльцы).

Эта шкала была разработана для целей нефтегазопроисковых работ еще в 1984 г. в официально утвержденном руководящем документе РД РД-39-11-1142-84 [Определение исходного типа..., 1984], предназначенном для определения уровня катагенеза рассеянного ОБ. Следует отметить, что согласно РД РД-39-11-1142-84, шкала катагенеза по спорополлениновым микрокомпонентам увязана со шкалой углефикации и, следовательно, с диапазонами изменения показателя углефикации (отражательной способностью витринита R^0), значения которого, в свою очередь, определяются палеотемпературами. По аналогии с витринитом спорополленин также рассматривается в качестве своеобразного «палеотермометра» [Здобнова, 2009], и на основе сопоставления цвета оболочек микрофоссилий с цветовым индексом шкалы катагенеза может быть оценена максимальная палеотемпература прогрева вмещающих пород. Таким образом, по спорополлениновым компонентам может быть определен как уровень катагенеза ОБ (градации ПК₂, МК₁, МК₂, МК₃, МК₄, МК₅, АК₁), так и соответствующие этим градациям диапазоны палеотемператур, характеризующие степень катагенеза пород.

В последние годы А.М. Станевичем, Е.Н. Корниловой, Т.А. Гладкочуб и др. было установлено наличие в рифейских отложениях водорослей, в оболочках которых, наряду с водорослевой целлюлозой, содержится спорополленин [Станевич и др., 2009]. Этот факт создает предпосылки для оценки степени катагенетических преобразований рифейских толщ по палинологическим данным.

В случае отсутствия в образцах спорополленинсодержащих микрофитофоссилий, используя палинологический метод, можно руководствоваться менее детальной шкалой – по трем градациями цветовой изменчивости в проходящем свете, установленной по сапропелевым микрокомпонентам - коллоальгиниту и коллохитиниту [Парпарова, Неручев, Жукова, 1989].

Для древних отложений, по-видимому, возможно применение и более детальной цветовой шкалы, разработанной на основе изменения цвета оболочек празинофитовых водорослей – тасманитесов [Здобнова, 2009], широко распространенных в пермских и мезозойских отложениях. Однако возможность применения вышеупомянутой шкалы для более древних отложений фанерозоя и верхнепротерозойских отложений, на наш взгляд, ограничена в связи с редким распространением тасманитесов в этих отложениях.

Несмотря на преимущества ПМ по сравнению с другими методами, у него имеются и определенные недостатки. К основным из них следует отнести:

- ограничение области применения в случае высоких градаций катагенеза исследуемого ОВ (выше АК), когда ОВ выглядит «обуглероженным» и имеет черный цвет;

- сравнительно широкие интервалы шкалы катагенеза, которые позволяют определять ОВ на уровне градаций, но с меньшей детальностью по сравнению с ИК-спектроскопическим методом.

ИК-спектроскопический метод. При планировании проведения детальных исследований катагенетической преобразованности ОВ следует обратить особое внимание на ИК-спектроскопический метод, который выгодно отличается от других методов физико-химического исследования ОВ как с точки зрения широты диапазона значений катагенетической преобразованности ОВ, которые этим методом можно выявить, так и с точки зрения широты “охвата” различных составляющих изучаемого ОВ (нерастворимое ОВ, битумоиды и др.) [Глебовская, Резцов, Туровцев, 1982]. Для этого метода характерна высокая детальность определения уровня катагенеза. Так, при известном биоценоотическом составе исходного ОВ ИК-спектроскопическим методом достоверно определяются соответствующие градации катагенеза в каждой подстадии катагенеза и даже оцениваются изменения в пределах одной градации, например, $МК_1^1$ и $МК_1^2$ [Справочник по геохимии..., 1998].

Кроме того, ИК-спектроскопический метод позволяет согласовать результаты исследований нерастворимой части ОВ и различных растворимых его компонентов в широком диапазоне значений катагенетической преобразованности ОВ.

Следует отметить важный экспериментальный факт. Так, при определении катагенеза сапропелевого ОВ ИК-спектроскопическим методом с учетом исходного биоценоотического состава, установлено, что в случае одинакового уровня катагенеза ОВ, определенного по отражательной способности витринита, зоопланктонное ОВ «выглядит» более катагенетически преобразованными по сравнению с фитопланктонным ОВ [Суханов, Баженова, Котельникова, 2009]. На наш взгляд, это может свидетельствовать о том, что данным методом определяются катагенетические изменения собственно ОВ того или иного состава.

Что касается оценки катагенеза ОВ на основе данных элементного и изотопного анализов, то, поскольку их интерпретация в значительной степени зависит от состава пород и исходного ОВ (сапропелевое, гумусовое и т.д.), они могут рассматриваться, скорее, как дополнительные.

Приведенные данные относительно информативности различных экспериментальных методов, применяемых при исследовании катагенеза ОБ нижнепалеозойских – верхнепротерозойских отложений, позволили нам ранжировать их по увеличению значимости получаемых показателей с точки зрения детальности и достоверности оценки катагенетической преобразованности ОБ следующим образом: пиролитический – хромато-масс-спектрометрический – петрографический – палинологический – ИК-спектроскопический.

3. Рациональный комплекс методов и новые возможности его применения

На основе представленного выше сравнительного анализа ряда методов определения максимально полного состава ОБ и ряда методов определения достоверной степени катагенеза ОБ, нами были выделены два наиболее значимых по информативности и достоверности метода. В первом случае выделен палинологический метод, а во втором - ИК-спектроскопический метод.

Объединение этих методов, являющихся (в соответствии с результатами вышеприведённого анализа) наиболее оптимальными для решения двух взаимно дополняющих задач: *определения максимально полного состава ОБ; достоверной оценки уровня его катагенеза* – представляет, на наш взгляд, рациональный комплекс методов определения уровня катагенеза сапропелевого ОБ древних отложений фанерозоя и позднего протерозоя.

На базе комплексирования двух методов в рациональный комплекс предложен системный подход с выделением трех соподчиненных уровней исследования ОБ (таксономического, геополимерного и молекулярного) и соответствующих показателей, который позволяет прогнозировать:

- уровень катагенетической преобразованности ОБ разного состава, в т.ч. и геополимеров;

- содержание биомаркеров определенного состава в нефтяных углеводородах, которые могут быть выделены и определены впоследствии геохимическими методами.

Здесь следует отметить, что на молекулярном уровне изучения ОБ геохимическими методами достигнуты определенные результаты. Так, на сегодняшний день установлена взаимосвязь хемотаксономических и молекулярных показателей (биомаркеров) для большинства таксонов крупного ранга тип, отдел, класс (см. табл. 2) [Петров, 1984; Журавлев, 2003; Иванова, 2008; Конторович и др., 2009]. В то же время геополимерные

особенности ОВ, определяющие характер катагенетических изменений, исследованы недостаточно полно.

Применение рационального комплекса методов создает условия для более обоснованного определения уровня катагенеза ОВ и прогнозирования обнаружения тех или иных биомаркеров в составе нефтяных углеводородов, генерируемых нефтематеринскими толщами.

В качестве примера по детализации определения уровня катагенеза ОВ с учетом сопоставления результатов молекулярного и таксономического уровня исследований приведем опубликованные данные [Соколов, Федонкин, 2003; Иванова, 2008].

В настоящее время установлено, что породы, содержащие в массе тасманитесы, характеризуются более высоким содержанием ароматических соединений. Это связано с биохимическими особенностями тасманитесов, – прازیнофитовых водорослей, в которых, как считается, еще в прижизненном состоянии накапливаются продукты метаболизма – ароматические соединения – n-алкилбензолы.

При отмирании тасманитесов отложения оказываются обогащенными ароматическими соединениями уже на стадии диагенеза. Оценивая катагенез ОВ, особенно геохимическими методами, этот факт необходимо учитывать так, как повышенное содержание ароматических соединений в данном случае не связано с высокой степенью катагенетического преобразования ОВ пород. Таким образом, обнаружение в отложениях значительного количества тасманитесов, позволяет предположить, что:

- определяемый уровень катагенеза ОВ может быть несколько завышен из-за геохимических особенностей оболочек тасманитесов;
- в нефтяных углеводородах, производимых нефтематеринскими толщами, будет содержаться повышенное количество n-алкилбензолов.

Ниже приведен пример практического применения рационального комплекса при изучении сапропелевого ОВ из нижнедевонских и силурийских отложений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (коллекция А.А. Гудельман), где фактически отсутствуют витринитовые микрокомпоненты, образующиеся из высшей наземной растительности. В результате изучения микрофоссилий из этих отложений нами были выявлены как споры наземных растений, так и оболочки зеленых водорослей, содержащие спорополленин. При этом в составе ассоциаций микрофоссилий разновозрастных отложений было установлено соответствие цвета спорополленинсодержащих оболочек водорослей с цветом спор, т.е. и споры, и водоросли характеризовались одинаковым цветовым индексом.

Проведена «калибровка» по цвету спорополленинсодержащих водорослей со спорами расширяет возможности палинологического метода по применению цветовой шкалы катагенеза [Определение исходного типа..., 1984] для безвитринитовых древних толщ по индексу цвета водорослей.

При изучении сапропелевого ОВ, несмотря на отсутствие витринита, установленный нами состав ОВ оказался достаточно разнообразным как на таксономическом уровне, так и на уровне геополимеров. Среди последних, определяемых в световом микроскопе были выделены: водорослевые целлюлозы, склеропротеиновые, хитиноподобные и спорополленинсодержащие микрокомпоненты. Уровень катагенеза ОВ вмещающих толщ на основе спорополленинсодержащих микрокомпонентов по цветовому индексу, был определен на уровне градации МК₁₋₂. Полученная палинологическим методом оценка катагенеза ОВ подтверждалась результатами ИК-спектроскопических измерений, значения которых также указывали на область градации МК₁₋₂. При этом в палинологических препаратах цветовая гамма окраски других органостенных микрофоссилий, не содержащих спорополленин, изменялась от темно-коричневой до бесцветной.

Как уже отмечалось выше, уровень катагенеза ОВ в световом микроскопе устанавливается на основе существующих методик по изменению индекса цвета тех или иных микрокомпонентов [Определение исходного типа..., 1984; Парпарова, Неручев, Жукова, 1989; Парпарова, Жукова, 1990]. В связи с изменением цветовых характеристик разных органических остатков, по сравнению со спорополлениновыми микрокомпонентами, были выделены более преобразованные и менее преобразованные микрокомпоненты. К наиболее катагенетически преобразованным микрокомпонентам, нами отнесены склеропротеиновые остатки фауны, а хитин и водорослевая целлюлоза – к наименее преобразованным.

Полученные нами данные сходны с результатами исследований катагенеза, приведенными выше и установленными на основе применения ИК-спектроскопического и углепетрографического методов. Так, для более молодых отложений установлен факт различия уровня катагенеза зоопланктонного и фитопланктонного ОВ при одинаковых значениях витринитовой составляющей. [Суханов, Баженова, Котельникова, 2009]. Как уже отмечалось витринитовая и спорополлениновая составляющая являются градусниками палеотемператур, что позволяет определять на основе существующих шкал степень катагенеза породы (результат термобарического и других видов воздействия на породу).

Таким образом, на фактическом материале из нижнедевонских – силурийских отложений установлено, что при одной и той же степени катагенеза породы, определяемой

по градуснику палеотемператур «спорополленину», содержащееся в породе ОВ разного исходного состава (состоящее из разных геополимеров) отличается по своей катагенетической преобразованности.

4. Основные результаты

Основные результаты проведенного нами анализа различных методов применительно к оценке возможности исследований катагенеза сапропелевого ОВ нижнепалеозойских и более древних сводятся к следующему:

1. Проведен сравнительный анализ по полноте и достоверности данных, получаемых разными методами исследования ОВ.

2. Предложен рациональный комплекс оптических методов для оценки катагенетических преобразований сапропелевого ОВ нижнепалеозойских – позднепротерозойских отложений, основанный на последовательном применении палинологического метода и ИК-спектроскопического метода. Палинологический метод дает возможность, наряду с предварительной оценкой уровня катагенеза, получить наиболее полную характеристику ОВ. ИК-спектроскопический метод позволяет достоверно оценить уровень катагенеза ОВ с высокой степенью детальности.

3. В результате изучения ОВ безвитринитовых осадочных толщ раннего девона, силура, которые содержат споры и водоросли, известные в древних отложениях, нам удалось сопоставить по цвету оболочки спор и оболочки зеленых водорослей, также содержащих спорополленин. Установленное сходство цвета этих микрокомпонентов ОВ позволяет, по нашему мнению, применять шкалу катагенеза [Определение исходного типа.,1984] для оценки степени преобразованности ОВ более древних отложений фанерозоя и позднего протерозоя, где споры высших растений отсутствуют.

4. При применении рационального комплекса оптических методов появляется возможность:

- использования системного подхода в изучении ОВ на трех уровнях: таксономическом; геополимерном; молекулярном;
- сравнения данных, получаемых разными методами, оптических и геохимических на основе хемотаксономических признаков органических остатков.

Кроме того, на основании установленного в нефтематеринских породах ОВ того или иного таксономического состава возможен предварительный прогноз:

- особенностей катагенетических процессов, обусловленных исходным ОВ;

- наличия в битумоидах соответствующих биомаркеров, переходящих также в нефтяные углеводороды.

Таким образом, применение предложенного комплекса методов в целом может повысить эффективность проводимых при нефтегазопроисковых работах исследованиях ОБ.

Литература

Богородская Л.И., Ларичев А.И. Геохимия нефтегазоносных отложений Сибири. – Новосибирск, 1991. – С. 8-19.

Геология и геохимия нефти и газа / Под ред. Б.А. Соколова. – М: МГУ, 2000. – 384 с.

Глебовская Е.А., Резцов В.И., Туровцев А.В. Экспериментальное моделирование катагенетических превращений гумусового и сапропелевого вещества // Геохимия современных и ископаемых осадков. – М., 1982. – С. 215-227.

Гончаров И.В., Самойленко В.В., Носова С.В., Обласов Н.В. Зрелость органического вещества баженовской свиты Томской области по хроматомасс-спектрометрическим данным // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. – М.: Геос, 2004. – С. 133-135.

Журавлев А.Ю. Невидимые миру факты, или «говорящие» атомы и молекулы в палеонтологии // Природа, 2003. – №5. – С. 23-29.

Здобнова Е.Н. Миоспоры и водоросли *Tasmanites* нижнепермских подсолевых отложений Волгоградского Заволжья и их значение для стратиграфии и нефтегазовой геологии. - Автореферат диссертации на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук. – Саратов, 2009. – 26 с.

Иванова И.К. Моноалкилбензолы в нефтях венд-кембрийских отложений // Нефтегазовое дело, 2008. – №5. – С. 34-42.

Макарова И.Р. Модель сукцессий морской и наземной биот в осадочных секвенциях пермских отложений ТПП и ее значение для нефтяной геологии // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2009. – Т.4. - №3. – http://www.ngtp.ru/rub/2/25_2009.pdf.

Станевич А.М., Максимова Е.Н., Корнилова Т.А., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М, Донская Т.В. Микрофоссилии арымакской и дебенгинской свит рифея Оленекского поднятия: возраст и предполагаемая природа // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2009. - Т.17. - №1. – С. 23-40.

Конторович А.Э., Каширцев В.А., Данилова В.П., Костырева Е.А., Ким Н.С., Меленевский В.Н., Москвин В.И., Парфенова Т.М., Тимошина И.Д., Фомин А.Н., Фурсенко Е.А. Молекулы – биомаркеры в ископаемом органическом веществе и нафтидах докембрийских и фанерозойских пород Сибири. – СПб: ВНИГРИ, 2009. – 108 с.

Определение исходного типа и уровня катагенеза рассеянного органического вещества палинологическим методом. РД-39-11-1142-84. – М: Министерство нефтяной промышленности, 1984. – 17 с.

Парпарова Г.М., Жукова А.В. Углететрографические методы в изучении осадочных пород полезных ископаемых. - Л.: Недра, 1990. – 308 с.

Парпарова Г.М., Неручев С.Г., Жукова А.В. Отражение природных процессов катагенетических превращений ОБ в оптических свойствах микрокомпонентов и их использование для изучения нефтегазообразования // Теоретические, природные и экспериментальные модели нефтегазообразования, их использование в прогнозе нефтегазоносности. - Тезисы докл. VI Всесоюзного семинара 27 ноября - 1 декабря 1989 г. - Л.: ВНИГРИ, 1989. – С. 105-107.

Петров А.А. Углеводороды нефти. - М.: Наука, 1984. – 264 с.

Соколов Б.С., Федонкин М.А. Биоразнообразие неопротерозоя и раннего фанерозоя в аспектах становления древних экосистем и стратиграфии // Научная школа, 2003. - №5. - 10 с.

Справочник по геохимии нефти и газа / Под ред. С.Г. Неручева. – СПб: Недра, 1998. – 576 с.

Суханов А.А., Баженова Т.К., Котельникова Е.Н. Структурные характеристики углеродного компонента керогена сапропелитов: зависимость от биоценоотического типа исходного органического вещества и степени его катагенеза // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2009. – Т.4. - №4. – http://www.ngtp.ru/rub/1/40_2009.pdf.

Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти и газа. - М.: Мир, 1981. – 501 с.

Виноградова Т.Л., Чахмахчев В.А., Агафонова З.А., Якубсон З.В. Углеводородные и гетероатомные соединения – показатели термической зрелости органического вещества пород и нефтидов // Геология нефти и газа, 2001. – №6. – С. 49-55.

Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских (юра, триас) и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. - Автореферат диссертации на соискание степени доктора геолого-минералогических наук. – Новосибирск, 2005. – 30 с.

Makarova I.R., Sukhanov A.A.

All-Russia Petroleum Research Exploration Institute (VNIGRI), St. Petersburg, Russia, ins@vnigri.ru

METHODOLOGICAL ASPECTS OF CATAGENESIS STUDY OF SAPROPELIC ORGANIC MATTER IN OIL AND GAS POTENTIAL EVALUATION

The evaluation of catagenesis level of sapropelic organic matter from the Early Paleozoic and Late Proterozoic sediments causes certain methodological difficulties. A comparative analysis of different methods of organic matter study has been carried out in order to choose optimal methods for the determination of composition and the evaluation of organic matter catagenesis level. The efficient set of methods based on the joint application of palynological and infrared spectroscopic methods has been justified, which enables us to conduct systemic research of organic matter on three interrelated levels: taxonomic; geo-polymeric and molecular. The set of methods proposed can enhance the efficiency of oil and gas exploration.

Key words: *the Lower Paleozoic and the Upper Proterozoic sediments, catagenesis level, insoluble organic matter, palynological method, infrared spectroscopic method, oil and gas exploration efficiency.*

References

Bogorodskaya L.I., Larichev A.I. *Geokhimiya neftegazonosnykh otlozheniy Sibiri* [Geochemistry of oil-and-gas-bearing deposits of Siberia]. Novosibirsk, 1991, pp. 8-19.

Geologiya i geokhimiya nefti i gaza [Geology and geochemistry of oil and gas]. Editor B.A. Sokolov. Moscow: Moscow State University, 2000, 384 p.

Glebovskaya E.A., Reztsov V.I., Turovtsev A.V. *Ekspperimental'noe modelirovanie katageneticheskikh prevrashcheniy gumusovogo i sapropelevogo veshchestva* [Experimental modeling of katagenetic transformations of humic and sapropelic matter]. *Geokhimiya sovremennykh i iskopaemykh osadkov*, Moscow, 1982, pp. 215-227.

Goncharov I.V., Samoylenko V.V., Nosova S.V., Oblasov N.V. *Zrelost' organicheskogo veshchestva bazhenovskoy svity Tomskoy oblasti po khromatomass-spektrmetricheskim dannym* [The maturity of organic matter of the Bazhenov suite, Tomsk region, using GC-spectrometric data]. *Novye idei v geologii i geokhimiya nefti i gaza*. Moscow: Geos, 2004, pp. 133-135.

Zhuravlev A.Yu. *Nevidimye miru fakty, ili «govoryashchie» atomy i molekuly v paleontologii* [The facts invisible for world, or "speaking" atoms and molecules in paleontology]. *Priroda*, 2003, no. 5, pp. 23-29.

Zdobnova E.N. *Miospory i vodorosli Tasmanites nizhneperskikh podsolevykh otlozheniy Volgogradskogo Zavolzh'ya i ikh znachenie dlya stratigrafii i neftegazovoy geologii* [Myospores and Tasmanites algae of the Lower Permian subsalt deposits, Volgograd Volga region and their significance for stratigraphy and petroleum geology]. Synopsis of dissertation for the degree of PhD in Geological and Mineralogical Sciences. Saratov, 2009, 26 p.

Ivanova I.K. *Monoalkilbenzoly v neftyakh vend-kembriyskikh otlozheniy* [Mono-alkyl-benzenes in the oils of the Vendian-Cambrian deposits]. *Neftegazovoe delo*, 2008, no. 5, pp. 34-42.

Makarova I.R. *Model' suksessiy morskoy i nazemnoy bioty v osadochnykh sekvensiyakh permskikh otlozheniy TPP i ee znachenie dlya neftyanoy geologii* [Model of succession of marine and land biota in the

sedimentary sequences of Permian deposits Timan-Pechora province and its significance for petroleum geology]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2009, vol. 4, no. 3, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/25_2009.pdf.

Stanevich A.M., Maksimova E.N., Kornilova T.A., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V. *Mikrofossilii arymakskoy i debenginskoy svit rifeya Olenekskogo podnyatiya: vozrast i predpolagaemaya priroda* [Microfossils of Arymak and Debenginsk suites of the Riphean Olenek uplift: age and nature]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya*, 2009, vol. 17, no. 1, pp. 23-40.

Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Danilova V.P., Kostyreva E.A., Kim N.S., Melenevskiy V.N., Moskvina V.I., Parfenova T.M., Timoshina I.D., Fomin A.N., Fursenko E.A. *Molekuly – biomarkery v iskopaemom organicheskom veshchestve i naftidakh dokembriyskikh i fanerozoyskikh porod Sibiri* [Molecules as biomarkers in fossil organic matter and naphthides of the Pre-Cambrian and Phanerozoic rocks in Siberia]. Saint Petersburg: VNIGRI, 2009, 108 p.

Opređenje iskhodnogo tipa i urovnya katageneza rasseyannogo organicheskogo veshchestva palinologicheskim metodom. [Determining the source type and catagenesis level of dispersed organic matter by palynological method]. RD-39-11-1142-84. Moscow: Ministerstvo neftyanoy promyshlennosti, 1984, 17 p.

Parparova G.M., Zhukova A.V. *Uglepetrograficheskie metody v izuchenii osadochnykh porod poleznykh iskopaemykh* [Coal-petrographic methods in the study of sedimentary minerals]. Leningrad: Nedra, 1990, 308 s.

Parparova G.M., Neruchev S.G., Zhukova A.V. *Otrazhenie prirodnykh protsessov katageneticheskikh prevrashcheniy OV v opticheskikh svoystvakh mikrokomponentov i ikh ispol'zovanie dlya izucheniya neftegazoobrazovaniya* [Reflection of the natural processes of katagenetic transformations of organic matter in the optical properties of micro-components and their application for oil-and-gas generation study]. Abstracts of VI All-Union Seminar "Teoreticheskie, prirodnye i eksperimental'nye modeli neftegazoobrazovaniya ikh ispol'zovanie v prognoze neftegazonosnosti" [Theoretical, natural and experimental models of oil-and-gas generation and their application in petroleum potential forecast]. Leningrad: VNIGRI, 1989, pp. 105-107.

Petrov A.A. *Uglevodorody nefti* [Hydrocarbons of oil]. Moscow: Nauka, 1984, 264 p.

Sokolov B.S., Fedonkin M.A. *Bioraznoobrazie neoproterozoya i rannego fanerozoya v aspektakh stanovleniya drevnykh ekosistem i stratigrafii* [Biodiversity of the Neoproterozoic and Early Phanerozoic in the aspects of formation of ancient ecosystems and stratigraphy]. *Nauchnaya shkola*, 2003, no. 5, 10 p.

Spravochnik po geokhimii nefti i gaza [Handbook of oil and gas geochemistry]. Editor S.G. Neruchev. Saint Petersburg: Nedra, 1998, 576 p.

Sukhanov A.A., Bazhenova T.K., Kotelnikova E.N. *Strukturnye kharakteristiki uglerodnogo komponenta kerogena sapropelitov: zavisimost' ot biotsenoticheskogo tipa iskhodnogo organicheskogo veshchestva i stepeni ego katageneza* [Structural characteristics of a carbonic component of sapropelite kerogen: dependence on the biocoenosis type of original organic matter and the degree of its catagenesis]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2009, vol. 4, no. 4, available at: http://www.ngtp.ru/rub/1/40_2009.pdf

Tisso B., Vel'te D. *Obrazovanie i rasprostranenie nefti i gaza* [Formation and distribution of oil and gas]. Moscow: Mir, 1981, 501 p.

Vinogradova T.L., Chakhmakhchev V.A., Agafonova Z.A., Yakubson Z.V. *Uglevodorodnye i geteroatomnye soedineniya – pokazateli termicheskoy zrelosti organicheskogo veshchestva porod i naftidov* [Hydrocarbon and heteroatomic compounds as indicators of thermal maturity of organic matter and naphthides]. *Geologiya nefti i gaza*, 2001, no. 6, pp. 49-55.

Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegazonosnost' mezozoyskikh (yura, trias) i paleozoyskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyna* [Catagenesis of organic matter and petroleum potential of the Mesozoic (Jurassic, Triassic) and Paleozoic deposits of the West Siberian megabasin]. Synopsis of dissertation for the degree of PhD in Geological and Mineralogical Sciences. Novosibirsk, 2005, 30 p.