

УДК 553.983:552.14

©

Зубков М.Ю., Федорова Т.А.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОРГАНИЧЕСКОГО  
ВЕЩЕСТВА ПО МЕРЕ ЕГО КАТАГЕНЕТИЧЕСКОЙ  
ЭВОЛЮЦИИ

Рассматриваются особенности преобразования микроструктуры различных микрокомпонентов углей, а также рассеянного органического вещества в зависимости от стадии их катагенетического созревания. Делается вывод о возможности использования микроструктуры определенных компонентов органического вещества для суждения о степени его термической эволюции, в частности о прохождении главной фазы нефтеобразования.

Из всех компонентов, входящих в состав осадочных пород, органическое вещество (ОВ) наиболее подвержено воздействию внешних термодинамических факторов и поэтому чутко реагирует на изменения физико-химических параметров природной обстановки. В процессе образования и последующей литификации осадка наибольшие изменения исходное ОВ претерпевает дважды. Во-первых, на ранней стадии образования осадка в приповерхностных условиях, когда в зависимости от условий захоронения происходит более или менее интенсивное окисление ОВ. Во-вторых, при достижении погружающимися осадками некоторой глубины и соответственно температуры  $T_{пл}$ , начиная с которой ОВ начинает интенсивно генерировать битумоиды. Этот этап в катагенетической эволюции ОВ, как известно, получил название главной фазы нефтеобразования (ГФН).

Существенным фактором является то, что и в первом (окисление) и во втором (нефтегазогенерация) случаях происходит уменьшение объема ОВ, что приводит к формированию вторичной пористости  $Y_{вт}$  [1] и соответственно к возникновению у исходного ОВ определенной микроструктуры.

Таким образом, микроструктура ОВ будет зависеть, во-первых, от его первоначального химического состава и степени окисления в процессе седиментации и, во-вторых, от стадии катагенеза.

Логично предположив, что различные микрокомпоненты, слагающие ОВ, преобразуются неодинаково, что в свою очередь вызывает формирование различной по величине  $V_{вт}$ , а следовательно, и соответствующей каждому микрокомпоненту микроструктуре, наблюдаемой на поверхности сколов образцов.

Для изучения микроструктуры ОВ использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-50A. Исследования проводились в режиме вторичных электронов, в интервале увеличений 1 000–10 000. Так как для изучения в РЭМ диэлектриков на поверхность образца необходимо наносить слой проводящего материала, то в данном случае, чтобы избежать искажения морфологии поверхности, все образцы готовились следующим образом: в вакуумном напылителе Fine coat на поверхность образцов наносили пленку золота толщиной 300 Å. Пленка золота такой толщины дает оптимальную вторично-электронную эмиссию, не искажая тонких деталей поверхности [5].

Чтобы избежать неоднозначности в интерпретации полученных снимков, первоначально исследовали концентрированные формы ОВ – угли. Для этого использовали коллекцию углей с различным микрокомпонентным составом, отобранных с глубин от 2 до 3 км с  $T_{пл}$  соответственно от 70 до 110 °C (таблица).

Микрокомпонентный состав углей определяли по изготовленным из них про-

**Микрокомпонентный состав и некоторые физические свойства углей,  
отобранных с месторождений Широтного Приобья**

Месторождение	Номер сква- жины	Глу- бина отбо- ра об- раз- ца, м	Пласто- вая температура, °С	Микрокомпонентный состав, %			Выход летучих на ОВ, %	Темпера- тура макси- мального выхода летучих, °С
				фюзи- нит	витри- нит	лейпти- нит		
Шушминское	1081	1993	70	92	5	3	21	430
Солкинское	1152	2742	82	95	3	2	16	435
Тепловское	274	2888	91	97	2	1	23	440
Талинское	3902	2740	90	75	20	5	17	440
Варьеганское	2153	2618	80	3	95	2	40	390
Тюменское	121	2756	85	0	100	0	32	430
Салымское	131	2918	110	0	100	0	20	460
Северо-Варьеган- ское	4П	3130	102	5	70	25	40	435

зрачным шлифам. На основании углепетрографических исследований были приготовлены три группы образцов или выделены участки в углях, сложенные в первой группе преимущественно фюзинитом, во второй – витринитом и в третьей – лейптинитом.

Интересно, что угольные микрослойки, толщиной 1–3 мм, отобранные из отложений баженовской свиты с различных месторождений (см. таблицу), оказались сложенными практически одним витринитом. Остальные образцы углей содержали в заметных количествах все три компонента.

Степень катагенетической превращенности ОВ в отобранных образцах углей закономерно увеличивается с ростом  $T_{пл}$ , что подтверждается дериватографическими исследованиями (по выходу летучих на органическую массу, увеличению температуры максимального выхода летучих продуктов) [3], а также по изменению цвета ОВ в прозрачных шлифах (потемнение до темно-коричневого, почти черного в образцах, отобранных из наиболее глубоких скважин с максимальной  $T_{пл}$ ).

Лишь после детального исследования морфологии микроструктуры поверхности сколов концентрированных форм ОВ (углей) была проанализирована также структура поверхности рассеянных форм ОВ (РОВ). С этой целью использовали образцы пород, богатые РОВ – черные сланцы (кукерсит, баженовская и менилитовая свиты).

**Обсуждение результатов.** Влияние процессов окисления на микроструктуру исходного ОВ удобнее всего проследить на фюзините, так как именно этот микрокомпонент углей наиболее окислен, что выражается в его карбонатизации и почернении. Напротив, катагенетические изменения микроструктуры ОВ лучше всего должны проявиться при термическом созревании витринитовых и лейптинитовых компонентов, которые на начальных стадиях осадкообразования подвергались окислению в гораздо меньшей степени, чем фюзинит.

Используя простейшие балансовые расчеты, основанные на знании элементного состава углей различного микрокомпонентного состава, битумоидов и неуглеводородных летучих, а также литературные данные [4, 6] можно примерно оценить максимальные генерационные свойства  $\Gamma_{макс}$  различных микрокомпонентов углей. Под  $\Gamma_{макс}$  будем понимать активную часть ОВ, т.е. ту его часть, которая по мере катагенетической эволюции превращается в битумоиды и неуглеводородные летучие.

Так, в фюзините  $\Gamma_{макс}$  в зависимости от его состава и свойств изменяется примерно от 10 до 25% от его первоначального веса. В витрините  $\Gamma_{макс}$  достигает

приблизительно 40–50%, а в лейптинах – 60–70% от исходного веса или объема. Иными словами, при отсутствии уплотнения, после окончания процессов генерации,  $V_{bt}$  может изменяться от 10 до 70% в зависимости от микрокомпонентного состава.

Исходя из полученных оценочных данных следует ожидать, что минимальные структурные преобразования поверхности  $OB_{isch}$  по мере его термического созревания будут характерны для фюзинита. Более значительные изменения микроструктуры должны отмечаться для витринитовой, а максимальные – для лейптиновой компоненты  $OB_{isch}$ .

Помимо вещественного состава морфология микроструктуры различных микрокомпонентов  $OB_{isch}$ , возникающая в результате процесса генерации ими битумоидов и неуглеводородных летучих, в значительной степени зависит также еще от ряда дополнительных причин. Во-первых, от исходной структуры микрокомпонентов, во-вторых, от геометрической формы, в которой они присутствуют в породе (шарообразные тела, пленки или корочки, массивные образования), в-третьих, от степени прочности их связи с минеральной матрицей, и в-четвертых, от их реологических свойств, а также от способности противостоять уплотняющему действию литостатического давления.

Простейшим примером влияния внутренней структуры микрокомпонентов на морфологию возникающей  $V_{bt}$  и соответственно на ее микроструктуру являются фитералы. Это объясняется их анизотропным строением, а значит и неодинаковой величиной  $V_{bt}$ , возникающей по различным составляющим фитералов (фиг. 1, в).

Влияние формы исходного ОВ на морфологию его микроструктуры можно проанализировать на примере шарообразных, пленочных и массивных образований. При этом следует отметить, что процессы окисления и генерации битумоидов и неуглеводородных летучих из ОВ по физической сути очень близки к процессу обезвоживания и поэтому для описания морфологии  $V_{bt}$  или микроструктуры ОВ можно применять приемы и методы, используемые при анализе процесса обезвоживания [2].

Так, например, для шарообразных тел ОВ, подверженных окислению или генерирующих битумоиды и летучие, возможны три основных варианта формирования  $V_{bt}$ .

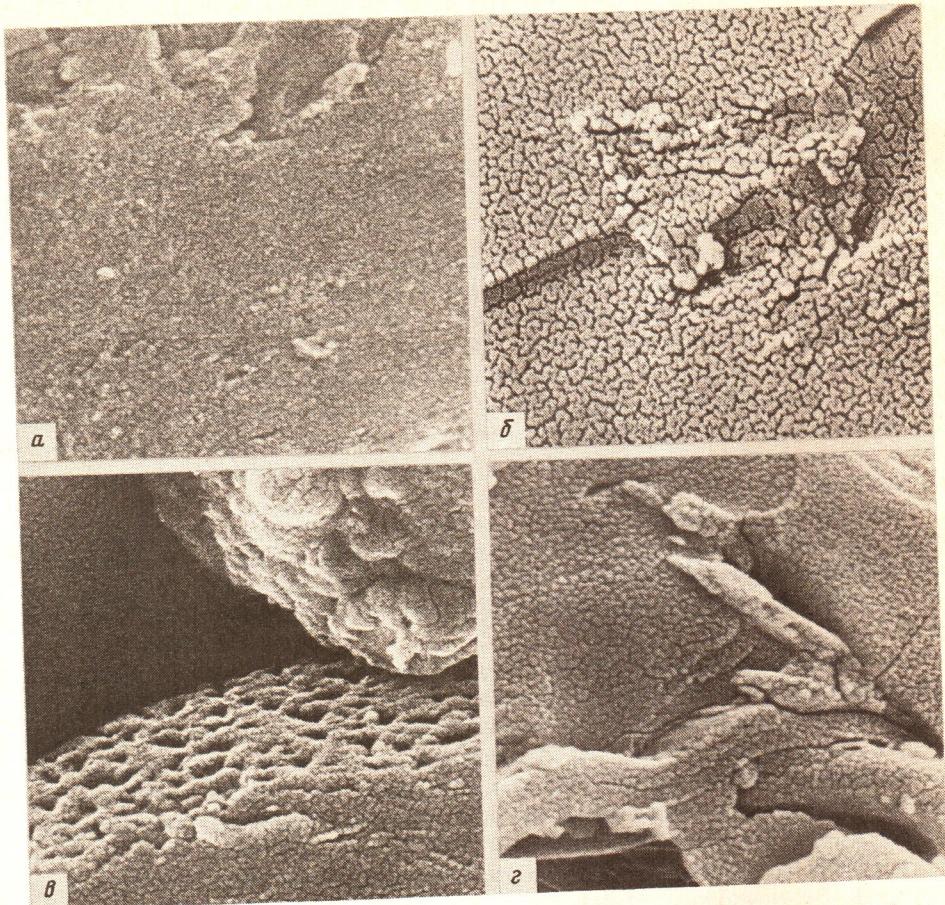
Если  $OB_{isch}$  аморфно и его структура абсолютно изотропна, то в результате процесса нефтегенерации произойдет "сжатие" исходного шара с уменьшением его первоначального радиуса. Однако в действительности ОВ, как правило, имеет неоднородную структуру, поэтому возможны еще два варианта формирования  $V_{bt}$ .

Если шарообразное ОВ структурировано таким образом, что при его окислении или генерации им битумоидов и летучих преимущественно уменьшаются его размеры вдоль радиуса, то в нем возникнут трещины, раскрытые вовнутрь органической массы.

Если же в результате генерации происходит преимущественно уменьшение размеров исходного ОВ в направлении, перпендикулярном к радиусу, то возникающие трещины уже будут раскрываться наружу.

В обоих случаях первоначальный радиус шарообразного ОВ не изменится. Если ОВ присутствует в виде пленочек, микролинзочек и т.п., то формируется структура, напоминающая высохшую глинистую корку и состоящая из многоугольников, разделенных трещинами "усыхания".

Влияние третьей причины – степени связи  $OB_{isch}$  с минеральным субстратом – удобно проследить на примере форм сечений образующихся трещин "усыхания". Возможны два варианта. В том случае, когда степень связи ОВ с субстратом слаба, трещины, разделяющие отдельные микроблоки органики, имеют вертикальные границы. Если же связь  $OB_{isch}$  с субстратом достаточно велика, то в сечении трещины имеют вид конуса, расширяющегося в сторону свободной поверхности ОВ.



Фиг. 1. Микроструктуры поверхностей сколов фузинитовых микрокомпонентов углей Месторождения: а – Шушминское; б – Солкинское; в – Тепловское (внизу фрагмент фильтера); г – Талинское. Увел. 10 000

В массивных образованиях ОВ<sub>исх</sub> развивается такая же сеть микротрещин, как и в пленочных, однако в отличие от них здесь возникает трехмерная (а не двумерная) сеть трещин, которая разбивает всю органическую массу на микрополиэдры. Однако поскольку трехмерная сеть не является полностью замкнутой, т.е. не все трещины соединяются между собой, то возникающие полиэдры сохраняют связь между собой и не рассыпаются на отдельные составляющие.

Четвертая причина – реологические и прочностные свойства различных типов ОВ обуславливают возможность сохранения или исчезновения возникающей в нем  $V_{\text{вт}}$ , проявляющейся в виде микротрещин вследствие "затекания" в них органической массы под действием сил поверхностного натяжения или литостатического давления.

Исследования микроструктуры окисленных разностей микрокомпонентов углей (фузинитов) проводились на образцах, находившихся при различных  $T_{\text{пл}}$  (см. таблицу). Состав выбранных углей преимущественно фузинитовый с различными значениями выхода летучих компонентов, максимум выделения которых лежит в интервале температур 430–440 °С (см. таблицу). Между микрокомпонентным составом углей, выходом летучих и величиной  $T_{\text{пл}}$  однозначная

связь отсутствует. Однако между  $T_{пл}$  и температурой максимального выхода летучих продуктов  $T_{макс}$  намечается положительная связь (см. таблицу).

Анализ полученных на РЭМ снимков показал, что на поверхности сколов всех фюзинитовых образцов независимо от величины  $T_{пл}$  и выхода летучих продуктов имеется отчетливая микроструктура, обусловленная наличием микрополиэдров или микроблоков с поперечными размерами 0,1–0,4 мкм, разделенными трещинами с раскрытием около 0,01–0,08 мкм (см. фиг. 1). В самом низкотемпературном образце с Шушминского месторождения микроструктура фюзинита выражена явно хуже, чем в других образцах, находившихся при более высоких  $T_{пл}$  (см. фиг. 1, а). Вероятно, последующие катагенетические преобразования усиливают рельефность возникающей у фюзинитов микроструктуры. Однако можно допустить также и то, что образец с Шушминского месторождения в меньшей степени подвергся окислению в седименто- и диагенезе, чем фюзиниты из других месторождений.

Чрезвычайно важен тот факт, что размеры микроблоков, возникающих в результате процессов окисления в фюзините, сравнимы с длиной световой волны (фиолетовая область спектра). Поскольку размеры микроблоков (микрополиэдров) в пределах одного образца фюзинита изменяются незначительно, то формирующаяся микроструктура придает поверхности скола угля свойства дифракционной решетки. Падающий на поверхность угля свет взаимодействует с ней, что придает ей характерный шелковистый отлив. Однако этот отлив появляется у углей с достаточно крупными микроблоками (около 0,4 мкм и более), так как на меньших по размерам полиздрах дифрагируют ультрафиолетовые лучи, не видимые для человеческого глаза.

Таким образом, по особенностям строения микроструктуры фюзинитов нельзя однозначно судить о степени их катагенетического преобразования, так как ее формирование прежде всего результат окисления исходных растительных тканей и лишь затем продукт последующей природной термодеструкции в ГФН.

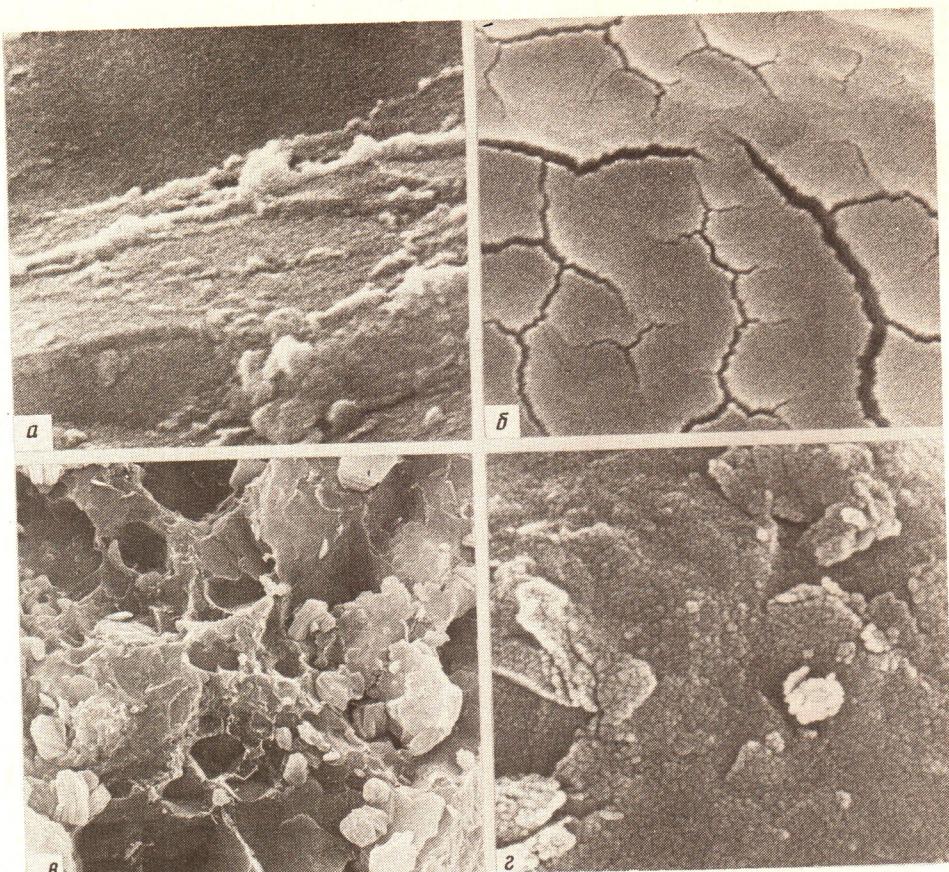
Наиболее удобным объектом для анализа характера изменений микроструктуры концентрированных форм ОВ по мере их катагенетического преобразования являются углистые микрослойки из битуминозных отложений баженовской свиты, так как они сложены практически одним микрокомпонентом – витринитом (см. таблицу).

Образец с Варьеганского месторождения находился в условиях с  $T_{пл}$ , равной 80 °С, и имел минимальную из всех отобранных из баженовской свиты углей степень катагенетической преобразованности. Уголь из этого образца характеризуется максимальным (40%) выходом летучих и минимальной  $T_{макс}$  (см. таблицу). Микроструктура его скола имеет ровную, однородную поверхность (см. рис. 2, а).

Несколько большую степень превращения имеет баженовский уголь с Тюменского месторождения, находившийся в пластовых условиях при  $T_{пл}$  85 °С. Выход летучих из этого угля составляет уже 32% и  $T_{макс}$  – 430 °С (см. таблицу), а на поверхности скола появляется сеть микротрещин усыхания с раскрытием около 0,2 мкм, разбивающая поверхность скола на микроблоки с размерами 1–2 мкм (см. фиг. 2, б).

Наибольшую степень катагенетической превращенности имеет уголь из отложений баженовской свиты Салымского месторождения с современной  $T_{пл}$  110 °С. Выход летучих из него составляет всего около 20%, а  $T_{макс}$  – 470 °С (см. таблицу).

Анализ сделанных на РЭМ снимков показал, что поверхность сколов угля с Салымского месторождения имеет сложное строение. На ней отмечается большое количество пустот-микрокаверн размером 2–8 мкм, в которых часто присутствуют псевдогексагональные кристаллы аутигенного каолинита (см. фиг. 2, в). Сама органическая масса приобретает, как и у фюзинитов, микроячеистое или микроблоочное строение со средними линейными размерами микроячеек-



Фиг. 2. Микроструктура поверхностей сколов витринитовых микрокомпонентов углей из баженовской свиты

Месторождения: а – Варьеганское; б – Тюменское; в – Салымское; г – Салымское (увеличенный фрагмент предыдущего снимка). Увел. а, б и г 10 000, в – 3000

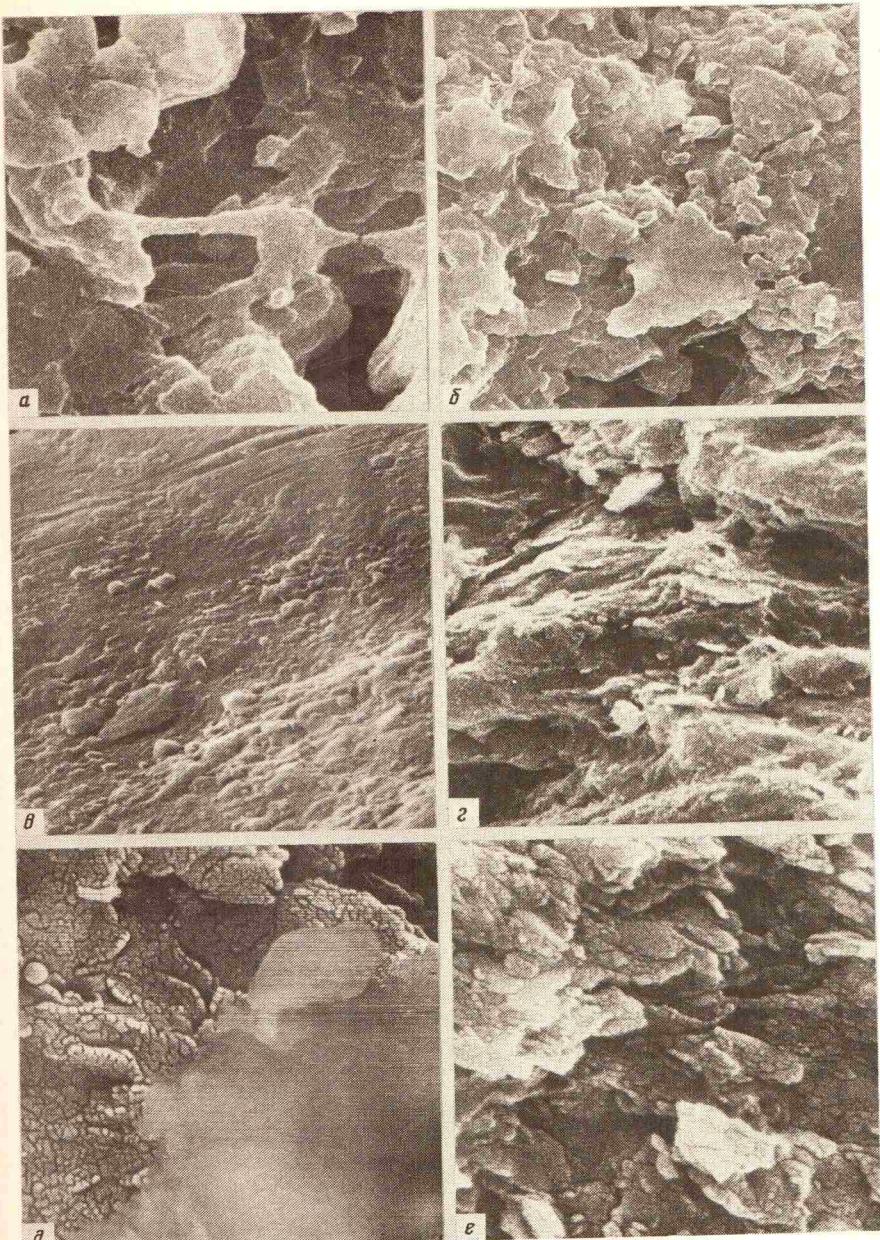
полиэдров 0,4 мкм и раскрытистью разделяющих их трещин 0,01 мкм (см. фиг. 2, г).

Вероятно, возникновением микрокавернозной и микроячеистой структур в угле хотя бы отчасти объясняется резкое увеличение открытой пористости в образцах пород баженовской свиты из высокотемпературных участков Салымского месторождения, достигающей 6–8%. Понятно, что сама органическая масса имеет гораздо более высокую пористость.

Следовательно, на основе анализа микроструктуры сколов витринитовых углей, отобранных из битуминозных отложений баженовской свиты, можно сделать вывод, что интенсивная генерация ими битумоидов и летучих, приводящая к формированию  $V_{bt}$  и соответствующей микроструктуры органической массы, начинается при  $T_{pl}$  более 80 °C.

Иными словами, верхняя граница ГФН для углей этого состава лежит на уровне изотерм 80–85 °C. Здесь, однако, необходимо сделать следующее замечание. Существует мнение, что современные  $T_{pl}$  значительно ниже тех, что существовали ранее (по различным оценкам палеотемпературы были выше современных на 20–50 °C). Поэтому, возможно, что верхняя граница ГФН поднимется до 100–130 °C.

Анализ микроструктуры лейптинистых микрокомпонентов показал, что даже



Фиг. 3. Микроструктура поверхностей сколов лейптина, битумов и РОВ черных сланцев  
Месторождения: а – Северо-Варьегансское (лейптинит); б – Северо-Варьегансское (мета-  
морфизованный жильный битум); в – Салымское (трещинный битум, неметаморфизован-  
ный); г – Октябрьское (кукерсит); д – Холмогорское (баженовская свита); е – Оров-  
ское (мениллитовая свита)

в образцах, находившихся при довольно высоких  $T_{\text{пл}}$  (около 100 °C), отсутствует микроблочная структура, характерная для фюзинитов и сильно катагенетически преобразованных витринитов. При этом, однако, возникает весьма "ажурная" структура, обусловленная наличием в лейптинитовой массе большого количества микропор или микрокаверн со средними размерами 1–3 мкм (фиг. 3, а). Можно предположить, что лейптинитовая масса сохраняет даже в этих сравнитель-

но жестких термодинамических условиях достаточную пластичность, благодаря чему под действием сил поверхностного натяжения возникающие в теле лейптиита (вследствие генерации им битумоидов) микротрешины залечиваются. В результате этого лейптиитовая масса сжимается и в ней возникают наблюдаемые на снимках микрополости.

Вполне возможно, что впоследствии на ее более высокой катагенетической стадии по мере исчерпания лейптиитом генерационных свойств (уменьшения выхода летучих продуктов) его реологические свойства изменятся настолько, что возникающие микротрешины перестанут залечиваться и сформируется микроблочная микроструктура, как у фюзинитов или сильно катагенетически преобразованных витринитов.

По своему составу и свойствам к лейптииту приближаются вязкие битумы. Анализ микроструктуры поверхности сильноизмененного жильного битума с Северо-Варъеганского месторождения (глубина 3496 м) показал полную аналогию с лейптиитом (см. фиг. 3, б). Так же как и в лейптиите, в метаморфизованном битуме формируется значительная по величине  $V_{\text{вт}}$  вследствие выделения из него под действием высоких  $T_{\text{пл}}$  летучих компонентов и возникают микрополосы размером 1–3 мкм и более. Так же как и в лейптиите, в метаморфизованном битуме отсутствует микроблочная микроструктура (см. фиг. 3, а, б), которая, возможно, появится позднее на ее более высоких ступенях катагенеза. Обычный неметаморфизованный битум имеет ровную поверхность скола, напоминающую таковую у витринитов или лейптиита низких стадий катагенеза, не достигших ГФН (см. фиг. 3, в).

Анализ микроструктуры поверхности сколов пород, обогащенных рассеянным ОВ (РОВ), называемых обычно черными или битуминозными сланцами, на примере пород баженовской или мениллитовой свит, а также кукерсита, показал, что характер изменений микроструктур штеноочек или корочек РОВ, сорбированных минеральными частицами по мере их термического созревания, напоминает описанные ранее преобразования микроструктуры поверхностей сколов витринитовых углей [7].

Практически не измененное РОВ кукерсита, которое несмотря на значительный возраст, никогда не было в ГФН, имеет ровную поверхность, как у витринита с Варъеганской площади (см. фиг. 2, а и 3, г). Образцы, отобранные из баженовской и мениллитовой свит, находились в ГФН, поэтому РОВ, содержащееся в этих образцах, интенсивно генерировало битумоид и летучие, в результате чего образовалась  $V_{\text{вт}}$  соответствующая ей микроструктура, которая напоминает таковую у витринитов высоких стадий катагенеза (см. фиг. 2, г и 3, д, е) или фюзинитов (см. фиг. 1, б–г). Существенным отличием РОВ от ОВ углей является то, что в случае черных сланцев явно "просвечивает" структура минеральной матрицы, которая совершенно не проявляется в случае анализа микроструктуры поверхности углей.

Таким образом, анализ микроструктуры РОВ, так же как и микроструктуры углей, позволяет отличать зрелые отложения, вступившие в ГФН от "незрелых", находящихся выше ГФН – по наличию или отсутствию соответствующей мозаичной микроблочной структуры поверхности РОВ. Нельзя, однако, полностью исключить вероятность существования окислительной обстановки и в морских осадках, обогащенных РОВ. В этих условиях становится возможным окисление РОВ и образование такой же микроблочной структуры, как и у фюзинитов, которая будет характеризовать степень окисления, а не стадию катагенеза. Отличить в этом случае окисленное РОВ от катагенетически преобразованного можно лишь с помощью специальных битуминологических исследований, а также по величине  $T_{\text{макс.}}$ .

\* \* \*

\*

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Процессы окисления (фюзенизации) и термическая эволюция в катагенезе приводят к формированию мозаичной микроблочной поверхности исходного ОВ, что, видимо, обусловлено сокращением объема ОВ по мере исчерпания нефтегенерационных возможностей.

2. Подобная микроструктура поверхности наблюдается у фюзенитовых компонентов углей во всем интервале исследованных  $T_{пл}$  (от 70 до 110 °C): у углей витринитового состава – при  $T_{пл} > 85$  °C, у углей лептенитового состава отсутствует.

3. Микроструктура ОВ, возникающая в результате формирования  $V_{вт}$ , кроме микрокомпонентного состава и стадии катагенетической преобразованности зависит также от формы микрокомпонентов и степени прочности связи с минеральной матрицей.

4. РОВ, так же как и концентрированные формы (угли), по мере катагенетической эволюции приобретает соответствующую микроблочную структуру поверхности, морфологически напоминающую структуру растрескивания глинистой корки.

5. Установление подобной микроструктуры РОВ свидетельствует о вступлении породы в ГФН.

6. При оценке стадии катагенеза на основании особенностей микроструктуры ОВ наиболее удобным микрокомпонентом является витринит.

#### Список литературы

1. Зубков М.Ю., Ершов В.А., Прямоносова И.А., Шакирова А.Х. Генерация битумоидов и формирование емкостного пространства в отложениях баженовской свиты // Научно-технический прогресс при поисках и освоении нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири. Вып. 63. Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1984. С. 16–21.
2. Зубков М.Ю. Некоторые модели конкрециеобразования // Постседиментационное минералообразование в осадочных формациях. Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1985. С. 43–51.
3. Зубков М.Ю., Федорова Т.А., Прямоносова И.А. Преобразование микроструктуры органического вещества баженовской свиты по мере его термического созревания // Тез. V горнодобывающей конф. "Геология и минерально-сырьевые ресурсы Западно-Сибирской плиты и ее складчатого обрамления". Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1987. С. 222–223.
4. Конторович А.Э., Нестров И.И., Салманов Ф.К. и др. Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра, 1975. 680 с.
5. Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица. М.: Мир, 1978. 237 с.
6. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. М.: Мир, 1981. 502 с.
7. Федорова Т.А. Изменение микроструктуры адсорбированного органического вещества глинистых нефтематеринских пород в процессе катагенеза // Матер. XIV конф. молодых ученых геол. фак-та МГУ. М., 1987. С. 162–167. – Деп. в ВИНТИ, № 7154.

Сибирский научно-исследовательский  
институт нефтяной промышленности,  
Тюмень

Поступила в редакцию  
4.IV.1988