

РОЛЬ КАТАГЕННЫХ ПОТЕРЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ В ФОРМИРОВАНИИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

И.Ф. Юсупова

ИПНГ РАН, e-mail: Iskra.yusupova@yandex.ru

Целью данной публикации является исследование генезиса трещинных систем и процессов флюидогенерации в ходе вещественной трансформации горных пород. Многочисленные данные свидетельствуют о широком распространении на больших глубинах зон повышенной трещинной проницаемости в тонкодисперсных породах, традиционно считающихся флюидоупорами. К примеру, на Оренбургском, Карачаганакском, Астраханском, Тенгизском, Жанажольском и других месторождениях углеводородов (УВ) важную роль в фильтрации УВ играет система открытых субгоризонтальных макротрещин, обеспечивающих сверхвысокую (по сравнению с матрицей) проницаемость. Пласты с такими трещинами названы суперколлекторами [1]. Горизонтальная трещиноватость нередко сопровождается вертикальной, т.е. образуется общая система флюидопроницаемости.

В вопросе о генезисе трещин в осадочных породах нет единого мнения. Их появление связывают с неравномерностью тангенциальных напряжений в породах, палеосейсмическими толчками, диагенезом, расслоением глин, сеймотектоническими явлениями и т.д. [2–7]. По мнению Ф.Г. Гурари и его последователей, возникновение трещин в битуминозных глинах обусловлено, наряду с другими возможными причинами, явлениями флюидообразования и флюидоразрыва (нефте-, газогидро- и авторазрыва) [3].

Флюидогенерация – это образование, отделение и удаление миграционно-способных продуктов (H_2O , CO_2 и др.) при трансформации пород в недрах – явление, представляющее интерес при решении многих геологических проблем, связанных с нефтегазоносностью, металлогенией и др.

Наибольшим флюидогенерирующим потенциалом, как известно, обладают осадочные толщи, содержащие флюидогенерирующие компоненты: карбонатное (генерация CO_2), глинистое, кремнистое, гипсовое (генерация H_2O) и, особо значимое, органическое (генерация CO_2 , H_2O , H_2S , H_2 , NH_4 , а также УВ и их производные) вещество. Потенциально флюидогенерирующими являются и газогидраты, которые в определенных условиях распадаются на воду и газ (CO_2 , CH_4 и др.).

В осадочных разрезах чаще всего встречаются несколько неравномерно распределенных флюидогенерирующих компонентов. Факторы, вызывающие флюидогенерацию в недрах, разнообразны. Выделение флюидов – процесс многоактный, подчиняющийся многим условиям, количество выделяемых продуктов значительно. Оценка отторгающихся огромных масс воды, УВ и других газов позволила А.В. Сидоренко с соавторами обосновать научное понятие о «жидко-газоворудном дыхании» метаморфизирующихся осадочных пород [8].

С флюидогенерирующими явлениями связаны различные виды деформаций и дислокаций в самих флюидоматеринских породах и во вмещающих их толщах [2, 7, 9–11]. Некоторые из деформаций являются результатом потери породами своей массы, приводящей к объемным изменениям пород, пластов, толщ, к формированию на глубине «дефекта геологического пространства», к созданию дополнительных напряжений, вовлечению вышележащих пород в нисходящее движение (явление гравитационной компенсации). Деформационные изменения происходят на разных уровнях (толща, пласт, порода, минерал); ранее было показано формирование областей проседания (сопутствующих деформаций) и над зонами метаморфизма и локальных проявлений дислоцированности в пластовых условиях [12, 13].

Анализ особенностей формирования трещинных зон во флюидогенерирующих толщах показал, что в отдельных участках земной коры на определенных глубинах возможно возникновение зон аномальной трещиноватости [5, 11].

Горючие сланцы и их связь с нефтегазообразованием. Горючие сланцы – поликомпонентные осадочные породы, содержащие в разных соотношениях глинистый, органический, иногда карбонатный материал. Главная их особенность – обогащенность ОВ (в настоящем или в прошлом). Горючие сланцы широко распространены в отложениях практически любой эпохи, от архея до четвертичного времени [14–17]. Н.Б. Вассоевич относил к ним высокоуглеродистые породы с содержанием ОВ 10–40%, другие исследователи – с содержанием концентрированного органического вещества (КОВ) в пределах от 15–60 до 80%.

Типичные горючие сланцы – породы, свойственные только ранним стадиям литогенеза, на более поздних стадиях литогенеза они не фиксируются. Их метаморфизованными аналогами, с меньшим содержанием ОВ, являются черные сланцы, а иногда и обычные известняки, мергели и другие породы, уже с убогим содержанием ОВ.

Для многих регионов характерно залегание горючих сланцев по периферии нефтегазоносных бассейнов, а черных сланцев и других «малоуглеродистых» пород (стратиграфические аналоги первых) – на погружении и в центральных частях. В [18] подчеркивается несостоятельность представлений о том, что пространственная приуроченность горючих и черных сланцев – следствие литофациальных переходов, заложенных в седиментогенезе.

Таким образом, в ходе литогенеза в погруженных частях нефтегазоносных бассейнов горючие сланцы, теряя один из породообразующих компонентов – ОВ, утрачивают свою индивидуальность, превращаясь в обычные осадочные породы. Данный процесс идет с образованием большого количества газообразных и жидких продуктов. Поскольку превращение высокоуглеродистых пород в низкоуглеродистые в погружающихся частях нефтегазоносных бассейнов может носить региональный характер и сопровождаться образованием УВ, высокоуглеродистые отложения признаются нефтегазоматеринскими. Масштабность и пространственно-временное развитие процесса трансформации горючих сланцев и генерация при этом УВ коррелируются с распределением мировых запасов нефти и цикличностью нефтегазообразования. В этом аспекте рассматриваются особенности нефтегазоносности Балтийской и Амударьинской синеклиз, Западной Сибири, Прикаспийской впадины и других регионов [18]. Оценка вклада кукурситовых горючих сланцев в генерацию нефти в Балтийской синеклизе показала, что за счет этого источника было генерировано свыше 30 млрд т нефти, достаточных для формирования нескольких крупных месторождений; обнаружение ее небольшого количества объясняется плохой герметичностью покрывающих [19].

Уменьшение мощности пород, сопровождающее трансформацию горючих сланцев. Потери высокоуглеродистыми породами ОВ в ходе литогенеза представляют интерес с точки зрения как нефтегазообразования, так и формирования проницаемости и путей миграции флюидов. Это обусловлено значительным сокращением объема пород, формированием дефекта геологического пространства и, в конечном счете, сокращением исходной мощности пород (без учета уплотнения в ходе погружения).

Исследования авторов настоящей статьи, посвященные оценке уменьшения объема кукурситовых сланцев при утрате ими ОВ, подтвердили значимость этого явления [13]. Оно обусловлено высоким содержанием ОВ в этих породах (одного из основных породообразующих компонентов сланца, доля которого достигает 40–50% весовых). К

тому же ОВ обладает малой плотностью (около 1 кг/м^3), что делает его самым важным объемным компонентом горючих сланцев. При усредненных содержаниях ОВ (35 масс. %), карбонатного (40 масс. %) и глинистого (25 масс. %) материала их объемные соотношения составят соответственно 54, 25, 21%. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что при удалении из сланца даже равных весовых содержаний минерального и ОВ вклад последнего в образование вторичной пустотности будет больше (в нашем примере почти в два раза).

В Балтийской синеклизе мощность условно суммарного пласта кукерситов в 2,5 м в результате катагенной деструкции ОВ сократилась до 1 м, или на 60% [19]. В основу оценок потерь были положены представления об утрате на катанных глубинах не менее половины массы ОВ, сохранившегося после диагенеза и литификации [20]. Это относится и к угольному ОВ.

Горючие сланцы нередко залегают совместно с угленосными отложениями. Например, юрские горючие сланцы встречаются внутри пачек гумусовых углей на некоторых месторождениях Узгенского угольного бассейна [21]. Известен целый ряд угольно-сланцевых месторождений: Харанорское, Гусиноозерское и др. (Россия), Кендерлыкское (Казахстан), Ново-Дмитровское (Украина), Фушунь (КНР) [22, 23]. В рассматриваемом аспекте угольное ОВ представляет интерес как мощный флюидогенерирующий компонент осадочных отложений; даже частичная его утрата вносит определенный вклад в уменьшение массы (и мощности) угольных пластов.

Таким образом, пласты и участки осадочных формаций, обогащенные ОВ, в ходе погружения становятся не только зонами повышенной генерации флюидов (в том числе и УВ), но и зонами заметного уменьшения мощности, притом неравномерного (вследствие неравномерной концентрации исходного ОВ).

Другим фактором уменьшения мощности пластов является растворение кальцитов и других компонентов пород под воздействием агрессивных продуктов деструкции ОВ (CO_2 , органические кислоты и др.) [9, 24]. Суммарный результат генерации флюидов и растворения компонентов пород, например карбонатов, может в отдельных участках сократить объем кукерситов на 90% [19], а по нашим оценкам – не менее чем на 60–70%.

Столь значительные потери объема высокоуглеродистыми породами в ходе генерации УВ приводят к нарушению целостности породы и приобретению ею поровой, кавернозной и трещинной флюидопроводимости. Трещиноватость внутри пласта нередко

обусловлена также и тем, что твердое ОВ на микроуровне распределено в пласте не равномерно, а в виде прослоек, удлинённых линзочек. Впоследствии в ходе удаления образующихся флюидных компонентов ослабленные зоны будут наследовать морфологию таких прослоек.

Еще одним фактором формирования внутрипластовой трещиноватости может быть неоднородность концентраций флюидогенерирующих компонентов. Даже в минералогически однородных породах имеют место вариации долевых соотношений компонентов, слагающих породу; это предопределяет неравномерность уменьшения мощности пластов, их деформированность на стыках, вплоть до потери сплошности и нарушения монолитности [12]. Латеральная неоднородность концентраций ОВ (в 2–3 раза) в прибалтийских сланцах также может стать причиной повышенной трещиноватости пласта (в случае расходования ОВ на флюидогенерацию) [13].

Латеральную изменчивость КОВ предопределяют (при прочих равных условиях) и многообразные фациальные переходы, локальные замещения, выклинивания пласта, наличие конкреционных образований и других включений. В частности, для кукерситов характерно присутствие известняковых включений, отличающихся неравномерным распределением, разнообразной формой (прослой, линзы и т.д.) и большим разбросом значений мощности [13, 22]. В весьма широких пределах изменяется мощность породных прослоев в угленосных отложениях с КОВ (угольные пласты, углистые породы).

По данным разработки прибалтийских горючих сланцев установлено, что концентрации ОВ в пределах одного пласта могут различаться в 2–2,5 раза (например, в пласте «В» концентрации ОВ варьируют в пределах 30,8–61,5%) [22]. Следует, однако, иметь в виду, что геологическая документация зачастую не отражает в полной мере латеральную изменчивость концентраций ОВ в пластах осадочных пород, поскольку в ней обычно приводятся лишь максимальные, минимальные и средние значения (таблица).

Компонентный состав горючих сланцев и переслаивающихся с ними известняков кукрузеского горизонта Ленинградского месторождения горючих сланцев [22]

Индекс сланцевого слоя	Количество анализов	Содержание компонентов, %					
		Органическое вещество		Карбонатный материал		Обломочный материал	
		Интервал	Среднее	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее
A ₁	56	21,9-39,1	33,4	22,6-47,6	28,7	30,0-43,9	37,9
A	43	8,9-18,7	14,9	29,7-49,3	43,1	36,0-52,7	42,0
B	75	33,1-56,3	46,0	21,2-40,6	26,5	17,6-39,2	27,5

С	74	22,6-42,2	33,9	24,5-46,6	34,6	23,9-40,2	31,5
Д	3	17,2-17,3	17,3	47,0-48,0	47,5	34,7-35,8	35,2
Е	84	21,5-37,6	29,4	33,4-59,3	45,4	16,5-34,7	25,2

Таким образом, латеральная изменчивость концентраций ОВ предопределяет неравномерность усадки пласта, возникновение зон повышенных напряжений на стыках участков с разной степенью усадки (иногда затрудняя хроностратиграфическую коррелируемость разреза). Возникают пликативные и дизъюнктивные деформации, автономные по своей природе. На катагенных глубинах они выражаются в утончении и выклинивании пласта в отдельных участках, полого-волнистом залегании и флексуроподобных перегибах кровли и вышележащего слоя, их прогибании, проседании (вплоть до потери сплошности и нарушения первоначальной монолитности), дроблении, обрушении, образовании зеркал скольжения, формировании зон трещиноватости и брекчирования, а также в создании мелкоблоковой, клавишной пологоступенчатой структуры пласта. В конечном счете возникает и нарастает геофлюидодинамическая неоднородность.

Фактором возникновения вдольпластовой проницаемости и трещиноватости может стать процесс формирования прикровельных разномасштабных ослабленных зон, образующихся над утончающимися (часто неравномерно) пластами. Они могут проявляться по границам толщ, пластов, слоев. Такие зоны чаще всего выражаются участками горизонтальной послойной (межслойной) пустотности, разуплотнения, трещиноватости, вдольслоевых, межпластовых нарушений, отслоения, листоватостью, способностью породы раскалываться на плитки по субгоризонтальным плоскостям (например, трассирующим прослой с былым обогащением ОВ).

Многие исследователи фактором трещинообразования при генерации УВ считают гидроразрыв. По мнению ряда авторов, коллектор в некоторых глинистых битуминозных разностях в баженовских отложениях (Западная Сибирь), майкопской свиты (Предкавказье) образовался в процессе автонефтегазоразрыва при переходе части твердой фазы ОВ в жидкую и газообразную; при этом объем новообразованных соединений превысил объем исходного материала в 1,5–2,5 раза. Такой коллектор образуется в наиболее ослабленных участках разреза баженовской свиты, отличающихся наличием микролинзовидных форм ОВ [2, 3, 7].

Многопластовость сланцевой толщи (при ее достаточной мощности) также может считаться фактором формирования дополнительной трещиноватости. Поскольку нижние пласты при погружении раньше попадают в зону нефтегазообразования и раньше трансформируются, они и раньше уменьшаются в мощности. Усадка верхних пластов будет отставать по времени от усадки нижних. В определенных условиях могут возникнуть дополнительные напряжения: верхние пласты сланцев начнут проседать, вплоть до потери сплошности, с образованием трещин и т.д. Как следствие – трещинообразование будет носить длительный, унаследованный характер с неоднократным «оживлением» трещинных зон, наложением на них новых систем трещин.

Интенсивность трещиноватости будет определяться мощностью пластов и ее изменчивостью. В частности, мощность отдельных пластов прибалтийских сланцев – кукерситов незначительна (до 1 м), и потенциальная амплитуда смещения (в пределах одного пласта) будет колебаться от сотых до десятых долей метра. Однако сланценосность здесь носит многопластовый характер и выражена тонко чередующимися сланцами с изменчивым содержанием ОВ (внутри одного пласта по латерали и между разными пластами), известняками, мергелями и глинами, также в разной степени обогащенных ОВ. И если бы такая толща испытала погружение, то сопутствующая потеря массы вызвала бы неравномерное сокращение мощности многочисленных пластов и малоамплитудную структурно-деформационную неоднородность толщи.

Амплитуда неравномерного сокращения мощности пласта на угольно-сланцевом гиганте Фушунь в результате потенциальных катагенных потерь могла бы составить 13,5–34,8 м (исходная 70,0–80,0 м), а подстилающего угольного пласта – 5,2–78,0 м (исходная 8,0–120,0 м без породных прослоев) [11, 25].

Выше была рассмотрена роль катагенных потерь ОВ горючих сланцев в неравномерном уменьшении их мощности и трещиноватости, однако существуют и другие факторы преобразования ОВ [26, 27]. В локальных участках сланценосной толщи потери ОВ (иногда значительные) могут иметь место и на докатагенных этапах существования этих отложений, как, например, потери ОВ прибалтийских горючих сланцев в условиях подземного карста.

В Прибалтийском сланцевом бассейне при разработке кукерситовых горючих сланцев были вскрыты структурно-деформационные зоны. Породы в них трещиноваты, раздроблены, пласты смещены относительно друг друга. Кукерситы по периферии таких

зон изменены («порченный сланец»), в центральной части – отсутствуют. На месте сланцев залегают остаточные глины – терригенная компонента подобных пород, оставшаяся после распада и удаления ОВ (и карбонатов). Поскольку для кукерситов ОВ является значимой (а иногда и главенствующей) объемной компонентой, то потеря ОВ в этих зонах признана одним из основных факторов уменьшения мощности и деформации пластов. Разрушение ОВ кукерситов в подземной гидросфере было вызвано разными причинами, в том числе его утилизацией сульфатредуцирующей микрофлорой, сопутствующей деструкции, растворением и выносом подземными карстовыми водами [10, 28].

Другой пример докатагенного разрушения ОВ в локальных участках связан с автономной теплогенерацией в приповерхностных условиях, когда экзотермические изменения ОВ твердых каустобиолитов создают предпосылки для повышения (иногда значительного) температур и разнообразных трансформаций вмещающих отложений (образование высокотемпературных пород и др.) с потерей больших объемов вещества (в основном органического). Возникшие трещиноватость, раздробленность и другие деформации обусловили формирование своеобразной геофильтрационной среды [22, 29].

И хотя на катагенных глубинах такие участки уже не содержат ОВ, они несут следы его присутствия в виде микро- и макротрещиноватости (иногда частично залеченной). Возникшая трещиноватость внесла определенный вклад в формирующуюся катагенную флюидодинамическую неоднородность при погружении на нефтегазогенерирующие глубины.

В заключение отметим следующее. Многое из сказанного выше справедливо и в отношении нефтегазоматеринских пород с рассеянным ОВ, а именно уменьшение их мощности в ходе нефтегазообразования (помимо уплотнения), неравномерность концентрации ОВ и т.д. Однако в породах, содержащих концентрированное ОВ (в нашем случае – горючие сланцы), описанные эффекты более заметны. Поэтому в теле осадочно-породного бассейна участки отложений с горючими сланцами не только будут генерировать УВ в больших количествах, но и станут участками нарастающей дислоцированности, более интенсивной, чем в основной части бассейна.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальные проблемы геологии, геохимии и гидрогеологии нефтегазоносных осадочных бассейнов. Обоснование значимых факторов эффективного прогноза крупных скоплений УВ в неструктурных условиях», № АААА-А16-116022510269-5).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Политыкина М.А.* Значение горизонтальной трещиноватости для разработки залежей углеводородов // Сов. геология. 1988. № 4. С. 49–60.
2. *Бочкарев А.В., Евик В.Н.* Природа аномальных явлений в битуминозных глинах нижнего майкопа Центрального Предкавказья // Литология и полез. ископаемые. 1990. № 1. С. 38–43.
3. *Гурари Ф.Г., Гурари И.Ф.* Формирование залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1974. № 5. С. 36–40.
4. *Каракин А.В.* Флюидодинамический режим в зонах повышенной трещиноватости коры // ДАН. 1990. Т. 311, № 6. С. 1329–1333.
5. *Клещёв К.А., Петров А.Н., Шеин В.С.* Геодинамика и новые типы природных резервуаров нефти и газа. М.: Недра, 1995. 285 с.
6. *Матвиенко Н.И.* Влияние флюидодинамических процессов на формирование коллекторов в разновозрастных черносланцевых толщах // Геодинамика нефтегазоносных бассейнов: тез. докл. II Междунар. конф. М., 2004. С.192–194.
7. Нефтегазоносность глинистых пород Западной Сибири. М.: Недра, 1987. 256 с.
8. *Сидоренко А.В., Сидоренко Св.А.* Об «углеводородном дыхании» докембрийских графитосодержащих толщ // ДАН СССР. 1970. Т. 192. № 1. С. 181–184.
9. *Юсупова И.Ф., Абукова Л.А., Абрамова О.П.* Катагенные потери органического вещества пород как фактор геодинамической стабилизации // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. Нефтегазоносные системы осадочных бассейнов: материалы 8-й Междунар. конф. М., 2005. С. 500–502.
10. *Абукова Л.А., Юсупова И.Ф., Абрамова О.П.* Роль органического вещества сланцевой залежи в формировании ее проницаемости на раннекатагенном этапе // Химия твердого топлива. 2014. № 2. С. 19 – 24.
11. *Вартамян Г.С., Юсупова И.Ф.* Особенности формирования трещинных зон во флюидогенерирующих толщах // ДАН. 2000. Т. 370, № 3. С. 353–356.
12. *Вартамян Г. С., Юсупова И. Ф.* Флюидосфера, геодинамическая фильтрация и формирование трещинной проницаемости в ходе погружения осадочных толщ. М.: Геоинформмарк, 2000. 33 с. (Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений топливно-энергетического сырья; вып. 6).

13. Юсупова И.Ф. Новый фактор автономной дислоцированности черносланцевых толщ // ДАН СССР. 1991. Т. 316, № 3. С. 697–701.
14. Dyni J.R. Geology and resources of some world oil-shale deposits // Oil Shale. 2003. N 3. P. 193–252.
15. Hutton A.C., Kantsler A.J., Cook A.C., McKirdy D.M. Organic matter in oil shales // Austral. Petrol. Explor. Assoc. J. 1981. Vol. 20, N 1. P 44–67.
16. Tourtelot H.A. Black shale – its deposition and diagenesis // Clays and Clay Minerals. 1979. Vol. 27. N 5. P. 313–321.
17. Yang R., Cao J., Hu G., Fu X. Organic geochemistry and petrology of Lower Cretaceous black shales in the Qiangtang Basin, Tibet: Implications for hydrocarbon potential // Org. Geochem. 2015. N 86. P. 55–70.
18. Ильин В.Д., Клецев К.А., Максимов С.П., Минский Н.А. Формации горючих сланцев в зоне катагенеза и метаморфизма – важный региональный источник углеводородов. М.: ВИЭМС, 1986. 56 с. (Геология, методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: обзор информ.).
19. Минский Н.А. Закономерности формирования поясов оптимальных коллекторов. М.: Недра, 1979. 298 с.
20. Неручев С.Г. Нефтепроизводящие свиты и миграция нефти. Л.: Гостоптехиздат, 1986. 301 с.
21. Бакиров А.Б., Гесь М.Д., Дженчураева Р.Д. и др. Геодинамика и оруденение Тянь-Шаня. Бишкек: Илим, 2014. 280 с.
22. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 11 / гл. ред. С.А. Скорбов. М.: Недра, 1968. 608 с.
23. Wu Chonglong, Yang Qi, Zhu Zuoduo, Liu Gang, Li Xing. Thermodynamic analysis simulation of coal metamorphism in Fushin basin, China // Intern. J. Coal Geol. 2000. Vol. 44. P. 149–168.
24. Новосилецкий Р.М. Гидродинамические и геохимические условия формирования залежей нефти и газа. М.: Недра, 1975. 227 с.
25. Матвеев А.Г. Угольные месторождения зарубежных стран (Евразия). М.: Недра, 1966. 460 с.
26. Микуленко К.И., Синдюков И.Ш., Фролов В.И., Иванова Н.Д. Задачи и перспективные направления катагенетических исследований пород и органического

вещества на востоке Сибирской платформы // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. М., 2000. С. 221–224.

27. Юсупова И.Ф., Абукова Л.А. Очаговая теплогенерация в угольно-сланцевых отложениях // Химия твердого топлива. 2017. № 4. С. 24–31.

28. Газизов М.С. Карст и его влияние на горные работы. М.: Наука, 1975. 204 с.

29. Гаврилин К.В., Озерский А.Ю. Канско-Ачинский угольный бассейн. М.: Недра, 1996. 272 с.