

# Результаты исследований и работ ученых и конструкторов

---

---

М. Ю. Зубков  
ООО «ЗапСибГЦ»

## МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ В БАЖЕНО-АБАЛАКСКОМ КОМПЛЕКСЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ, ПРОГНОЗ ИХ ЗОН РАСПРОСТРАНЕНИЯ

На основе анализа комплексных литолого-петрофизических, геофизических, тектонофизических и геохимических исследований бажено-абалакского комплекса предложен механизм формирования вторичных коллекторов тектоно-гидротермального происхождения. Доказано, что вторичные коллекторы образуются в прочных, но хрупких литологических типах пород, представленных кремнистыми и карбонатными разновидностями, в результате их тектонического дробления и последующей гидротермальной проработки. Рассмотрены типы минералов гидротермального происхождения, отлагавшихся в трещинах и кавернах вторичных коллекторов из гидротермальных растворов. Доказано, что в участках, подвергшихся тектоно-гидротермальному воздействию, все исходное органическое вещество превратилось в углеводороды (нефть) и битум, заполнивший пространство, занимаемое до этого исходным органическим веществом. Предложен способ выделения потенциально продуктивных пород (ППП) в разрезе бажено-абалакского комплекса и слагаемых ими пластов по комплексу ГИС. На основе результатов тектонофизического моделирования предложены критерии для выделения перспективных участков для поисков углеводородных залежей в бажено-абалакском комплексе и способ их разработки.

*Ключевые слова: углеводороды, бажено-абалакский комплекс, тектоно-гидротермальное воздействие, вторичные коллекторы, картаж, тектонофизическое моделирование, многостадийный гидроразрыв пласта.*

## Введение

В конце 60-х годов прошлого века на Салымском месторождении из баженовской свиты были получены высокодебитные притоки нефти. До этого большинство ученых-нефтяников считали баженовскую свиту региональным флюидоупором и главным генератором углеводородов, насытивших верхнеюрские и нижнеэокомские продуктивные отложения Западной Сибири. Поэтому возникла необходимость объяснить, что представляют собой коллекторы, входящие в состав баженовской свиты, каков механизм их формирования и где их следует искать.

Первоначально возникло представление, что коллекторами в баженовской свите являются листоватые аргиллиты (бажениты по терминологии И. И. Нестерова), емкостное пространство в которых сформировалось вследствие флюидоразрыва, связанного с генерацией исходным органическим веществом (ОВ), входящим в состав свиты, жидких и газообразных углеводородов (УВ) благодаря тонкослоистому строению пород свиты [2, 8, 10, 11, 14].

Поскольку на большей части площади Западной Сибири баженовская свита находится в зоне нефтегенерации, то, исходя из этой модели, она должна бы являться почти повсеместно нефтеносной (за исключением периферийных районов), однако это совсем не так. Продуктивные скважины расположены в определенных локальных участках, причем даже соседние скважины, пробуренные на небольшом расстоянии от высокопродуктивных, часто оказываются малодебитными или вовсе «сухими». Следовательно, вышеописанный механизм формирования коллекторов и углеводородных (УВ) залежей в баженовской свите нельзя признать верным.

В это же время сформировалось альтернативное представление, что коллектор в баженовской свите относится к трещинному типу, которое основывалось на результатах испытаний баженовских отложений, а именно на факте быстрого падения пластового давления в процессе испытания скважин. Однако это представление носило скорее декларативный характер и не позволяло осуществлять прогноз продуктивных зон в баженовской свите.

Абалакская свита долгое время находилась «в тени» своей более знаменитой соседки, однако постепенно выяснилось, что карбонат-

ные слои, входящие в ее состав, также являются продуктивными. Причем в ряде случаев из них получают гораздо более значительные притоки нефти, чем из баженовской свиты, что особенно характерно для Красноленинского месторождения.

Постепенное накопление геолого-геофизической и литолого-петрофизической информации позволило обосновать новые, более адекватные представления о механизме формирования и типах коллекторов в составе обеих свит, их происхождении и выделении по данным ГИС, сейсморазведки и тектонофизического моделирования [3–6]. Эти новые данные позволили не умозрительно, а на основе нового фактического материала (включая экспериментальный) подойти к решению проблемы происхождения коллекторов в баженовской и абалакской свитах и выделения в них зон, перспективных для поисков УВ-залежей.

### Результаты исследований

Прямые признаки присутствия нафтидов, а значит и коллекторские свойства у содержащих их пород, обнаружены у небольшого количества литологических разновидностей. Рассмотрим эти типы пород и коллекторов более подробно.

Начнем с типов коллекторов, присутствующих в составе баженовской свиты. Первыми рассмотрим кремнистые разновидности пород-коллекторов, представленных силицитами, радиоляритами и гидротермальными силицитами.

*Силициты* – наиболее распространенный тип пород в составе баженовской свиты, сложенный преимущественно биогенным аутигенным кремнеземом, содержание которого превышает 70–75%. В этом типе пород в результате тектоно-гидротермального воздействия формируется вторичный коллектор трещинного типа (рис. 1, а, б). На поверхности возникших трещин отлагаются тонкие пленки метаморфизованного битума (тиобитума) и мелкокристаллические эпигенетические минералы гидротермального происхождения, представленные кварцем, кальцитом, доломитом, баритом, ангидритом, гармотомом и другими разновидностями, включая сульфиды (рис. 1, а, в–е). Часто битум является цементом, скрепляющим отдельные раздробленные части образцов пород, из-за чего в процессе экстракции они разрушаются.

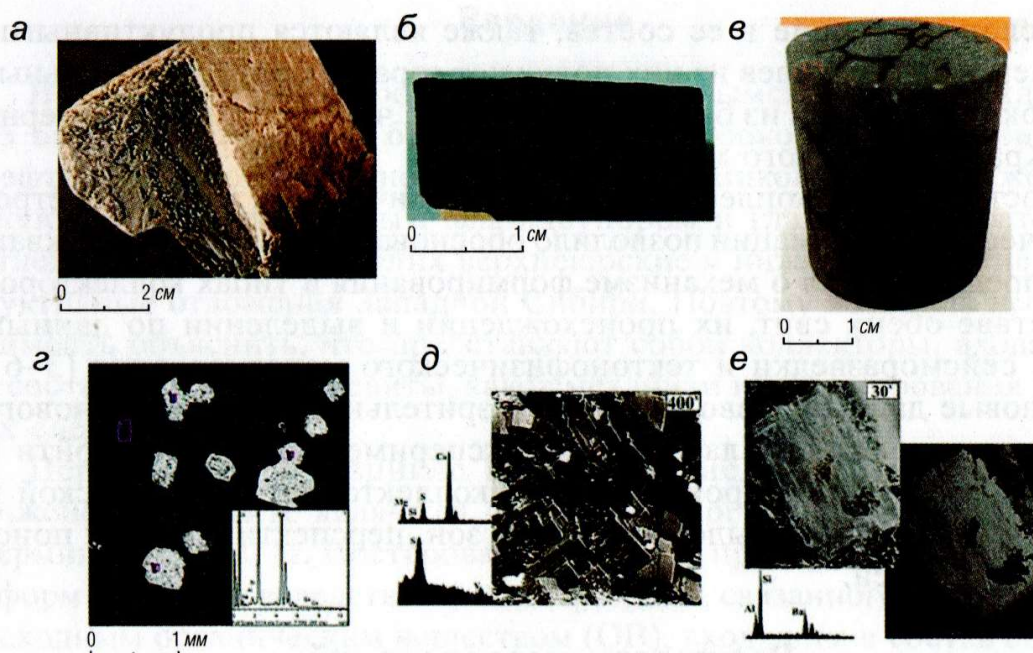


Рис. 1. Фотографии трещиноватых силицитов (а–в) и снимки растрового электронного микроскопа (РЭМ) поверхности трещин с образовавшимися на них гидротермальными минералами и тиобитумом (г–е):

а – трещина, поверхность которой покрыта тонкой пленкой тиобитума; б – поверхность трещины, покрытой тиобитумом и мелкими кристаллами гидротермального кварца; в – образец с трещинами, насыщенными керосином; г – увеличенный фрагмент поверхности трещины с кристаллами барита и их элементный спектр; д – кристаллы гидротермального магниезиального кальцита с пленками ванадиеносного тиобитума на поверхности трещины и их элементные спектры; е – кристалл гармотома и его элементный спектр, местами покрытый пленками тиобитума, снятый в обычном (слева) и КОМПО\* (справа) режимах

Силициты представляют собой микропролиты (продукты жизнедеятельности рачков-эвфаузиид), питавшихся, скорее всего, преимущественно диатомеями. Микропролиты сложены очень плохо ограненными микроскопическими кристаллами кварца, в которые под действием гидротермальных флюидов превратился исходный биогенный кремнезем [4].

Пористость силицитов обычно не превышает 2–3%, и их массивные разновидности практически непроницаемы, только появление в них тектоногенной трещиноватости превращает их в коллектор трещинного типа (рис. 1). Трещинная пористость в силицитах, сохранивших свою целостность при изготовлении из них цилиндров, изменяется от 0,2 до 3,6% (в атмосферных условиях). В более хрупких

\* КОМПО – компонент (прим. ред.)

разновидностях определить трещинную пористость невозможно, так как они, как правило, распадаются по этим трещинам на отдельные куски и традиционным способом определяется пористость лишь их матрицы. Тем не менее, используя размеры трещин, образующихся на поверхности кристаллов различных гидротермальных минералов, можно оценить раскрытость самых крупных трещин, которая в среднем составляет 0,05–0,25 мм.

*Радиоляриты* представляют собой псевдогранулярный коллектор, в котором роль зерен крупноалевритовой размерности играют раковинки радиолярий, а пустоты, расположенные между ними, заполнены битумом и углеводородами (нефтебитумом по В. А. Скоробогатову). В отличие от силицитов, в которых коллекторы имеют вторичное (тектоно-гидротермальное) происхождение, в радиоляритах наряду со вторичной трещинной емкостью в большей или меньшей степени сохраняется первичная (седиментогенная) пористость.

На снимках, сделанных при ультрафиолетовом освещении, прекрасно видны интервалы, сложенные нефтенасыщенными радиоляритами, которые ярко люминесцируют, и силицитами, которые не люминесцируют, так как практически все их незначительное по величине поровое пространство заполнено метаморфизованным битумом (рис. 2, а, б, в). Различия в структуре порового пространства обеих разновидностей кремнистых пород хорошо видны на их спектрах ЯМР. Пористость радиоляритов достигает 10–12%, а силицитов не превышает и 3% (рис. 2, в, д).

Пожалуй, самым необычным вторичным коллектором в составе баженовской свиты являются *гидротермальные силициты*, образующиеся по кремнисто-карбонатным типам пород (рис. 3, а, б). Они возникают в результате полного растворения кислыми гидротермальными флюидами карбонатной составляющей этих пород и последующей перекристаллизацией исходного биогенного кремнезема в мелкокристаллический кварц (рис. 3, в, г). В результате формируется вторичный коллектор порово-микрокавернозного типа [4].

Самые высокие фильтрационно-емкостные свойства имеют *карбонатные породы*, включая радиоляриты, замещенные карбонатным материалом, подвергшиеся тектоно-гидротермальному воздействию. В них образуются вторичные коллекторы, относящиеся к трещинно-кавернозному типу (рис. 4, а–г). Этот тип коллектора формируется как в баженовской, так и в абалакской свитах, причем в последней это единственный тип вторичных коллекторов.

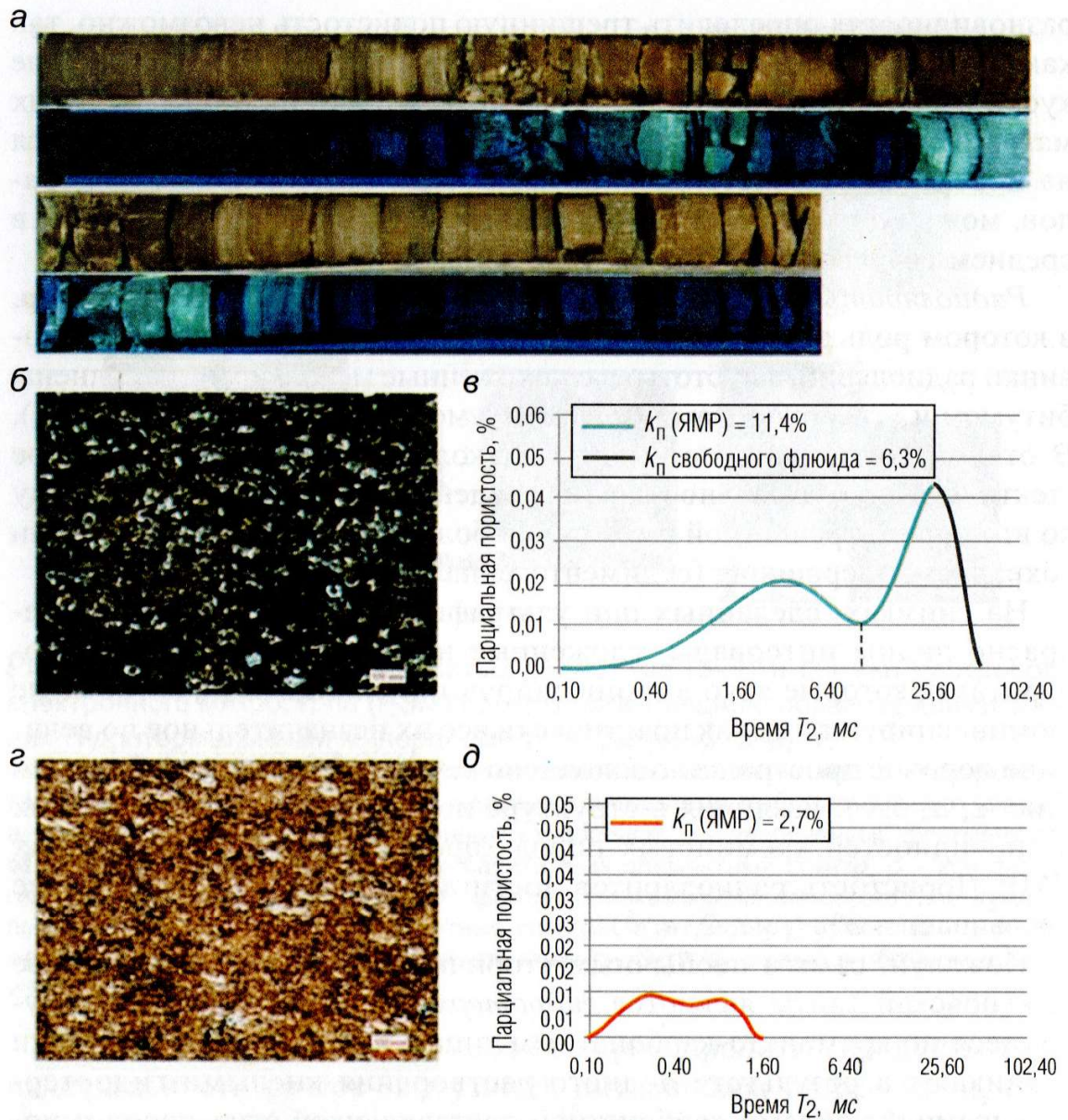


Рис. 2. Фотографии полноразмерного керна, представленного силицитами и радиоляритами, выполненные в белом и ультрафиолетовом свете (а), снимки прозрачных петрографических шлифов (б, в) и спектры ЯМР (в, д):

а – участки, люминесцирующие в ультрафиолетовом свете, сложены радиоляритами, остальные образцы керна – силициты; б – петрографический шлиф радиолярита; в – его спектр ЯМР с выделенной областью свободного флюида (6,3%); в – петрографический шлиф силицита; д – его спектр ЯМР с объемом пор, занятых связанной водой (2,7%)

Судя по размерам кристаллов гидротермального кварца, образовавшегося в кавернах, их раскрытость нередко достигает 1 см и более, что обеспечивает не только высокую пористость рассматриваемых вторичных коллекторов, но и, что очень важно, их чрезвычайно высокую проницаемость (рис. 4, д, е). Определить их пористость в лабораторных условиях довольно проблематично, так как они при бурении раскалываются по трещинам на отдельные куски (рис. 4). Пористость трещинно-кавернозных карбонатов в разрезе бажено-абалакского комплекса при условии их достаточной мощности можно оценить с помощью данных ГИС. По результатам этих исследований пористость этого типа коллекторов достигает 10–15%.

Существуют и другие, гораздо более редкие типы пород-коллекторов, например, *фосфоритовые копролиты*, встреченные в составе баженовской свиты, которые можно отнести к псевдогранулярному типу, как и рассмотренные ранее радиоляриты (рис. 5, а, б). Они обладают довольно высокой пористостью, достигающей почти 15% (рис. 5, в, г).

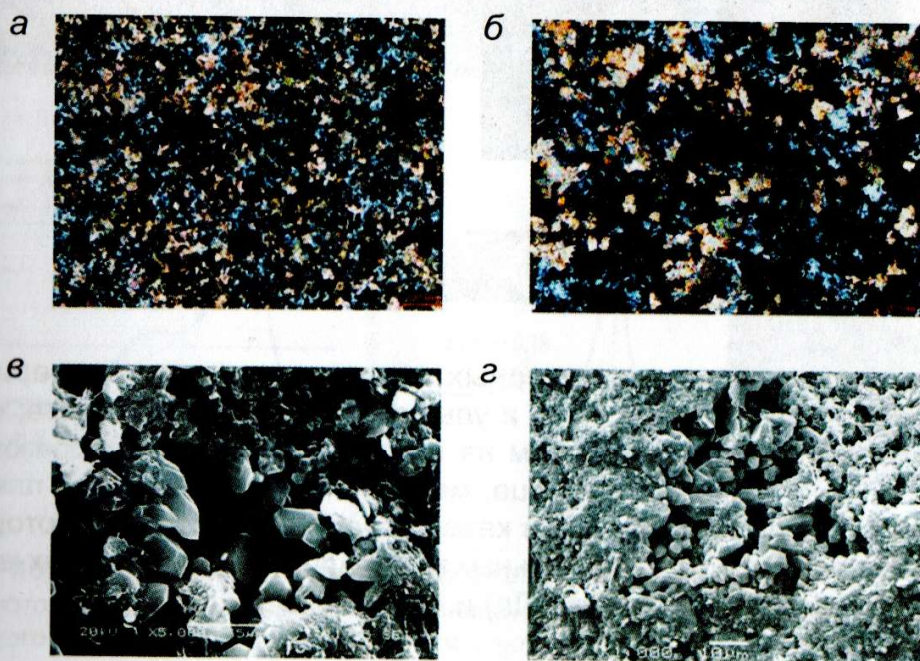


Рис. 3. Фотографии прозрачных петрографических шлифов кремнисто-карбонатных типов пород, входящих в состав баженовской свиты, снятые в анализаторе (а, б), и снимки РЭМ образующихся по ним в результате гидротермальной проработки гидротермальных силицитов (в, г)

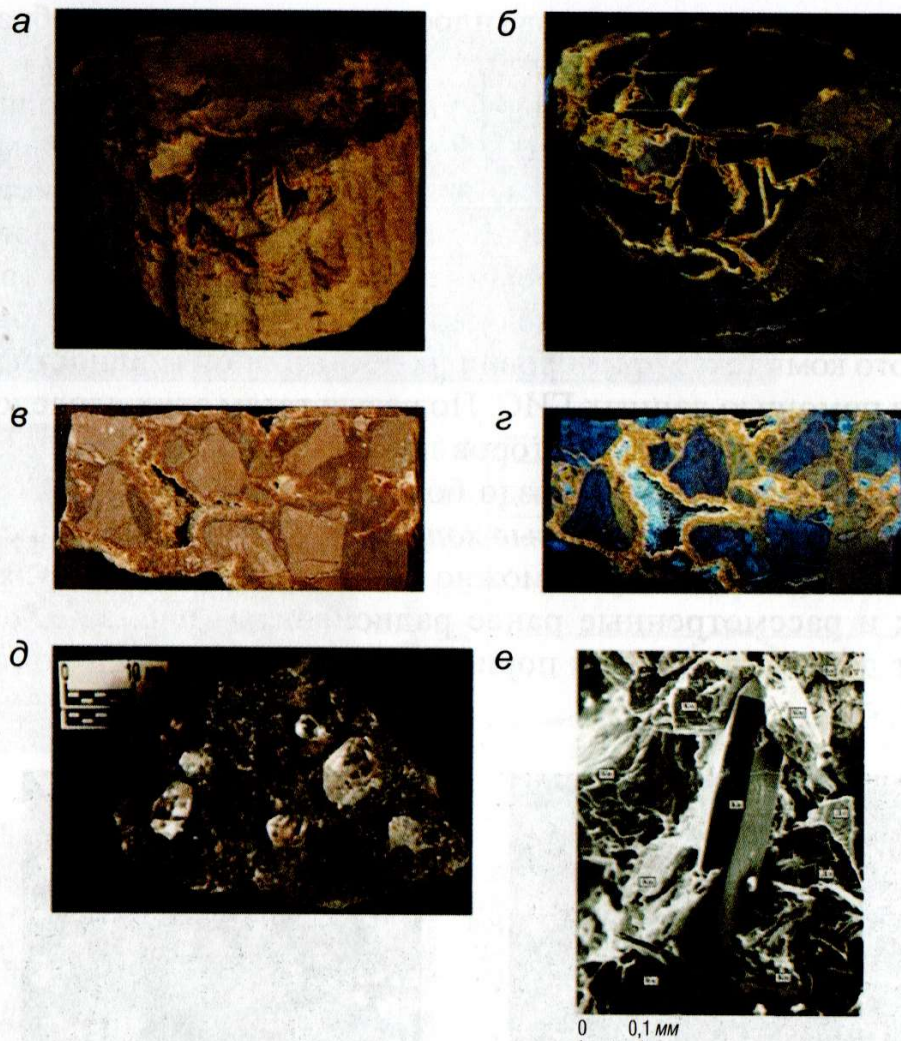


Рис. 4. Фотографии полноразмерных образцов трещинно-кавернозных карбонатов, снятые в белом (а, в) и ультрафиолетовом (б, г) свете; снимок кавернозного карбоната, в котором на поверхности каверны образовались кристаллы гидротермального кварца, местами покрытые тонкими пленками тиобитума (д); снимок РЭМ другой каверны (е), на поверхности которой отложилась ассоциация гидротермальных минералов, представленных кварцем (Кв), кальцитом (Кц), доломитом (Дл) и баритом (Ба)

Фосфоритовые копролиты состоят из очень мелких сфер, сложенных апатитом, а в порах между самими копролитами присутствуют многочисленные кристаллы гидротермальных минералов, представленных баритом, доломитом, каолинитом (диккитом) и кварцем



(рис. 5, д, е). Часть порового пространства в них занята метаморфизованным тиобитумом (рис. 5, в, д, е). Об этом же свидетельствуют результаты капельной хроматографии и пиролитических исследований (рис. 5, д).

В результате воздействия высокоэнтальпийных гидротермальных флюидов на органическое вещество, входящее в состав баженовской свиты, образуется также вторичная пористость в результате его превращения в битум, а также в жидкие и газообразные УВ. В зависимости от мацерального состава исходного органического вещества (ОВ) и степени его термического преобразования, вторичная пористость может изменяться в широких пределах (рис. 6, а).

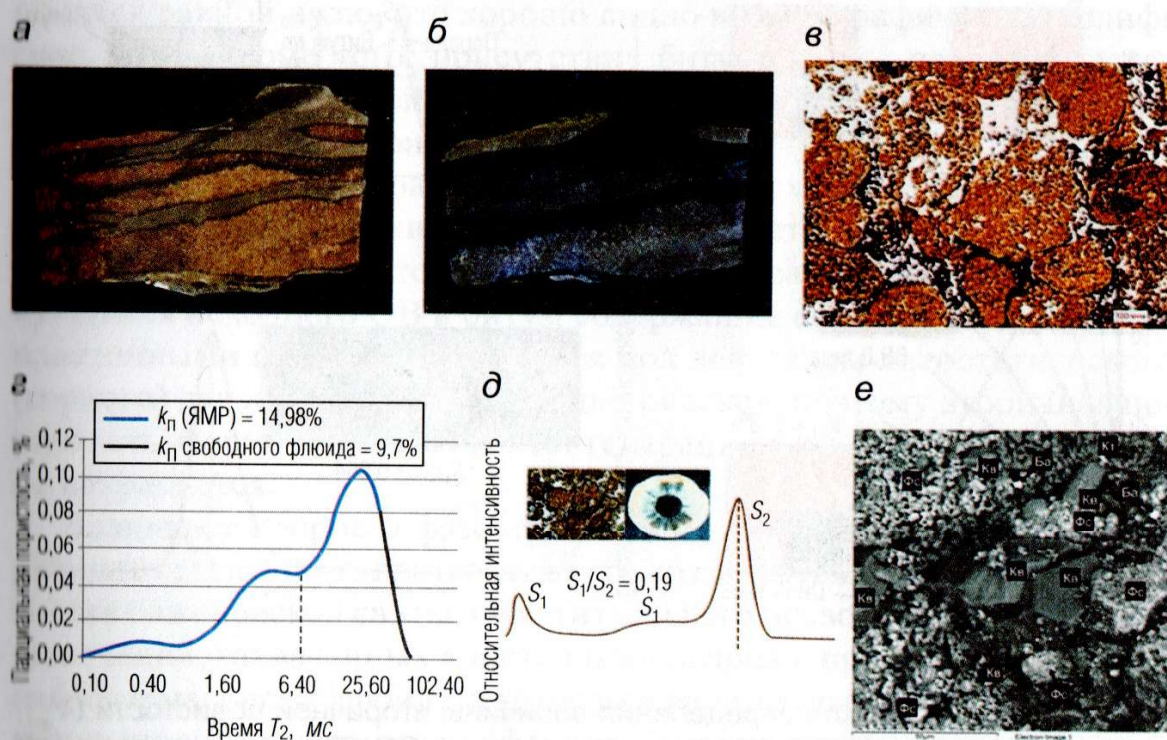


Рис. 5. Фосфоритовые копролиты в составе баженовской свиты:

а, б – фотографии полноразмерного образца с прослоями нефтенасыщенного фосфоритового копролита, снятые в белом и ультрафиолетовом свете соответственно; в – снимок прозрачного петрографического шлифа фосфоритового копролита; г – его спектр ЯМР с выделенной областью свободного флюида (9,7%); д – его пиелограмма с фотографией петрографического шлифа и результатом капельной хроматографии, приведенными на врезке, е – снимок РЭМ фосфоритового копролита (Фс) с ассоциацией гидротермальных минералов в его поровом пространстве, представленных баритом (Ба), доломитом (Дл), кварцем (Кв), каолинитом (Кт) и кальцитом (Кц)

Однако, поскольку объем образующихся нафтидов превышает таковой исходного ОВ, происходит флюидоразрыв баженовской свиты, и жидкие, а также газообразные УВ эмигрируют в ближайшие породы-коллекторы, а наиболее вязкая битуминозная их часть остается в образовавшемся поровом пространстве, превращая исходные породы в битуминозную толщу. В тех случаях, когда возникшего вследствие генерации нафтидов вторичного порового пространства оказывается недостаточно для размещения в нем образовавшегося битума, он выделяется в форме самостоятельных линзообразных тел различного размера, но их толщина редко превышает 4–6 мм (рис. 6, б).

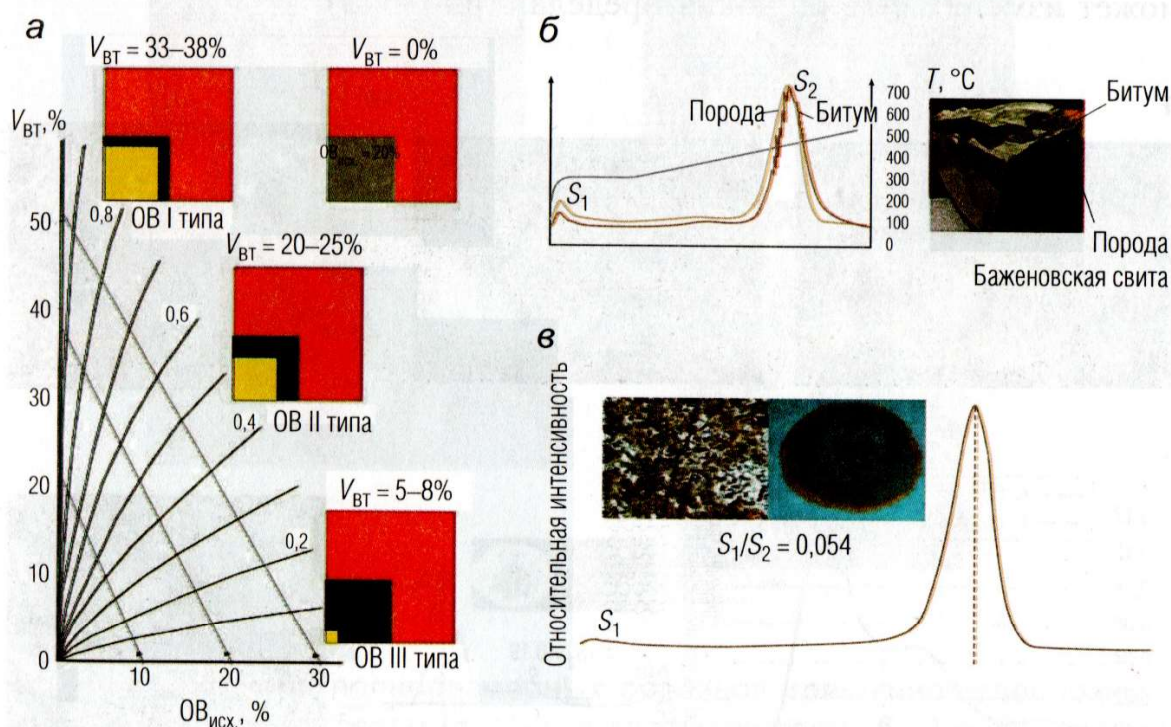


Рис. 6. Номограмма для определения величины вторичной пористости ( $V_{BT}$ ), образующейся за счет превращения исходного ОВ ( $OB_{исх}$ ) в нафтиды (а); пирограмма образца баженовской свиты и битума, присутствующего на нем в виде маломощного прослоя (б), и пирограмма трещиноватого карбонатного радиоларита, трещины в котором также заполнены битумом с врезкой, на которой представлена фотография его петрографического шлифа и результат капельной хроматографии (в). Жирные кривые (а) – линии равных степеней превращения  $OB_{исх}$  в нафтиды, цифры рядом с ними – величина мобильной части  $OB_{исх}$ ; тонкие прямые со стрелками – линии, показывающие направление изменения величины вторичной пористости ( $V_{BT}$ ) в зависимости от содержания  $OB_{исх}$  и его типа

Пирограммы битумов и образцов, в которых они были встречены, практически ничем не отличаются, что подтверждает сделанное предположение, что поровое пространство этих образцов занято тем же самым битумом, который выделился в виде самостоятельной фазы (рис. 6, б). Небольшой по амплитуде пик  $S_1$  на полученной пирограмме – это УВ, находящиеся в составе битума в форме «твердого» раствора, так как на спектре ЯМР битума отсутствует сигнал от жидких УВ. Из этих фактов можно заключить, что в битуме отсутствуют поры, заполненные жидкими и/или газообразными УВ.

Образующийся из исходного ОВ битум также часто полностью заполняет возникшие тектоногенные микротрещины, например, в карбонатном радиолярите, из-за чего его эффективная емкость становится равной нулю, что хорошо видно в петрографическом шлифе (рис. 6, в). Кроме того, присутствие битума также подтверждается результатами капельной хроматографии и пиролитических исследований этого образца (рис. 6, в).

Таким образом, образуемая за счет исходного ОВ вторичная пористость практически полностью заполняется образовавшимся из него битумом. Кроме того, не следует забывать, что в момент превращения исходного ОВ в битум содержащие его породы становятся пластичными и легко уплотняются под действием литостатического (горного) давления, перекрывающих осадков, поэтому вторичная пористость, формирующаяся за счет генерации исходным ОВ нефтидов, не сохраняется.

Возникает вопрос о фазовом составе нефтидов, образующихся в результате тектоно-гидротермального воздействия на ОВ, входящего в состав бажендовской свиты. Ответить на него позволяет анализ микровключений, захваченных кристаллами кварца в процессе их роста из гидротермального флюида, в котором в виде эмульсии присутствовали капельки образовавшихся нефтидов. Эти включения состоят из трех фаз: пузырька газа, жидкости желтого цвета и вязкой субстанции почти черного цвета (рис. 7). Используя принцип Кавальери, несложно определить объемы, занимаемые этими фазами: газ – 15%, желтая жидкость (нефть) – 47% и вязкая субстанция почти черного цвета (битум) – 38% (рис. 7).

При нагревании этих включений гомогенизация жидкой и газообразной фаз происходила в интервале температур 230–260 °С. Темная вязкая фаза не гомогенизировалась и при нагревании до 330 °С [4].

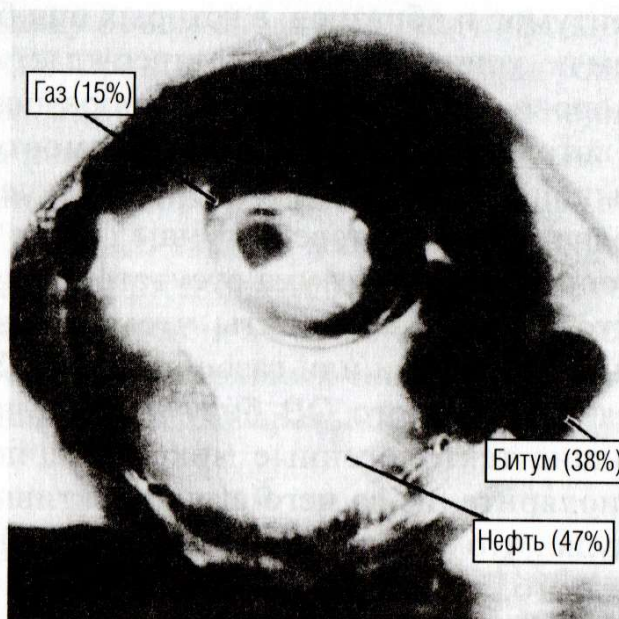


Рис. 7. Газово-жидкое включение в кристалле гидротермального кварца (по [4])

При более высоких температурах включения просто взрывались, поэтому температуру полной гомогенизации всех трех фаз определить не удалось, но можно предположить, что температура гидротермального флюида была гораздо выше 330 °С.

Очевидно, что темная вязкая субстанция – это битум, состоящий преимущественно из асфальтосмолистых соединений, который выделился на поверхности трещин и каверн вместе с гидротермальными минералами (рис. 1, 2, 4, 5) и в виде самостоятельной фазы (рис. 6, б). Основная часть вторичной пористости, образовавшейся в результате превращения исходного ОВ в нафтиды, как уже отмечалось ранее, оказалась заполненной битумом. Кроме того, битуминозные разновидности пород, слагающих баженовскую свиту, обладают низкими прочностными свойствами и легко уплотняются под действием литостатического (горного) давления. Напротив, карбонатные и кремнистые типы пород способны противостоять этому давлению и сохранять сформировавшуюся в них вторичную емкость, представленную главным образом трещинами и кавернами, которые наряду с битумом оказались заполненными образовавшейся нефтью (рис. 1–4).

Таким образом, в зонах тектоно-гидротермального воздействия на отложения баженовской и абалакской свит происходит активная генерация нафтидов и формирование вторичных коллекторов трещинного

и трещинно-кавернозного типов. Поэтому все разновидности пород, входящие в состав бажено-абалакского комплекса, можно условно разделить на два типа: генераторы нефтидов (породы с повышенным содержанием ОВ) и коллекторы (имеющие преимущественно кремнистый и карбонатный состав).

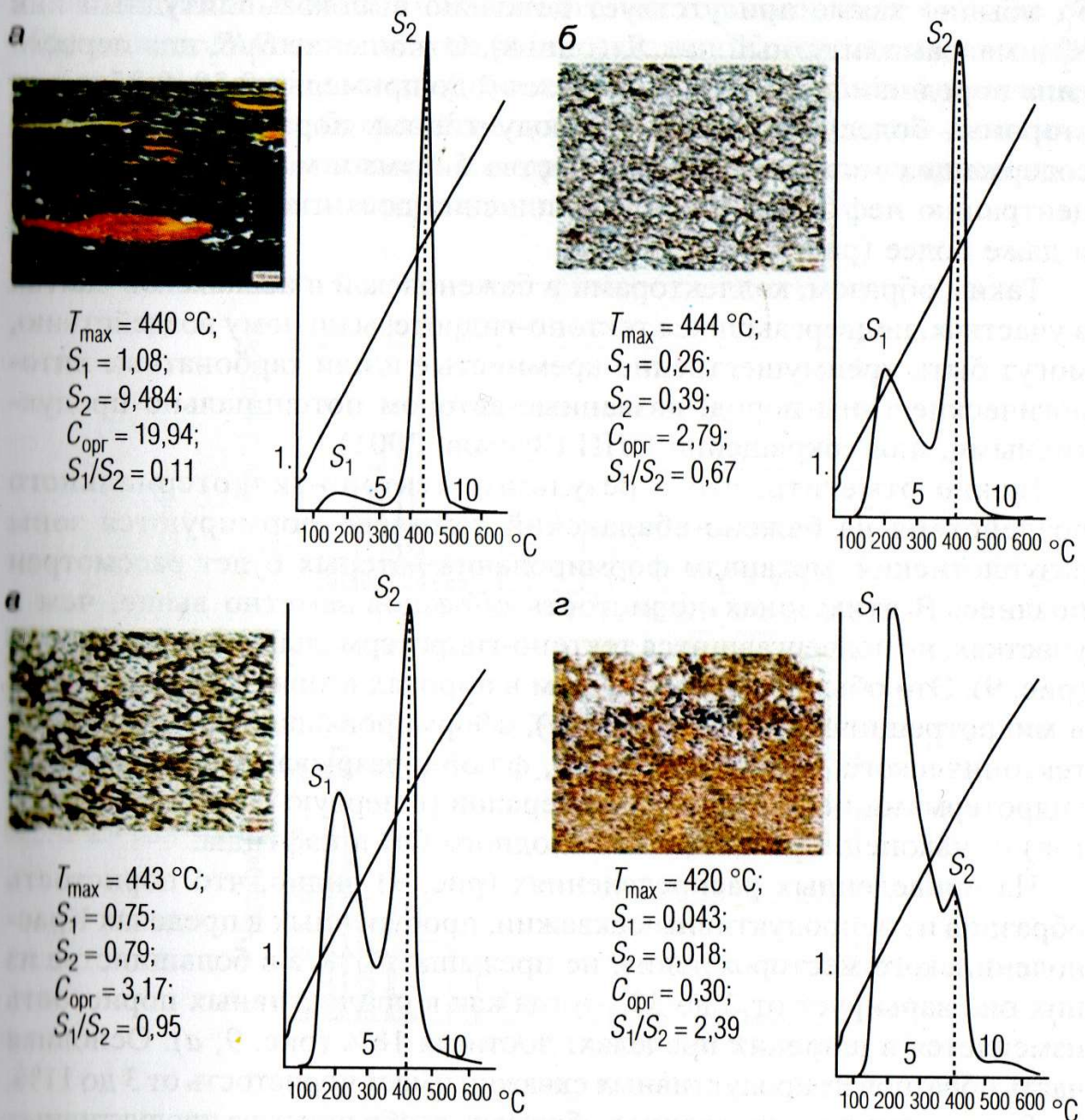


Рис. 8. Литолого-пиролитические характеристики различных типов пород (генераторов нефтидов и их коллекторов) в составе баженовской свиты Маслиховского месторождения:

а – битуминозный кремнистый аргиллит с ихтиодетритом; б – карбонатный радиоларит; в – радиоларит; г – кремнистый известняк ( $S_1$  и  $S_2$  даны в мг УВ/г породы)

С целью оперативного разделения пород, слагающих бажено-абалакский комплекс, на два этих типа можно использовать результаты пиролитических исследований. Первые имеют малоамплитудный пик  $S_1$  (или он вовсе отсутствует на их пирограммах) и высокоамплитудный пик  $S_2$ ; вторые, наоборот, характеризуются высоким пиком  $S_1$ , обычно также присутствует довольно высокоамплитудный пик  $S_2^0$  и малоамплитудный пик  $S_2$  (рис. 8). Отношение  $S_1/S_2$  для первого типа пород изменяется в пределах от 0 до примерно 0,30–0,35, а для второго – более 0,35. В самых продуктивных породах-коллекторах, содержащих минимальное количество битума и максимальную концентрацию нефтяных УВ, это отношение достигает значений 1–1,5 и даже более (рис. 8, в, г).

Таким образом, коллекторами в баженовской и абалакской свитах в участках, подвергавшихся тектоно-гидротермальному воздействию, могут быть преимущественно кремнистые и/или карбонатные литологические типы пород, названные автором потенциально продуктивными, или сокращенно ППП (Зубков, 2001).

Важно отметить, что в результате тектоно-гидротермального воздействия на бажено-абалакский комплекс формируются зоны разуплотнения, механизм формирования которых будет рассмотрен позднее. В этих зонах пористость образцов заметно выше, чем в участках, не подвергавшихся тектоно-гидротермальному воздействию (рис. 9). Это объясняется наличием в породах вторичной пористости и микротрещиноватости (рис. 1, в), сформировавшихся в результате тектонического дробления пород, флюидоразрыва, выщелачивания гидротермами неустойчивых минералов (в первую очередь карбонатов) и, наконец, превращения исходного ОВ в нефтиды.

На приведенных распределениях (рис. 9) видно, что пористость образцов из непродуктивных скважин, пробуренных в пределах Краснотеневского месторождения, не превышает 5%, а в большинстве из них она варьирует от 2 до 3%, тогда как в продуктивных пористость изменяется в широких пределах, достигая 18% (рис. 9, а). Основная часть образцов из продуктивных скважин имеет пористость от 3 до 11%.

Распределение пористости в образцах, отобранных из продуктивных и непродуктивных скважин, пробуренных в пределах Салымского месторождения, заметно отличается от ранее рассмотренного. Пористость образцов, отобранных из непродуктивных скважин, изменяется в гораздо более узких пределах – от десятых долей до 3%, причем основная

масса образцов, поднятых из этих скважин, имеет пористость менее 1% (рис. 9, б). Пористость образцов, отобранных из продуктивных скважин, изменяется в более широких пределах (от 1 до 16%), однако основная их часть обладает пористостью 2–6% (рис. 9, б).

Заметно более низкие значения пористости образцов, отобранных из обоих типов скважин Салымского месторождения, в отличие от образцов, поднятых из тех же типов скважин Красноленинского месторождения, скорее всего объясняются большей глубиной залегания и, соответственно, большей величиной литостатического давления на верхнеюрские отложения в пределах первого, по сравнению с таковым на втором месторождении.

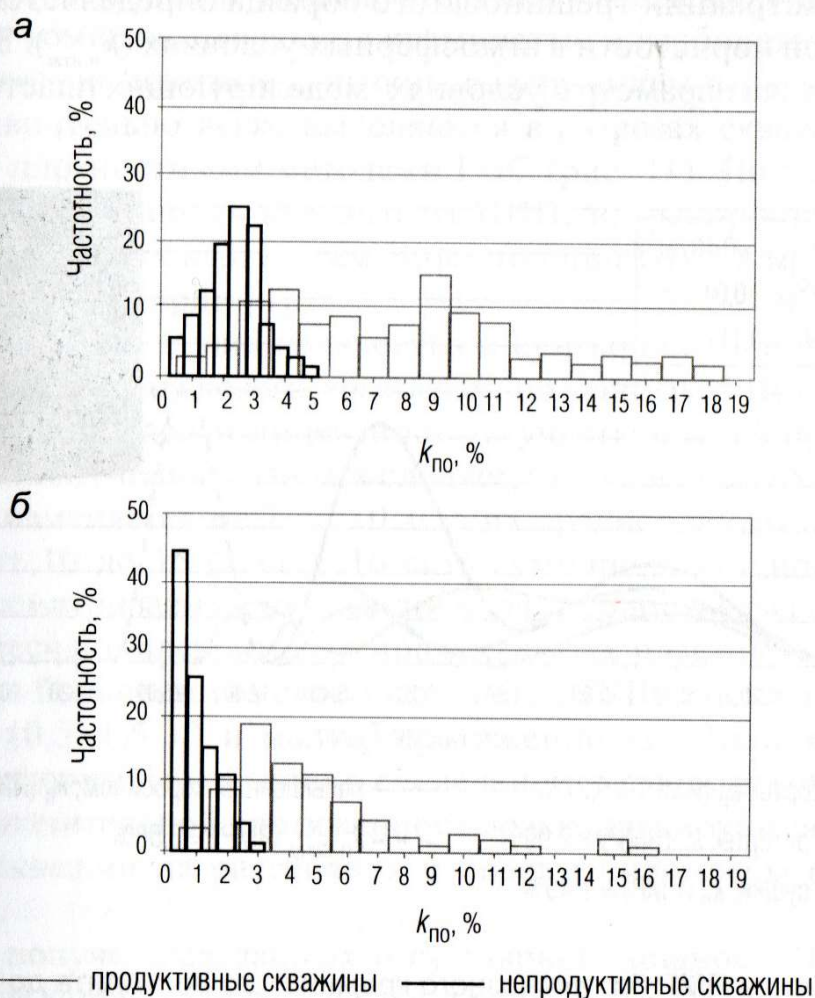


Рис. 9. Распределение значений пористости в образцах, отобранных из продуктивных и непродуктивных скважин Красноленинского (а) и Салымского (б) месторождений

Можно предположить, что основной вклад во вторичную емкость, формирующуюся в породах бажено-абалакского комплекса, подвергшихся тектоно-гидротермальному воздействию, вносит тектоногенная трещиноватость. Действительно, методом ЯМР трещинная емкость фиксируется в виде самых крупных двумерных пор, доля которых в рассматриваемом образце баженовской свиты составляет почти 3,6% (рис. 10) [3]. Однако эти определения трещинной пористости проводились в атмосферных условиях без учета эффективного давления, действующего на образец. Поэтому для получения более достоверных данных о величине трещинной пористости необходимо учесть сжимаемость трещиноватых образцов следующим образом.

После экстракции трещиноватого образца определяется величина его открытой пористости в атмосферных условиях ( $k_{п.атм}$ ). Затем определяется тот же параметр в условиях, моделирующих пластовые ( $k_{п.пл}$ ).

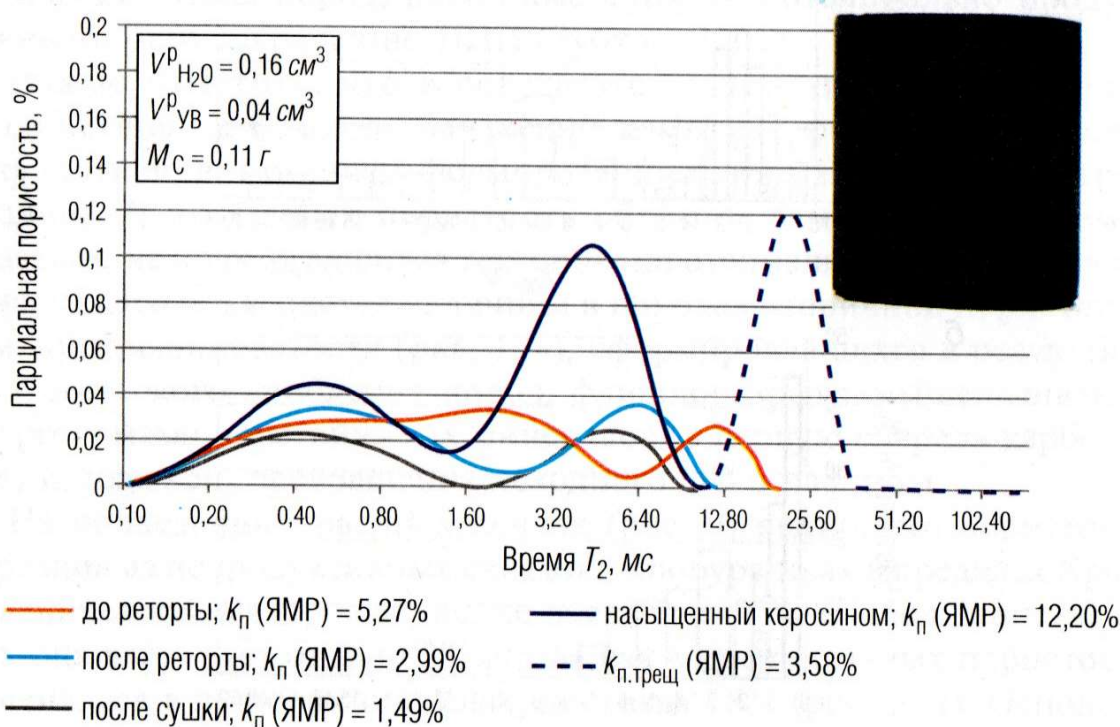


Рис. 10. Спектры ЯМР битуминозного кремнистого аргиллита до и после термического воздействия и последующего насыщения его керосином (Каменная площадь, баженовская свита); на врезке приведена фотография этого же образца, насыщенного керосином, на которой видны трещины, выделяющиеся темно-серым цветом (по [3]).



Вычисляется величина уменьшения открытой пористости при изменении атмосферных условий на пластовые:  $\Delta k_{\text{п}} = k_{\text{п.атм}} - k_{\text{п.пл}}$ . Очевидно, что полученное значение  $\Delta k_{\text{п}}$  обусловлено главным образом величиной сжимаемости трещин. Затем методом ЯМР определяется трещинная пористость образца (рис. 10).

Так как исследование образца с помощью ЯМР-релаксометра проводилось в атмосферных условиях, то из полученной на нем величины трещинной пористости ( $k_{\text{п.атм.трещ}}$ ) необходимо вычесть поправку за пластовые условия, то есть значение  $\Delta k_{\text{п}}$ . Тогда величина трещинной пористости в условиях, моделирующих пластовые ( $k_{\text{п.пл.трещ}}$ ), будет равна:  $k_{\text{п.пл.трещ}} = k_{\text{п.атм.трещ}} - \Delta k_{\text{п}}$ .

Поскольку главными типами вторичных коллекторов в бажено-абалакском комплексе являются кремнистые и карбонатные породы, то есть довольно плотные с низким содержанием в их составе ОВ, то они сравнительно легко выделяются в разрезах скважин акустическими и плотностными методами ГИС (рис. 11). По данным ГИС определяется мощность каждого из ППП, их распространение по площади и строится карта суммарных толщин ППП в пределах анализируемой территории [4].

Примеры определения количества и суммарной толщины ППП в составе бажено-абалакского комплекса по данным ГИС в пределах нескольких площадей и лицензионных участков (ЛУ) приведены в таблице. Из полученных данных следует, что в среднем их суммарная мощность изменяется от 7 до 10 м, а их среднее число варьирует в пределах от 10 до 15 (табл.). То есть суммарная мощность ППП в составе рассматриваемых отложений вполне сопоставима с толщиной обычных песчано-алевритовых продуктивных пластов.

Однако в большинстве своем отдельные ППП имеют небольшую мощность (0,5–1,5 м) и малую протяженность. Лишь единичные ППП, расположенные обычно в кровельной части абалакской свиты, обладают значительной протяженностью и коррелируются в разрезах соседних скважин на расстояния в первые километры (например, пласт КС<sub>1</sub>).

Однако полученных данных о суммарной мощности ППП недостаточно для оценки запасов нефти в рассматриваемых отложениях. Необходимо также определить площадь, в пределах которой происходило тектоно-гидротермальное воздействие на ППП, без которого невозможно формирование в них вторичных коллекторов, содержащих

углеводородные залежи, то есть там, где потенциально продуктивные пласты или породы (ППП) превращались в продуктивные пласты или породы (ПП).

Выделение участков или зон, в пределах которых происходило тектоно-гидротермальное воздействие на рассматриваемые отложения, осуществляется путем комплексирования данных сейсморазведки и результатов тектонофизического моделирования, выполняемого на основе этих данных [4, 5, 13].

Моделирование осуществлялось двумя методами: оптико-поляризационным и тектоно-седиментационным.

**Оптический метод исследования** напряжений основан на явлении двулучепреломления в прозрачных аморфных оптически активных материалах (в наших экспериментах использовался желатин), подвергнутых деформации. При этом изменение двойного лучепреломления в таких телах находится в прямой зависимости от величины напряжений, возникающих в деформируемом теле [1, 5, 6, 12, 13, 15–17].

Точность оптического метода исключительно велика, и поэтому он широко применяется в технике при исследованиях сложных систем напряжений, расчеты которых оказываются затруднительными или невозможными. Также трудно получить полное представление о распределении полей напряжений в геологических структурах на основе умозрительных построений, чем широко пользуются геологи в практике своих исследований, что, к сожалению, нередко приводит к грубым ошибкам. Расчеты же полей напряжений даже в случае простых геологических структур оказываются очень сложными и дают неоднозначные результаты. Кроме того, оптический метод обеспечивает относительно строгое соблюдение условий подобия для упругой области деформаций и правомерность сопоставления модели с реальным объектом в тех пределах, в каких отдельные геологические структуры в различных стадиях их развития можно считать односвязными телами. В этом случае распределение напряжений в них не зависит от величины и физических свойств сравниваемых объектов, а достаточно строго определяется аналогией внешнего нагружения и геометрическим подобием структурных форм [1, 5, 6, 12, 13, 15–17].

Преимущества оптического метода используются для выявления участков повышенных значений касательных напряжений и прогноза в их пределах разрывных дислокаций в направлении траекторий нормальных ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ) и касательных ( $\tau_{\max}$ ) напряжений, построенных по карте изоклин оптического поля.

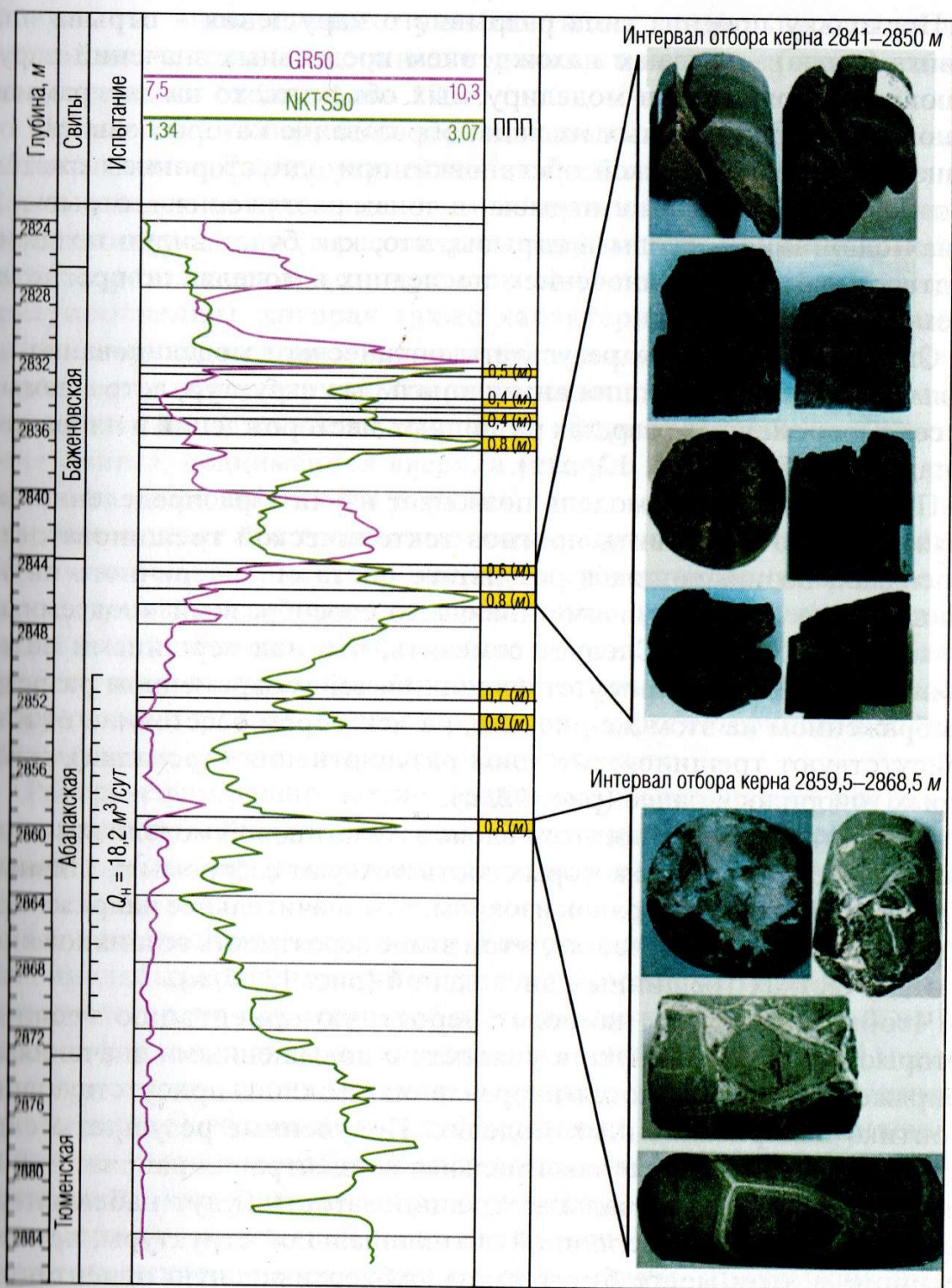


Рис. 11. Пример выделения потенциально продуктивных пластов в отложениях баженовской и абалакской свит по данным ГИС (по [4])

Поскольку прогноз типа разрывного нарушения – отрыва или сдвига (скола) – связан с нахождением предельных значений нарушающих напряжений в моделируемых объектах, то на диаграммах наносятся оба возможных их вида, образование которых зависит от конкретной геологической обстановки: при одностороннем сжатии прогнозируются сколы и отрывы, в зонах растяжения – отрывы, в зонах сдвигания – сколы и отрывы, что, как будет видно позднее, подтверждается возникновением последних в моделях по прогнозируемым направлениям.

Сначала рассмотрим результаты оптического моделирования на примерах двух простейших антиклинальных структур, встречаемых на сейсмодновременных разрезах различных месторождений и площадей Западной Сибири (рис. 12, а, г).

Первая оптическая модель позволяет изучить распределение напряжений и осуществить прогноз тектонической трещиноватости в осадках, возникающих в результате роста симметричного антиклинального поднятия, напоминающего своеобразный «подземный вулкан» (рис. 12, а). Следует отметить, что над вершинами антиклинальных блоков, присутствующих на сейсмодновременном разрезе, изображенном на этом же рисунке, на некотором расстоянии от них присутствуют трещиноватые зоны разуплотнения (просадки), о которых говорилось ранее (рис. 12, а).

Вследствие вздымания этого блока в желатиновой модели возникают напряжения, уровню которых соответствуют изохромы различных порядков. Чем выше порядок изохром, тем значительнее напряжения, существующие в этом участке, и тем выше вероятность возникновения в этих участках трещинных дислокаций (рис. 12, б, в).

Чтобы определить наиболее вероятную ориентацию трещин, которые могут возникнуть в участках с повышенными значениями напряжений, используются направления изоклин, присутствующих в оптико-поляризационных моделях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальная концентрация напряжений и, соответственно, максимальная трещиноватость будут наблюдаться непосредственно над вершиной антиклинальной структуры, причем трещины в этом месте будут иметь субвертикальную ориентацию (рис. 12, в). Зона дробления будет расширяться по направлению вверх, достигая максимальной ширины на границе нижнего и среднего желатиновых слоев, соответствующих в модели баженовской толще,

а затем она вновь начинает уменьшаться в латеральных размерах, полностью исчезая немного выше границы между средним и верхним желатиновыми слоями (рис. 12, в).

По мере роста поднятия первоначально образуются трещины в области сжатия, формирующейся непосредственно над его вершиной. Затем вследствие продолжающегося движения вверх постепенно на некотором удалении (в рассматриваемой модели на границе первого и второго слоев и во втором слое) возникает зона растяжения (разуплотнения), которая также характеризуется повышенными значениями касательных напряжений и в которой также возникают условия для образования субвертикальных трещин. Постепенно, по мере роста этого поднятия, трещины, сформировавшиеся в нижней зоне сжатия, поднимаются вверх, а таковые, возникшие в зоне растяжения, расположенной в верхних слоях, устремляются вниз, и в какой-то момент обе трещинные зоны могут соединиться. При этом образуется единая высокопроницаемая субвертикальная зона, по которой становится возможной эффективная миграция флюидов снизу вверх или в обратном направлении в зависимости от ориентации градиентов пластовых давлений, существующих между нижними и верхними породами-коллекторами или нефтематеринской толщей (баженовская свита) и породами-коллекторами.

Распределение напряжений, возникающих вследствие роста трапециевидного поднятия, заметным образом отличается от рассмотренного ранее, сформировавшегося над симметричным поднятием (рис. 12, д).

Если в первой модели (симметричное поднятие) начальный участок максимальных концентраций напряжений (зона сжатия) формируется непосредственно над вершиной этого поднятия, а следующий на некотором удалении от него (зона разуплотнения), то во второй модели (трапециевидное поднятие) участки с максимальными напряжениями (зоны сжатия) возникли над его крыльями, а в непосредственной близости от его плоской вершины расположился участок с низкими значениями касательных напряжений (рис. 12, д). Второй участок повышенных напряжений (зона растяжения) в этой модели возник также на некотором удалении от ее вершины, причем она имеет гораздо большую латеральную протяженность, чем таковая, сформировавшаяся над первой моделью (рис. 12, б, д). Субвертикальные высокопроницаемые трещинные зоны в рассматриваемой модели

прогнозируются на краях этого поднятия, а в центральной части над его плоской поверхностью могут сохраниться нераздробленные (монокристаллические) участки (рис. 12, *д, е*). Поэтому интенсивная вертикальная миграция флюидов в этом случае возможна лишь на бортах трапециевидного поднятия, а не в его центральной части.

Интересно, что высокодебитная скважина 554э, пробуренная на Салымском месторождении и вскрывшая бажено-абалакский комплекс, попала как раз в рассмотренную выше структурно-тектоническую ситуацию, и ее «виртуальный» ствол находится именно в субгоризонтальной протяженной зоне дробления, приуроченной к границе нижнего и среднего слоев оптической модели, имитирующих зону сочленения отложений баженовской и абалакской свит (рис. 12, *г-е*).

В обеих рассмотренных выше моделях прогнозируемые трещины ориентированы субвертикально по отношению к вершинам поднятий, а по направлению к их крыльям и вниз к их основаниям они начинают наклоняться и принимать все более пологое положение (рис. 12, *в, е*).

Таким образом, оптико-поляризационное моделирование позволяет прогнозировать зоны сжатия и разуплотнения (то есть тектоногенной трещиноватости) в компетентных (относительно трещиноватости) породах (аналоги ППП) и ориентацию, а также объемную плотность возникающих в этих зонах трещин.

**Седиментационный метод** представлен двумя разновидностями – двумерным и трехмерным.

Начнем рассмотрение с *двумерных седиментационных моделей*.

Двумерное моделирование осуществлялось в камерах с линейными размерами  $50 \times 30 \times 10$  см. В нижней части камеры располагались подвижные блоки, с помощью которых моделировался рост поднятий заданной формы [4, 5, 13].

Модели приготавливались из двух основных типов осадков: компетентных, моделирующих карбонатные и кремнистые породы (ППП), а также некомпетентных, имитирующих песчано-алевритовые и глинистые пласты. Первые изготавливались из цемента и/или алебаstra, а вторые – из природных песчано-алевритовых и глинистых осадков.

После завершения экспериментов модели послойно препарировались и изучался характер распределения трещин в каждом из компетентных слоев, их ориентация в пространстве, протяженность, плотность, а также их раскрытость [4, 5, 13].

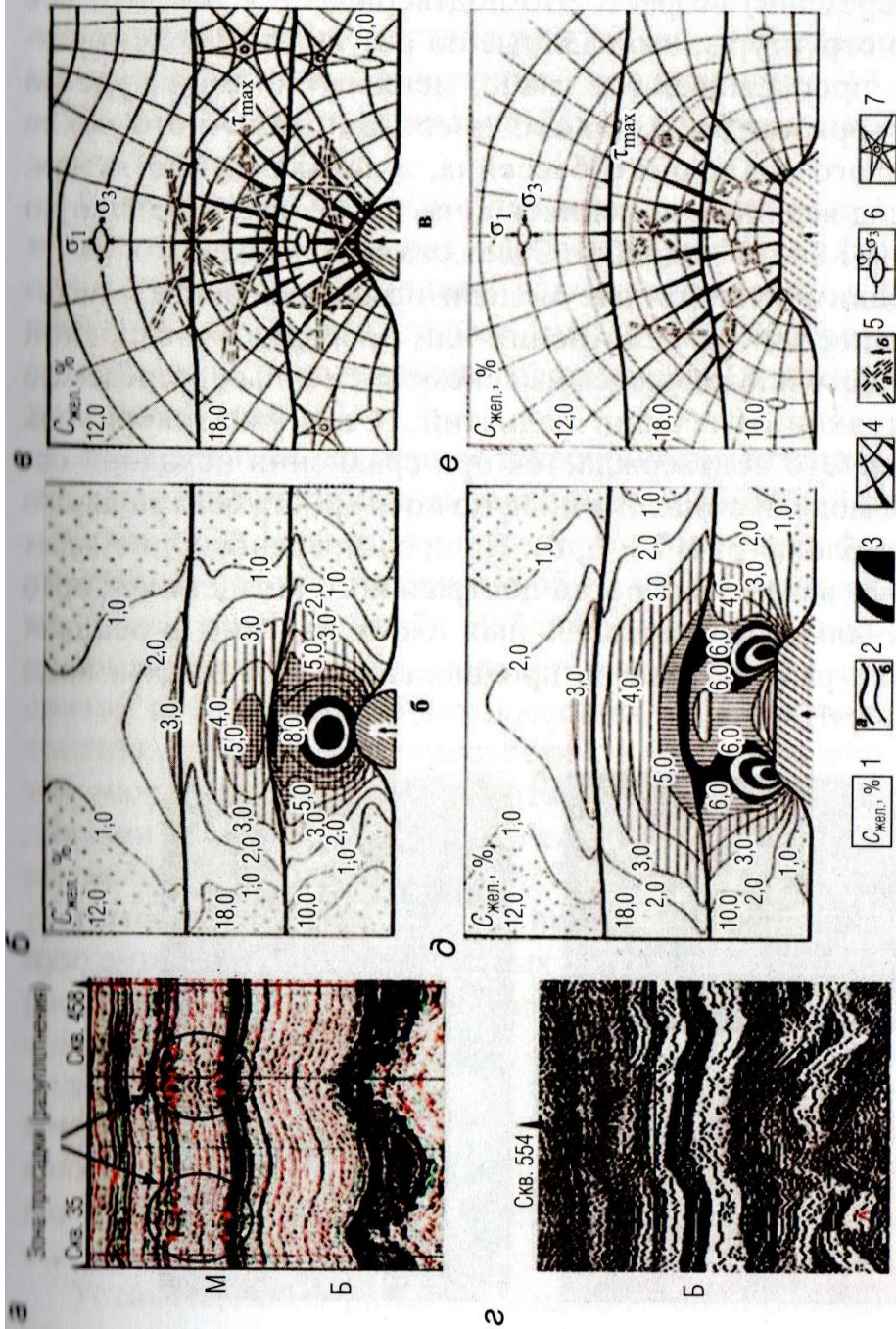


Рис. 12. Примеры базовых сейсмoproфилей (а, б) и расшифровка построенных на их основе оптико-поляризационных моделей (в, г, д, е); а – Пальяновская площадь; г – Салымское месторождение. Условные обозначения: 1 – концентрация желатина; 2 – границы между желатиновыми слоями (а), изохромы (уровни касательных напряжений) (б); 3 – максимальные значения порядка изохром (более 8); 4 – траектории нормальных напряжений ( $\sigma_1$ ), их уширения – прогнозируемые трещины; 5 – траектории касательных напряжений ( $\tau_{max}$ ) (а), направление движения антиклиинальных блоков (б); 6 – эллипсоид деформации; 7 – изотропная точка

Следует также обратить внимание на очень важный для тектоно-физического моделирования факт, что все исследованные структуры имели постседиментационный, то есть очень молодой (в масштабе геологического времени) возраст. Это подтверждается тем, что все антиклинальные структуры, выявленные по результатам сейсморазведочных работ, прослеживаются слабо, меняясь по амплитуде до самых верхних горизонтов, входящих в состав осадочного чехла Западно-Сибирского осадочного бассейна, а зоны разуплотнения, образующиеся над вершинами поднятий, часто выходят на дневную поверхность, о чем более подробно будет сказано позже.

Двумерные седиментационные модели помогают понять механизм формирования зон разуплотнения или просадки в осадочной толще, которые часто наблюдаются на сейсмодновременных разрезах на некотором расстоянии от вершин поднятий, о чем уже говорилось ранее (рис. 12, *а*). Это подтверждается при сравнении исходной седиментационной модели с аналогичной, но после роста центрального антиклинального блока (рис. 13, *а, б*). На представленных рисунках хорошо видно, что вследствие роста центрального антиклинального блока в первоначально субпараллельных слоях над ним в осадках образовалась зона разуплотнения, проявившаяся в осадках в виде просадки (рис. 13, *б*).

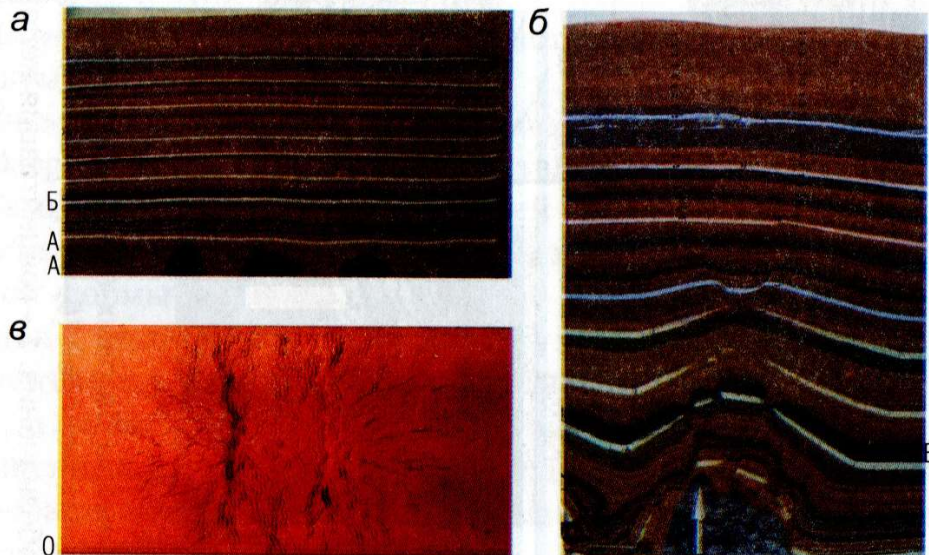


Рис. 13. Фотографии двумерной седиментационной модели в исходном состоянии (*а*), после роста центрального поднятия с образованием над ним зоны разуплотнения (дробления) или просадки осадков (*б*) и вид сверху на вышедшую на поверхность модели зону разуплотнения осадков (*в*)



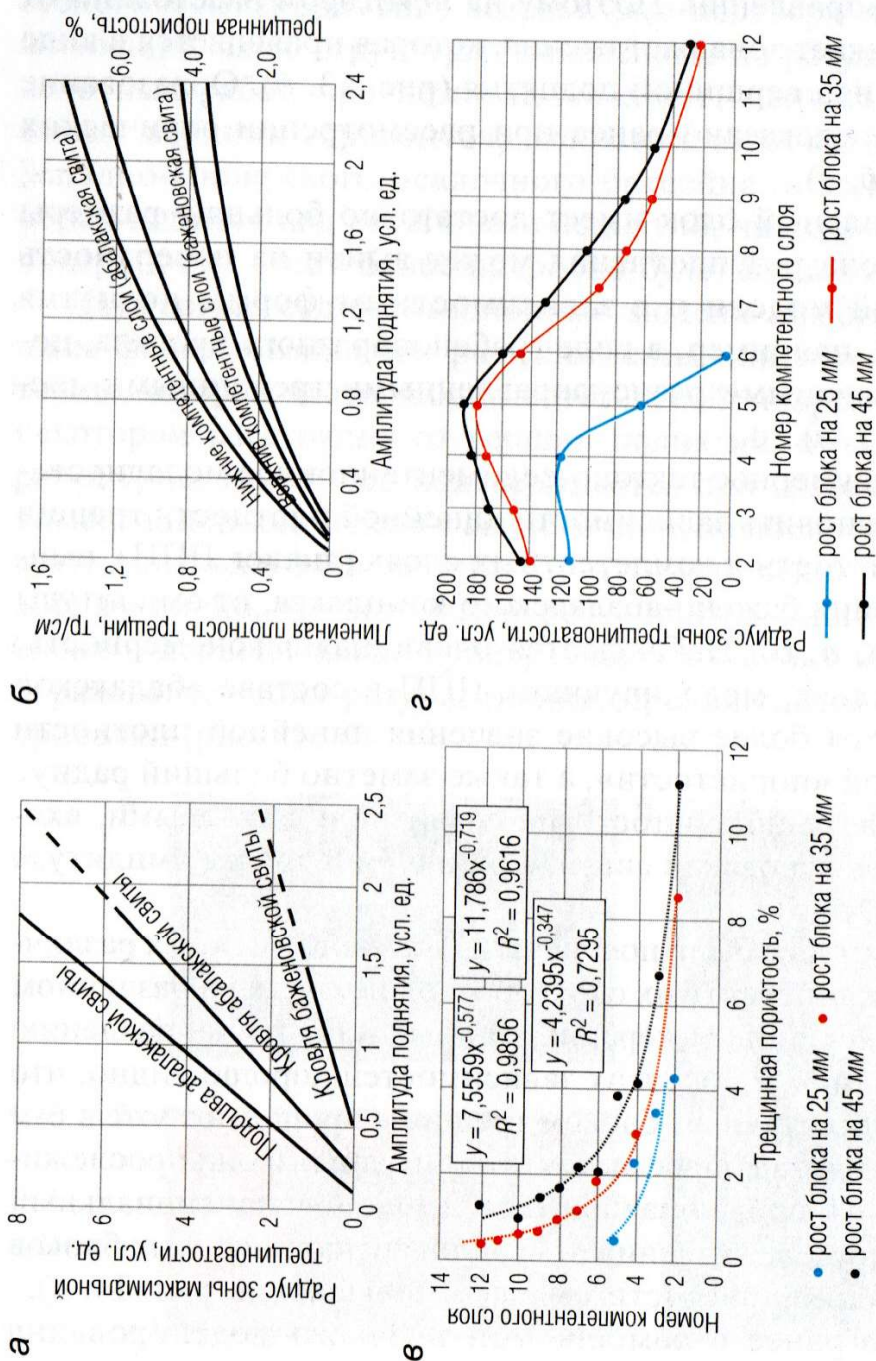
Механизм формирования зоны разуплотнения или просадки заключается в следующем. Растущий антиклинальный блок смещает перекрывающие его осадки не только вверх, но и в стороны в субгоризонтальном направлении. Поэтому на некотором расстоянии от его вершины возникает зона растяжения, которая проявляется в виде просадки осадков над вершиной поднятия (рис. 13, б). Образование этой зоны было предсказано ранее при рассмотрении оптических моделей (рис. 12, б, в).

Если антиклинальный блок имеет достаточно большие размеры и амплитуду, то зона разуплотнения может выйти на поверхность седиментационной модели и в зависимости от формы поднятия проявиться на ней, например, в виде грабенообразного провала, покрытого многочисленными разнонаправленными трещинными дислокациями (рис. 13, в).

Выполненное двумерное тектоно-седиментационное моделирование позволило установить зависимости линейной плотности трещин и трещинной пористости в компетентных слоях (аналог ППП), имитирующих отложения бажено-абалакского комплекса, от амплитуды поднятий (рис. 14, а, б). Наблюдается очевидная закономерность: в компетентных слоях, моделирующих ППП в составе абалакской свиты, наблюдаются более высокие значения линейной плотности трещин, трещинной «пористости», а также заметно больший радиус зон максимальной трещиноватости по сравнению с таковыми, входящими в состав баженовской свиты, при одной и той же амплитуде поднятий (рис. 14, а, б).

Похожие зависимости были получены для блоков, имевших различную амплитуду, и компетентных слоев, расположенных на различном расстоянии от их вершин, нумерация которых идет по направлению снизу вверх (рис. 14, в, г). Из этих зависимостей хорошо видно, что над самым малоамплитудным блоком трещины пропадают уже в 6-м компетентном слое, а над более высокоамплитудными они прослеживаются до 12-го слоя, причем зависимости имеют экспоненциальный характер, то есть по мере удаления от вершин антиклинальных блоков величина трещинной пористости быстро уменьшается (рис. 14, в).

Установленное ранее с помощью оптического моделирования закономерное увеличение радиуса зоны трещиноватости по мере удаления от вершины антиклинального блока, а затем быстрое его уменьшение подтверждается и результатами двумерного седиментационного моделирования (рис. 12, б, в, д, е и 14, г).



**Рис. 14. Результаты обработки данных по двумерному тектоно-седиментационному моделированию:**  
 а – зависимость радиуса зоны максимальной трещиноватости от амплитуды поднятия в компетентных пластах (ППП), моделирующих отложения баженовской и абалакской свит; б – связь линейной плотности трещин и трещинной пористости в тех же компетентных пластах, входящих в состав моделей этих же свит; в – связь между величиной трещинной пористости и номером компетентного слоя в зависимости от амплитуды поднятия антиклинальных блоков (нумерация слоев осуществляется по направлению снизу вверх); г – связь между номером компетентного слоя и радиусом зоны трещиноватости в зависимости от амплитуды поднятия тех же антиклинальных блоков

*Трехмерное седиментационное моделирование.* В отличие от двумерного седиментационного моделирования, позволяющего имитировать лишь отдельные плоские вертикальные фрагменты той или иной площади по аналогии с сейсмодновременными разрезами, трехмерные седиментационные модели способны давать более полную информацию о плотности трещин, формирующихся вследствие роста одного или нескольких блоков в пределах выбранного для моделирования участка по ее высоте. Для этого используются данные о структуре поверхности выбранного антиклинального участка, обычно по отражающему горизонту А, по которому строятся объемные модели выбранных поднятий. В трехмерную седиментационную модель, также как и в двумерную, закладываются тонкие (толщиной 2–4 мм) компетентные слои с целью определения ориентации и плотности трещин, которые сформируются в них вследствие их деформации растущими трехмерными антиклинальными блоками. Размеры трехмерных моделей составляют 60 × 40 × 40 см.

В качестве примера трехмерной седиментационной модели рассмотрим модель, построенную на основе сейсморазведочных данных, представляющую собой фрагмент с двумя антиклинальными блоками, имеющими различные размеры и амплитуду (рис. 15, а). По этим антиклинальным структурам была изготовлена модель, повторяющая все их морфологические особенности. Затем проводилось моделирование роста этих поднятий, после чего, как и при двумерном седиментационном моделировании, осуществлялась ее послойная разборка (препарирование) и изучались закономерности распределения трещин, образовавшихся после роста поднятий в компетентных слоях (рис. 15, б–д).

Анализ полученных результатов подтвердил установленные ранее закономерности, заключающиеся в том, что по мере удаления компетентных слоев (аналоги ППП) от вершины поднятия сначала наблюдается увеличение их площади дробления (рис. 15, б, в), а затем ее уменьшение (рис. 15, г, д). Полученные данные позволили также установить зависимости, подобные рассмотренным выше при изучении двумерных седиментационных моделей, например, величины трещинной (двумерной) пористости от расстояния до вершины антиклинального блока, размеров зон дробления от величины амплитуды поднятий и их размеров и т. п.

Следует обратить внимание на тот факт, что если зона дробления (разуплотнения), сформировавшаяся над более крупным поднятием, вышла на поверхность трехмерной седиментационной модели, то зона, возникшая над менее амплитудным поднятием, осталась внутри модели и никак не проявила себя на ее поверхности (рис. 15, е).

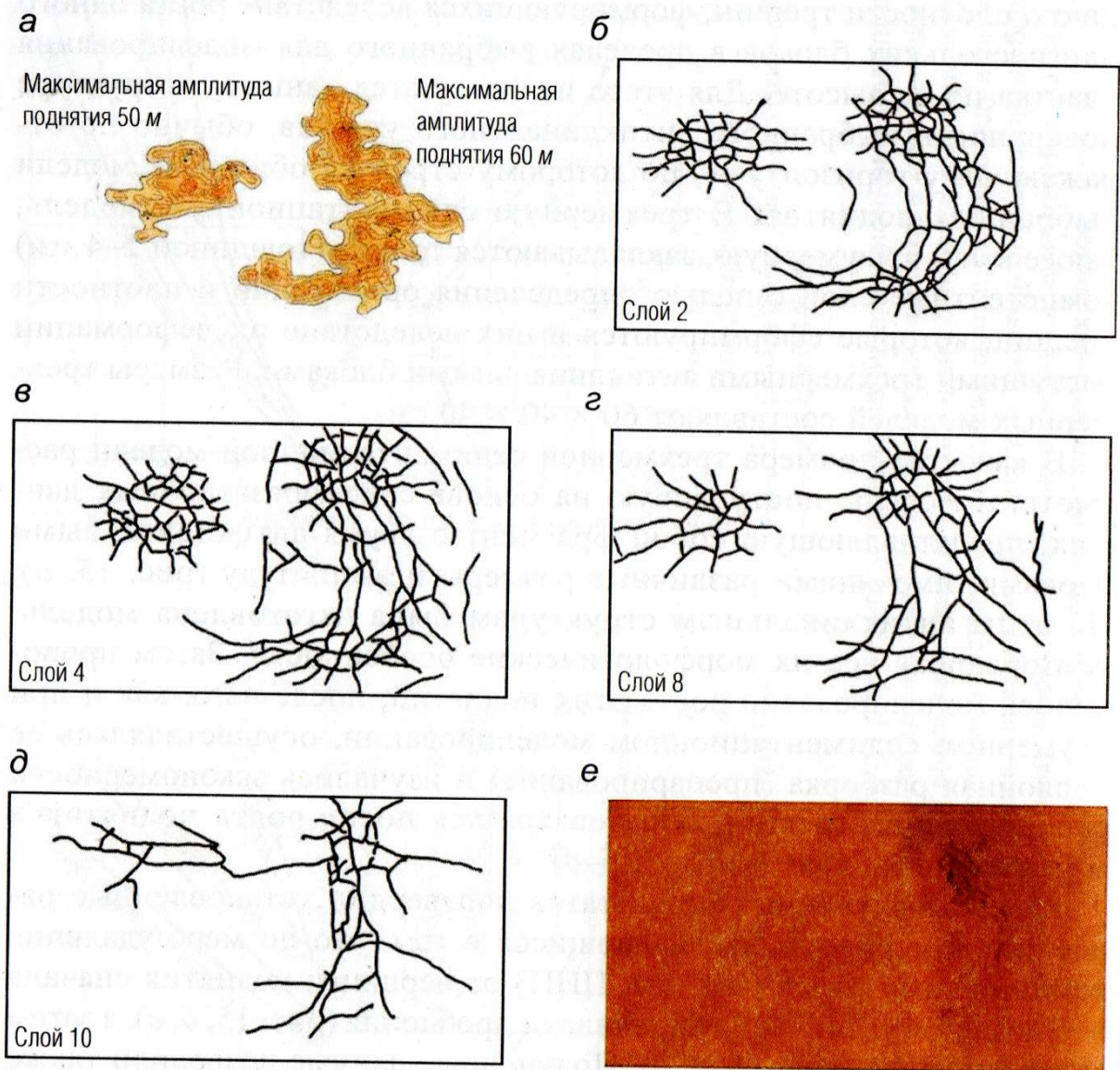


Рис. 15. Результаты трехмерного тектоно-седиментационного моделирования: а – антиклинальные структуры по отражающему горизонту А, выбранные для моделирования; б–д – распределение трещин в компетентных слоях, образовавшихся в них вследствие роста антиклинальных блоков; е – зона разуплотнения, сформировавшаяся над более крупным антиклинальным блоком, вышедшая на поверхность модели; нумерация компетентных слоев идет по направлению снизу вверх

Таким образом, полученные в результате тектонофизического моделирования данные ясно указывают на то, что если вторичные коллекторы, сформировавшиеся в бажено-абалакском комплексе, имеют тектоно-гидротермальное происхождение, то должна наблюдаться зависимость дебитов скважин, вскрывших эти свиты, от расстояния до оси зон разуплотнения (тектоногенной трещиноватости), сформировавшихся над антиклинальными блоками. Действительно, такая зависимость существует (рис. 16, а). Из полученной зависимости следует, что скважины, пробуренные на расстоянии около 600 м и более от оси главной зоны разуплотнения, будут иметь непромышленные дебиты нефти (рис. 16, а). Для того чтобы эти скважины стали давать рентабельные дебиты нефти, необходимо провести в них гидроразрыв, который позволит соединить их с зонами тектоногенной трещиноватости в ПП, расположенными в непосредственной близости от оси главной зоны разуплотнения, которые и содержат основные запасы нефти в рассматриваемых свитах.



Скважины:

- сухие; ● малодобитные; ○ среднедобитные;
- высокособитные; ⊗ нет данных испытания;
- , ⊙ проектные;
- оси зон максимальной защищенности;
- оси зон умеренной и слабой трещиноватости.

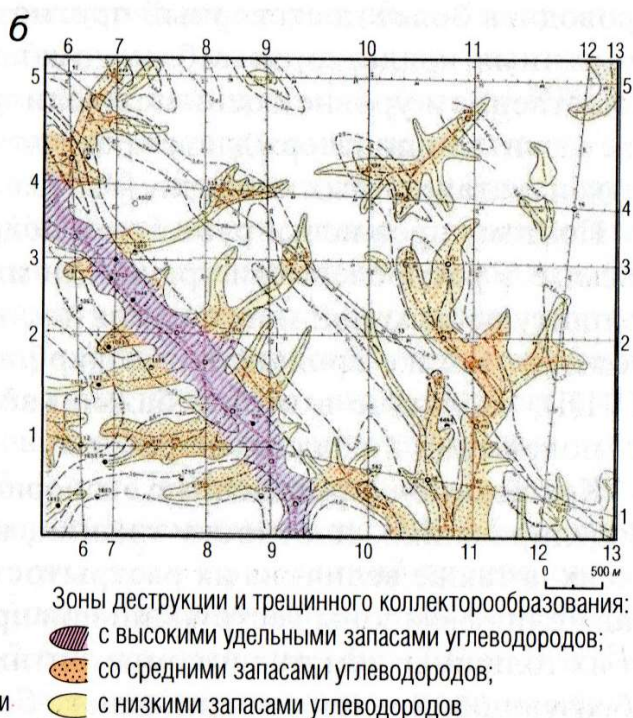


Рис. 16. Зависимость начальных дебитов нефти из скважин от их расстояния до главной оси зоны разуплотнения (а) и структурно-прогнозная схема размещения трещинных коллекторов в баженовской и абалакской свитах Ем-Еговской площади по данным сейсморазведки и тектонофизического моделирования (б)

Пример прогнозной карты с вынесенными на нее по результатам тектонофизического моделирования перспективными зонами трех категорий, осуществленного на основе данных 3D-сейсморазведки, приведен на рис. 16, б.

### **Обсуждение полученных результатов. Рекомендации**

Геологи и геофизики-нефтяники хорошо понимают роль трещиноватости в фильтрационно-емкостных свойствах продуктивных толщ, поэтому неоднократно предпринимались попытки выделения зон тектонического дробления по данным сейсморазведки [9, 18]. Однако для тонкослоистого разреза бажено-абалакского комплекса, в котором толщина отдельных ППП составляет от первых десятков сантиметров до 2,0–2,5 м, эти методы малоэффективны. Очевидно, что именно комплексирование данных сейсморазведки с результатами тектонофизического моделирования, выполненного на их основе, позволит проводить более достоверный прогноз территорий распространения вторичных коллекторов в бажено-абалакском комплексе и даже на качественном уровне оценивать величину вторичной трещинной пористости, что подтверждается результатами испытаний разведочных и эксплуатационных скважин [4, 5].

Поэтому проанализируем более подробно закономерности, наблюдаемые в распределении трещин, и их плотности в зависимости от амплитуды того или иного поднятия, толщины компетентных слоев, моделирующих продуктивные карбонатные и кремнистые пласты (ППП), входящие в состав бажено-абалакского комплекса, а также их положения в осадочном разрезе.

Как показали проведенные эксперименты по тектонофизическому моделированию, плотность трещин, возникающих в компетентных слоях, а также величина их раскрытости и площадь формирующейся над поднятием зоны деструкции при прочих равных условиях зависят от их толщины: чем толще компетентный слой, тем меньше плотность образующихся в нем трещин, однако больше величина их раскрытости и значительнее площадь их распространения. Напротив, чем тоньше компетентные пласты, тем выше в них плотность трещин, но меньше их раскрытость и площадь их распространения. Минимальные расстояния между трещинами отмечаются в самых тонких прослоях силицитов, имеющих толщину около 3–10 см. В них расстояние между трещинами изменяется от 2–3 до 10–15 мм (рис. 1, в).

Кроме того, проявляется еще одна закономерность, связанная с тем, что радиус зоны трещиноватости, возникающей над растущим поднятием, зависит от его линейных размеров: чем больше радиус поднятия (при одинаковой амплитуде), тем значительнее латеральные размеры зоны дробления, формирующейся над ним.

Следует также обратить внимание на тот факт, что если растущие антиклинальные блоки довольно близко расположены по отношению друг к другу, то зоны трещиноватости, образовавшиеся над ними в осадках, моделирующих отложения бажено-абалакского комплекса, сливаются в единую обширную зону дробления, поэтому в природных условиях в такой зоне могут присутствовать значительные запасы углеводородов.

С практической точки зрения большое значение имеет прогноз средних расстояний между трещинами, формирующимися в компетентных пластах или ППП, так как от этого будет зависеть степень вероятности попадания в трещину или трещины ствола скважины. В этой связи сделаем по этому поводу ряд некоторых общих замечаний.

Наибольшая плотность трещин или минимальные расстояния между трещинами должны существовать в самых тонких ППП, о чем уже говорилось ранее, поэтому максимальная вероятность попадания в процессе бурения скважины в трещинную зону существует в самых маломощных ППП. Если принять в качестве оценочных полученные экспериментальные данные, то можно предположить, что расстояние между трещинами в этих слоях будет примерно соответствовать их мощности в участках максимального дробления (вблизи оси зоны разуплотнения) или превышать их мощность в 4–6 раз в зонах умеренной трещиноватости (на заметном удалении от оси этой зоны). Поэтому если в 0,3–0,5 м ППП минимальное расстояние между трещинами может составить примерно те же 0,3–0,5 м в зоне максимального дробления, то в участках с умеренной трещиноватостью расстояние между ближайшими трещинами в пластах такой же мощности составит около 1,5–2,5 м, а в среднем – 0,5–1,0 м. В ППП, имеющих мощность 1,5–2,0 м, соответствующие расстояния между ближайшими трещинами будут изменяться от 1,5–2,0 до 7,5–10,0 м.

Важно отметить, что из результатов седиментационного моделирования следует, что все трещины, слагающие зону деструкции в одном и том же ППП, взаимосвязаны друг с другом, поэтому при попадании скважиной хотя бы в одну из трещин ею будет дренироваться вся эта зона.

Понятно, что вряд ли можно напрямую переносить полученные в экспериментах зависимости между толщиной компетентных слоев и расстоянием между трещинами, образующимися в них, на природные объекты. Поэтому были проанализированы данные о трещиноватости в песчаниках и алевролитах, вскрытых в природных разрезах различных районов Карпат [7]. Анализ приведенных в этой работе результатов исследований показал, что в песчаниках и алевролитах флишевых отложений Карпат расстояние между субвертикальными трещинами превышает их толщину в 1,4–1,5 раза. Толщина этих пластов изменялась от первых сантиметров до двух с лишним метров, что в первом приближении соответствует мощности ППП, входящих в состав бажено-абалакского комплекса.

Очевидно, что для более детального сопоставления результатов тектоно-седиментационного моделирования и данных полевых наблюдений необходимо учитывать амплитуды поднятий, над которыми происходит формирование зон трещиноватости, а также их морфологию. Тем не менее можно отметить, что в целом наблюдаются явные сходства в соотношениях мощности слоя и расстояниях между трещинами в нем. В наших экспериментах расстояние между трещинами вблизи вершины антиклинального блока в среднем оказалось больше мощности компетентных слоев в 1,5–2,0 раза, а в природных объектах – в 1,4–1,5 раза.

Исходя из приведенных выше оценок расстояний между ближайшими трещинами в компетентных пластах различной мощности, при бурении скважин на обсуждаемые верхнеюрские объекты, чтобы не пропустить зону тектонического дробления (зону разуплотнения), после бурения скважин вблизи оси зоны разуплотнения необходимо делать пусть даже неглубокий (малообъемный) гидроразрыв с протяженностью трещин порядка 15–20 м.

Следующей чрезвычайно важной с точки зрения поисков и разработки трещинных коллекторов задачей является достоверный прогноз ориентации возникающих тектоногенных трещин. На основе полученных экспериментальных данных можно заключить, что над небольшими изометричными поднятиями формируются округлые зоны дробления, напоминающие по форме структуру разбитой тарелки, в которой по краям образуются дугообразные трещины, а в центральной части радиальные и реже – субперпендикулярные. Над крупным продолговатым поднятием формируется субперпендикулярная сеть



трещин, причем преобладают трещины, ориентированные вдоль его оси и бортов, эти же трещины имеют максимальную раскрытость. Поэтому при бурении горизонтальных скважин необходимо учитывать морфологию поднятия, над которым прогнозируется существование тектоногенной зоны трещиноватости.

Наконец, не следует забывать о том, что по мере роста поднятия трещины изменяют свою ориентацию, например вторая (более поздняя) генерация трещин может оказаться расположенной субперпендикулярно по отношению к системе первой (более ранней) генерации трещин, на что обращал внимание М. В. Гзовский в своей работе, посвященной экспериментальной тектонике [1].

Несомненный интерес также представляет оценка латеральных размеров зоны трещиноватости, возникающей над образовавшимися поднятиями. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что можно очень грубо (на качественном уровне) определить ширину такой зоны, связав ее размеры с амплитудой этих поднятий. Максимальная ширина трещинной зоны разуплотнения, формирующейся над поднятиями, примерно в 5–6 раз больше их амплитуды. Поэтому если амплитуда антиклинального блока составляет порядка 100–150 м, то максимальная ширина зоны дробления над таким блоком может варьировать в пределах от 500–600 до 750–900 м.

Анализ зависимости расстояния продуктивных скважин, вскрывших бажено-абалакский комплекс, от оси зоны разуплотнения и их дебитом показал, что скважины, в которых получены притоки нефти из III, входящих в состав этого комплекса, расположены на расстоянии не более 500–800 м от оси зон разуплотнения (рис. 16, а). Расстояние наиболее высокодебитных скважин от оси разуплотнения не превышает 350–400 м (рис. 16, а). Таким образом, полученные на основе моделирования результаты в первом приближении соответствуют данным промысловых испытаний.

Изучение степени успешности прогнозов, выполненных для бажено-абалакского комплекса на основе комплексирования данных сейсморазведки и тектонофизического моделирования на примере 12 площадей и ЛУ, показало, что эта величина изменяется от 66 до 100%. Было установлено, что степень достоверности прогнозов напрямую зависит от качества исходной геолого-геофизической информации. Поэтому при проведении поисково-разведочного и эксплуатационного бурения скважин на площадях, освещенных

сейсморазведочными работами, следует осуществлять тектонофизическое моделирование в их границах с целью выделения наиболее перспективных участков с максимально высокими ФЕС пород-коллекторов в составе бажено-абалакского комплекса, чтобы грамотно организовать сначала разведку, а затем и разработку углеводородных залежей в пределах этих площадей.

В последнее время при разработке бажено-абалакского комплекса все шире используется метод многостадийного гидроразрыва в горизонтальных скважинах (рис. 17). Этот способ разработки позволяет объединять разрозненные линзы вторичных пород-коллекторов, образовавшихся в зонах тектоно-гидротермального воздействия на бажено-абалакский комплекс, представленных кремнистыми и карбонатными породами, что многократно увеличивает дебиты таких скважин. Кроме того, этим методом увеличивается раскрытость тектоногенных трещин, присутствующих в этих типах пород, что также способствует увеличению их проницаемости и, соответственно, росту дебита нефти из скважин.

На основе полученных результатов попробуем восстановить механизм формирования в бажено-абалакском комплексе коллекторов и УВ-залежей.

Из астеносферы поднимаются магматические тела, над которыми формируются зоны напряжений. При преодолении величин этих напряжений прочности перекрывающих пород образуются зоны дробления, по которым вследствие падения давления вверх устремляются высокоэнтальпийные флюиды, находившиеся до этого момента в растворенном состоянии в этих магматических телах. Поднимаясь вверх, эти тела формируют в перекрывающих их породах антиклинальные структуры различной формы и размера, напоминающие по форме, например, «подземные вулканы», или трапециевидные тела (рис. 12, а, з).

Высокоэнтальпийные флюиды, отделившиеся от магматических тел, мобилизуют поровую воду, сначала содержащуюся в породах фундамента, а затем и в осадочном чехле, что приводит к формированию высокоэнтальпийных гидротермальных флюидов, имеющих очень высокую (надкритическую) температуру. В результате тектонического дробления в бажено-абалакском комплексе начинается формирование вторичных коллекторов трещинного (в силицитах) и трещинно-кавернозного (в карбонатах) типов. В баженовской свите

одновременно под действием высокоэнтальпийных флюидов, проникающих в нее по возникшим зонам дробления, происходит термоллиз присутствующего в ее составе исходного ОВ, которое начинает интенсивно генерировать нефтиды. Сам флюид представляет в это время гомогенную смесь УВ, гетеросоединений и воды. По мере остывания этого флюида происходит его разделение на две фазы, в результате чего образуется нефтидно-водная эмульсия. Водная фаза вследствие охлаждения гидротермального флюида оказывается пересыщенной растворенными в ней минеральными компонентами, в результате чего из нее начинают кристаллизоваться гидротермальные минералы, которые из-за их быстрого роста захватывают капельки нефтяной эмульсии и в результате этого окрашиваются в желтые (кварц) и бурые (карбонаты) цвета (рис. 4).

Казалось бы, превращение исходного ОВ в нефтиды должно приводить к образованию вторичной пористости (рис. 6, а). Однако объем образующихся нефтидов превышает объем исходного ОВ, что приводит к флюидоразрыву пород с высоким содержанием ОВ и активной эмиграции газообразных и жидких УВ и части растворенных в них гетеросоединений в ближайшие коллекторы, и в первую очередь в образовавшиеся в бажено-абалакском комплексе. Наиболее высокомолекулярные УВ и гетеросоединения остаются на месте из-за их высокой вязкости, причем основная их часть по мере остывания переходит в твердое состояние. Появление битумов в «свободном виде» в форме маломощных линзочек и прослоев свидетельствует о том, что в момент превращения исходного ОВ в нефтиды породы баженовской свиты с высоким содержанием ОВ приобрели пластичное состояние и все поровое пространство, занимаемое до этого исходным ОВ, оказалось заполненным битумом, а его «излишки», выжатые давлением перекрывающих отложений, появились в виде упомянутых линз и прослоев (рис. 6, б). В этих участках, подверженных тектоно-гидротермальному воздействию, баженовская свита становится *битуминозной*. В зависимости от качества и мощности флюидоупоров, окружающих бажено-абалакский комплекс сверху и снизу, в них может сохраняться аномально высокое давление, превышающее гидростатическое для этих глубин в несколько раз.

С целью доказательства возможности превращения исходного ОВ в битум и УВ в результате воздействия на него гидротермальных флюидов были проведены эксперименты с юрскими отложениями в

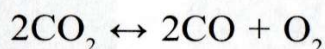
гидротермальных условиях при температуре от 235 до 400 °С и давлении 70 МПа [6]. Полученные результаты показали, что из исходного ОВ образуются пленки и капельки битума, причем на сколах с капелек хорошо видна микропористая структура битума, обусловленная выделением большого количества летучих компонентов, представленных преимущественно газообразными УВ (рис. 18).

Если образуется жидкий тиобитум, то он располагается на поверхности образца, а в том месте, где находилось исходное ОВ, образуются вторичные поры или полости (рис. 18, в). Вязкий, а затем отвердевший (вследствие снижения температуры) битум остается «вспученным» над поверхностью образца в местах концентрации исходного ОВ, а также образуются его многочисленные капельки (рис. 18, б, г). На поверхности капелек тиобитума иногда образуются микроагрегаты гидротермального железистого хлорита (рис. 18, а).

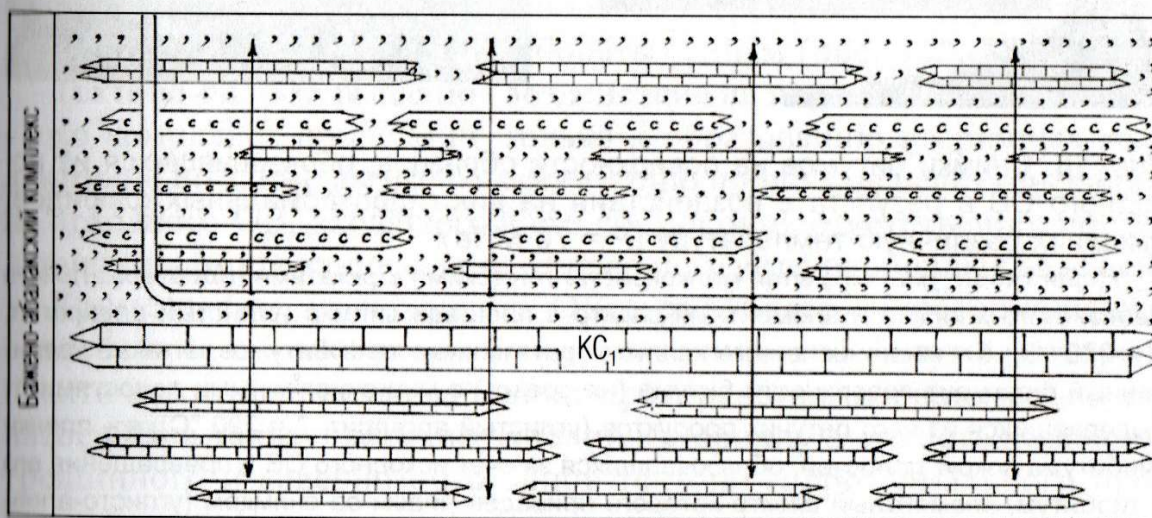
Вода, входившая в состав гидротермальных флюидов, по мере их охлаждения «вернулась» в поровое пространство пород, из которых она до этого была мобилизована, и заняла самые мелкие поры в породах бажено-абалакского комплекса, а также частично вошла в состав новообразованных гидротермальных минералов, представленных каолинитом (диккитом), гармотомом (цеолитная вода) и др. (рис. 1, 5). Действительно, нагрев обычных (не ППП) образцов, отобранных из бажено-абалакского комплекса (с использованием реторты), до 250 °С показал, что содержание в них воды в 2–5 раз превышает таковое УВ в баженовской свите и до 30 и более раз в абалакской свите. При этом, по данным пиролитических исследований, в составе образцов, отобранных из баженовской свиты (не ППП), отмечается высокое содержание тяжелых УВ и битума, а в поднятых из абалакской свиты, напротив, преобладают низкомолекулярные УВ, а концентрация битума невелика. То есть битумы, генерируемые исходным ОВ, из-за высокой вязкости преимущественно остаются в составе баженовской свиты и не перемещаются на большие расстояния. Этот тип пород, как отмечалось ранее, можно назвать генератором нафтидов. Только небольшая часть образовавшегося битума в виде гетеросоединений, входящих в состав образующейся нефти, эмигрирует во второй тип, то есть в породы-коллекторы или продуктивные породы (ПП).

Нахождение среди новообразованных гидротермальных минералов сульфатов (ангидрита, барита) в кавернах и трещинах ПП указывает на присутствие в гидротермах кислорода, который окислил серу, вхо-

дившую в состав тиобитума и/или пирита. Этот феномен объясняется полученными экспериментальными данными, свидетельствующими о том, что при высоких температурах (ориентировочно около 300 °С и выше) углекислота начинает активно проявлять свойства окислителя, поэтому можно написать следующее уравнение, отражающее динамическое равновесие:



При увеличении давления, в соответствии с принципом Ле Шателье, равновесие сдвигается влево, то есть устойчивой является углекислота. Напротив, при резком снижении давления (например, в результате образования трещин в фундаменте и осадочном чехле над поднимающимся из астеносферы магматическим телом) рассматриваемое равновесие смещается вправо, то есть в системе появляются кислород и окись углерода (см. формулу). Образовавшийся кислород реагирует с тиобитумом и пиритом, окисляя их с образованием серной кислоты, которая, в свою очередь взаимодействуя с карбонатами, образует сульфаты и углекислоту.



- 1  
  2  
  3  
  4  
  5  
  6

1 – карбонатные породы; 2 – силициты; 3 – битуминозные аргиллиты; 4 – аргиллиты;  
 5 – трещина гидроразрыва; 6 – ствол горизонтальной скважины

Рис. 17. Схема проведения многостадийного гидроразрыва в горизонтальной скважине, пробуренной в бажено-абалакском комплексе в зоне, подвергшейся тектоно-гидротермальному воздействию

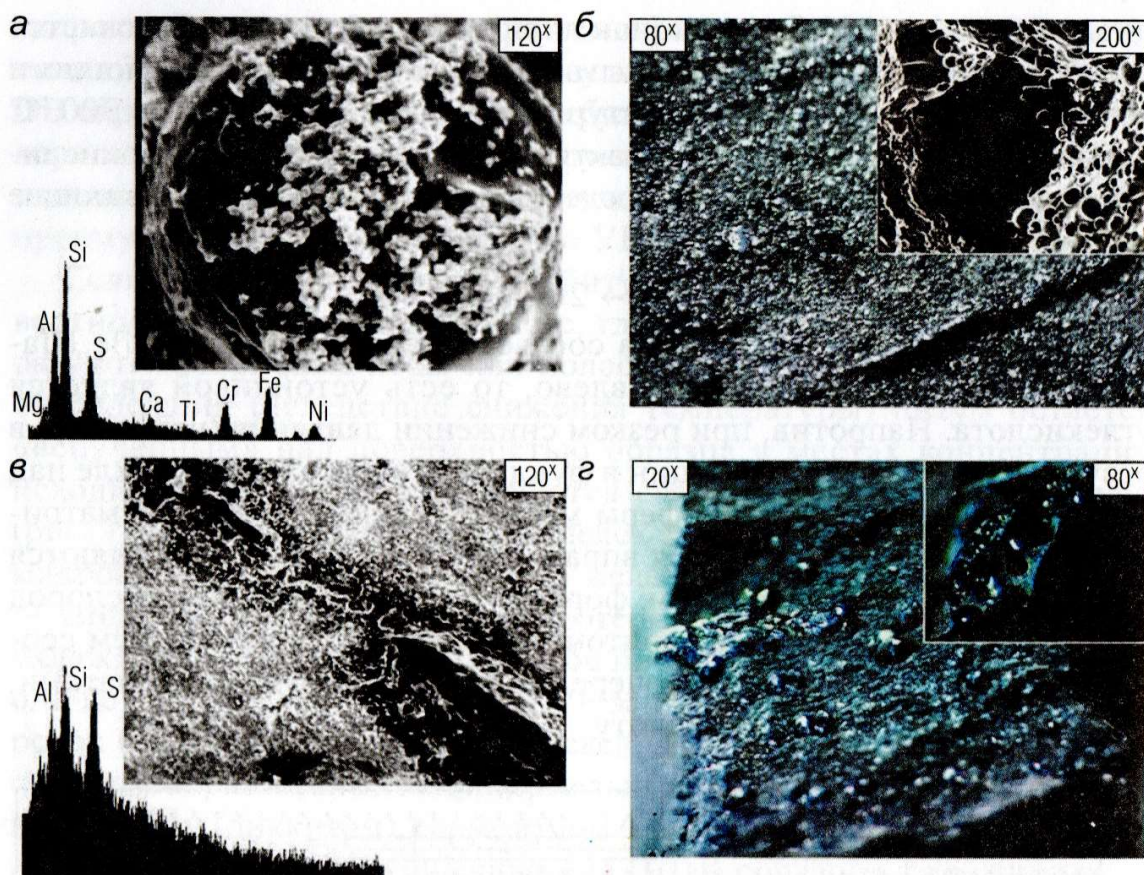


Рис. 18. Снимки битумов на поверхности образцов, образовавшихся из исходного ОБ в результате воздействия на них гидротермальных флюидов, имевших различную температуру ( $P = 70 \text{ МПа}$ ):

а – капля тиобитума, покрытая мелкокристаллическими агрегатами гидротермального железистого хлорита и элементный спектр с площади снимка (углистый алевролит,  $T = 275 \text{ }^\circ\text{C}$ ); б – многочисленные капли и протяженные тела битумов, а также увеличенный фрагмент поверхности битума (на врезке) с многочисленными полостями от выделившихся из него летучих продуктов (углистый аргиллит,  $T = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ ); в – пленки тиобитума вокруг полостей, образовавшихся за счет исходного ОБ и превращения его в тиобитум, элементный спектр которого приведен рядом со снимком (углисто-алевритистый аргиллит,  $T = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ ); г – многочисленные капли битума на поверхности образца с микрополостями от выделившихся из него газообразных УВ (см. врезку) на поверхности образца (углистый аргиллит,  $T = 390 \text{ }^\circ\text{C}$  (по [6] с дополнениями))

В результате неполного окисления углерода органического вещества образуется дополнительное количество СО. Водород, который является обычным компонентом ювенильных флюидов, реагирует с окисью углерода с образованием углеводородов (процесс Фишера–

Тропша), что приводит к увеличению суммарного количества нефтидов, формирующих залежи нефти в бажено-абалакском комплексе.

Кроме того, эксперименты показали, что в результате высокотемпературного гидротермального воздействия на исходное ОВ образуется большое количество ненасыщенных УВ (алкенов), которые также взаимодействуют с ювенильным водородом, образуя насыщенные УВ (алканы).

Таким образом, тектоно-гидротермальное воздействие на рассматриваемые отложения не только приводит к формированию вторичных коллекторов и генерации нефтидов из исходного ОВ, присутствующего в составе баженовской свиты, но и активному образованию дополнительных объемов «ювенильных» УВ.

### Заключение

Проведенные исследования позволили установить, что основная часть пород-коллекторов, входящих в состав бажено-абалакского комплекса, имеет вторичное тектоно-гидротермальное происхождение, а сами вторичные коллекторы относятся к трещинному (кремнистые) и трещинно-кавернозному (карбонаты) типам (рис. 1, 3, 4).

Тектоно-гидротермальное воздействие на породы бажено-абалакского комплекса привело не только к образованию вторичных коллекторов, но также вызвало активизацию процессов нефтегенерации из исходного ОВ, входящего в его состав, и, соответственно, последующее формирование в этих отложениях углеводородных залежей.

Кроме нефти, из исходного ОВ в результате гидротермального воздействия образовалось большое количество битума, который практически полностью заполнил пространство, первоначально занятое ОВ, а также частично заполнил вторичную емкость порового, трещинного и кавернозного типов тектоно-гидротермального происхождения. В результате протекания этого процесса отложения баженовской свиты стали битуминозными.

По данным ГИС, в составе бажено-абалакского комплекса достаточно надежно выделяются ППП, определяется их мощность и строятся карты их суммарных толщин в пределах интересующих территорий.

На основе комплексирования данных сейсморазведки и результатов тектонофизического моделирования, выполненного на основе этих данных, осуществляется прогноз площадного распространения

вторичных коллекторов тектоно-гидротермального происхождения в бажено-абалакском комплексе.

Полученные с помощью тектонофизического моделирования значения вторичной (тектоногенной) трещинной «пористости» носят сугубо ориентировочный характер. Тем не менее они объясняют, почему при прочих равных условиях дебиты нефти, получаемые из ПП, входящих в состав абалакской свиты, гораздо больше, чем из аналогичных по мощности ПП, содержащихся в баженовской свите. Действительно, и плотность трещин, и их раскрытость, и величина самой трещинной пористости по результатам тектонофизического моделирования в абалакских ПП заметно выше, чем в баженовских (рис. 14, а, б). Кроме того, образовавшийся битум в первую очередь заполняет вторичные коллекторы именно в баженовской свите, уменьшая их эффективную составляющую, и лишь затем наиболее подвижные его фракции попадают в коллекторы, присутствующие в составе абалакских отложений.

На основе комплексирования данных о суммарной мощности ППП, площади их распространения, а также прогнозирования зон дробления по данным сейсморазведки и тектонофизического моделирования, выполненного на их основе, оценивается вероятный объем продуктивных отложений в составе бажено-абалакского комплекса.

Поскольку подавляющее большинство продуктивных пластов кремнистого и карбонатного состава, расположенных в зонах тектоно-гидротермального воздействия на бажено-абалакский комплекс, имеют небольшую протяженность (вероятно, первые сотни метров, реже первые километры), то наиболее эффективным способом их разработки является метод многостадийного ГРП в горизонтальных скважинах (рис. 17).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
2. Гурари Ф. Г., Гурари И. Ф. Формирование залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1974. № 5. С. 36–40.
3. Зубков М. Ю., Потапов А. Г. Спектры ЯМР пород бажено-абалакского комплекса Западной Сибири // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2014. Вып. 8 (242). С. 3–32.
4. Зубков М. Ю. Коллекторы в бажено-абалакском комплексе Западной Сибири и способы их прогноза // Геология нефти и газа. 2014. № 5. С. 58–72.



5. Зубков М. Ю. Оценка региональных и локальных перспектив нефтеносности баженовской и абалакской свит Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2016. № 3. С. 51–67.
6. Зубков М. Ю. Битумы в составе верхнеюрских отложений Западной Сибири и их связь с гидротермальными процессами // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2019. № 1 (37). С. 9–24.
7. Копыстьянский Р. С. Трещиноватость горных пород и ее значение в нефтегазовой геологии. Киев: Наукова думка, 1978. 216 с.
8. Краснов С. Г., Дорофеева Т. В., Лебедев Б. А. Геологические условия нефтеносности и природа емкости коллекторов баженовской свиты Западной Сибири / В кн.: Условия нефтегазоносности и особенности формирования месторождений нефти и газа на Западно-Сибирской плите. Л.: Недра, 1980. С. 115–127.
9. Кузнецов О. Л., Чиркин И. А., Курьянов Ю. А., Шлёнкин С. И. и др. Новые технологии и решение прикладных задач. Т. 3. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. М.: ООО «ЦИТвП», 2007. 434 с.
10. Нестеров И. И. Новый тип коллектора нефти и газа // Геология нефти и газа. 1979. № 10. С. 26–29.
11. Новиков Г. Р., Салманов Ф. К., Тянь А. В. Перспективы открытия крупных залежей нефти в трещиноватых аргиллитах баженовской свиты // Нефть и газ Тюмени. 1979. Вып. 1. С. 1–3.
12. Осокина Н. Д. Пластичные и упругие низко модульные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 196 с.
13. Патент на изобретение № 2183332 «Способ прогнозирования зон развития вторичных коллекторов трещинного типа в осадочном чехле» / М. Ю. Зубков, П. М. Бондаренко. Приоритет от 08.11.2000.
14. Скоробогатов В. А., Краснов С. Г. Некоторые критерии перспектив нефтеносности баженовской свиты Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1984. № 3. С. 15–19.
15. Фрохт М. М. Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1948. Т. 1. 432 с.
16. Фрохт М. М. Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1950. Т. 2. 488 с.
17. Хаимова-Малькова Р. И. Методика исследований напряжений поляризационно-оптическим методом. М.: Наука, 1970. 116 с.
18. Nurhasan A., Davis T. L. Interpretation of Wrench Faulting and Fault-Related Pressure Compartmentalization, Wattenberg Field, Denver Basin Colorado // First Break. 2016. Vol. 34. № 2. P. 53–61.

*Рецензенты доктор геол.-минер. наук, проф. Ю. И. Кузнецов,  
канд. геол.-минер. наук, доцент В. Г. Мамяшев*