

5 (12) май 2005

ГОРНЫЕ ВЕДОМОСТИ

ТЮМЕНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЕОДИНАМИКА ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО
И ТУРАНСКОГО БАССЕЙНОВ В ЮРСКОЕ
ВРЕМЯ И ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ
ИХ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

ТЕКТОНО-СЕДИМЕНТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ
ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ
И СТРУКТУРНО-СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ
ЛОВУШЕК И ЗАЛЕЖЕЙ УВ В ЮРСКОМ
ФОРМАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ

ИНТЕГРИРОВАНИЕ СЕЙСМОИНВЕРСИОННЫХ
МЕТОДОВ СО СКВАЖИННЫМИ ДАННЫМИ
В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА

«Богатство нефт
есть залог величия державы»

М.В. Ломоносов

ПРОГНОЗ ЗОН ВТОРИЧНОЙ (ТЕКТОНОГЕННОЙ) ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Зубков М.Ю., Пормейстер Я.А.

ООО «ЗапСибГЦ», г. Тюмень

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с фундаментальным законом уплотнения осадков по мере их погружения на все большую и большую глубину происходит постепенное уменьшение их пористости и проницаемости. В зависимости от состава обломочной и цементирующей части, а также их соотношения в породе при достижении осадками глубины приблизительно 2800-3000 м наблюдается значительное уменьшение их первичной межгрануллярной пористости и особенно проницаемости. Породы-коллекторы по мере погружения и уплотнения переходят в класс не коллекторов. Поэтому на достаточно больших глубинах, на которых залегают юрские песчано-алевритовые отложения, входящие в состав осадочного чехла Западно-Сибирской плиты, они имеют низкие фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС).

Тем не менее, известны случаи, когда с больших глубин из песчаников васюганской и тюменской свиты были получены высокодебитные притоки углеводородов, достигающие 100-150 т/сут. Исследования коллекторских свойств этих песчаников показали, что они, как правило, обладают низкой эффективной емкостью (6-10%) и абсолютной проницаемостью (1-8 мД). Гидродинамические расчеты показывают, что из пород с такими ФЕС

(являющихся по существу матрицей) нельзя получить высокодебитные притоки, не привлекая для их объяснения наряду с первичной межгрануллярной вторичную трещинную проницаемостью. Следовательно, поиски углеводородных залежей с достаточно высокими значениями ФЕС в глубокозалегающих юрских отложениях сводятся к прогнозу распространения зон вторичной трещиноватости, имеющей тектоническое происхождение.

Для прогноза расположения таких зон предлагается оригинальная методика, основанная на комплексировании данных сейсморазведки и тектонофизического моделирования [3-7].

МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ЗОН ВТОРИЧНОЙ (ТЕКТОНОГЕННОЙ) ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Выделение прогнозных зон тектоногенной трещиноватости основано на физическом моделировании роста поднятий, присутствующих в пределах рассматриваемой площади или месторождения, морфологию которых, а также их амплитуду и последовательность роста устанавливают путем палеотектонических реконструкций, выполненных на основе результатов сейсморазведочных работ [3-7]. Для этого используются два метода: оптико-поляризационный и тектоно-седиментаци-

онный, основы которых были заложены Гзовским М.В. с соавторами [1] и затем развиты в работах [3-7].

Достаточно детально эти способы моделирования вторичной трещиноватости рассмотрены в работах [3-5, 7], поэтому здесь приводится лишь краткое описание этих методов.

Оптико-поляризационный метод моделирования (далее для краткости просто **оптический**) основан на явлении оптической анизотропии в прозрачных аморфных телах, подвергнутых деформации, связанном с изменением двойного лучепреломления в зависимости от величины напряжений. Этот метод обеспечивает достаточное соблюдение условий подобия для упругой области деформаций. Поэтому сопоставление модели с реальным геологическим объектом правомерно лишь в тех пределах, где отдельные геологические структуры в различных стадиях их развития можно считать упругими однородными телами с ненарушенной сплошностью.

В таких случаях распределение напряжений в упругих телах различного масштаба, как известно (Фрохт М.М., 1948, 1950), не зависит от физических свойств сравниваемых объектов, а достаточно строго определяется аналогией внешнего напряжения и геологическим подобием изучаемых структурных форм.

В качестве эквивалентного материала при оптико-поляризационном моделировании использовались водно-глицериновые растворы желатина с различной плотностью, задаваемой концентрацией желатина от 10 до 20%, что соответствует модулю их упругости E от 0.3 до 0.9 кг/см² соответственно. Для каждого слоя, входящего в состав моделей, проводилось изучение характера распределения уровней касательных напряжений (τ_{max}) по их относительной величине, равной спектральному порядку изохроматических полос, обозначающих зоны равных полуразностей нормальных напряжений (σ), в соответствии с законами фотоупругости: $\tau_{max} = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3)$, где σ_1 и σ_3 , нормальные напряжения, соответственно, сжатия и растяжения.

Нулевые и минимальные значения параметров изохроматических полос отвечают напряженному состоянию материала при близких или равных величинах нормальных напряжений, что характеризует участки двухстороннего (в плоских моделях) и, по-видимому, всестороннего сжатия (растяжения) в объемах горных пород (в трехмерных моделях).

Для прогноза трещиноватости отрыва (разрыва) или сдвига (скола) в моделях выбираются участки повышенных касательных напряжений. Направления траекторий нормальных и касательных напряжений определяются по картине изоклинов, представляющих линии равных наклонов

осей главных нормальных напряжений к плоскости поляризованного света.

Тектоно-седиментационный метод моделирования (далее для краткости просто **седиментационный**), в отличие от рассмотренного выше оптико-поляризационного, не позволяет изучать закономерности распределения напряжений в осадочных толщах и прогнозировать направления отрывных и сдвиговых дислокаций. Однако он дает возможность исследовать механизм формирования различных типов дислокаций, а также закономерности перемещения осадков под действием воздымающихся блоков, моделирующих движения фундамента. Кроме того, если оптико-поляризационный метод позволяет исследовать упругие деформации, то седиментационный — пластические и разрывные. Поэтому использование обоих методов в комплексе позволяет охватить экспериментами все основные типы деформаций.

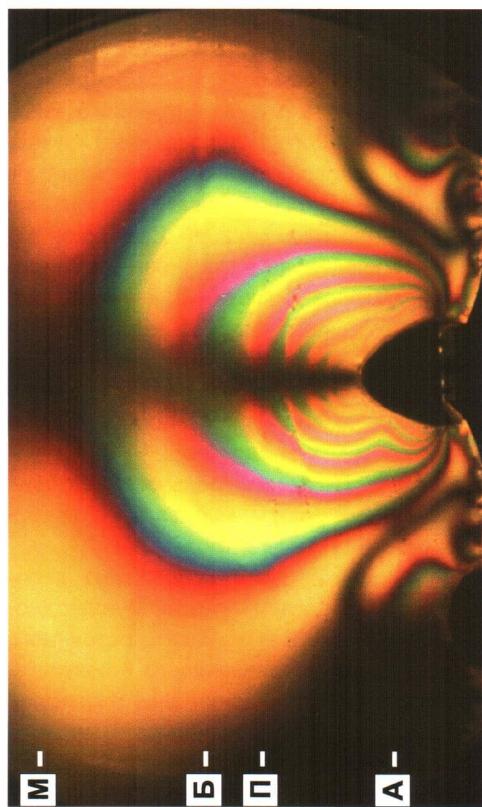
Седиментационный метод основан на лабораторном воспроизведении процесса подводного осадконакопления в условиях постоянного внешнего нагружения, возникающего в результате последовательного отложения слоистых толщ. Результаты такого моделирования применимы к анализу механизма образования геологических структур, выявляемых в разновозрастных разрезах, сложенных слоями, в различной степени консолидированными и различавшимися в момент деформации физико-механическими свойствами.

Эксперименты проводились в наполненном водой боксе размером 50x10x40 см. Материалом для образования слоев служили глины, песок, а также их смеси между собой с примесью алевритовых частиц. За счет их осаждения в камере постепенно накапливалась тонкослоистая серия осадков. Компетентные слои, имитирующие карбонатные отложения или карбонатизированные песчаники, моделировались, соответственно, цементом или смесью цемента с песком.

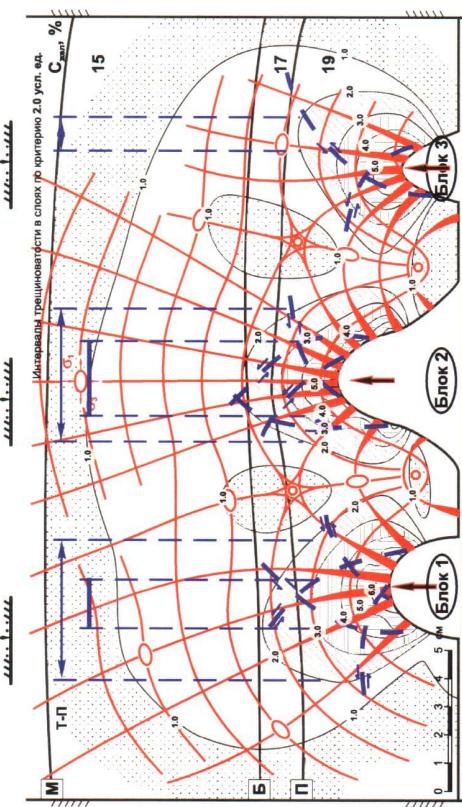
В основание камеры монтировались подвижные блоки, расположение и морфология которых подобны структурному профилю выбранного для моделирования сейсмовременного разреза, обычно по сейсмоотражающему горизонту А (кровля фундамента).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

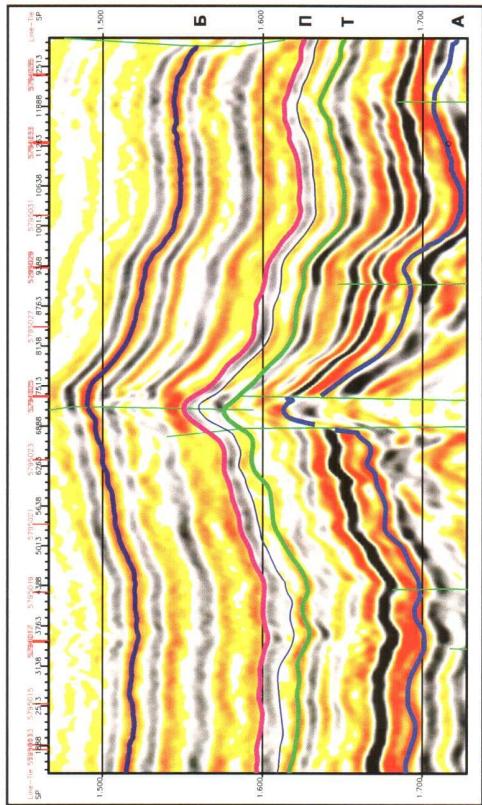
Рассмотрим в качестве примера распределение напряжений в трехслойной **оптической** модели, построенной по сейсмовременному разрезу 5795070 Славинского месторождения (Рис. 1 а) [5]. Рост центрального, самого крупного антиклинального поднятия вызывает формирование в модели симметричной картины касательных напряжений, проявляющихся в виде серии изохроматических полос, напоминающих по внешнему контуру цве-



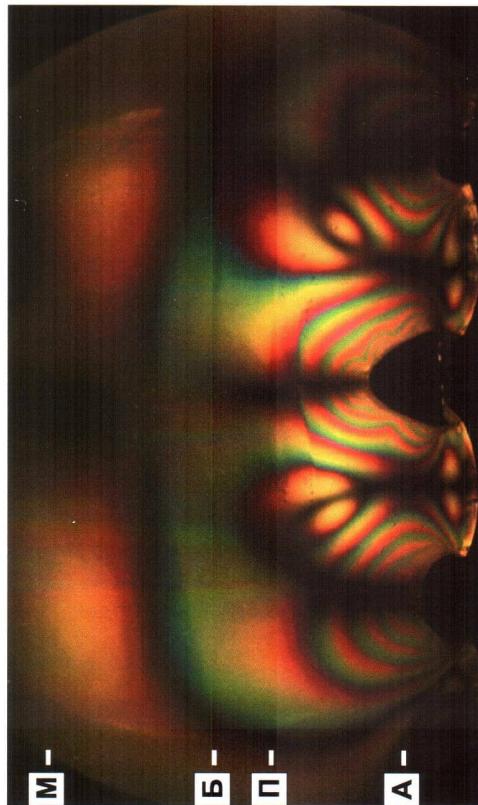
б



г



а



в

Рис. 1. Фрагмент сейсмовременного разреза 5795070 Славинского месторождения (а), фотоизохроматические картыны распределения касательных напряжений в трехслойной разнотолщинной модели по тому же сейсмопрофилю при деформации поочередным поднятием антиклинальных блоков, отвечающих рельефу фундамента (б, г) и графическая интерпретация фотоизохроматической модели с нанесенными траекториями нормальных напряжений (в), по [5]

ток распустившегося тюльпана (Рис. 1 б). Самая высокая концентрация касательных напряжений наблюдается непосредственно над куполом поднятия, достигающая 7-8 единиц (числа изохроматических полос).

Рост более мелких боковых поднятий привел к заметному изменению картины распределения и величины касательных напряжений в модели – распустившийся над центральным поднятием «цветок тюльпана» сложился, превратившись в нераспустившийся «бутон» (Рис. 1 в). Уровень касательных напряжений, существовавший над центральным поднятием до роста соседних с ним антиклинальных блоков, уменьшился до 5 единиц. Напротив, несмотря на небольшие размеры и немного меньшую, чем у центрального поднятия, амплитуду боковых блоков, уровень касательных напряжений, возникших над ними, превысил таковой, сформировавшийся на этой стадии моделирования над центральным поднятием, и составил 6 единиц (см. Рис. 1 в).

Необходимо отметить, что если над центральным поднятием нормальные напряжения распределяются симметрично, то над боковыми поднятиями траектории равных касательных напряжений асимметричны – они смешены в сторону боковых стенок модели (см. Рис. 1 в). К отмеченным особенностям в распределении напряжений мы вернемся чуть позже, при рассмотрении **седиментационной** модели по этому же сейсмопрофилю.

В промежутках между поднятиями справа и слева от центральной антиклинали сформировались по две (довольно симметрично расположенные) зоны всестороннего сжатия с изотропными точками в их центральной части (Рис. 1 в, г). Над и под этими точками эллипсоид деформации меняет свое положение на 90°, и поэтому если под изотропной точкой траектория нормального напряжения сжатия (σ_1) была ориентирована субгоризонтально, то над этой точкой она расположится субвертикально (см. Рис. 1 г). Поскольку направление трещин отрыва совпадает по ориентации с положением нормальных напряжений, то и их расположение над и под изотропной точкой поменяется на 90° (прогнозируемые трещины отрыва на рисунке 1 г выделены расширенными участками нормальных напряжений красного цвета).

Зоны всестороннего сжатия представляют собой участки, где касательные напряжения равны нулю, а нормальные равны во всех направлениях. Следовательно, в этих участках невозможно формирование вторичной (трещинной) емкости. Более того, существовавшая в них первичная межгранулярная пористость значительно уменьшается вследствие уплотнения этих участков под действием не только литологической нагрузки, но и интенсивного всестороннего тектонического сжатия

пород. Что происходит с осадочными породами в таких участках, мы рассмотрим чуть позже на примере образцов, отобранных из такой зоны.

Ранее, при рассмотрении оптической модели, построенной по сейсмопрофилю Славинского месторождения, мы отметили, что рост соседних поднятий вызывает уменьшение величины касательных напряжений, существовавших над ранее образовавшимся поднятием (см. Рис. 1 в). Иными словами, можно ожидать, что образовавшаяся над этим поднятием трещинная зона или зона дробления должна, под действием выросших следом соседних поднятий, уменьшиться или раскрыть образовавшихся ранее трещин уменьшится.

С целью проверки этого предположения в **седиментационной** модели проведена серия попаренных взды маний соседних поднятий (Рис. 2) [3, 4].

Рост первого поднятия, ось которого ориентирована параллельно коротким (правому и левому) бортам модели, вызвал формирование на ее поверхности (вид сверху) довольно равномерной изотропной сети трещин (Рис. 2 а). Последовавшее затем вздымание соседнего (второго) поднятия (расположенного справа) привело к сжатию (уменьшению величины раскрытия) трещин, возникших ранее над первым поднятием (Рис. 2 б).

Чрезвычайно важным отличием системы трещин, возникших над вторым поднятием, является то, что они имеют совершенно определенное направление – все образовавшиеся трещины ориентированы параллельно оси поднятия и вытянуты вдоль него (Рис. 2 б). Выявленное отличие сформированной системы трещин от возникшей ранее над первым объясняется тем, что первое поднятие росло в изотропной осадочной среде, а второе – в деформированном первым поднятием осадке. Причем осадок оказался сжатым крыльями росшего первым поднятия параллельно его оси, и, по этой причине, в нем сформировалось анизотропное поле напряжений. Из-за этого образовавшаяся над вторым поднятием сеть трещин приобрела строго направленную ориентировку – вдоль оси первого и второго поднятий, которые расположены, как уже говорилось выше, параллельно коротким сторонам модели (см. Рис. 2 б). Возникшие две системы трещин соединились двумя поперечными трещинами (см. Рис. 2 б).

Следующее отличие второй системы трещин от первой заключается в том, что если первая расположена симметрично над куполом поднятия, то вторая оказалась немного смещенной вправо по отношению к куполу второго поднятия. Такое расположение второй системы трещин вполне закономерно вытекает из результатов **оптического** моделирования. Действительно, если над первым (центральным) поднятием изохромы, соответству-

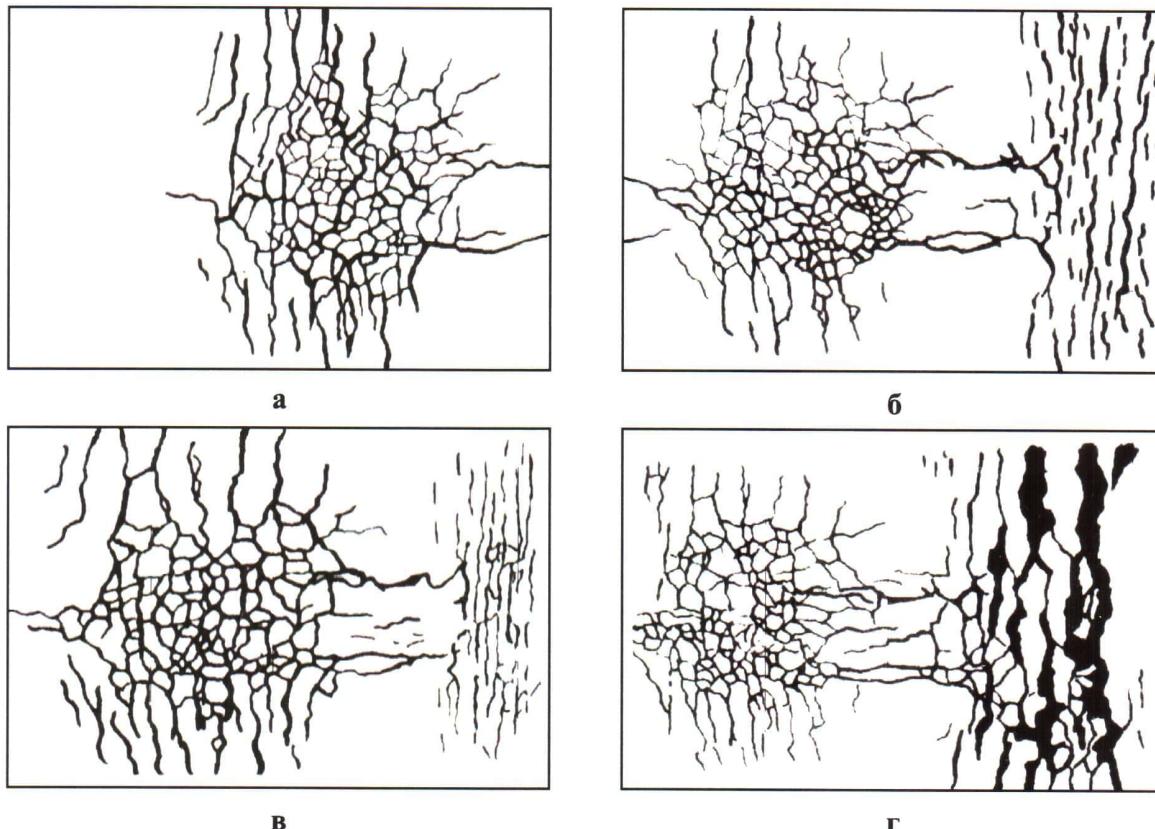


Рис.2. Вид сверху на тектоно-седиментационную модель, в которой осуществлялся попаременный рост левого (а, в) и правого (б, г) поднятий, по [3]

ющие распределению равных значений касательных напряжений, расположены симметрично, то над соседними, более молодыми (правым и левым) поднятиями они оказались асимметричными — смещеными к боковым стенкам модели. Соответственно и зоны трещиноватости также смещены вправо от правого и влево от левого поднятий (см. Рис.1 в, г).

Возобновившийся рост первого поднятия после завершения воздымания второго привел к некоторому увеличению радиуса зоны трещиноватости, сформировавшейся над ним вследствие первоначального его роста, и увеличению ширины (раскрытию) возникших ранее и сформировавшихся на этом этапе роста поднятия трещин. Напротив, трещины, образовавшиеся до этого над вторым поднятием, сжались, их ширина или раскрытие заметно уменьшилась (см. Рис.2 в). Уменьшение размеров первоначально возникшей зоны трещиноватости и раскрытию трещин вследствие роста соседних (более молодых) поднятий также вытекает из анализа **оптической** модели. Действительно, выше нами уже отмечалось, что рост соседних поднятий вызывает уменьшение уровня касательных напряжений (числа изохром) над центральным (более старым) поднятием, что отражается в уменьшении радиуса зоны трещиноватости и сжатии

(уменьшении ширины) трещин, первоначально сформировавшейся над ним (см. Рис.1 б, в и Рис.2 б, в).

Последующий рост второго поднятия вновь вызывает интенсивное сжатие трещин, сформировавшихся ранее над первым поднятием, и, наоборот, увеличение степени раскрытия сжатых до этого момента старых и формирование над ним новых трещин (см. Рис.2 г). Увеличилось также число попечных трещин, соединяющих обе зоны трещиноватости (см. Рис.2 г).

Скважина 12366, пробуренная в пределах Восточно-Пальяновской площади в интервале залегания осадков тюменской свиты, попала в зону всестороннего сжатия. Песчаники, поднятые из интервала распространения этой зоны, имеют практически чисто кварцевый состав и очень низкое содержание глинистого цемента (не более 3-5%), который представлен агрегатами хорошо ограненных кристаллов эпигенетических каолинита и диккита (Рис.3). Интересно, что песчаники под действием всестороннего сжатия приобрели псевдокварцитовую структуру, обусловленную очень плотной укладкой кварцевых зерен, их перекристаллизацией, а также регенерацией отдельных зерен кварца (см. Рис.3). Открытая пористость этих песчаников (на снимке открытые поры заполнены смолой красного цвета) не превышает

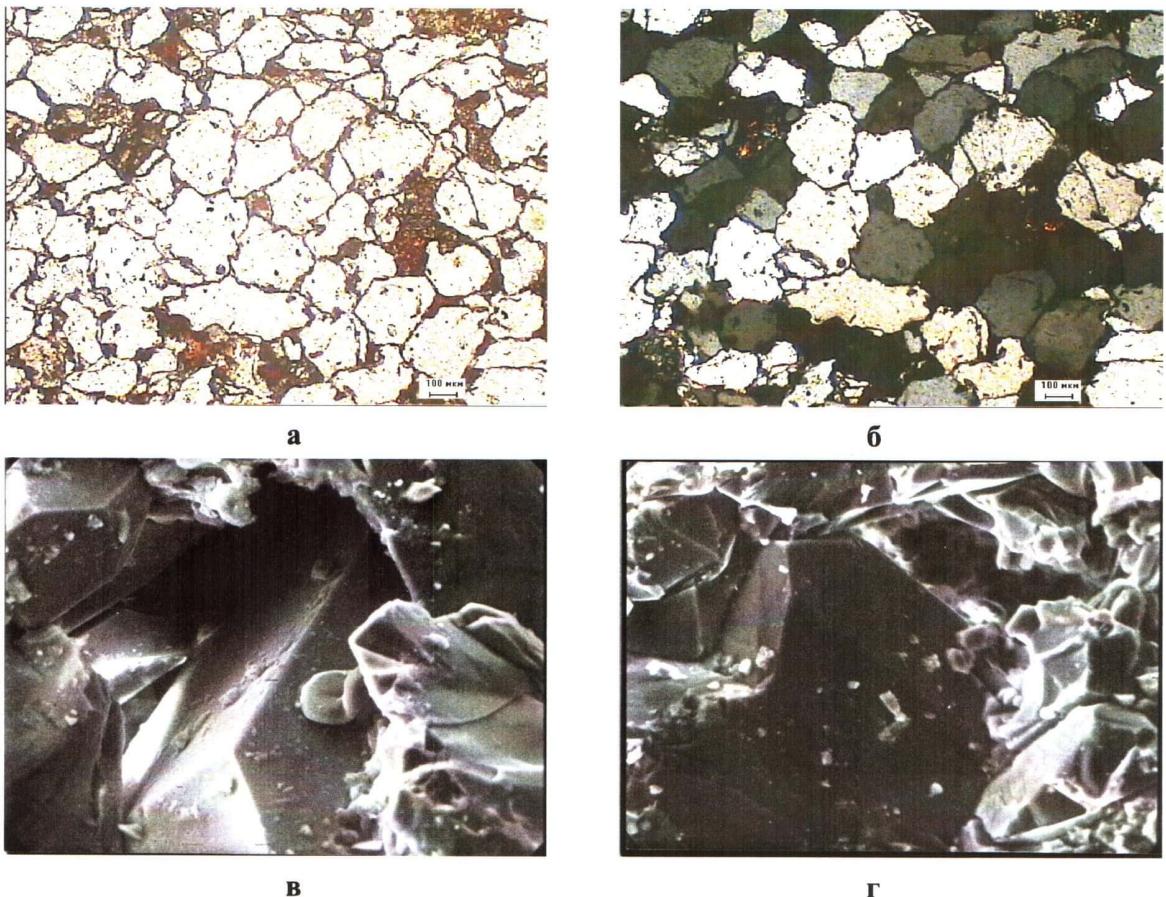


Рис.3. Фотографии прокрашенных смолой петрографических шлифов в проходящем (а) и поляризованном (б) свете и снимки РЭМ (в, г) кварцитовидных песчаников из зоны всестороннего сжатия; Восточно-Пальяновская площадь, скв. 12366, глубина 2430 м (тюменская свита)

5-6%, а проницаемость составляет менее 1 мД, и это при том, что глубина их залегания равна всего 2430 м!

Таким образом, даже самые лучшие песчаники, имевшие первоначально высокие ФЕС, в зоне всестороннего сжатия превращаются в плотные «метапесчаники», с очень низкой пористостью и практически полным отсутствием проницаемости.

С целью имитации условий тектонического стресса, возникающего над растущим поднятием, образцы, отобранные из васюганской свиты, Тагринского месторождения, были подвергнуты осевому сжатию в условиях эффективного бокового давления до момента достижения предела их прочности. После окончания эксперимента из образцов были изготовлены прокрашенные смолой прозрачные петрографические шлифы, одни из которых были ориентированы перпендикулярно по отношению к оси сжимающего усилия, а другие – параллельно. Исследование этих шлифов показало, что в тех из них, что были ориентированы перпендикулярно по отношению к оси сжатия, никаких видимых изменений не отмечалось. В шлифах,

ориентированных параллельно оси сжатия, напротив, отмечаются тонкие протяженные трещинки, имеющие толщину (раскрытие) около 25-50 мкм (Рис.4). Минимальное расстояние между ближайшими трещинами составляет 150-200 мкм.

Вероятно, присутствием этих трещин (возникновение которых над поднятиями вследствие их роста было доказано выше на основе интерпретации **оптической** модели) и объясняется высокая проницаемость юрских песчаников, отмечаемая в ряде районов. Поскольку в природных условиях трещины, присутствующие в зонах тектонического дробления, скорее всего, имеют гораздо большие размеры (раскрытие и протяженность), чем трещины, образовавшиеся в наших экспериментах, то керн, получаемый из скважин, попавших в зоны дробления, представлен отдельными кусками, распавшимися по этим трещинам, а сами трещины, присутствовавшие между ними, «исчезают» после извлечения керна из скважины. Коллекторские свойства этих кусков керна ничем не выделяются среди других, поскольку высокая продуктивность интервалов, из которых они отбираются, обусловлена именно наличием трещин, присутствующих в

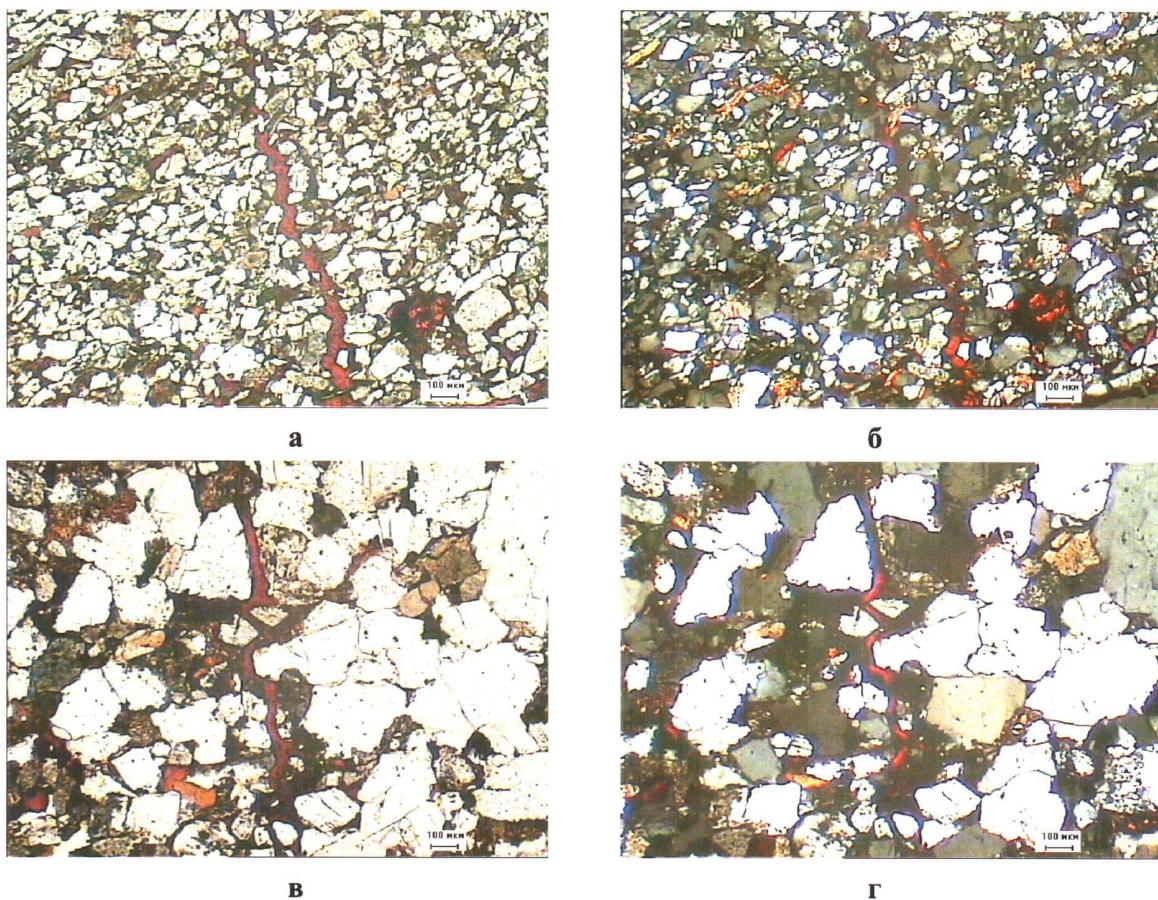


Рис. 4. Фотографии прокрашенных смолой петрографических шлифов, снятых в проходящем (а, в) и поляризованном (б, г) свете, изготовленных из образцов, подвергнутых осевому сжатию, имитирующему тектонические напряжения; Тагринское месторождение, скв. 2330, глубина 2620 м, ачимовская пачка (а, б) и 2824 м, Васюганская свита (в, г)

большом количестве в зонах тектонического дробления.

Тщательный анализ многослойных оптических моделей показал, что на границе слоев, имеющих различную плотность (а значит, и прочность), происходит скачок величины касательных напряжений – при переходе из более плотного в менее плотный слой уровень касательных напряжений растет, а в обратном направлении, соответственно, падает (см. Рис. 1 б, в). Поэтому в менее плотном слое, находящемся между двумя более плотными слоями, максимальные значения напряжений будут наблюдаться на его границах с плотными слоями, а в плотном слое, граничащем и сверху, и снизу с менее плотными слоями, напротив, максимальная концентрация напряжений отмечается в его центральной части. Это означает, что на границе песчаников, особенно известковистых и глин, подвергнутых тектоническому сжатию, трещинные дислокации в глинах начнут в первую очередь формироваться на границе с песчаниками и затем распространяться в глубь глинистого слоя, а в из-

вестковистом песчанике, наоборот, трещины в поле напряжений начнут зарождаться в центральной части слоя, постепенно приближаясь к границам с глинами [4].

Подтверждением сказанному может служить образец керна, отобранный из зоны субвертикального сжатия, представленный прослоем известковистого алевролита в глинистом осадке (Рис. 5). В нем наблюдается несколько субвертикальных трещин, имеющих максимальную ширину в центральной части образца, что свидетельствует о том, что их рост начался именно в этой части слоя. Слой по мере уплотнения уменьшался в толщине, поэтому самые первые (ранние) трещины изгибались и приняли с-образную форму (см. Рис. 5). Если их выпрямить, то можно восстановить первоначальную мощность этого прослойка. Она приблизительно на четверть была больше теперешней толщины прослоя. Расположенные рядом трещины по мере их дальнейшего роста соединялись (см. Рис. 5). Трещины росли в несколько этапов. В средней части самых широких (самых старых) трещин отме-

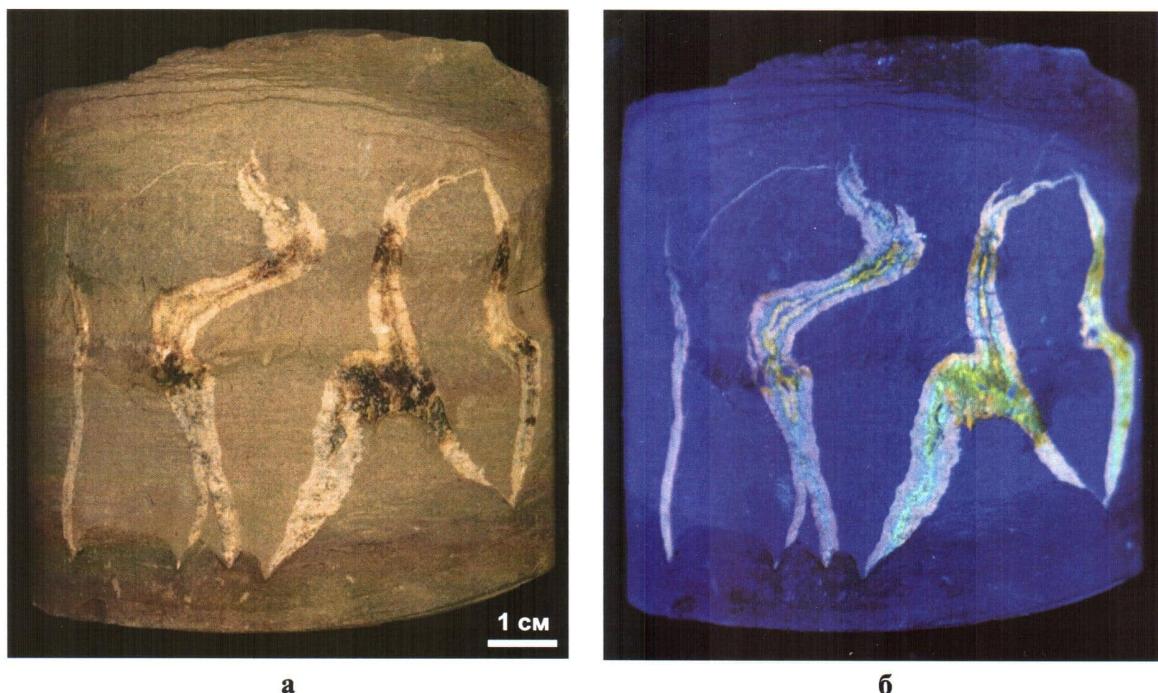


Рис. 5. Фотографии трещиноватого образца керна, снятые в обычном (а) и ультрафиолетовом (б) свете, Зимняя площадь, скв. 143П, Васюганская свита

чаются зоны, сложенные бурым кальцитом, в котором в виде мелких включений присутствует нефть, об этом же свидетельствует интенсивная флюоресценция этих трещин в ультрафиолетовом свете (см. Рис.5). Внешняя (зальбандовая) часть этих трещин сложена молочно-белым кальцитом без признаков нефти. Следовательно, нефть попала в трещины не в начальном, а промежуточном и, вероятно, заключительном этапах формирования трещин. Скорее всего, она в момент или моменты активизации тектонических движений в эти трещины попадала в виде струй, так как формирование трещин сопровождалось значительным разряжением (резким падением давления в них).

Сedimentационное моделирование, проведенное по тому же сейсмопрофилю Славинского месторождения, подтвердило в общих чертах предположения, сделанные на основе рассмотренных ранее результатов **оптического** моделирования. Рост первого, самого крупного (центрального поднятия) привел к формированию над ним в компетентных слоях (имеющих белый цвет) субвертикальных трещин, а на поверхности модели сформировалась редкая сеть трещин, расположенных субперпендикулярно по отношению друг к другу (Рис.6 б).

Воздымание второго (левого) поднятия также вызвало формирование в компетентных слоях системы субвертикальных трещин, причем, как и предсказывалось на основе данных по оптическому моделированию, максимальная их плотность

отмечается не над его куполом, а немного левее (см. Рис.6 в). На поверхности модели возникла одна трещина, ориентированная параллельно оси поднятия, и две очень тонкие трещины, имеющие перпендикулярную по отношению к ней ориентировку (см. Рис.6 в). Где-то между антиклинальными блоками в толще, имитирующей осадки тюменской свиты, должны возникнуть две зоны всестороннего (в рассматриваемом случае двумерного) сжатия, в которых осадки максимально уплотнены и в них отсутствуют трещины тектонического происхождения. Одна из них должна быть расположена в самом основании осадков, имитирующих отложения тюменской свиты, а вторая — в их верхней части.

Рост третьего, самого маленького поднятия, расположенного справа, вызвал формирование над ним редкой сети субвертикальных трещин, а на поверхности модели образовались две взаимно перпендикулярные трещины (Рис.6 г).

Необходимо обратить внимание на тот факт, что вследствие роста поднятий между ними произошло нагнетание осадочного материала, из-за чего мощность осадков в межблочном пространстве заметно увеличилась (см. Рис.6 в, г).

После завершения эксперимента модели послойно разбирались с целью изучения характера распределения и оценки плотности трещин в компетентных слоях (Рис.7 а). На основе полученных данных строились связи радиуса дробления и трещинной «пористости» в зависимости от номера

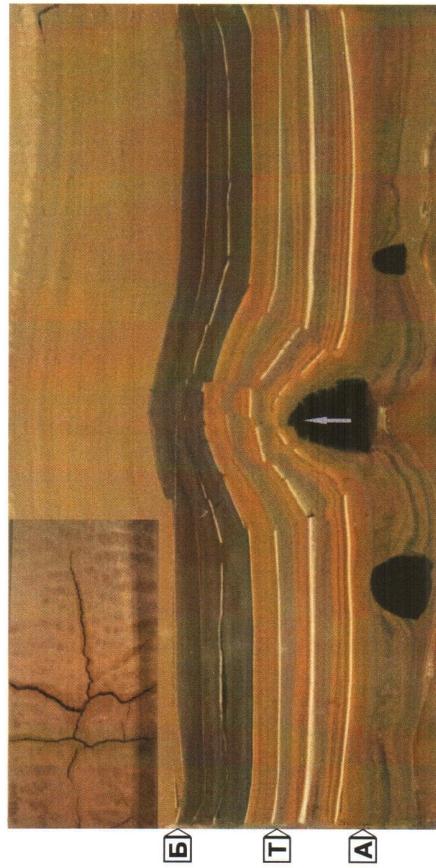
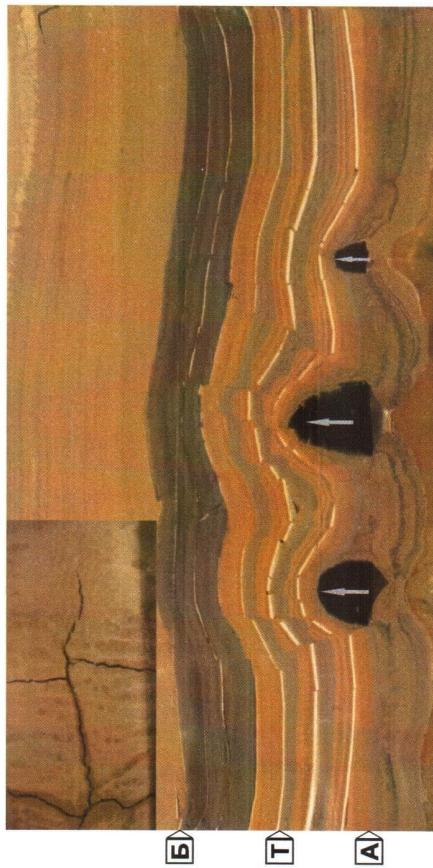
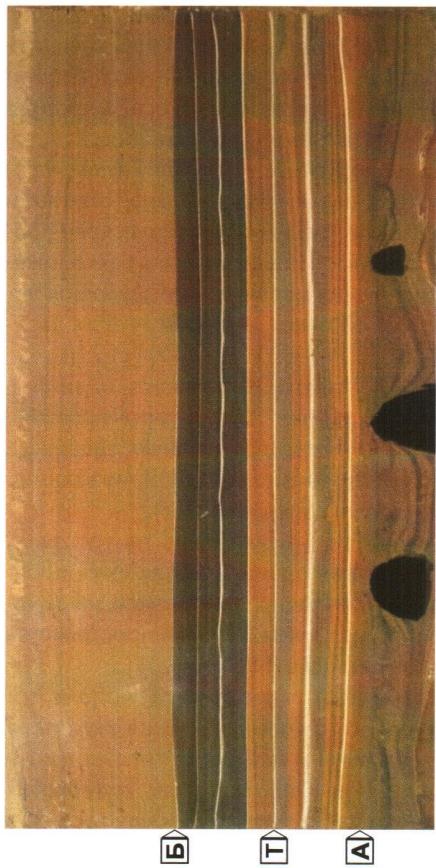
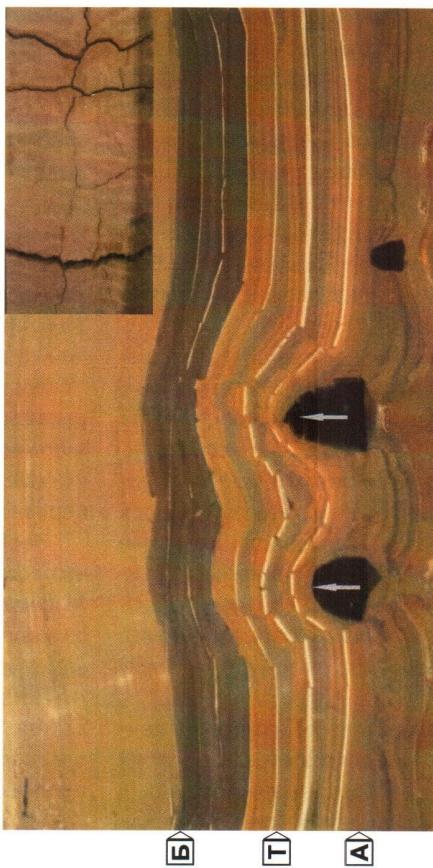
**б****Г****а****в**

Рис. 6. Тектоно-седиментационная модель формирования антиклинальных структур, построенная по сейсмопрофилю 5795070 Славянского месторождения до начала роста поднятий (а), после роста 2-го (центрального) поднятий (б), после роста 1-го (левого) и 3-го (правового) поднятий (в и г соответственно); на бреззах (б, в и г) приведены фотографии поверхности модели над первым, вторым и третьим блоками, на которых изображена сеть трещин, возникшая в результате роста этих блоков, по [5]

компетентного слоя или, что почти то же самое, расстояния от купола поднятия (Рис.7 б, в).

На полученных зависимостях выделяются по две группы линий, одна построена для сравнительно крупных поднятий, а другая – для средних и мелких антиклиналей. Обсуждаемые зависимости отражают довольно простые закономерности, а именно: чем крупнее поднятие, тем больше радиус образующейся над ним зоны дробления. Зоны дробления, образующиеся над самыми мелкими поднятиями, прослеживаются лишь до 4-го компетентного слоя. Компетентные слои, расположенные выше, сохраняются целыми, в них отсутствуют вторичные трещины тектонического происхождения (см. Рис.7 б). Резкое уменьшение радиуса зоны трещиноватости в интервале 2-го и 3-го компетентных слоев может косвенно указывать на положение в этом интервале зоны двустороннего сжатия, о которой говорилось выше.

Величина трещинной «пористости», или, вернее, емкости трещин, образующихся над поднятиями, также зависит от их размеров и расстояния от купола поднятия. Трещинная «пористость», возникшая в компетентных слоях вследствие роста крупных поднятий, имеет в 2-3 раза большую величину, чем таковая, образовавшаяся в тех же слоях над мелкими и средними по величине поднятиями (см. Рис.7 в). Небольшая по величине трещинная «пористость», отмечаемая над мелкими и средними поднятиями на большом удалении от их куполов (в 5, 6 и 7 компетентных слоях), обусловлена своим формированием существованию краевых эффектов. Краевые эффекты возникают из-за небольших размеров седиментационных моделей. Суть этого явления заключается в том, что вследствие роста поднятий осадки, перемещаемые ими, «наползают» на стены модели. Поскольку последние являются жесткими упорами, то осадки вынуждены подниматься вверх вдоль стенок моделей, формируя здесь зону напряжений. Вследствие этого выше стенок моделей в верхних компетентных слоях образуются краевые трещины, которые вряд ли возникли бы в моделях больших размеров, в которых краевые эффекты отсутствуют.

На основе полученных зависимостей радиуса зоны трещиноватости и трещинной «пористости» от размеров поднятий и расстояния до их купола в комплексе с результатами сейсморазведочных работ, из которых берутся данные о размерах и форме поднятий, построена структурно-прогнозная схема размещения зон повышенной тектоногенной трещиноватости в юрском комплексе Славинского месторождения [5]. На этой схеме выделяются две крупные высокоперспективные зоны с максимальной прогнозной плотностью вторичных трещин тектонического происхождения, около десятка небольших перспективных участков со средней плот-

ностью тектоногенных трещин и более сотни мелких малоперспективных участков с низкой плотностью вторичных трещин в юрских осадках (Рис.8).

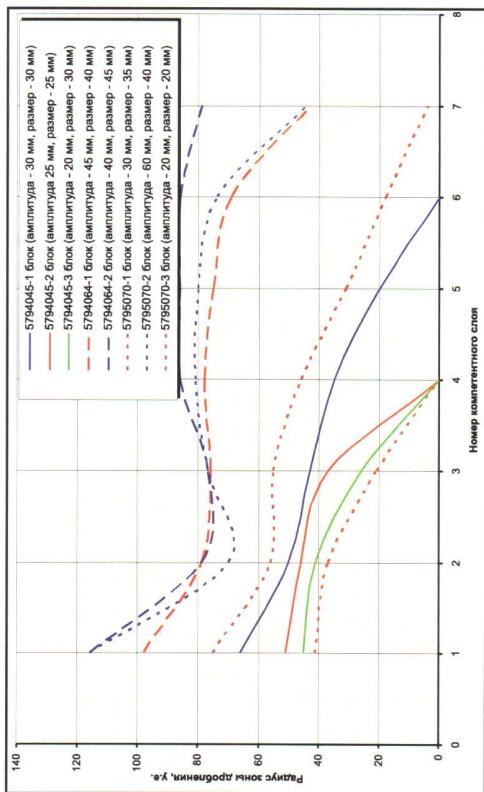
В пределах высокоперспективных зон предлагается пробурить 4 эксплуатационные скважины, в границах перспективных участков – 5 разведочно-эксплуатационных скважин, а в пределах низкоперспективных зон – ни одной (см. Рис.8). Отсутствие проектных скважин в пределах низкоперспективных участков объясняется не только очень малой прогнозной плотностью тектоногенных трещин в них и малыми запасами углеводородов, но и низким гипсометрическим положением этих участков. Существует слишком большая вероятность того, что эти мелкие участки находятся в чисто водоносной зоне юрских отложений.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

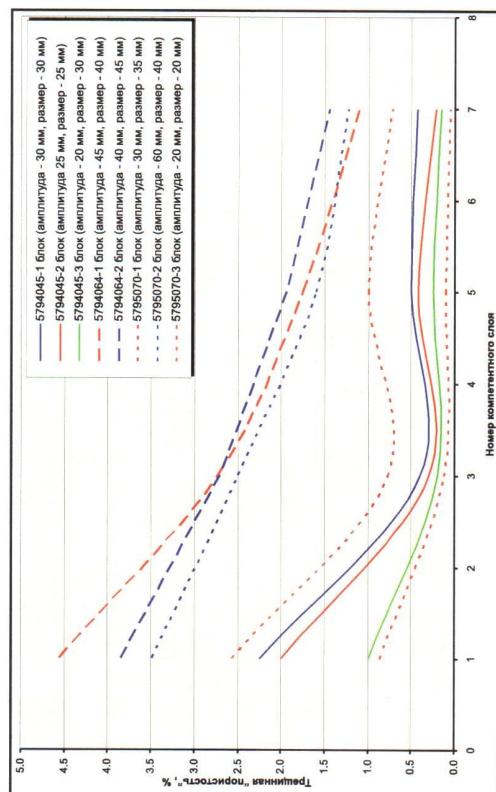
Из полученных результатов тектонофизического моделирования следует, что на фоне закономерного ухудшения ФЕС гранулярных коллекторов по мере их погружения на все большую глубину, под действием тектонических сил создаются условия для возникновения в них вторичной трещиноватости, которая значительно улучшает их фильтрационные и отчасти емкостные свойства и обуславливает получение высокодебитных притоков из скважин, пробуренных в этих участках.

В случае достаточно близкого расположения соседних поднятий, которые в процессе роста взаимодействуют друг с другом, отмечается изменение величины и характера распределения касательных напряжений, возникающих над ними. Над самым старым поднятием следует ожидать существование довольно изометричной системы трещин (в плане), ориентированных в разрезе преимущественно субвертикально (см. Рис.1 г). Кроме того, в первоначально изотропной осадочной толще вследствие роста этого поднятия возникают напряжения, распределенные в осадочной толще в соответствии с морфологией этого поднятия. Поэтому последующий рост соседних с ним поднятий осуществляется в анизотропном поле напряжений, из-за чего характер распределения и положение трещин над ними отличается от такового, какое бы возникло в изотропном осадке. Основные отличия заключаются в том, что возникающие над молодыми поднятиями трещины имеют вполне определенную ориентировку, обусловленную распределением напряжений в осадке, созданным первым поднятием (см. Рис.1 б-г, Рис.2).

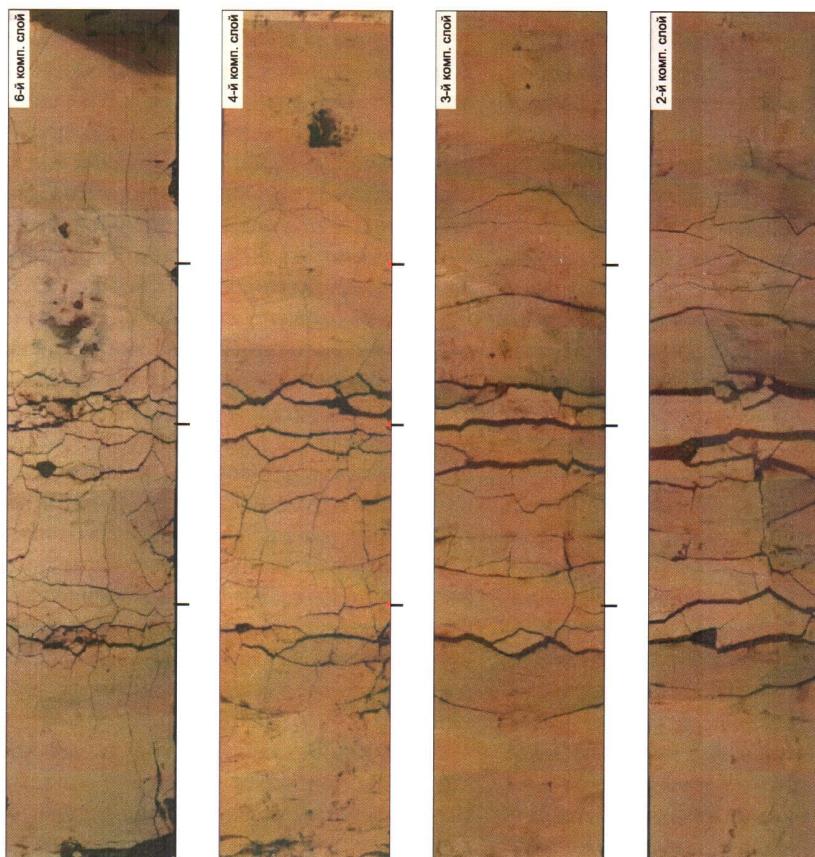
Следующий важный вывод заключается в том, что вследствие роста соседних (молодых) поднятий уровень касательных напряжений, существовавший до этого момента над первым (ранее образовавшимся) поднятием, уменьшается, что про-



б



в



а

Рис. 7. Распределение трещин в компетентных слоях тектоно-седиментационной модели, построенной по профилю 5795070 Славинского месторождения (а) и зависимость радиуса зоны дробления (б), а также величины трещинной "пористости" (в) от номера компетентного слоя, по [5]

является в сжатии возникших над ним трещин и уменьшении радиуса самой зоны трещиноватости (см. Рис.1 б-в, Рис.2 б, г). Следовательно, флюиды, заполнявшие зону дробления, образовавшуюся ранее над первым поднятием, по системе трещин, соединяющих ее с таковой, сформировавшейся над соседним молодым поднятием, перетекут в эту новую зону трещиноватости (см. Рис.2). Таким образом, последовательно растущие поднятия можно отождествить с мощными тектоническими «насосами», перекачивающими флюиды из более ранних зон дробления в молодые, сформировавшиеся над новыми, самыми юными поднятиями [3, 4]. Поэтому, при прочих равных условиях, наиболее перспективными являются зоны дробления, возникшие над самыми молодыми поднятиями.

Если допустить, что причиной роста поднятий является вздымание мантийных тел типа батолитов, то над ними в соответствии с установленными на основе **оптического и седиментационного** моделирования закономерностями, должна сформироваться зона дробления, по которой через фундамент в осадочный чехол проникнут перегретые флюиды, мобилизующие из осадка не только воду, содержащуюся в нем, но и углеводороды (УВ), как уже образовавшиеся ранее, так и возникшие вследствие интенсивного прогрева осадочной толщи и содержащихся в ней нефтематеринских отложений. В этом случае в соответствии с установленными на основе моделирования закономерностями водно-углеводородные флюиды должны мигрировать преимущественно в вертикальном направлении достаточно быстро (тем более в масштабе геологического времени), формируя углеводородные залежи и месторождения. В случае роста соседнего поднятия, как было показано выше (см. Рис.2), наряду с вертикальной миграцией флюидов будет происходить и латеральное их перемещение из зоны сжатия по субвертикальным трещинам, соединяющим ранее возникшую зону дробления (над «старым» поднятием) с новообразованной (над «молодым» поднятием).

Таким образом, тектонический «насос» перекачивает не только «новые» УВ по направлению снизу вверх, но и «старые» в субгоризонтальном направлении из более ранних зон дробления, возникших над соседними «старыми» поднятиями в трещинную область, сформировавшуюся над новыми («молодыми») поднятиями. Это происходит вследствие бокового сжатия «старых» трещин осадками, нагнетаемыми растущими новыми поднятиями (см. Рис.1 в, Рис.2).

Обращает на себя внимание также тот факт, что в области, расположенной между поднятиями, отмечаются низкие уровни касательных напряжений, поэтому формирование здесь вторичных трещин и трещинных зон тектонического происхождения

происходит с гораздо меньшей интенсивностью, чем над поднятиями (см. Рис.1 г, 7 а).

Следует также обратить внимание на тот немаловажный факт, что флюиды, проникающие из фундамента в осадочный чехол, часто имеют ярко выраженный кислый состав (низкое значение pH) из-за высокого содержания в них углекислоты, соляной и других кислот. Поэтому при проникновении их по системе вертикальных трещин в проницаемый пласт они интенсивно реагируют с его цементирующими и обломочной частью. Наиболее значительным изменениям подвергается цемент, особенно если он представлен карбонатным материалом, а также неустойчивыми в кислой среде глинистыми минералами (например, хлоритами). Вследствие такого воздействия могут сформироваться рыхлые, слабо сцепленные песчаники, напоминающие по своим механическим свойствам пески. Такого рода песчаники неоднократно встречались нами в составе юрских отложений Красноленинского свода. Цементом в них служат крупные агрегаты великолепно ограненных кристаллов диккита и каолинита, являющихся наиболее устойчивыми среди глинистых минералов в кислой среде [2].

Наряду с формированием высокопродуктивных зон, обусловленных возникновением вторичной (тектоногенной) трещиноватости, рост взаимодействующих (соседних) поднятий вызывает образование между ними как минимум двух зон всестороннего (или двустороннего) сжатия (см. Рис.1 в). Одна из которых находится в подошвенной части осадочного чехла, а вторая — вверху, на некотором удалении от куполов этих поднятий (см. Рис.1 г). Из этих зон происходит интенсивное выжимание содержащихся в них флюидов, а гранулярные коллекторы превращаются в зависимости от их состава или в «псевдокварциты», или «метапесчаники» с очень низкой открытой пористостью и практически полным отсутствием проницаемости (см. Рис.3). Причем формирование такого рода уплотненных пород может происходить и на не очень больших глубинах, что зависит от мощности осадочного чехла и амплитуд взаимодействующих поднятий.

В **седиментационных** моделях местоположение участков всестороннего сжатия можно косвенно определить по резкому уменьшению радиуса зон трещиноватости, образующихся над поднятиями в компетентных слоях (см. Рис.7 б).

Образование трещин в породах сопровождается возникновением в них (трещинах) разрежения (или резкого падения давления), вследствие чего в возникшие полости устремляются флюиды, присутствующие в окружающих породах. Поскольку фазовая проницаемость у легких (юрских) нефтьей в среднем почти на порядок выше, чем у воды (из-

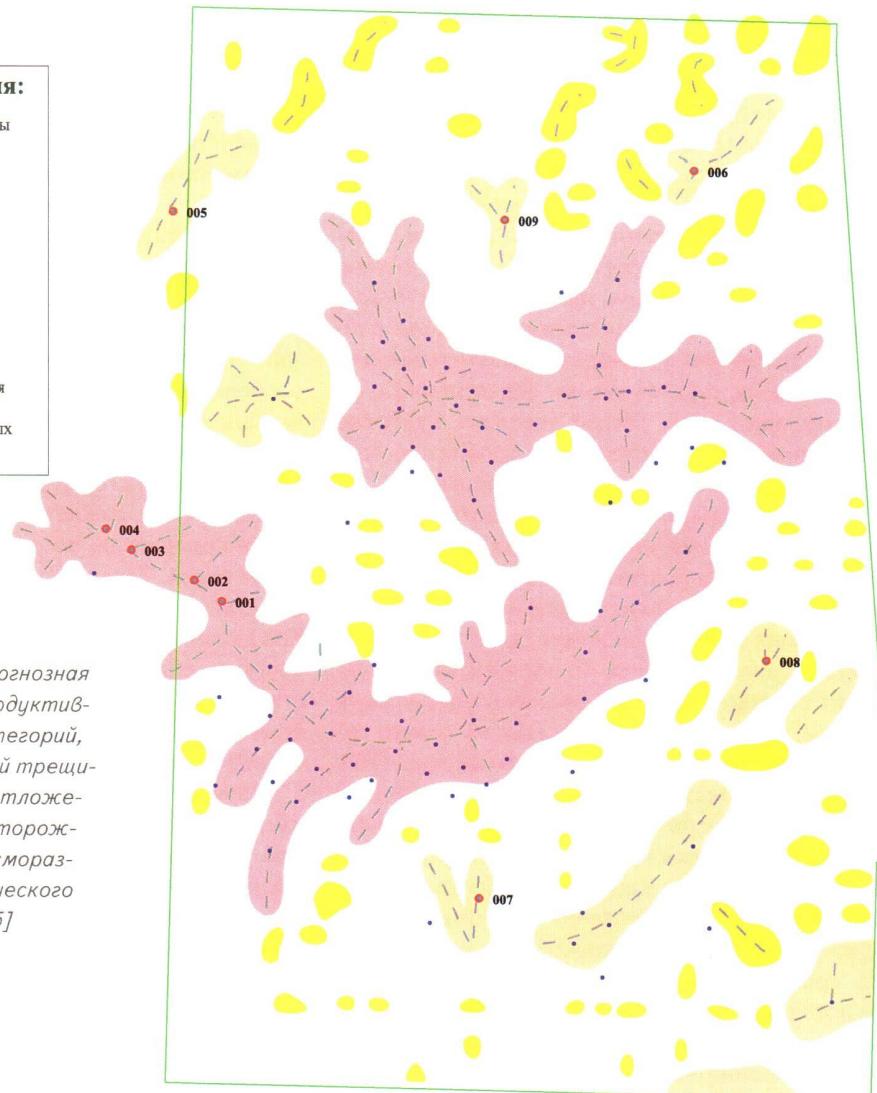


Рис. 8. Структурно-прогнозная схема размещения продуктивных зон различных категорий, или зон тектоногенной трещиноватости в юрских отложениях Славинского месторождения (по данным сейсморазведки и тектонофизического моделирования), по [5]

за гидрофильных свойств большинства осадочных пород), то в трещины в первую очередь попадет нефть и в виде струй по трещинным зонам начнет движение до ближайшего пласта-коллектора. Присутствие УВ в трещинах пород, находящихся в главной зоне нефтегенерации, часто фиксируется в образцах (см. Рис.5).

Как показал анализ результатов **седиментационного** моделирования, радиус зоны тектоногенной трещиноватости напрямую зависит от размеров и амплитуды поднятия, а именно: чем крупнее поднятие, тем больше радиус вторичной трещиноватости, возникающей над ним (см. Рис.7 а). По этой причине над мелкими малоамплитудными поднятиями возможно формирование маленьких по площади высокопродуктивных (трещиноватых) зон лишь на небольшом удалении от них. Напротив, над крупными поднятиями зоны вторичной (тектоногенной) трещиноватости могут подниматься достаточно высоко в осадочный чехол и даже в некоторых случаях выходить на поверхность.

В этом случае на поверхности обычно образуются понижения (зоны просадки), форма которых зависит от морфологии поднятия или поднятий [3-6]. Между поднятиями вследствие нагнетания ими осадков формируются участки с повышенной суммарной мощностью. Если поднятия достаточно крупные, то зоны увеличенных мощностей могут выйти на поверхность, и на ней возникнут возвышенности. Таким образом формируются своего рода инверсии мощности — над прогибами возникают поднятия, а над поднятиями — прогибы [3-6]. Впервые это явление было обнаружено нами в 1992 г. при сопоставлении результатов сейсморазведки (структурной поверхности по отражающему горизонту «Б») и рельефа современной поверхности в пределах участка сейсморазведочных работ 3Д Ем-Еговской площади.

Величина трещинной «пористости» или емкости также напрямую зависит от размеров поднятия — чем крупнее поднятие, тем больше емкость трещин, возникающих над ним. Чем выше подни-

мается зона дробления в осадочный чехол, тем меньше трещинная «пористость» в компетентных слоях (см. Рис.7 в).

Таким образом, исходя из полученных на основе моделирования данных, можно заключить, что наибольшее значение вторичные трещины тектонического происхождения имеют именно в осадках юрского возраста, причем чем глубже они залегают, тем более значителен их вклад в ФЕС этих отложений. В осадках мелового возраста, как правило, трещины тектонического происхождения играют менее важную роль, их ФЕС в основном определяются сохранившейся межгранулярной пористостью и проницаемостью.

ВЫВОДЫ

1. Прогноз высокопродуктивных (трещиноватых) зон в юрских отложениях возможен на осно-

ве комплексирования данных сейсморазведочных работ и результатов тектонофизического моделирования.

2. На основе тектонофизического моделирования вырабатываются критерии, с помощью которых можно прогнозировать расположение и размеры зон тектонической трещиноватости, а также оценивать их вторичную (трещинную) емкость.

3. Используя эмпирические зависимости, полученные на основе моделирования, по данным сейсморазведочных работ выделяются прогнозные зоны повышенной продуктивности (вторичной тектоногенной трещиноватости) и строятся прогнозные схемы распределения зон вторичной трещиноватости, имеющих различные категории перспективности.

4. В пределах выделенных прогнозных зон вторичной трещиноватости размещаются проектные скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
2. Зубков М.Ю., Дворак С.В., Романов Е.А., Чухланцева В.Я. Гидротермальные процессы в шеркалинской пачке Талинского месторождения (Западная Сибирь) // Литология и полезные ископаемые. 1991. № 3. С. 122-132.
3. Зубков М.Ю., Бондаренко П.М. Прогноз зон вторичной трещиноватости на основе данных сейсморазведки и тектонофизического моделирования // Геология нефти и газа. 1999. № 11-12. С. 31-40.
4. Зубков М.Ю., Бондаренко П.М. Использование методов тектонофизического моделирования при структурно-прогнозном дешифрировании результатов сейсморазведочных работ на месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа // Вторая науч.-практ. конф. «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО» / Под ред. В.И. Шпильмана, В.А. Волкова. Ханты-Мансийск, 1999. С. 269-280.
5. Зубков М.Ю., Пормейстер Я.А., Николюк В.И. Прогноз углеводородных залежей на основе тектонофизического моделирования на примере Славинского месторождения // Седьмая научно-практическая конференция «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО». Ханты-Мансийск, 2004. Т. 1. С. 114-131.
6. Зубков М.Ю., Пормейстер Я.А., Садыков М.Р., Мордвинцев М.В., Захаров В.В., Бондаренко П.М. Прогноз зон природной трещиноватости в продуктивных отложениях Западно-Урьевской площади по данным сейсморазведки и тектонофизического моделирования // Вестник недропользователя. 2004. № 14. С. 25-35.
7. Патент на изобретение № 2183332 «Способ прогнозирования зон развития вторичных коллекторов трещинного типа в осадочном чехле» / Зубков М.Ю., Бондаренко П.М. Приоритет от 08.11.2000.