

ПРОГНОЗ ЗОН ВТОРИЧНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М.Ю. Зубков (ОАО "СибНИИНП"), П.М. Бондаренко (ОИГГиМ СО РАН)

Из анализа геолого-промысловых данных, а также результатов детальных литолого-петрофизических исследований, проведенных в пределах различных месторождений Западной Сибири, видно, что резкие изменения продуктивности скважин, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, невозможно объяснить только вариациями мощности продуктивных пластов или их выклиниванием (глинизацией) (Трусов Л.Л., Зубков М.Ю., Черновец Л.В. и др., 1991). То же самое можно сказать и о значительных вариациях уровня водонефтяного контакта (ВНК) в пределах некоторых месторождений (Трусов Л.Л., Асанбаев Б.З., Зубков М.Ю., 1990; Трусов Л.Л., Зубков М.Ю., Черновец Л.В. и др., 1991). Более того, трассерные исследования многих залежей месторождений Западной Сибири (Южно-Ягунское, Дружное, Лась-Еганское, Поточное, Северо-Поточное, Ватинское, Тюменское, Ново-Молодежное, Гун-Еганское, Мало-Черногорское, Талинское и др.) показали наличие аномально высокопроницаемых (до 30-5000 мкм²) каналов. Скорость прохождения по ним закачиваемой воды достигает 10-180 м/ч, что в 1000-2000 раз выше характерных значений для терригенных (гранулярных) коллекторов [4]. Особо выделяются также необычные продуктивные объекты в отложениях баженовской и абалакской свит, формирование емкостного пространства в которых происходило на значительных глубинах под действием наложенных (вторичных) процессов (Гурари Ф.Г., Гурари И.О., 1974; Нестеров И.И., 1979; Новиков Г.Р., Салманов Ф.К., Тянь А.В., 1979; Зубков М.Ю., 1989; Зубков М.Ю., Бондаренко П.М., 1997; [1,5]). Все перечисленные факты свидетельствуют, что тектонические движения, происходившие в пределах тех или иных месторождений или площадей, оказывают значительное влияние на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) обычных (первичных) гранулярных коллекторов, а также способствуют образованию трещинно-кавернозных (вторичных) коллекторов (Трусов Л.Л., Асанбаев Б.З., Зубков М.Ю., 1990; Трусов Л.Л., Зубков М.Ю., Черновец Л.В. и др., 1991; Зубков М.Ю., Бондаренко П.М., 1997).

Сказанное подтверждается также наличием в описываемых участках термобарических и гидрохимических аномалий. Кроме того, в образцах керн отмечаются специфические новообразованные минеральные ассоциации, представленные хорошо ограненными эпигенетическими кристаллами кварца, альбита, целезиана (бариевый полево шпат), барита, апатита, пирита, миллерита, различных карбонатных минералов, самородной серы, гипса, каолинита и диккита (Трусов Л.Л., Асанбаев Б.З., Зубков М.Ю., 1990; Зубков М.Ю., Бондаренко П.М., 1997).

Таким образом, резкие изменения ФЕС первичных (гранулярных) и образование вторичных (трещинных и трещинно-кавернозных) коллекторов обусловлены тектоническими движениями, сопровождавшимися проникновением из фундамента гидротермальных флюидов, приведших к возникновению термобарических и гидрохимических аномалий, а также формированию устойчивых в этих условиях минеральных ассоциаций.

Возникает вопрос о возможности прогнозирования описываемых зон в пределах как уже эксплуатирующихся месторождений с целью организации оптимальной схемы их разработки, так и новых площадей для их разведки (доразведки) и последующего рационального размещения нагнетательных и добывающих скважин. Для этого предлагается использовать оригинальный способ комплексирования данных

сейсморазведки и тектонофизического моделирования (Зубков М.Ю., Бондаренко П.М., 1997).

Суть описываемого способа заключается в исследовании распределения напряжений, прогнозе зон трещиноватости (разуплотнения), а также анализе механизма образования трещинных дислокаций с использованием двух типов моделей (оптико-поляризационной и седиментационной [2, 3]) на основе выбранных в качестве базовых для того или иного месторождения или площади сейсмсовременных разрезов (Зубков М.Ю., Бондаренко П.М., 1997).

Анализ сейсмсовременных разрезов, отражающих строение кровли фундамента и осадочного чехла в пределах различных месторождений, показал, что на них выделяются различные структурные формы, которые в большинстве случаев могут быть представлены в виде более простых составляющих их элементов. К ним могут быть отнесены прогибы различной амплитуды и формы, флексуры, флексуробросы, антиклинальные поднятия (островершинные, пологие), а также сложные, состоящие из нескольких близкорасположенных более мелких поднятий, и т. д. (рис. 1).

Следует обратить внимание, что на большей части Западно-Сибирской плиты осадки залегают субгоризонтально, поднятия имеют пологие вершины и крылья, а впадины обладают "корытообразной" формой. И поднятия, и впадины обычно ограничены флексурами или флексуробросами (см. рис. 1, А, Б). В западной части плиты тектонические движения происходили гораздо активнее и значительно позже, поэтому здесь отмечаются более рельефные структуры с островершинными поднятиями и сравнительно крутыми крыльями (см. рис. 1, В, Г, Д).

На сейсмсовременных разрезах обращают на себя внимание два необычных морфоструктурных элемента, а именно: "бескорневые" поднятия, не имеющие продолжения в фундаменте (см. рис. 1, Г, Д), и зоны разуплотнения или просадки над вершинами антиклинальных поднятий (см. рис. 1, Б, В, Д). Происхождение этих структур не имело однозначного объяснения и лишь проведение тектонофизического моделирования, в частности седиментационным методом, позволило разобраться в механизме их формирования.

Рассмотрим результаты тектонофизического моделирования выделенных на сейсмсовременных разрезах основных простых структурных элементов.

Оптико-поляризационный метод моделирования 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. Сопоставление модели с реальным геологическим объектом правомерно 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.

При оптико-поляризационном моделировании в качестве эквивалентного материала использовались водно-глицериновые растворы желатина с различной плотностью, задаваемой концентрацией желатина ($C_{\text{жел}}$) от 10 до 20 %, что отвечает модулю их

упругости E от $3 \cdot 10^4$ до $9 \cdot 10^4$ Па 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 значениях 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 определялись по картине изоклин, представляющих линии равных наклонов осей главных нормальных напряжений к плоскости поляризованного света.

Самой простой из рассматриваемых структурных элементов является флексура (рис. 2). Анализ распределения касательных напряжений во флексуре показал, что их максимальные значения приурочены к приподнятому плечу (изохромы до 7-го порядка). Минимальные касательные напряжения (вплоть до нулевых), напротив, отмечаются в опущенном крыле флексуры (см. рис. 2, А). Уже отмечалось, что образование трещинных дислокаций должно происходить в зонах повышенных касательных напряжений. Поэтому, исходя из прогнозируемого расположения зон повышенной трещиноватости или разуплотнения, можно предположить, что если рассматриваемая структура представляет собой песчаный пласт, перекрытый глинистым экраном, то миграция флюидов из опущенного крыла флексуры по имеющимся сколово-сдвиговым и разрывным дислокациям будет осуществляться вверх в зону разуплотнения, сформировавшуюся в приподнятом крыле флексуры. Именно здесь образуется высокоперспективная зона с повышенными ФЕС (см. рис. 2, Б, В).

В качестве следующей простой структуры рассмотрим пологий прогиб, ограниченный по бортам двумя флексурами (рис. 3). Как и в рассмотренном ранее случае, максимальные касательные напряжения отмечаются в приподнятых крыльях левой и правой флексур, которые далее для краткости будем называть плечами прогиба (см. рис 3, А). Небольшие зоны средних значений касательных напряжений (5-6-го порядков) отмечаются вблизи поверхности модели над левым и правым ее плечами. В центральной части рассматриваемой модели над осью прогиба также выделяется зона с повышенными значениями касательных напряжений (до 6-8-го порядков). Зоны пониженных касательных напряжений выделяются в осевой части нижней модели (см. рис. 3, А). В нижней части прогиба в области минимальных значений касательных напряжений выделяется нейтральная ось, вдоль которой растягивающие и сжимающие напряжения равны между собой.

В зависимости от прочностных свойств моделируемой толщи, а также скорости ее прогибания реализуются те или иные виды сдвигово-сколовых или отрывных дислокаций, траектории которых показаны на рис. 3, Б. Следует обратить внимание на то, что если в

самой подошве прогиба прогнозируются субвертикальные трещины отрыва, то в средней и верхней ее частях трещины отрыва должны иметь субгоризонтальную ориентацию. Таким образом, зоны вторичного (тектонического) разуплотнения в рассматриваемой модели прогиба прогнозируются в плечах прогиба, а также в осевой части над прогибом. Очень слабая зона вторичной трещиноватости возникнет в самой подошве прогиба (см. рис. 3, Б).

Исследуемые осадочные толщи имеют слоистое строение, поэтому нет уверенности в том, что, проводя эксперименты с монолитными однородными моделями, мы получим распределение напряжений, адекватное таковому слоистых моделей. Поэтому для сравнения с монолитной однородной моделью прогиба была создана модель, состоящая из слоев различной плотности (рис. 4).

Анализ распределения значений касательных напряжений в многослойной модели прогиба показал, что, несмотря на несомненную схожесть с монолитной однослойной моделью, имеются и явные отличия. Максимальные касательные напряжения отмечаются в самом нижнем слое с максимальной плотностью. Эти зоны приурочены к плечам прогиба и его осевой части (см. рис. 4, А). В перекрывающем его менее плотном слое также наблюдаются повышенные касательные напряжения над плечами и в осевой частях прогиба.

Интересно, что если в двух нижних слоях зоны максимальных касательных напряжений в осевой части модели приурочены к их кровлям, то в перекрывающих их верхних слоях эти зоны находятся в их подошвах (см. рис. 4, А). В нижней части прогиба так же, как и в монолитной однослойной модели, выделяется зона пониженных и нулевых значений касательных напряжений, где образование трещинных дислокаций обоих типов (отрыва и скола) невозможно. Учитывая траектории нормальных и касательных напряжений (см. рис. 4, Б), а также связывая плотность слоев с их прочностными свойствами и вещественным составом (например, самый плотный нижний слой ($C_{\text{жел}} = 20\%$) моделирует песчаные отложения, следующий слой ($C_{\text{жел}} = 14\%$) – глинистые алевролиты и самый пластичный слой ($C_{\text{жел}} = 10\%$) – глины), можно предположить следующее распределение зон тектонической трещиноватости. В нижнем плотном слое (его подошве) над плечами прогиба возникнут наклонно ориентированные трещины отрыва, которые впоследствии могут оказаться соединенными серией трещинно-сколовых дислокаций сбросового типа, ориентированных поперек напластования. Следует отметить, что в приосевой части прогиба трещины отрыва приобретают субгоризонтальную ориентировку, поэтому в кровле рассматриваемого слоя на этом участке модели следует ожидать формирование зоны разуплотнения с субгоризонтальной трещиноватостью (см. рис. 4).

В перекрывающем слое на этом участке отмечаются пониженные значения касательных напряжений, что указывает на небольшую вероятность его дробления и, следовательно, на его высокие экранирующие свойства. Напротив, над плечами прогиба в этом же слое фиксируются довольно высокие значения касательных напряжений, что предполагает возможность образования над плечами трещинных дислокаций и как следствие снижение экранирующих свойств. Максимальная степень трещиноватости прогнозируется в кровле этого слоя вблизи оси прогиба (см. рис. 4).

Следует отметить, что образование трещин отрыва наиболее вероятно в компетентных породах, представленных известняками, мергелями, песчаниками с карбонатным цементом и т. п., а в пластичных породах – глинах, глинистых алевролитах, возможно,

граувакках, скорее всего, будут возникать сколово-сдвиговые дислокации, так как трещины отрыва в них не смогут сохраниться из-за их повышенной пластичности.

С целью более наглядного сравнения распределения значений касательных напряжений в однородной однослойной и неоднородной многослойной моделях построен график их изменения в этих моделях в вертикальном направлении в их осевых частях и плечах (рис. 5). Анализ полученных графиков показал, что общие тенденции изменения касательных напряжений с глубиной и в осевых частях, и плечах моделей сохраняются. Однако в многослойной разноплотностной модели отмечаются значительные изменения касательных напряжений на границах слоев, что свидетельствует о скачках напряжений при переходе через границу слоев. Максимальные скачки касательных напряжений фиксируются в осевой части прогиба (см. рис. 5).

Следует также отметить, что приуроченность прогнозируемых зон вторичной (тектонической) трещиноватости к осевой части прогиба представляет интерес для поисков зон повышенной продуктивности, если ВНК находится ниже них. Иначе эти высокопроницаемые участки будут заполнены водой. Однако, даже если уровень ВНК окажется выше рассматриваемых участков, не исключена возможность появления в них капиллярно-экранированных залежей. Наличие седловидных структур в этих погруженных участках также может способствовать возникновению в них УВ-залежей.

Рассмотрим более обычные для геологов и нефтяников антиклинальные структуры начиная с простого симметричного антиклинального поднятия (рис. 6, А, Б). Максимально высокие касательные напряжения зафиксированы в купольной части поднятия, причем в нижнем слое выделяются два таких участка – один в нижней и средней его частях, а второй – в верхней. Судя по ориентации нормальных и касательных напряжений, а также величине последних, воздымание симметричного антиклинального поднятия вызовет образование в подошве нижнего слоя субвертикальных трещин отрыва, которые будут расти вверх, а навстречу им из кровли этого же слоя (из зоны растяжения) будут опускаться вниз трещины таких же типа и ориентации (см. рис. 6, Б).

В перекрывающих слоях субвертикальные трещины отрыва образуются в их подошвах, захватывая в большей или меньшей степени остальную часть слоев. Если нижний слой с минимальной плотностью условно принять за глинистый, то, скорее всего, в нем реализуются сдвигово-сколовые дислокации, в результате которых образуются поверхности и зеркала скольжения, так как трещины отрыва в силу низких прочностных свойств глин не смогут сохраниться. Напротив, в более плотном следующем слое, имитирующем песчаники, вполне вероятно формирование зоны с субвертикальной трещиноватостью, обладающей повышенными ФЕС. В следующем, менее плотном, слое, условно отнесенном к алевролитистым глинам, в его подошве сформируется небольшая трещиноватая зона разуплотнения, в которой в зависимости от прочностных и реологических свойств рассматриваемого слоя образуются сколово-сдвиговые деформации или трещины отрыва. Таким образом, над симметричными антиклинальными поднятиями в их купольной части формируются участки с повышенными ФЕС, причем в зависимости от прочностных свойств слоев и их положения в разрезе изменяются тип трещин, их ориентировка и протяженность (см. рис. 6, А, Б).

Рассмотрим антиклинальное поднятие более сложной (трапециевидной) формы (см. рис. 6, В, Г). Здесь главные отличия от ранее рассмотренного симметричного антиклинального поднятия проявляются в двух нижних слоях. Максимальные касательные напряжения отмечаются на краях поднятия, а над центральной его частью формируется зона сплошного сжатия (уплотнения) с пониженными значениями касательных напряжений. В

верхней части нижнего слоя над поднятием возникла обширная зона повышенных касательных напряжений, обусловленных растяжением этого участка (см. рис. 6, В). Повышенные касательные напряжения над поднятием отмечаются в нижней части среднего (плотного) слоя, а средней величины – в подошве верхнего слоя. Судя по траекториям нормальных и касательных напряжений, над плосковершинным трапециевидным поднятием наиболее трещиноватые зоны возникнут на его бортах и над ним, причем трещины отрыва должны иметь преимущественно субвертикальную ориентировку над поднятием и наклоняться в сторону погружающихся частей на его крыльях. Сколово-сдвиговые дислокации, наоборот, ориентированы полого над поднятием, а на его крыльях одна система сдвиговых трещин имеет субвертикальную, а другая – субгоризонтальную ориентировку (см. рис. 6, Г). Полагая, как и в предыдущей модели, что нижний и верхний слои с низкой плотностью имитируют существенно глинистые отложения, а средний (самый плотный) – песчаный пласт, можно ожидать, что в нижнем и верхнем слоях реализуются сколово-сдвиговые дислокации, а в среднем, наоборот, возникнут преимущественно трещины отрыва, которые значительно повысят ФЕС пласта в основном в его подошве и средней части (см. рис. 6, Г).

Проведенный анализ простейших оптико-поляризационных моделей показал, что наряду с их структурными особенностями распределение напряжений зависит от числа слоев, их мощности, плотности (прочности), величины нагрузки и т.п. Поэтому при моделировании разрезов, подготовленных на основе сейсмических разрезов, кроме структурного соответствия, нужно обеспечить максимально близкое подобие прочностных (реологических) свойств моделируемых пластов, их толщин и рассчитать необходимую величину нагружения модели, отвечающую (в соответствии с коэффициентом подобия) литостатическому давлению, существующему на моделируемой в оптико-поляризационном эксперименте глубине.

В качестве примера модели, построенной на основе конкретного сеймопрофиля, рассмотрим оптико-поляризационную модель по сейсмическому разрезу 1 Ем-Еговской площади (рис. 7). В качестве структурообразующей выбрана сейсмоотражающая граница Т, соответствующая кровле отложений тюменского возраста.

В модели изучалось распределение напряжений в отложениях, имитирующих баженовскую (Б) и абалакскую (Аб) свиты при условии чередования в разрезе пластичных (с низкой концентрацией желатина) "глинистых" слоев и плотных (с более высоким содержанием желатина) "кремнистых" и "карбонатных" слоев, с целью прогноза развития в последних трещинных коллекторов. Анализ распределения касательных напряжений в модели показал, что максимальные вариации их значений наблюдаются в самом нижнем слое с минимальной плотностью (см. рис. 7, А). В перекрывающих его слоях изменение касательных напряжений становится плавным и детали структурной поверхности по горизонту Т уже не ощущаются. Сохраняются лишь обобщенные очаги повышенных касательных напряжений, приуроченные к наиболее рельефным антиклинальным структурам. Поэтому рассмотрим подробнее нижний слой, налегающий на структурообразующий штамп. В этом слое выделяются несколько участков с повышенными касательными напряжениями, приуроченных к сводовым частям антиклинальных поднятий, причем над самым высокоамплитудным из них напротив участков сжатия в подошве слоя сформировались очаги повышенных касательных напряжений в его кровле, обусловленные растягивающими напряжениями (см. рис. 7, А). Между поднятиями в погруженных участках модели отмечаются пониженные и нулевые значения касательных напряжений, где $\tau_{\max} = 0$, а $\sigma_1 = \sigma_3$. Эти участки представляют собой бесперспективные зоны всестороннего сжатия, в которых невозможно образование трещин сколового или отрывного типов (см. рис. 7, Б).

Следует обратить внимание на характер распределения касательных напряжений в плотных ($C_{\text{жел}} = 15-18 \%$) и пластичных ($C_{\text{жел}} = 10-12 \%$) слоях рассматриваемой модели, перекрывающих базальный слой. В плотных слоях максимальные касательные напряжения концентрируются в их центральных частях, а в более пластичных, наоборот, – подошве и кровле (см. рис. 7, А). Следовательно, наиболее трещиноватые зоны в кремнистых и карбонатных пластах будут приурочены к их центральным частям, а в глинистых – к подошве и кровле. Судя по градиентам изменений касательных напряжений, можно предположить, что в плотных слоях трещины должны начинать расти от их центра к границам слоев, а в глинистых, наоборот, от границ слоев к их центральной части.

Отмеченные особенности имеют важное практическое значение, заключающееся в том, что глинистые покрывки, залегающие над антиклинальными ловушками, имеют пониженные экранирующие свойства в подошве и кровле из-за повышенной трещиноватости приграничных участков. Поэтому, если глинистый пласт имеет небольшую мощность, подошва и кровля зоны повышенных касательных напряжений могут слиться, образовав зону сплошного дробления, и глинистый пласт потеряет свойства флюидоупора.

Рассматривая распределение и ориентацию нормальных и касательных напряжений в обсуждаемой модели, можно отметить, что над поднятиями трещины отрыва имеют субвертикальную ориентировку, а в прогибах, наоборот, субгоризонтальную (см. рис. 7, Б). Следует также обратить внимание на тот факт, что смена ориентировки трещин отрыва происходит над и под изотропными точками, в которых касательные напряжения равны нулю, а нормальные имеют равные значения. Судя по результатам моделирования, над высокоамплитудным антиклинальным поднятием в осадочных отложениях могут возникнуть сплошные зоны субвертикальных трещин отрыва, по которым флюиды будут перемещаться из нижних зон сжатия вверх – в зоны сводового растяжения.

Очевидно, что формирование УВ-залежей путем миграции флюидов по трещинам гораздо эффективнее гравитационного механизма всплывания капелек нефти по поровым каналам гранулярных коллекторов.

Траектории касательных напряжений ориентированы приблизительно под 45° к направлениям нормальных напряжений, поэтому над сводами и впадинами они имеют косые траектории, а над бортами впадин и поднятий одна часть касательных напряжений приобретает субвертикальную ориентировку, а другая – субгоризонтальную (см. рис. 7, Б).

Еще раз отметим, что поскольку прочность горных пород на отрыв (разрыв) примерно на один порядок меньше, чем на скол [2, 3], то первоначально в деформируемой осадочной толще любого состава возникают трещины отрыва. Однако если в крепких породах типа известняков, мергелей, силицитов или прочно сцементированных песчаников они в большей или меньшей мере сохраняются, то в пластичных породах, таких как глины, трещины отрыва быстро сменяются сколово-сдвиговыми дислокациями и в участках повышенных касательных напряжений в них возникают многочисленные поверхности и "зеркала" скольжения, которые часто наблюдаются в образцах керна, отобранных из таких зон.

Тектоноседиментационный 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, не следует забывать, что оптико-поляризационный метод позволяет исследовать главным образом упругие деформации, а седиментационный – пластические и разрывные. Поэтому использование обоих методов в комплексе дает возможность охватить экспериментами все основные типы деформаций.

Седиментационный метод основан на лабораторном воспроизведении процесса подводного осадконакопления в условиях постоянной внешней нагрузки, возникающей в результате последовательного отложения слоистых толщ. Результаты такого моделирования применимы к анализу механизма образования геологических структур, выявляемых в разновозрастных разрезах, представленных 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 с добавками 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 вмонтированы подвижные блоки, расположение и морфология которых подобны структурному профилю выбранного для моделирования сейсмического разреза, например по сейсмоотражающему горизонту А (кровля фундамента) или Т (кровля отложений тюменской свиты). Общая длительность одного эксперимента с момента начала отложения осадков и заканчивая подъемом блоков достигает 60 дней.

Моделирование роста антиклинальных поднятий седиментационным методом подтвердило сделанные ранее на основе оптико-поляризационного метода предположения относительно ориентации трещин отрыва, образовавшихся в компетентных (прочных) слоях моделей (рис. 8). Они субвертикальны в присводовой части поднятий и постепенно наклоняются по мере удаления от купола поднятия к основаниям их крыльев, где эти разрывы приобретают вид сбросов и/или взбросов. В самой нижней части крыльев (у основания поднятий) и между поднятиями намечаются трещины отрыва субгоризонтальной ориентации, что также прогнозировалось по результатам оптико-поляризационного метода моделирования (см. рис. 4, 7).

Однако гораздо более важным результатом роста антиклинальных поднятий явилось образование над их купольной частью зон просадок или разуплотнения, которые часто отмечаются на сейсмических разрезах в верхнеюрских и неокомских отложениях (см. рис. 1, Б, В, Д). Эти зоны разуплотнения прогнозировались и на основе оптико-поляризационного метода, так как на оптических моделях над достаточно высокоамплитудными антиклинальными поднятиями наблюдались зоны растяжения с повышенными касательными напряжениями (см. рис. 6, 7). Описываемые зоны разуплотнения (просадки) представляют собой грабенообразные впадины, ограниченные с обоих бортов серией сбросов (см. рис. 8). В этих зонах наряду с субвертикальными трещинами отрыва иногда (под компетентными слоями) отмечаются трещины отрыва субгоризонтальной ориентации (см. рис. 6, А). Очевидно, что в силу повышенной трещиноватости эти зоны надкупольной просадки или разуплотнения представляют

большой интерес, как на стадии разведки, так и разработки УВ-залежей, поскольку в их пределах можно выделить наиболее высокопродуктивные участки и организовать их рациональную эксплуатацию. Типичным примером зоны разуплотнения (просадки), обнаженной на дневной поверхности над вершиной антиклинального поднятия, является оз. Самотлор, которое отличается от соседних озер наиболее высоким гипсометрическим положением.

Следующий интересный феномен, обнаруженный с помощью седиментационного моделирования, заключается в том, что между близко расположенными растущими поднятиями вследствие бокового смещения ими осадков происходит формирование "бескорневых" поднятий, которые отмечались на сейсмодновременных разрезах (см. рис. 1, Г, Д).

На седиментационной модели, построенной по одному из сейсмодновременных разрезов Кальчинского месторождения, хорошо видно увеличение мощности слоев между двумя близко расположенными растущими антиклинальными блоками, что привело к формированию не только "бескорневого" поднятия между ними, но и объединению их в единое поднятие (рис. 9, А, Б). В средних слоях модели в купольной части единого поднятия отмечается зона разуплотнения (просадки), ограниченная с боков малоамплитудными сбросами.

Впервые образование "бескорневых" поднятий между растущими антиклинальными блоками было обнаружено случайно при послойной препарации седиментационной модели Пальяновской площади (см. рис. 9, В). Эти поднятия имели различную форму и размеры, что, вероятно, связано с конфигурацией воздымавшихся блоков, их амплитудой и последовательностью роста, что в свою очередь обусловило ту или иную величину бокового давления и соответственно степень смещения осадков в межблочное пространство.

Дать однозначную оценку перспективности "бескорневых" поднятий пока довольно сложно, так как они возникают в зонах бокового сжатия осадков, т.е. в зонах уплотнения (на оптико-поляризационных моделях это участки всестороннего сжатия, см. рис. 6, Б, 7, Б). Кроме того, в этих зонах пласты-коллекторы могут оказаться перемятыми и потерять гидродинамическую связь. Однако над этими поднятиями могут формироваться трещиноватые зоны просадки (разуплотнения), что наблюдается, например, в седиментационной модели по сейсмодновременному разрезу Кальчинской площади (см. рис. 9, Б).

Вследствие роста антиклинальных поднятий происходит формирование отдельных трещин и трещинных зон, в особенности над их куполом и крыльями (см. рис. 8, 9). Следовательно, возникают высокопроницаемые зоны, по которым осуществляется интенсивная фильтрация пластовых флюидов. Поэтому интерес представляет анализ механизма формирования трещин над растущими поднятиями (блоками) и их взаимодействия в случае попеременного воздымания соседних поднятий. Такой анализ проведен на примере седиментационной модели Пальяновской площади.

Осуществлялся попеременный рост двух близко расположенных поднятий и исследовались закономерности образования и последующего поведения трещинных зон, возникших над ними (рис. 10). После роста первого поднятия над ним на поверхности модели сформировалась довольно изометричная сеть трещин, в которой условно можно выделить продольные (ориентированные вдоль оси поднятия, расположенного

параллельно коротким боковым стенкам модели) и поперечные (расположенные перпендикулярно оси поднятия, или параллельно длинным стенкам модели).

Вследствие бокового давления, распространяющегося от растущего поднятия, флюиды из окружающих его осадков выдавливаются из них в трещинную зону разуплотнения. Таким образом, природный "насос" обеспечивает быстрое и эффективное заполнение флюидами (нефтью и/или водой) возникающей трещинной (разуплотненной) зоны (см. рис. 10, А).

Рост поднятия, кроме того, привел к нарушению существовавшей до этого момента структуры осадка. Он оказался сжатым в направлении, параллельном длинной оси этого поднятия (т.е. параллельно коротким сторонам седиментационной модели). Вследствие этого над начавшим расти рядом с ним вторым поднятием (ось которого ориентирована так же, как и у первого поднятия) трещины оказались вытянутыми преимущественно вдоль его оси (см. рис. 10, Б). Поперечные трещины почти не образовались за исключением нескольких, явившихся продолжением возникших ранее над первым поднятием. Эти поперечные трещины соединили обе возникшие трещинные зоны.

Следует обратить внимание на то, что раскрытость трещин, сформировавшихся ранее над первым поднятием, значительно уменьшилась, особенно тех, которые были ориентированы субпараллельно осям поднятий. Следовательно, на этапе роста второго поднятия вновь включился природный "насос", который под действием бокового давления перегнал от этого поднятия часть пластовых флюидов из образовавшейся ранее трещинной зоны над первым поднятием в только что сформировавшуюся таковую над вторым поднятием (см. рис. 10, Б).

Возобновление роста первого поднятия вновь привело к увеличению раскрытости системы трещин отрыва, возникшей ранее над ним, и почти полному смыканию субпараллельной системы трещин над вторым поднятием (см. рис. 10, В). Вновь произошла быстрая перекачка флюидов по существующей системе трещин из трещинной зоны над вторым поднятием в таковую над первым. Наконец, последовавший вновь интенсивный рост второго поднятия вызвал перераспределение флюидов в обратном направлении. Раскрытость трещин над первым поднятием вновь уменьшилась, а над вторым, напротив, значительно увеличилась, возросло и число поперечных трещин, соединяющих системы трещин над обоими поднятиями (см. рис. 10, Г).

Таким образом, воздымающееся поднятие не только формирует антиклинальную структуру, но и образует системы трещин, по которым происходит быстрое перемещение поровых флюидов из участков бокового сжатия, окружающих его, в зону разуплотнения и повышенной трещиноватости, возникающую над вершиной поднятия. Иными словами, растущее поднятие представляет собой своеобразный тектонический "насос", осуществляющий быструю и эффективную перекачку флюидов и формирование УВ-залежей.

Большой интерес представляет анализ закономерностей распределения трещинных дислокаций снизу доверху в различных пластах, составляющих седиментационную модель. Это важно не только с точки зрения выяснения механизмов миграции флюидов, формирования залежей, объяснения их блочного строения и т.п., но и для обоснования использования других дистанционных методов, в частности результатов дешифрирования аэро- и космоснимков для прогноза зон трещиноватости в осадочном чехле.

В качестве примера рассмотрим результаты послышной разборки седиментационной модели Кальчинского месторождения после окончания роста центрального поднятия (рис.

11). Поскольку трещины отрыва сохраняются лишь в компетентных (прочных) слоях, то по мере послойной разборки модели по направлению сверху вниз проведена тщательная препарация всех компетентных слоев. Анализ распределения образовавшихся трещин показал, что по направлению снизу вверх наблюдаются следующие закономерности. Во-первых, изменяется ориентировка трещин с субрадиальной (в нижних пластах) на субпоперечную (в верхних слоях). Смена ориентации трещин происходит приблизительно на уровне 11-го слоя модели (см. рис. 11). Во-вторых, в этом же направлении уменьшается раскрытость возникших трещин. В-третьих, уменьшается их число на единицу площади, или плотность. Накладывая проекции трещин каждого последующего слоя на их положение в предыдущих слоях, можно отметить, что они практически не совпадают друг с другом. Иными словами, в каждом слое существовали свои, отличные от других слоев, напряжения, вызывавшие образование той или иной системы трещин. Лишь главная поперечная трещина, возникшая раньше других и проходящая через осевую часть поднятия, достаточно надежно прослеживается от самого нижнего слоя до верхнего, слегка изменяя свое положение и конфигурацию (см. рис. 11). Таким образом, проведение субвертикальных секущих разломов от дневной поверхности через всю осадочную толщу до фундамента над антиклинальными блоками, поднимающимися из него, вряд ли корректно. Сказанное справедливо также и по отношению к результатам дешифрирования аэро- и космоснимков, по которым выделяются дизъюнктивные элементы, отмечаемые на поверхности Земли. Действительно, в приведенных примерах оптико-поляризационного и седиментационного моделирования показано, что одна часть субвертикальных трещин отрыва начинает расти снизу вверх под действием воздымающегося поднятия (блока), а другая, наоборот, формируется в верхней части осадков в зоне их растяжения и постепенно опускается вниз (см. рис. 6, 7, 8, б). Очевидно, что на дневной поверхности над вершиной антиклинального поднятия наблюдается именно этот последний вид трещин. Следовательно, данные аэро- и космических исследований следует использовать в комплексе с результатами сейсморазведки и тектонофизического моделирования. Только в этом случае можно получить результаты, наиболее адекватно отвечающие природной ситуации.

Выводы

1. На основе анализа сейсмодновременных разрезов различных месторождений Западной Сибири выделено небольшое число основных тектоноструктурных элементов, присутствующих на них (флексуры, флексуробросы, прогибы и поднятия различной формы).
2. Путем тектонофизического моделирования выделенных простых структурных элементов изучено распределение в них нормальных и касательных напряжений, выявлены зоны разуплотнения (вторичной трещиноватости), установлена ориентировка прогнозируемых типов трещин и направлений миграции пластовых флюидов.
3. Изучен механизм формирования над антиклинальными структурами зон просадки (разуплотнения) с повышенными ФЕС, обусловленными вторичной тектонической трещиноватостью.
4. Экспериментально подтверждена возможность образования "бескорневых" поднятий за счет бокового нагнетания осадков воздымающимися близко расположенными антиклинальными поднятиями.
5. Рассмотрены закономерности формирования УВ-залежей над антиклинальным поднятием, рост которого приводит в действие своеобразный тектонический "насос", перекачивающий флюиды из зон сжатия в зону разуплотнения, образующуюся над поднятием.

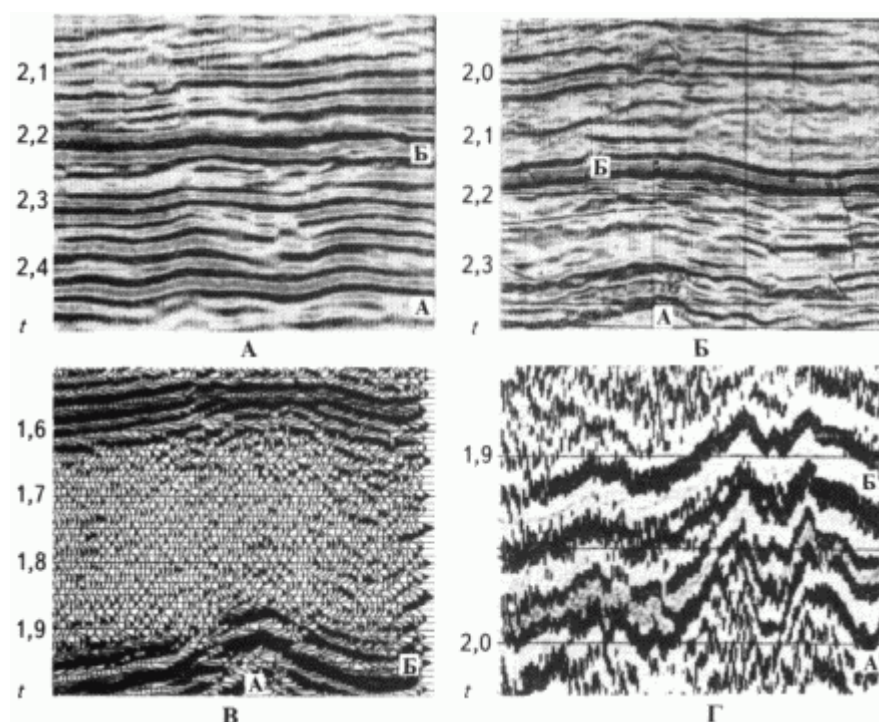
Литература

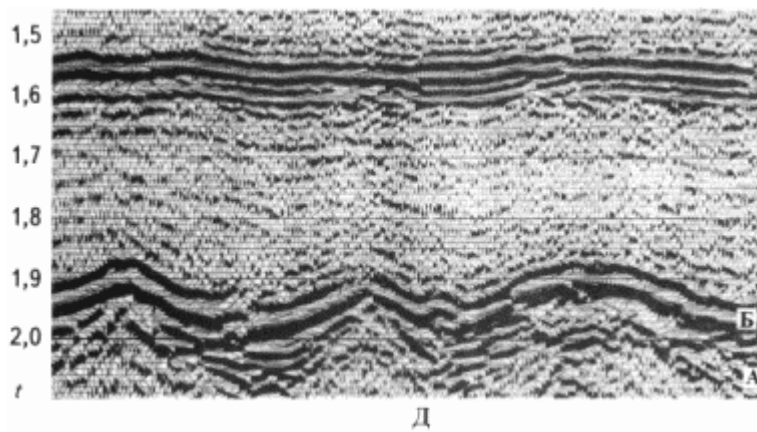
1. Белкин В.И., Медведский Р.И., Аббасов И.А. Жильный тип ловушек углеводородов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988.
2. Белоусов В.В., Гзовский М.В. Экспериментальная тектоника. – М.: Недра, 1964.
3. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975.
4. Трофимов А.С., Ибрагимов Л.Х., Ситников А.А. Ограничение водопритоков нефтяных скважин по каналам низкого фильтрационного сопротивления // Нефтепромысловое дело. – 1996. - № 6. - С. 13-18.
5. Халимов Э.М., Мелик-Пашаев В.С. О поисках промышленных скоплений нефти в баженовской свите // Геология нефти и газа. – 1980. – № 6. – С. 1-10.

Abstract

Analysis of time sections of different oil and gas areas of West Siberia allowed to recognise the main types of tectonostructural elements which were then studied using optic-polar and tectono-sedimentation methods of modelling with the aim to investigate a character of distribution of tangential and normal stresses for the prognosis of areas and mechanisms of forming thrust and shearing dislocations and their orientation. Prognosis of disconsolidation zones (secondary tectonic fracturing) and trends of fluid migration within the identified structural elements was done. It was established a mechanism of forming disconsolidation zones (sagging) above anticlinal structures and "rootless" uplifts being formed between the closely spaced blocks. Mechanism of hydrocarbon occurrences originated over anticlinal highs under tectonic effect is considered.

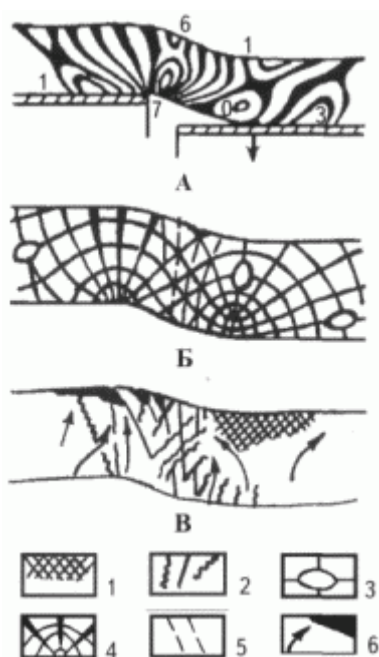
Рис. 1. ФРАГМЕНТЫ СЕЙСМОВРЕМЕННЫХ РАЗРЕЗОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ





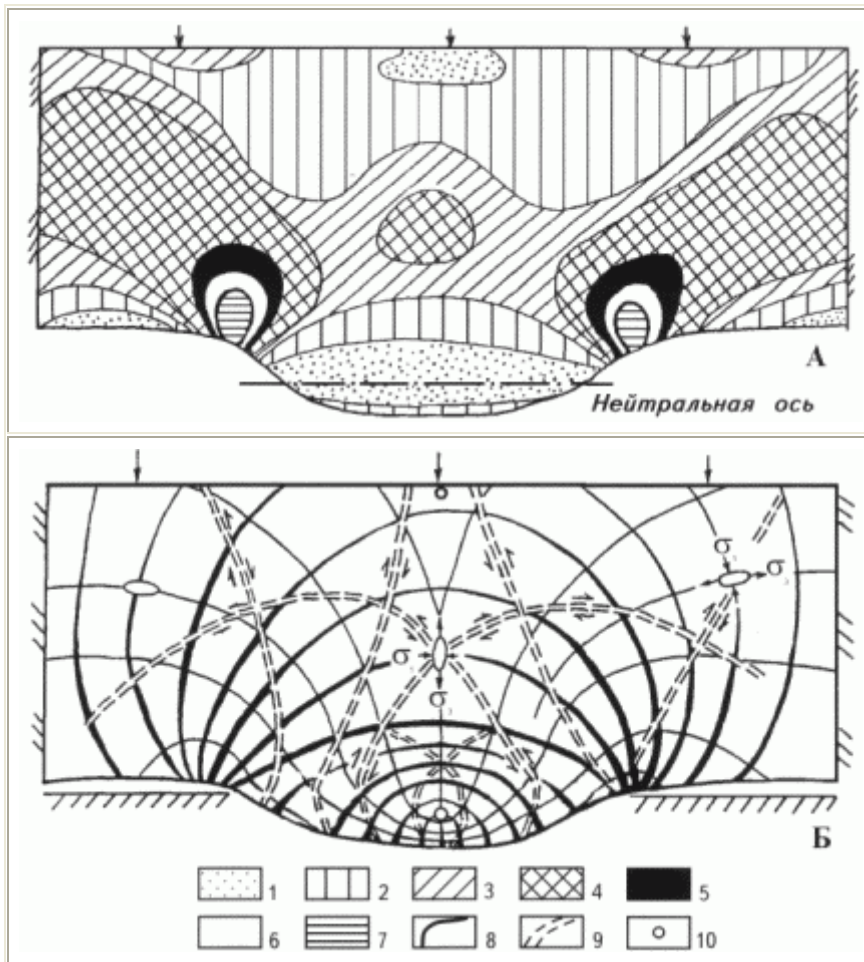
А – пологие антиклинальные и трапециевидные поднятия, флексуры (Кальчинское месторождение, СП 120/89-90, профиль 3); Б – среднеамплитудное антиклинальное поднятие (по сейсмоотражающему горизонту А) с образовавшейся над ним зоной разуплотнения или просадки (по горизонту Б и выше), на крыльях и за пределами поднятия отмечаются флексуры и сбрософлексуры (Кальчинское месторождение, СП 120/92, профиль 6); В – среднеамплитудное антиклинальное поднятие с образовавшейся над ним зоной разуплотнения или просадки в неокотских отложениях (Пальяновская площадь, СП 7/83-84, профиль 7); Г – малоамплитудное "бескорневое" поднятие, расположенное между двумя сред-неамплитудными поднятиями (Ем-Еговская площадь, участок сейсморазведочных работ 3D, профиль 6); Д – пологое (справа) и крутые (слева) среднеамплитудные антиклинальные поднятия с образовавшимися над ними зонами разуплотнения (просадки) в неокотских отложениях и малоамплитудные "бескорневые" поднятия между ними (Пальяновская площадь, СП 7/83-84, профиль 4)

Рис. 2. ОПТИКО-ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАДСБРОСОВОЙ ФЛЕКСУРЫ



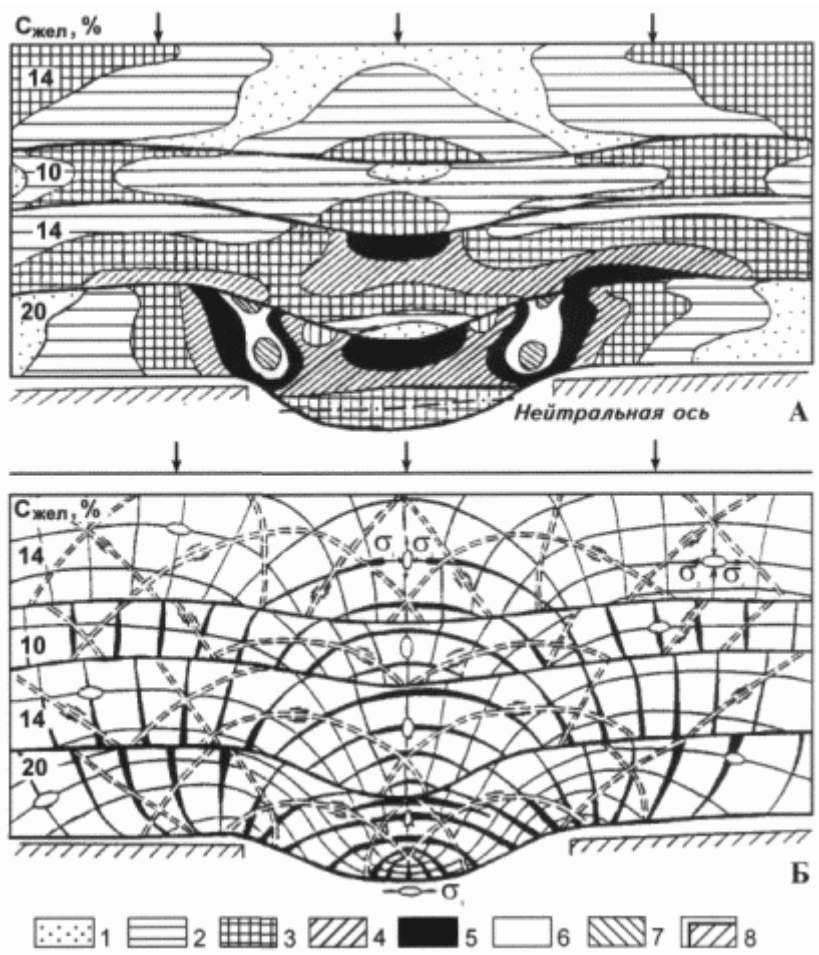
А – распределение касательных напряжений; Б – траектории нормальных напряжений и прогноз дислокаций; В – размещение динамических зон с прогнозируемыми направлениями миграции флюидов; 1 – зона сжатия; 2 – зоны дробления с трещинами сколового и отрывного типов; 3 – эллипсоид деформации; 4 – траектории нормальных напряжений и прогноз отрывных нарушений (утолщенные участки траекторий нормальных напряжений); 5 – траектории касательных напряжений, по которым возможно образование деформаций сколового типа; 6 – направление миграции флюидов и места возможного их скопления; порядок изохром указан цифрами

Рис. 3. ОДНОСЛОЙНАЯ ОДНОРОДНАЯ ОПТИКО-ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГИБА



А – распределение значений касательных напряжений; Б – ориентация траекторий нормальных и касательных напряжений; порядок изохром τ_{\max} : 1 – 0-3; 2 – 3-5; 3 – 5-6; 4 – 6-8; 5 – 8-9; 6 – 9-10; 7 – > 10 ; траектории напряжений: 8 – нормальных, 9 – касательных; 10 – изотропные точки, в которых $\tau_{\max} = 0$, а $\sigma_1 = \sigma_3$; разрывные дислокации прогнозируются в местах повышенных значений τ_{\max} (утолщенные траектории σ_1). Остальные усл. обозначения см. на рис. 2

Рис. 4. МНОГОСЛОЙНАЯ РАЗНОПЛОТНОСТНАЯ ОПТИКО-ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГИБА



А – распределение значений касательных напряжений; Б – траектории нормальных и касательных напряжений; порядок изохром τ_{\max} : 1 – 0-2; 2 – 2-4; 3 – 4-6; 4 – 6-8; 5 – 8-10; 6 – 10-12; 7 – >12; 8 – жесткий упор; разрывные дислокации прогнозируются в местах повышенных значений τ_{\max} (утолщенные траектории σ_1). Остальные усл. обозначения см. на рис. 2, 3

Рис. 5. ГРАФИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРТИКАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ В ОДНОСЛОЙНОЙ ОДНОРОДНОЙ (А) И МНОГОСЛОЙНОЙ РАЗНОПЛОТНОСТНОЙ (Б) ОПТИКО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ПРОГИБОВ В ИХ ОСЕВОЙ ЧАСТИ И ПЛЕЧАХ (см. рис. 3, 4)

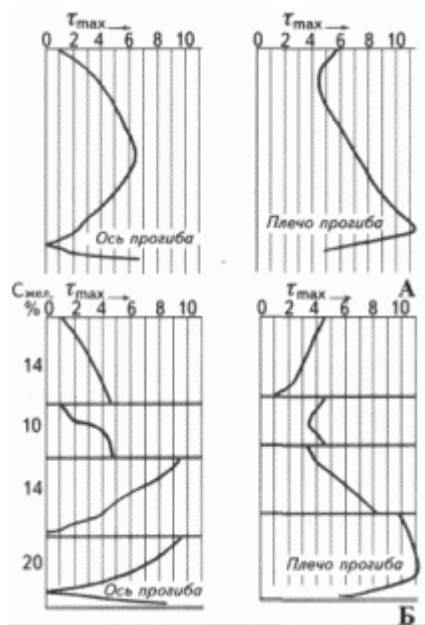
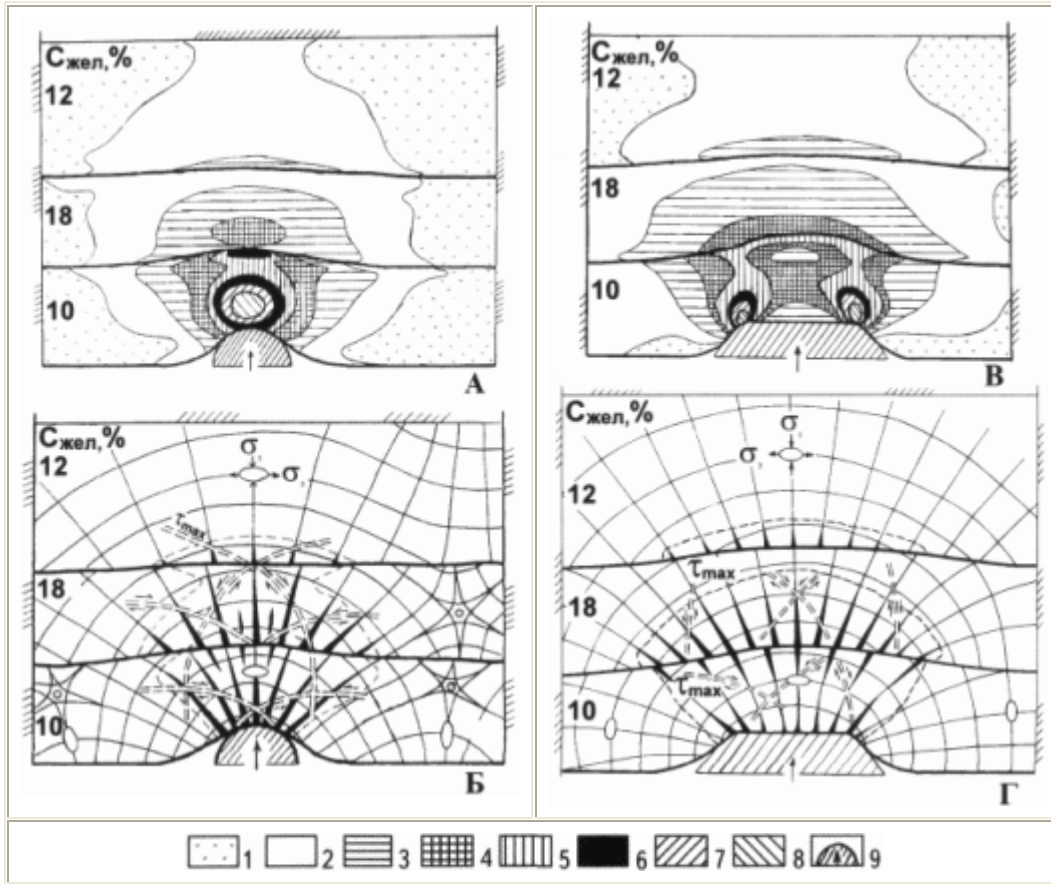
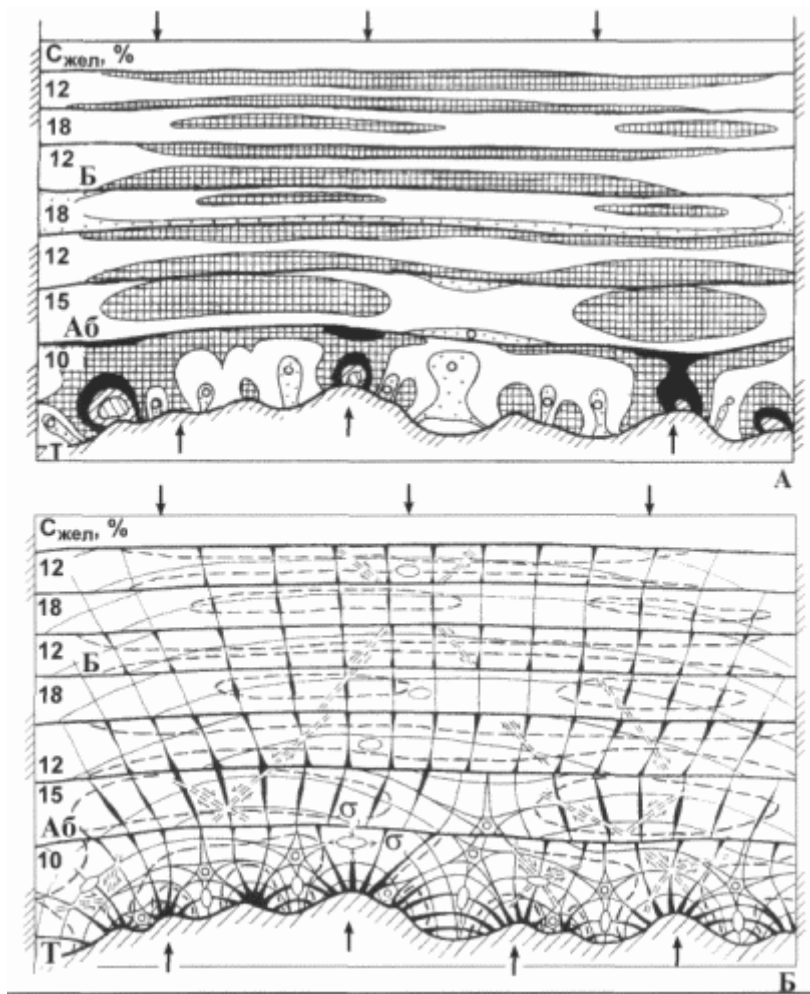


Рис. 6. ТРЕХСЛОЙНЫЕ РАЗНОПЛОТНОСТНЫЕ ОПТИКО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИММЕТРИЧНОГО АНТИКЛИНАЛЬНОГО (А, Б) И ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПЛОСКОВЕРШИННОГО (В, Г) ПОДНЯТИЙ



А, В – поля напряжений; Б, Г – траектории нормальных и касательных напряжений. Порядок изохром τ_{max} : 1 - 0-1; 2 - 1-3; 3 - 3-5; 4 - 5-7; 5 - 7-8; 6 - 8-9; 7 - 9-10; 8 - \rightarrow 10; 9 – форма штампа и направление его движения. Остальные усл. обозначения см. на рис. 2, 3

Рис. 7. МНОГОСЛОЙНАЯ РАЗНОПЛОТНОСТНАЯ ОПТИКО-ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ (построенная по сейсмодновременному разрезу 1 (участок 3D) Ем-Еговского месторождения в интервале верхнеюрских отложений)



А – распределение значений касательных напряжений; Б – траектории нормальных и касательных напряжений; кровля: Т – отложений тюменской свиты, Аб – осадков абалакской свиты, Б – битуминозных отложений баженовской свиты. Остальные усл. обозначения см. на рис. 2, 3, 6

Рис. 8. СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ, ПОСТРОЕННЫЕ ПО СЕЙСМОВРЕМЕННЫМ РАЗРЕЗАМ НАЛЬЧИКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (А) И ПАЛЪЯНОВСКОЙ ПЛОЩАДИ (Б)

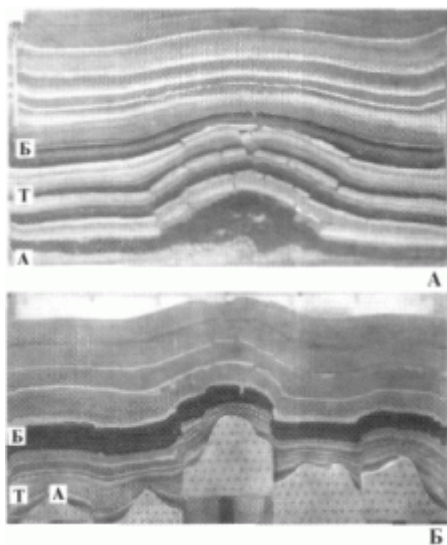
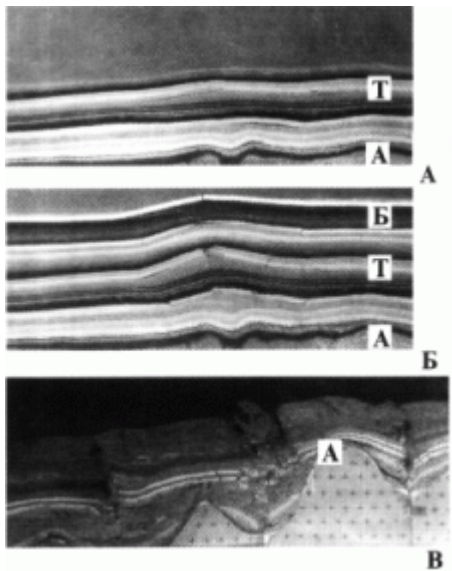
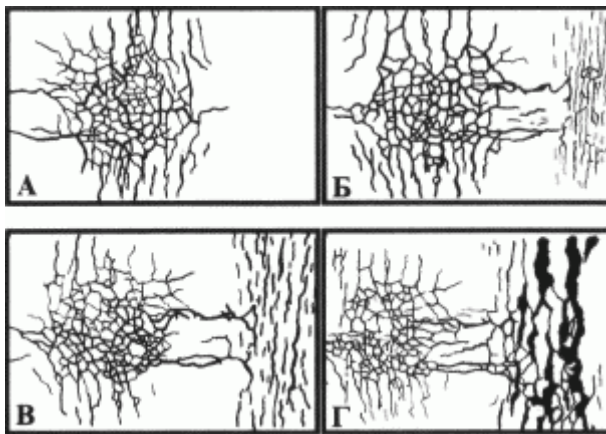


Рис. 9. СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ КАЛЫЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (А, Б) И ПАЛЪЯНОВСКОЙ ПЛОЩАДИ (В)



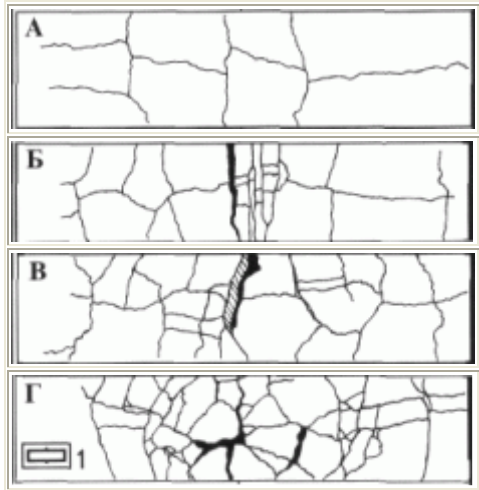
А – до начала интенсивного роста поднятий; Б – после их воздымания; В – отпрепарированные после окончания эксперимента "бескорневые" поднятия, возникшие между воздымавшимися блоками вследствие бокового нагнетания ими осадков

Рис. 10. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ОРИЕНТИРОВКА ТРЕЩИН НА ПОВЕРХНОСТИ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПАЛЪЯНОВСКОЙ ПЛОЩАДИ



Пояснения см. в тексте

Рис. 11. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЫВНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ В КОМПЕТЕНТНЫХ СЛОЯХ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ, ПОСТРОЕННОЙ ПО СЕЙСМОВРЕМЕННОМУ РАЗРЕЗУ 25 (СП 120/92) КАЛЬЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (вид сверху)



1 – положение осевой линии поднятия; слои: А – 44-й; Б – 22-й; В – 11-й; Г – 3-й