

ОАО «ТЮМЕНСКАЯ НЕФТЯНАЯ КОМПАНИЯ»

ОАО «ТЮМЕННЕФТЕГАЗ»



**Опыт повышения
Эффективности разработки
нефтяных месторождений
Западной Сибири**

(по материалам научно-практической конференции геологов,
посвященной памяти В. У. Литвакова)

г. Тюмень
апрель 1999 г.

М.Ю. Зубков ОАО «СибНИИНП»
П.М. Бондаренко ОИГГиМ (СО РАН)
Р.Н. Хасанов ЗАО «Компания Тура Петролеум»

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЗОН ПОВЫШЕННОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ КАЛЬЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Размещение поисково-разведочных и эксплуатационных скважин по результатам сейсморазведки осуществляется обычно на основе прогноза положительных структур, выявляемых по сейсмическим данным. Однако при этом не учитываются особенности распределения напряжений, существующих в осадочных толщах, слагающих рассматриваемую площадь, отсутствуют данные о положении зон сжатия и разуплотнения, что необходимо использовать при составлении адекватной геологической модели месторождения.

Тектонофизические методы моделирования, осуществляемые на основе имеющихся данных сейсморазведки, позволяют на качественном уровне спрогнозировать характер распределения различных видов напряжений в осадках, а также установить участки максимальной трещиноватости, ориентировку и протяженность трещин, возникающих за счет тектонических движений.

Кальчинская нефтеносная площадь характеризуется по данным сейсморазведки сочетанием протяженных ундулирующих поднятий с неглубоко погруженными впадинами. В наиболее поднятом гипсометрически валообразном поднятии в восточной части площади расположен основной разведочно-эксплуатационный участок, в пределах которого на коротких промежутках резко изменяется дебит скважин, вскрывающих данное поднятие по его оси, реже на крыльях.

На всех рассмотренных на данном участке 12 сейсмопрофилях в различной степени проявлены трещинные структуры сбросово-взбросового типа субвертикального залегания на уровне горизонтов К (палеоген), в сочетании с пологими поднятиями - в меловом комплексе (горизонты М, да), отражающими более крутые пликативные дислокации в юрском комплексе, особенно по горизонту А (рис. 1).

Почти полным отсутствием признаков разрывных дислокаций в записях сейсморазрезов отличается клиноформная часть нижнемелового комплекса (ачимовская пачка), в которой повторяются лишь сводовые изгибы нижележащих горизонтов. Для профилей субши-

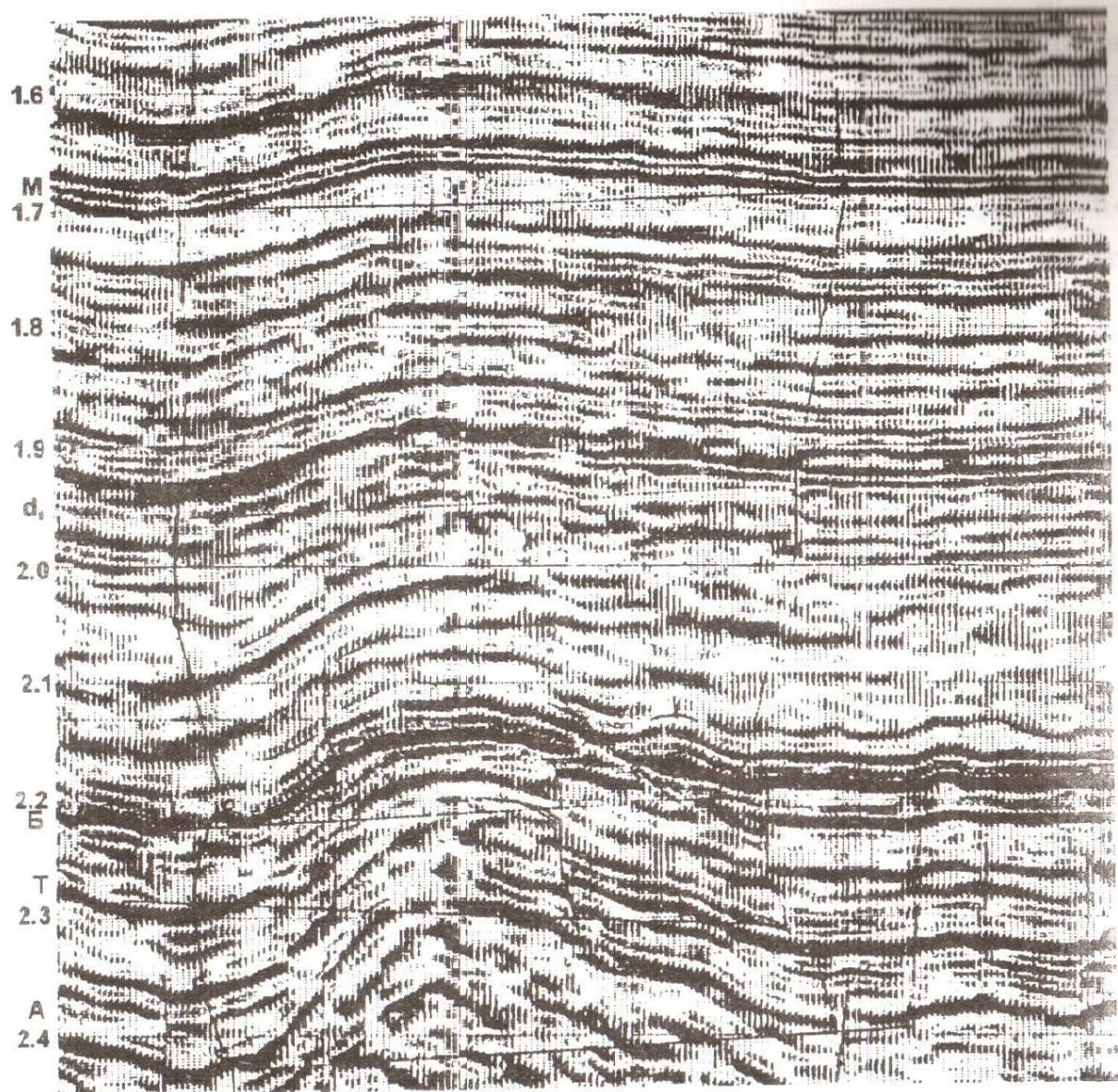


Рис. 1. Фрагмент сейсмопрофиля 93-28, проходящий через центральное поднятие Кальчинского месторождения

ротного направления - это юго-восточные их части, в которых клиноформные структуры отражений начинаются с юго-восточных склонов от основных поднятий и до этого залегавших параллельно главным отражающим горизонтам.

Для субмеридиональных профилей появление клиноформной структуры отражений также характерно для склонов поднятий, имеющих в данном случае диагональное (северо-северо-восточное) простирание осевых их зон. Это позволяет предполагать существование различных динамических условий формирования трещинных зон в продуктивной ачимовской пачке по обе стороны поднятий, на которых расположены и могут быть предсказаны места задания высокодебитных скважин, подобно положению скв. 68.

Для проверки такого предположения и выяснения общих условий трещинообразования предпринято тектонофизическое моделирование деформационных структур площади, выявляемых на выбранных в качестве опорных сейсмовременных разрезах 92-04, 92-25 и 90-13.

Моделирование проведено поляризационно-оптическим и тектоно-седиментационным методами.

Применение поляризационно-оптического метода исследования напряжений, возникающих при образовании деформационных структур, подобных по морфологии структурам, выявленным на сейсмо-временных разрезах Кальчинской площади, обусловлено следующими соображениями:

во-первых, при структурно-прогнозной интерпретации временных разрезов знание общих закономерностей возникновения и развития деформационных структур (складки, флексуры, прогибы, поднятия и т.п.), а также характера вторичных дислокаций в них совершенно необходимо для прогноза размещения динамических зон (сжатие, растяжение или разуплотнение, изгиб, сдвиг);

во-вторых, в существующих общих положениях структурной геологии, геотектоники, геодинамики, прикладной механики, морфо-кинематических классификациях деформационных структур недостаточно данных о внутреннем строении в них полей напряжений в момент образования, в процессе развития, деструкции или сочетания с другими структурами;

в-третьих, результаты тектонофизического моделирования, выявляя общие закономерности образования деформационных структур независимо от их масштаба, позволяют надежно проверять физическую правомерность геодинамических построений для конкретных площадей и обеспечивают наиболее полное использование имеющейся геолого-геофизической информации для прогноза перспективных участков вторичного (дислокационного) коллекто-рообразования без дополнительных затрат времени и средств.

Метод оптико-поляризационного моделирования основан на явлении оптической анизотропии в прозрачных аморфных телах, подвергнутых деформации, связанном с изменением двойного лучепреломления в зависимости от величины напряжений.

В качестве эквивалентного материала при оптическом моделировании используется 15-25% водные растворы желатина. Модели из желатина отливаются в специальных боксах, помещаются в нагружательную камеру и исследуются в плоско-поляризованном свете. Построение траекторий нормальных и касательных напряжений для каждого случая нагружения модели производилось на основе съемки изохром и изоклин, возникающих в напряженной

модели.

В качестве объекта исследования выбраны структуры облекания слоистыми толщами осадочного чехла выступов фундамента, по форме и размещению подобных его рельефу на выбранных в качестве опорных сейсморазрезах.

В качестве примера рассмотрим оптическую модель, выполненную по сейсмопрофилю 92-25 Кальчинского месторождения (рис. 2).

При вертикальной нагрузке на модель над поднятием концентрируются зоны высоких касательных напряжений, расположенные конформно контуру поднятия с отражением ступеней на его склонах и образующие над апикальной его частью высокий овал, превышающий амплитуду самого поднятия (рис. 2 а).

Положение, форма и порядок изохром этого овала изменяется в зависимости от величины нагрузки на модель. При вертикальной нагрузке 2 кг на площадь модели 55 см^2 давление в материале модели составляет $0.036 \text{ кг}/\text{см}^2$, что при вертикальном масштабе модели равном 2:10 000 соответствует литостатическому давлению на глубине залегания фундамента в рассматриваемом районе примерно $650-700 \text{ кг}/\text{см}^2$.

Анализ распределения касательных напряжений (рис. 2 а) и траекторий нормальных напряжений (рис. 2 б, в) в рассматриваемой модели показал, что в присводовой и крыльевых частях центрального поднятия возможно формирование системы субвертикальных трещин отрыва. Напротив, в наиболее погруженных частях у основания поднятия вследствие переориентации траекторий нормальных напряжений на 90 градусов (под изотропными точками) возможно возникновение трещин отслоения с субгоризонтальной ориентацией. Зоны разуплотнения или вторичного коллекторообразования описываемой ориентировки могут возникать в базальных тюменских отложениях палеорусел или делювиально-пролювиальных склоновых отложений.

В целом, проведенный анализ показал, что из характера распределения траекторий нормальных напряжений, в рассматриваемой модели можно выделить две системы трещиноватости.

Первая, имеющая субвертикальную ориентацию, связана с поднятием и его крыльями, причем по мере приближения к куполу поднятия от его крыльев увеличивается расстояние (высота), на которую проникают трещины в осадочный чехол, захватывая над апикальной частью поднятия верхи мегионской свиты (рис. 2 б).

Вторая, ориентированная субгоризонтально, приурочена к погруженным прифундаментным участкам, расположенным у основания поднятия (рис. 2 в). Описываемый тип вторичных коллекторов может быть связан с базальными тюменскими

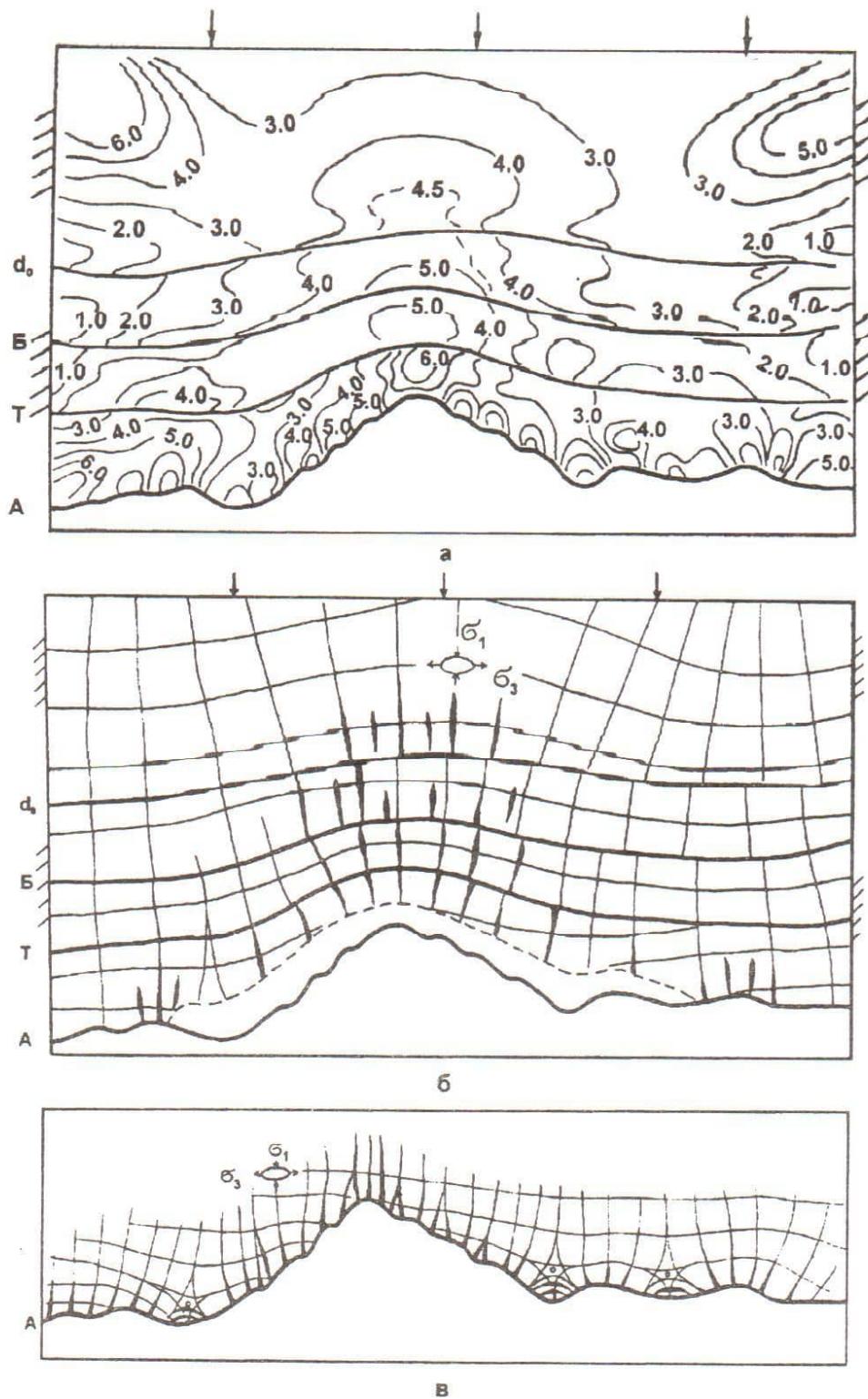


Рис. 2. Распределение касательных (а) и траектории нормальных (б, в) напряжений в слоистой модели центрального поднятия по сейсмопрофилю 92-25 Кальчинского месторождения

Величина касательных напряжений определена порядком изохроматических полос в оптической модели при вертикальной нагрузке над жестким штампом профиля, имитирующем поверхность фундамента (А); расширенные траектории, указывают возможные зоны трещиноватости в местах повышенных касательных напряжений; на среднем рисунке (б) пунктиром очерчена зона детализации траекторий нормальных напряжений над изгибами штампа по поверхности А, представленная на нижнем рисунке (в).

отложениями.

Резюмируя полученные в результате оптико-поляризационного моделирования данные, можно сделать следующие выводы:

- 1 Над выступами фундамента концентрируются очаги максимальных касательных напряжений и формируется зона веерообразных субвертикальных разрывных нарушений (трещин).
2. При близком расположении выступов, обеспечивающих взаимодействие (слияние) очагов касательных напряжений в разделяющих их седловинах (прогибах, грабенах) возникают зоны вертикального растяжения (разуплотнение, расслоение, субгоризонтальная трещиноватость), представляющие потенциальные ловушки в базальных тюменских отложениях.
3. Динамическое влияние неровностей рельефа фундамента отражается в квазиоднородной среде чехла не более чем на один размер относительной амплитуды (перепада) выступов и впадин (принцип Сен-Венана), в дальнейшем поднятие действует по усредненному профилю.
4. Зона динамического влияния общего поднятия или его элементов экранируется межслоевыми границами раздела между слоями различной компетентности (прочности, упругости и т.п.).

Параллельно с оптическими моделями, которые позволяют изучать распределение напряжений и прогнозировать положение и направление дислокаций, проводилось тектоно-седиментационное моделирование самих дислокаций в многослойных толщах, составленных из осаждаемых в водной среде слоев различной плотности, прочности и состава.

Самые пластичные слои представлены глинами, менее пластичные - алевритами и песками, иногда с добавлением цемента, имитирующего карбонатизацию последних и, наконец, самые прочные пласти моделировались чистым цементом и алебастром, соответствующим карбонатным породам в приготовленных моделях.

На основе проведенного анализа структурных соотношений и прочностных свойств пород юрского и мелового возраста были построены упрощенные модели разрезов Кальчинского месторождения по упомянутым трем сейсмопрофилям, в пределах которых наблюдаются все основные структурные особенности, характерные для рассматриваемой площади.

Поднятие блоков моделировалось путем расширения вмонтированных в основание камеры баллонов, нагнетаемых сжатым воздухом.

Основной целью проведенного моделирования являлось обнаружение наиболее общих закономерностей в процессах формирования различных типов пустотности, возникающей вследствие роста тектонических поднятий. При этом обращалось внимание на размеры поднятий, амплитуду и последовательность их роста.

В структурном отношении выделялись три основных тектонических элемента: купольная или верхняя часть поднятия, его крыльевые части, а также межблоковые промежутки.

Рассмотрим отложение осадков и развитие дислокаций в процессе роста поднятий на примере модели, построенной по сейсмопрофилю 92-25.

На первой стадии моделирования отлагались осадки с первого по тринадцатый слой, моделирующие отложения тюменской свиты (рис. 3 а). После этого в соответствии с полученными ранее результатами палеотектонической реконструкции производилось моделирование роста поднятия на соответствующую амплитуду (рис. 3 б).

В результате роста центрального поднятия на поверхности модели над купольной частью поднятия сформировался широкий и довольно глубокий грабен, ограниченный по бортам сериями мелких сбросов, ориентированных параллельно его бортам.

На вертикальном разрезе в результате роста поднятия сформировалась антиклинальная структура на крыльях и в присводовой части которой в компетентных слоях (3-ем, 6-ом и 11-ом) возникли разрывные нарушения типа сбросов и надвигов (см. рис. 3 б). В замковой части антиклинали сформировался грабен, описанный выше при характеристике поверхностной части модели.

Следует обратить внимание на впервые обнаруженный нами феномен увеличения мощности пластичных слоев над растущим поднятием, наблюдаемый особенно хорошо под компетентными слоями в местах их нарушения и смещения (сравни рис. 2 а и б).

На второй стадии осуществлялось моделирование роста структур во время накопления осадков, имитирующих слои абалакской и баженовской свит. С этой целью были отложены слои с 14-го по 22-ой, причем самый верхний (22-ой) слой соответствует базальному карбонатному пласту подачимовской пачки (рис. 3 в).

Осаждение слоев, имитирующих отложения абалакской и баженовской свит, привело к заметному выравниванию рельефа поверхности, возникшего в результате роста поднятия на предыдущей стадии.

Следует особо отметить явление образования микротурбидитного (сусpenзионного) потока во время отложения осадков,

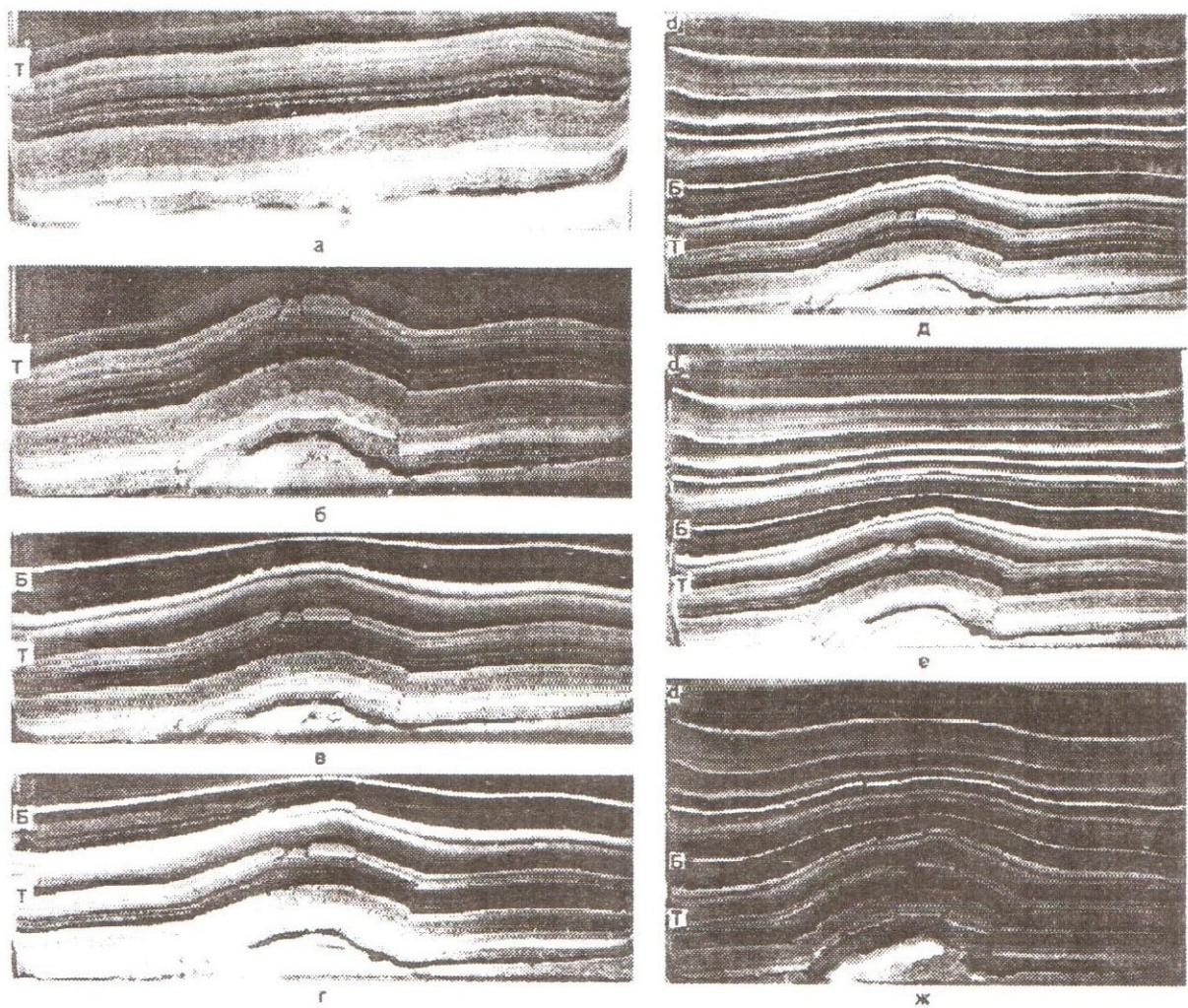


Рис. 3. Стадии развития тектоно-седиментационной модели центрального поднятия Кальчинского месторождения (по сейсмопрофилю 92-25)

а - на момент окончания отложения осадков тюменской свиты;
 б - тоже самое после роста поднятия;
 в - на момент завершения отложения осадков баженовской свиты;
 г - тоже самое после роста поднятия;
 д - на момент окончания отложения осадков ачимовской пачки;
 е - тоже самое после роста поднятия;
 ж - после роста поднятия, моделирующего палеоген-неогеновую тектоническую активизацию.

моделирующих аномальный разрез баженовской свиты и механизм отложения клиноформенных осадков ачимовской свиты, о чем более подробно будет сказано ниже (рис. 3 в).

После этого в соответствии с полученными ранее результатами палеотектонической реконструкции осуществлялось моделирование роста поднятий на соответствующую амплитуду (рис. 3 г).

После роста поднятия на поверхности модели наблюдалось увеличение раскрытия трещин, описанных выше.

На боковой поверхности модели после небольшого роста центрального блока наблюдаются следующие изменения:

- 1) увеличилась раскрытость существовавших трещин и амплитуда их смещения вдоль компетентных слоев;
- 2) в приразломных зонах в поднадвиговых участках образовались короткие субгоризонтальные трещины;
- 3) по направлению от подошвы к кровельной части модели наблюдается постепенное выполаживание разрывов от очень крутых почти вертикальных до более пологих надвигов, под которыми и формируются отмеченные выше короткие субгоризонтальные трещины;
- 4) в апикальной части поднятия в самой кровле абалакской свиты (17-ый слой) наблюдается образование горста, ограниченного справа и слева взбросами;
- 5) увеличилась толщина надвинутых на переднюю стенку модели пластичных слоев за счет бокового давления от растущего поднятия.

На третьей стадии осуществлялось моделирование роста структур в интервал времени накопления отложений ачимовской пачки и группы пластов БВ, то есть от начала берриаса до позднего валанжина. С этой целью на базальный карбонатный пласт подачимовской пачки были отложены слои с 23-го по 45-ый (рис. 3 д).

В течение данного интервала времени происходило заметное выравнивание рельефа до субгоризонтального.

После этого в соответствии с полученными результатами палеотектонической реконструкции осуществлено моделирование роста поднятий на соответствующую амплитуду.

На вертикальном разрезе модели рост поднятия вызвал усложнение его взбросово-горстовой структуры в слоях, отвечающих тюменской свите, разобщение фрагментов компетентных слоев по прежним трещинам отрыва, увеличение амплитуды бортовых взбросов, особенно с правой стороны, а также возникновение послойных трещин растяжения в приразломных участках (см. рис. 3 е).

На четвертой стадии осуществлялось моделирование роста структур в интервале времени от позднего валанжина до палеогена включительно (рис. 3 ж).

Центральное поднятие в рассматриваемый интервал времени развивалось довольно активно. В результате роста поднятия на поверхности модели сформировались две главные системы субпараллельных трещин, ориентированных перпендикулярно друг к другу в сводовой части поднятия.

На вертикальном разрезе модели наблюдаются следующие изменения:

- 1) произошло дальнейшее раздвижение компетентных блоков с

увеличением раскрытиости трещин между ними и амплитуды их смещения относительно друг друга;

2) появились новые и расширились старые субгоризонтальные трещины под 11-ым прочным слоем в верхней части тюменской свиты;

3) образовались субвертикальные трещины растяжения как в верхних компетентных слоях, имитирующих неокомские отложения, так и в подстилающих их отложениях, причем интенсивность дробления увеличивается в направлении сверху вниз (рис. 3 ж).

Отмечавшееся выше явление надвигания осадков на переднюю стенку седиментационной камеры вследствие бокового давления от растущего поднятия еще более контрастно наблюдалось при моделировании роста двух близкорасположенных поднятий (рис. 4 а, б). На фотографиях хорошо видно, что в пространстве между поднятиями мощность осадков увеличилась примерно 2-3 раза, причем над обоими малоамплитудными поднятиями сформировалось единое крупное поднятие (рис. 4 б).

В процессе седиментационного моделирования удалось смоделировать в миниатюре процесс скатывания турбидитного или суспензионного потока по наклонной поверхности подстилающих осадков, о чем упоминалось выше. В результате этого процесса в месте его торможения сформировалась опрокинутая складка (рис. 4 в).

Кроме того в подстилающем слое, по которому осуществлялось движение суспензионного потока, образовались застывшие волны (рис. 4 г, д). Вследствие формирования волн произошло перераспределение осадочного материала, что привело к увеличению мощности осадков в волнообразных телах и уменьшению исходной толщины в соседних с ними участках (рис. 4 г).

Очевидно, что наблюдаемые волнообразные увеличения временной мощности отражающих горизонтов и их локальные уширения на сейсмовременных разрезах могут быть хотя бы отчасти объяснены наблюдавшимися в седиментационных моделях явлениями.

Несомненный интерес представляет анализ характера распределения вертикальной трещиноватости в пластах от самых нижних до верхних отложений, составляющих седиментационные модели. В качестве примера рассмотрим закономерности изменения ориентировки, плотности и протяженности субвертикальных трещин, образовавшихся в компетентных слоях модели, построенной по сейсмопрофилю 92-25 (рис. 5).

Анализ распределения трещин показал, что по направлению снизу вверх изменяется пространственная ориентировка разрывных нарушений. Так если в нижних слоях распределение дислокаций напоминает классическую структуру «разбитой тарелки» с радиаль-

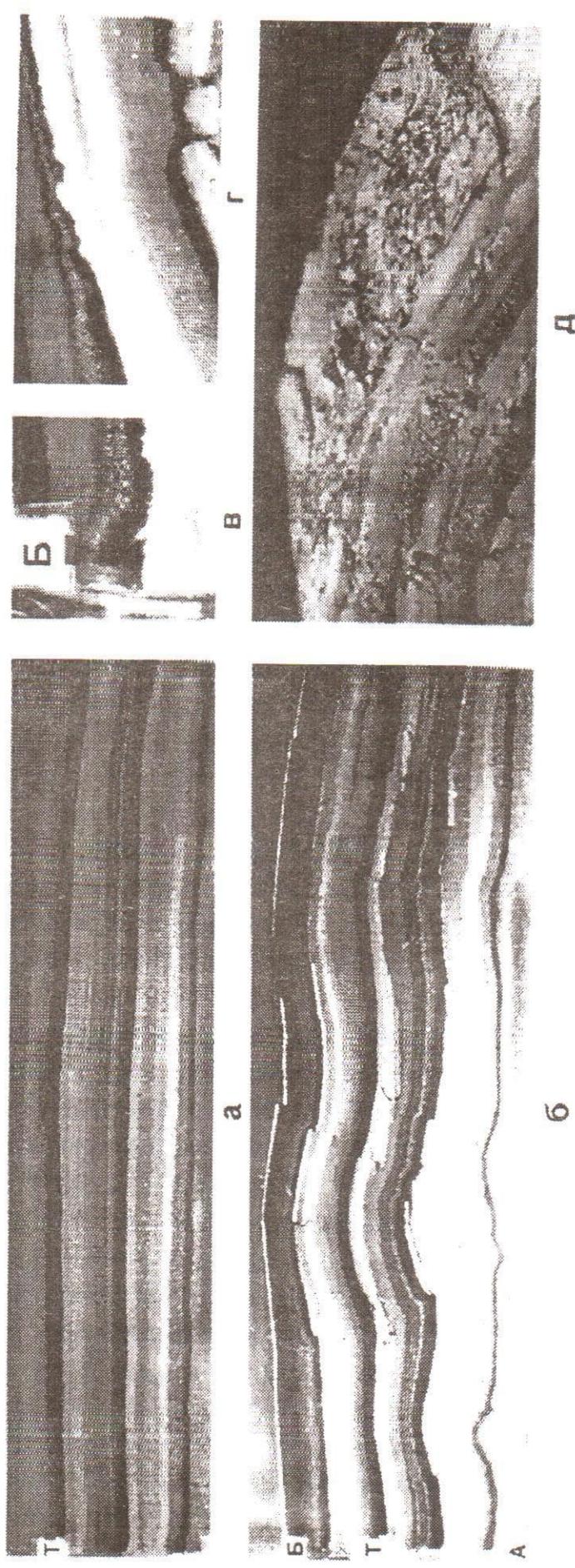


Рис. 4. Изменение мощности осадков в тектоно-седиментационной модели по сейсмопрофилю 92-4 Кальчинского месторождения вследствие бокового давления на них растущими поднятиями (а - до, б - после роста поднятий), а также возможновение опрокинутой складки (в) и застывших волн в осадках до (г) и после (д) их пренарации, которые образовались вследствие скатывания супесционного потока с плодого центрального потока 92-25 того же месторождения

ной системой трещин и максимальной их раскрытистью в присводовой части поднятия (3-ий и 6-ой слои), то примерно на 11-ом слое происходит смена субрадиальной ориентировки трещин на субперпендикулярную: одни трещины ориентируются поперек модели, а другие вдоль ее длинной оси, причем первые заметно многочисленнее вторых, что связано с большими по величине растягивающими напряжениями поперек модели, чем вдоль нее.

Как правило, в направлении снизу вверх уменьшается степень дробления компетентных слоев и как следствие растут размеры блоков, на которые разделяются слои возникающими трещинами. В том же направлении (снизу вверх) уменьшается раскрытисть трещин (рис. 5).

Размеры блоков, на которые разделяются возникающими трещинами слои, зависят не только от величины растягивающих напряжений, но и от их мощности - чем толще слой, тем более крупные блоки он разбивается.

Резюмируя результаты исследований тектоно-седиментационного моделирования, можно сделать следующие выводы:

1. В результате роста поднятий в моделях образуются две различно ориентированные системы трещин - субгоризонтальная и субвертикальная.
2. Субгоризонтальные трещины приурочены главным образом к крыльям поднятий, реже к купольным частям, а также к зонам инверсионных движений (просадки) и располагаются под компетентными пластами.
3. Субвертикальная трещиноватость развивается в компетентных пластах, разрастаясь снизу вверх по мере воздымания поднятий.
4. Чаще всего субвертикальные трещины приурочены к купольной части поднятий, ограничивая зону разуплотнения серией грабенов и к его крыльям.
5. Рост поднятий в нижней части модели приводит к дроблению и перемещению вверх компетентных слоев без изменения их первоначальной мощности и нагнетанию на переднюю часть седиментационной камеры пластичных и сыпучих осадков за счет бокового давления, распространяющегося от растущих поднятий.
- Характер распределения вертикальных трещин, возникающих в компетентных слоях, в плане изменяется в направлении снизу вверх от субрадиального до субперпендикулярного, меняется их количество, степень раскрытисти и амплитуды смещений вдоль плоскостей разрыва.
7. Скатывание песчано-алевритового материала по неуплотненному водонасыщенному осадку с образованием в нем опрокинутой складки и застывших волн может служить моделью формирования и

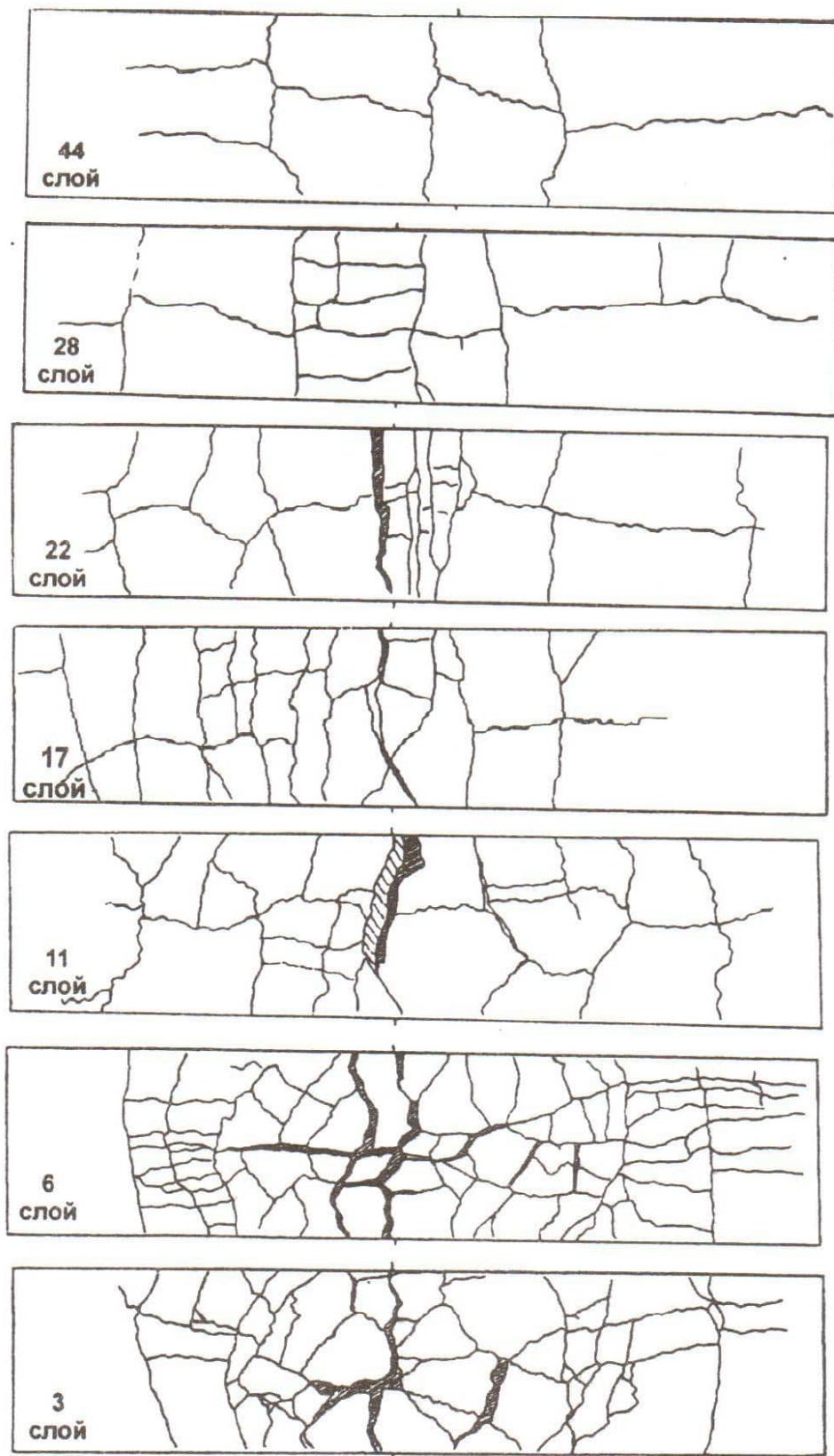


Рис. 5. Распределение разрывных дислокаций в компетентных слоях модели, построенной по сейсмопрофилю 92-25 Кальчинского месторождения (вид сверху)

Штрихом на боковой поверхности отпрепарированных слоев показано положение осевой линии поднятия, слева внизу цифрами указаны порядковые номера слоев по направлению снизу вверх.



1 2 3 4 5 6 7 8

Рис. 6. Структурно-прогнозная схема размещения перспективных зон Кальчинского месторождения по подошве ачимовской пачки

Условные обозначения: 1 - разломные границы блоков: а - установленные на профилях, б - предполагаемые между профилями, в - сопровождающиеся флексурами, г - надвигами; 2 - внутриблоковые нарушения: а - крутопадающие разломы, б - надвиги, в - флексурные зоны; 3 - осевые зоны: а - максимальных поднятий, б - поднятий средней ступени, в - прогибов; 4 - локальные горстовые поднятия; 5 - участки нарушения сейсмозаписи на разрезах, увеличение мощности слоев, наличие включений (предположительно литологические неоднородности, возможные коллекторы); 6 - номера поднятых блоков (по убыванию высот); 7 - перспективные участки, рекомендуемые для детализации сейсморазведки и моделирования; 8 - перспективные участки, рекомендуемые для разведочного бурения: а - первой, б - второй, в - третьей очереди.

перемещения супензионных потоков как в отложениях баженовской свиты с аномальным строением, так и ачимовских клиноформ. На основе данных, полученных в результате тектонофизического моделирования по выбранным сейсмовременных профилям, а также на основе анализа всех имевшихся сейсмоданных построена структурно-прогнозная схема размещения перспективных зон в нижней части ачимовской пачки Кальчинского месторождения (рис. 6). На ней представлен разломно-блочный вариант строения Кальчинской структуры с выделенными границами между блоками различных порядков, осевыми зонами максимальных поднятий и прогибов. Намечены участки, рекомендуемые для детализационных сейсморазведочных работ и дальнейшего тектонофизического моделирования. Кроме того обозначены перспективные участки, рекомендуемые для разведочного бурения (рис. 6).

Перспективные участки, рекомендуемые для детализации сейсморазведки и моделирования; 8 - перспективные участки, рекомендуемые для разведочного бурения: а - первой, б - второй , в - третьей очереди.