

УДК 550.34.013.4:553.98.061.4

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕКТОНИКИ В НЕФТЯНОЙ ГЕОЛОГИИ НА ПРИМЕРАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© М.Ю. Зубков

ООО “Западно-Сибирский Геологический Центр”, Тюмень, 625002, ул. Сургутская, д. 11, корп. 4/9  
e.mail: zubkovtyu@mail.ru

Поступила в редакцию 3.10.2018 г.; после исправления 29.01.2019 г.; принята в печать 28.01.2019 г.

На основе анализа сейсмических разрезов, полученных в пределах различных площадей и месторождений, расположенных в Западно-Сибирском нефтегазоносном бассейне, выбраны наиболее распространенные типы антиклинальных и взбросово-надвиговых тектонических структур, моделирование формирования которых осуществлялось с помощью двух методов: оптико-поляризационного и тектоно-седиментационного. Исследования, проведенные оптико-поляризационным методом, позволили изучить характер напряжений, возникающих в желатиновых моделях осадочного чехла вследствие роста антиклинальных блоков и также взбросово-надвиговых дислокаций. По уровню касательных напряжений и ориентации изоклин в оптических моделях спрогнозированы зоны вероятной тектоногенной трещиноватости и направления трещин в этих участках.

2D тектоно-седиментационное моделирование позволило объяснить механизм образования “бескорневых” поднятий, зон просадки или разуплотнения в осадках, принцип работы тектонического “насоса”, получить зависимости между размерами и формой поднятий, плотностью и раскрытостью трещин, величиной трещинной “пористости”, формирующихся над ними, а также латеральными размерами зон тектоногенной трещиноватости. 3D тектоно-седиментационное моделирование позволило установить связь гидрографии земной поверхности моделируемой площади и зон разуплотнения, вышедших на поверхность моделей на этом же участке. Эти зоны разуплотнения могут служить поисковым признаком при разведке высокопродуктивных зон в породах-коллекторах, содержащих углеводородные залежи.

**Ключевые слова:** оптико-поляризационное и тектоно-седиментационное моделирование, прогноз зон тектоногенной трещиноватости

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019392-109>

### ВВЕДЕНИЕ

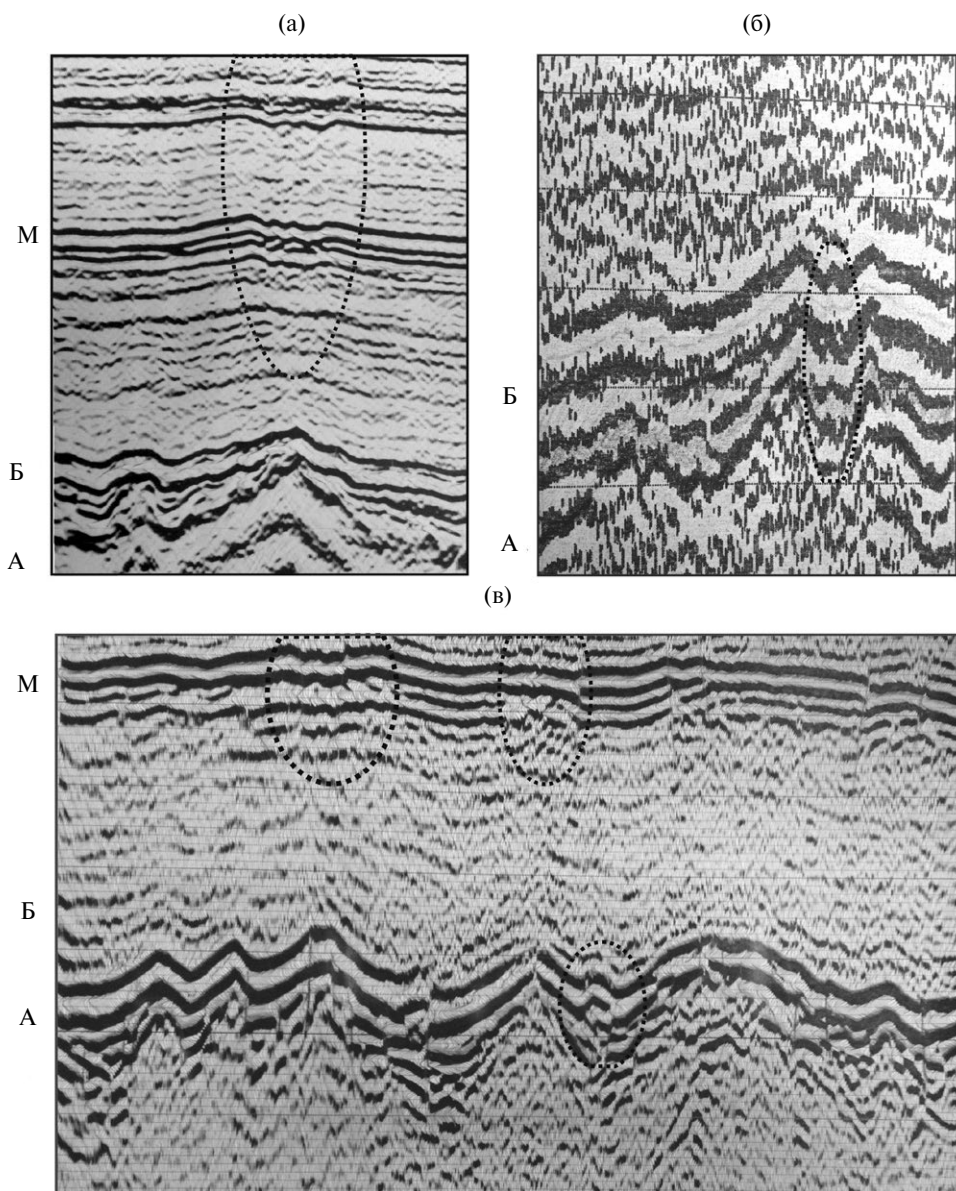
Для прогноза нефтегазоносности новых территорий и в пределах уже открытых месторождений нефтяниками широко используются методы сейсморазведки. При этом обычно по результатам сейсморазведочных работ, главным образом, выделяются антиклинальные структуры, в пределах которых возможно открытие углеводородных (УВ) залежей. Однако в последнее время специалисты, занимающиеся обработкой сейсмических данных, стали все больше внимания уделять возможности прогнозирования на основе этих данных трещиноватости в различных типах пород [9, 16–21]. Этот интерес обусловлен следующими причинами:

- трещины, присутствующие в любых типах пород резко увеличивают их проницаемость, а также, пусть в незначительной степени, но и их емкостные свойства;
- от ориентации трещин в продуктивном интервале зависит построение корректной технологической схемы разработки, включающей рациональное

размещение нагнетательных и добывающих скважин;

- при планировании бурения горизонтальных скважин также необходимо знать ориентацию трещин в пространстве, чтобы их ствол был расположен в перпендикулярном, а не параллельном направлении по отношению к ориентации трещин;
- при прогнозе мест расположения вторичных (эпигенетических) коллекторов, которые образуются под действием тектонических деформаций и которые полностью отсутствовали в толщах, не подвергавшихся до этого тектоническому и/или тектоно-гидротермальному воздействию.

Для решения некоторых из перечисленных выше задач используются различные достаточно сложные математические модели и созданные на их основе программы для обработки сейсмических данных [9, 16–19, 21]. При этом эти модели не учитывают характер распределения напряжений, возникающих при росте тектонических структур различной формы, расположение зон



**Рис. 1.** Сейсмические срезы с зонами разуплотнения осадков над антиклинальными структурами (а), (в) и бескорневыми поднятиями (б), (в).

Площади: (а), (в) – Пальяновская, (б) – Ем-Еговская.

Показаны (точечная линия) зоны разуплотнения (а), (в); бескорневые поднятия (б), (в).

Отражающие горизонты: А – кровля фундамента, Б – кровля баженовской свиты, М – кровля неокотских отложений.

сжатия и растяжения, закономерностей смещения осадков в процессе роста поднятий и многое другое, без чего невозможен корректный прогноз размещения зон трещиноватости, их размеров, ориентации и степени раскрытости трещин, присутствующих в них.

Решение этих задач возможно с помощью методов экспериментальной тектоники, которая пока не имеет широкого применения в нефтяной геологии. Поэтому целью статьи является на примерах месторождений Западной Сибири продемонстрировать возможности тектонофизического моделирова-

ния, проводимого на основе данных сейсморазведки при прогнозе зон тектоногенной трещиноватости, в пределах которых возможно получение высокодебитных притоков нефти и газа.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АППАРАТУРА

В качестве основы для моделирования выбирались основные типы тектонических структур, наблюдаемых в осадочном чехле Западно-Сибирского бассейна в пределах различных месторождений и площадей, которые выделялись по результатам

сейсморазведочных работ, для чего, в свою очередь, использовались сейсмодновременные разрезы и структурные карты, построенные по главным отражающим горизонтам.

Анализ сейсмических данных показал, что в осадочном чехле выделяются разнообразные по форме антиклинальные структуры от очень пологих, иногда трапецевидных до остроугольных, напоминающих в разрезе вулканическую постройку или “подземный вулкан” (рис. 1). Над вершинами наиболее высокоамплитудных поднятий часто наблюдаются своеобразные зоны просадки осадков, которые, как мы увидим далее, являются участками их разуплотнения (см. рис. 1а, в). Кроме того, между близко расположенными антиклинальными блоками нередко отмечаются “бескорневые” поднятия, которые отсутствуют в фундаменте и появляются лишь в подошвенной части осадочного чехла (см. рис. 1, б, в). Механизм их формирования также будет рассмотрен позднее.

Сейсмодновременные разрезы использовались при двумерном моделировании формирования антиклинальных структур. Для трехмерного моделирования применялись объемные модели поднятий, которые строились с использованием структурных карт по отражающему горизонту А (кровля фундамента, на котором залегает осадочный чехол).

При моделировании в качестве основного признака подобия между моделью и природным объектом использовалось их геометрическое сходство друг с другом [1–7, 10–12, 15].

С целью прогноза перспективных зон в осадочных отложениях использовались два метода тектонофизического моделирования: поляризационно-оптический и тектоно-седиментационный.

### Оптический метод исследования напряжений

Оптический метод исследования напряжений основан на явлении двулучепреломления в прозрачных аморфных оптически активных материалах (желатин, оргстекло, эпоксидные смолы), подвергнутых деформации. При этом изменение двойного лучепреломления в таких телах находится в прямой зависимости от величины напряжений, возникающих в деформируемом теле [1–7, 10–15].

Точность оптического метода исключительно велика, и поэтому он широко применяется в технике при исследованиях сложных систем напряжений, расчеты которых оказываются затруднительными или невозможными. Также трудно получить полное представление о распределении полей напряжений в геологических структурах на основе умозрительных построений, чем широко пользуются геологи в практике своих исследований, что, к сожалению, нередко приводит к грубым ошибкам. Расчеты полей напряжений даже в случае простых геологических структур оказываются очень сложными и дают неоднозначные результаты. Кроме того, этот метод обеспечивает относительно строгое соблюдение условий подо-

бия для упругой области деформаций и правомерность сопоставления модели с реальным объектом в тех пределах, в каких отдельные геологические структуры в различных стадиях их развития можно считать односвязными телами. В этом случае распределение напряжений в них не зависит от величины и физических свойств сравниваемых объектов, а достаточно строго определяется аналогией внешнего нагружения и геометрическим подобием структурных форм [1–7, 10–15].

В качестве эквивалентного материала при оптическом моделировании использовались 12–20% водно-глицериновые растворы желатина (упругие и упруго-хрупкие тела). Модели отливались в специальных боксах, затем помещались в нагружаемую камеру и исследовались в простейших поляризационно-оптических системах, позволяющих изучать модели размером до 300 мм.

Построение траекторий нормальных и касательных напряжений производилось на основе съемки изохром и изоклин, возникающих в нагруженной модели в результате двулучепреломления [1–7, 10–12, 15]. Его величина, характеризующая разностью хода лучей  $R$ , зависит от разности показателей преломления  $n$  и толщины модели  $d$ :

$$R = (n_1 - n_3) \cdot d \quad (1)$$

и связывается с разностью главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  следующим уравнением:

$$R = B \sigma \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot d, \quad (2)$$

где  $B$  – коэффициент оптической активности материала по напряжению.

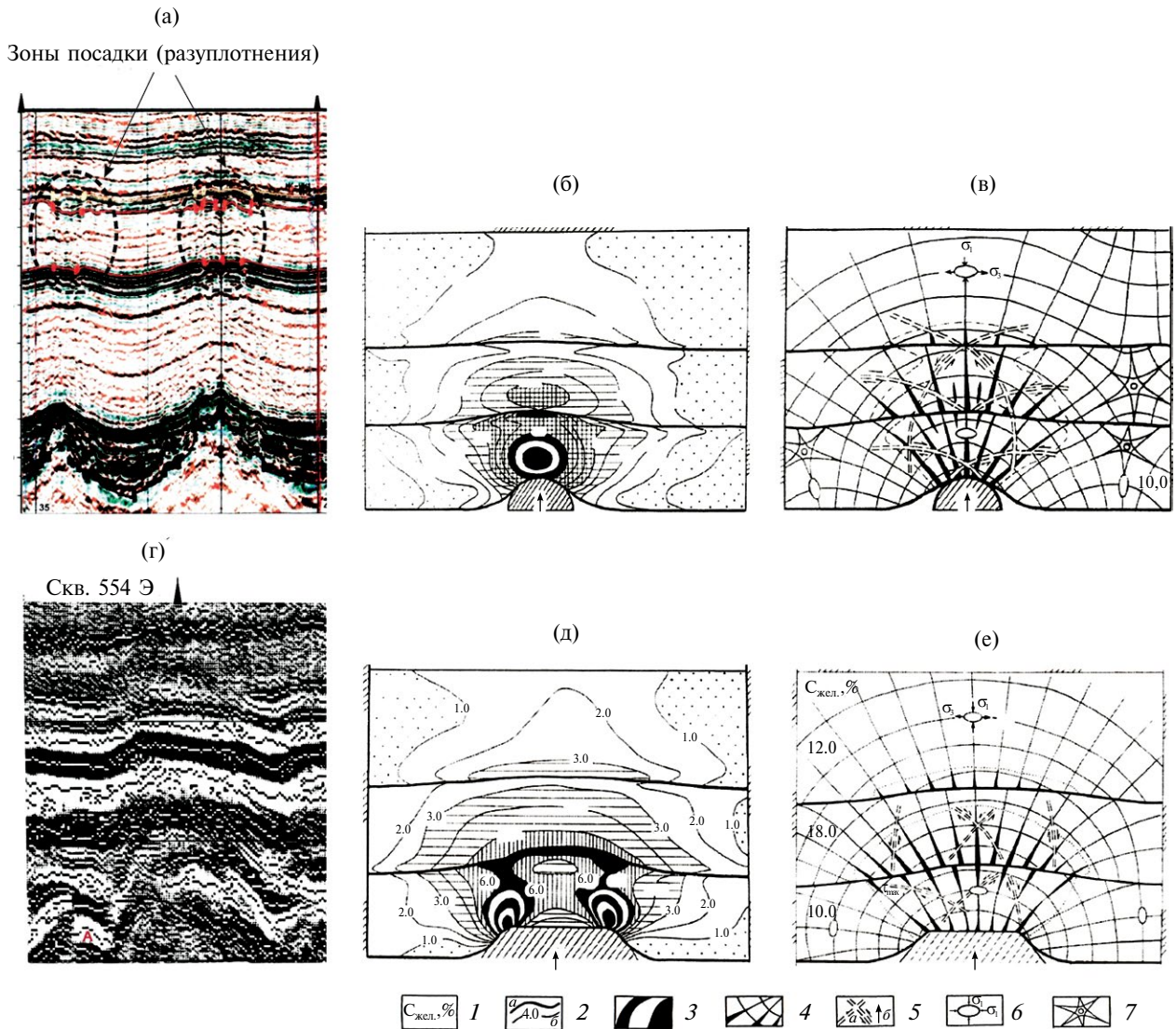
В итоге приходим к полному соответствию разности показателей преломления разности нормальных напряжений:

$$(n_1 - n_3) = B \sigma \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3)$$

Таким образом, изохроматические полосы отвечают равным значениям разности показателей преломления  $(n_1 - n_3)$ , и, соответственно, равным значениям разности главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , что составляет половину максимального касательного напряжения  $\tau_{\max}$ . Картины изохром дают наглядное представление о характере распределения напряжений в модели, их относительной величине, отвечающей для касательных напряжений номеру полосы по всему полю, а также о размещении участков концентрации напряжений (по плотности полос) и положении изотропных точек и нулевых изохром, где  $\sigma_1 = \sigma_3$ , а  $\tau_{\max} = 0$ .

Преимущества оптического метода используются для выявления участков повышенных значений касательных напряжений  $\tau_{\max}$  и прогноза в их пределах разрывных дислокаций в направлении траекторий нормальных и касательных напряжений, построенных по карте изоклин оптического поля [1–7, 10–15].

Поскольку прогноз типа разрывного нарушения – отрыва или сдвига (скола) связан с нахождением предельных значений нарушающих напряжений в моделируемых объектах, то на диаграммах



**Рис. 2.** Базовые сейсмо-профили Пальяновской площади (а), Салымского месторождения (г) и оптико-поляризационные модели (б), (в), (д), (е).

1 – концентрация желатина; 2 – границы и изолинии: *a* – между желатиновыми слоями, *b* – изохромы (уровни касательных напряжений); 3 – максимальные значения изохром ( $\geq 8$ ); 4 – траектории нормальных напряжений ( $\sigma_1$ ) и их уширения (прогнозируемые трещины); 5 – траектории и направления: *a* – касательных напряжений ( $\tau_{max}$ ), *b* – движения антиклинальных блоков; 6 – эллипсоид деформации; 7 – изотропная точка

наносятся оба возможных их вида, образование которых зависит от конкретной геологической обстановки. При одностороннем сжатии прогнозируются сколы и отрывы, в зонах растяжения – отрывы, в зонах сдвига – сколы и отрывы, что как мы увидим позднее, подтверждается возникновением последних в моделях по прогнозируемым направлениям.

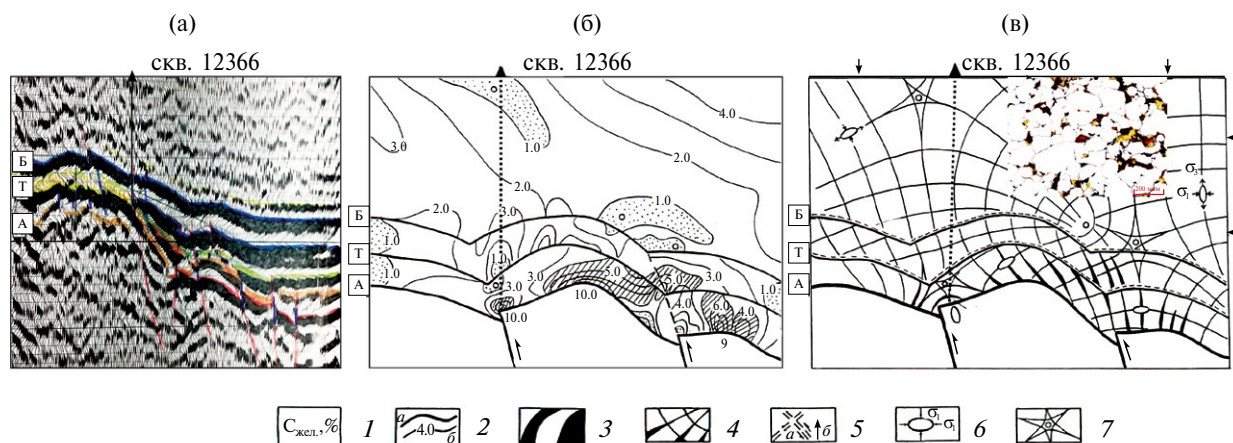
**Тектоно-седиментационный метод**

Прежде чем приступить к построению седиментационных моделей, анализировались масштабные характеристики моделируемых объектов. Кроме

того, учитывались мощности всех юрских и меловых отложений, моделируемых этим методом.

По литературным [1, 3] и имевшимся в нашем распоряжении данным о прочностных свойствах различных литологических типов пород были подготовлены ингредиенты, на основе которых затем моделировались осадочные отложения юрского и мелового возрастов.

**2D моделирование.** Двумерное моделирование осуществлялось в камерах с линейными размерами 50x30x10 см. В нижней части камеры располагались подвижные блоки, с помощью которых моделировался рост поднятий заданной формы [4–7, 12].



**Рис. 3.** Фрагмент сейсмического разреза Пальяновской площади, на котором расположена скв. 12366 (а), с результатами интерпретации оптико-поляризационной модели (б), (в).

На (в) – врезка: шлиф кварцевитового песчаника, отобранного из интервала тюменской свиты, вскрытой скв. 12366. Отражающие горизонты: А – кровля фундамента, Т – кровля тюменской, Б – баженовской свит.

Показаны (стрелки) направления движения антиклинальных блоков.

1 – концентрация желатина; 2 – границы и изолинии: а – между желатиновыми слоями, б – изохромы (уровни касательных напряжений); 3 – максимальные значения изохром ( $\geq 8$ ); 4 – траектории нормальных напряжений ( $\sigma_1$ ) и их уширения (прогнозируемые трещины); 5 – траектории и направления: а – касательных напряжений ( $\tau_{\max}$ ), б – движения антиклинальных блоков; 6 – эллипсоид деформации; 7 – изотропная точка

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

**3D моделирование.** В отличие от 2D седиментационного моделирования, позволяющего имитировать лишь отдельные плоские вертикальные фрагменты той или иной площади по аналогии с сейсмическими разрезами, 3D седиментационные модели способны давать более полную информацию о плотности трещин, формирующихся вследствие роста одного или нескольких блоков в пределах выбранного для моделирования участка по ее высоте. Для этого используются данные о структуре поверхности выбранного антиклинального участка, обычно, по отражающему горизонту “А”, по которому строятся объемные модели выбранных поднятий. В 3D седиментационную модель, также, как и в 2D модель, закладываются тонкие (толщиной 2–4 мм) компетентные слои с целью определения ориентации и плотности трещин, которые сформируются в них вследствие их деформации растущими трехмерными антиклинальными блоками.

После завершения экспериментов оба типа седиментационных моделей послойно разбираются и изучается характер распределения трещин в каждом из компетентных слоев, их ориентация в пространстве, протяженность, плотность, а также их раскрытость [5–7, 12].

Все исследованные нами структуры имели постседиментационный, то есть очень молодой (в масштабе геологического времени) возраст, что подтверждается тем, что все антиклинальные структуры, выявленные по результатам сейсморазведочных работ, прослеживаются до самых верхних горизонтов, входящих в состав осадочного чехла Западно-Сибирского осадочного бассейна, а зоны разуплотнения, образующиеся над вершинами поднятий часто выходят на дневную поверхность.

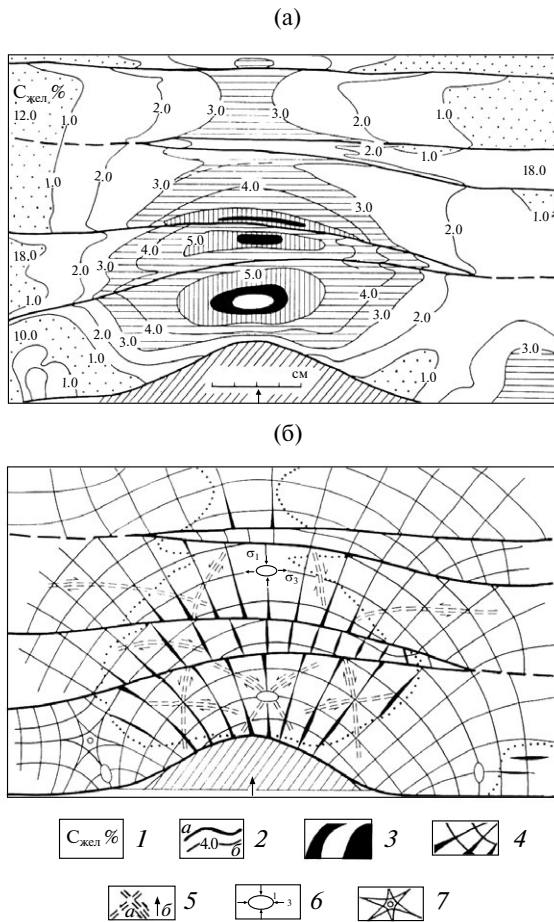
## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### Оптико-поляризационное моделирование

Сначала рассмотрим результаты оптического моделирования на примерах двух простейших антиклинальных структур, встречаемых на сейсмических разрезах различных месторождений и площадей Западной Сибири (рис. 2, а, г).

Первая оптическая модель позволяет изучить распределение напряжений и осуществить прогноз тектонической трещиноватости в осадках, возникающих в результате роста симметричного антиклинального поднятия (“подземный вулкан”) (см. рис. 2, а). Над вершинами антиклинальных блоков, присутствующих на сейсмическом разрезе, изображенном на этом рисунке, на некотором расстоянии от них, также присутствуют зоны разуплотнения (просадки), о которых говорилось ранее (см. рис. 2, а).

Вследствие его вздымания в желатиновой модели возникают напряжения, уровню которых соот-



**Рис. 4.** Поля напряжений в многослойной оптико-поляризационной модели, содержащей клиновидные слои, деформируемой поднятием пологой антиклинали

(а) – уровни касательных напряжений ( $\tau_{\max}$ ),  
 (б) – ориентация нормальных,  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  (сплошная линия) и скальвающих,  $\tau_{\max}$  (двойной пунктир), прогноз разрывов по  $\sigma_1$  (утолщенные траектории) и сдвигов (по  $\tau_{\max}$ ) в области их повышенных значений.

1 – концентрация желатина; 2 – границы и изолинии: а – между желатиновыми слоями, б – изохромы (уровни касательных напряжений); 3 – максимальные значения изохром ( $\geq 8$ ); 4 – траектории нормальных напряжений ( $\sigma_1$ ) и их уширения (прогнозируемые трещины); 5 – траектории и направления: а – касательных напряжений ( $\tau_{\max}$ ), б – движения антиклинальных блоков; 6 – эллипсоид деформации; 7 – изотропная точка

ветствуют изохромы различных порядков. Чем выше порядок изохром, тем значительнее напряжения, существующие в этом участке, и тем выше вероятность возникновения в этих участках трещинных дислокаций (см. рис. 2, б, в).

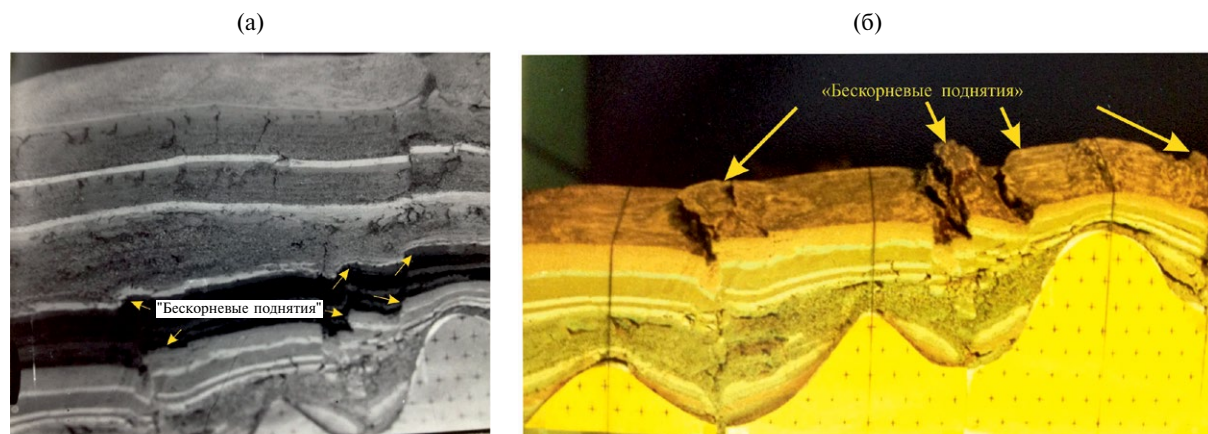
Чтобы определить наиболее вероятную ориентацию трещин, которые могут возникнуть в участках с повышенными значениями напряжений, используются направления изоклин, полученные

по результатам оптико-поляризационного моделирования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальная концентрация напряжений и, соответственно, максимальная трещиноватость будет наблюдаться непосредственно над вершиной антиклинальной структуры, причем трещины будут иметь субвертикальную ориентацию (см. рис. 2, в). Зона дробления будет расширяться по направлению вверх, достигая максимальной ширины на границе нижнего и среднего желатиновых слоев, а затем она вновь начинает уменьшаться, полностью исчезая немного выше границы между средним и верхним желатиновыми слоями (см. рис. 2, в).

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

Распределение напряжений, возникающих вследствие роста трапециевидного поднятия заметным образом отличается от рассмотренного выше, сформировавшегося над симметричным поднятием (см. рис. 2, д).

Если в первой модели (симметричное поднятие) первый участок максимальных концентраций напряжений (зона сжатия) формируется непосредственно над вершиной этого поднятия, а второй на некотором удалении от него (зона разуплотнения), то во второй (трапециевидное поднятие) участки с максимальными напряжениями (зоны сжатия) возникли над его крыльями, а в непосредственной близости от его плоской вершины расположился участок с низкими значениями напряжений (см. рис. 2, д). Второй участок повышенных напряжений (зона растяжения) в этой модели возник также на некотором удалении от ее вершины, причем она имеет гораздо большую латеральную протяженность, чем таковая, сформировавшаяся над симметричным поднятием в первой модели (см. рис. 2, б, д).



**Рис. 5.** Фрагменты 2D седиментационной модели с бескорневыми поднятиями, образовавшимися в результате последовательного роста соседних антиклинальных блоков, до (а) и после (б) ее препарирования.

Субвертикальные высокопроницаемые трещинные зоны в рассматриваемой модели прогнозируются на краях этого поднятия, а в центральной части над его плоской поверхностью могут сохраниться нераздробленные (монолитные) участки (см. рис. 2, д, е). Поэтому интенсивная вертикальная миграция флюидов в этом случае возможна лишь на бортах трапецевидного поднятия, а не в его центральной части.

Высокодебитная скважина 554Э, пробуренная на Салымском месторождении, попала в аналогичную структурно-тектоническую ситуацию и ее виртуальный ствол находится именно в субгоризонтальной протяженной зоне дробления, приуроченной к границе нижнего и среднего слоев оптической модели, имитирующих зону сочленения верхнеюрских отложений абалакской и баженовской свит (см. рис. 2, г-е).

В обеих рассмотренных выше моделях прогнозируемые трещины ориентированы субвертикально по отношению к вершинам поднятий, а по направлению к их крыльям и вниз к их основаниям, они начинают наклоняться и принимать все более пологое положение (см. рис. 2, в, е).

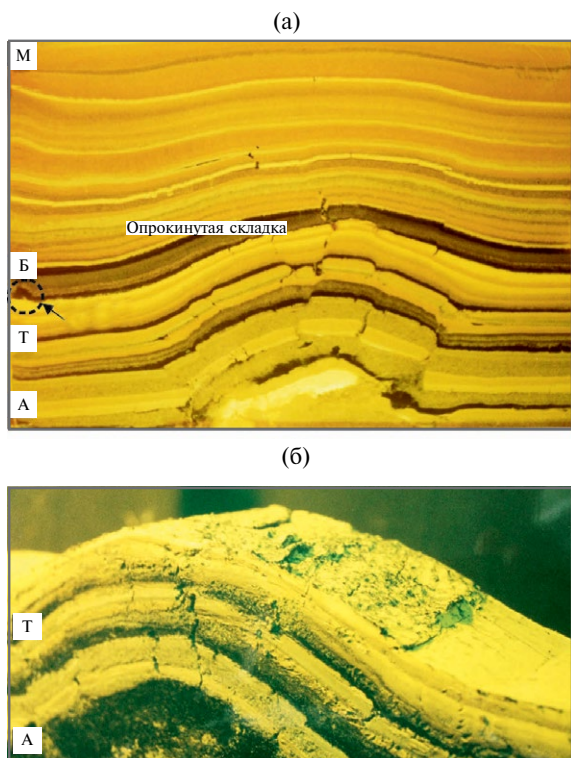
Рассмотрим более сложную оптическую модель с надвигово-взбросовыми дислокациями, моделирующими структурно-тектоническую ситуацию, в которой находится скв. 12366, пробуренная в пределах Пальяновской площади, расположенной в восточной части Краснотеннинского свода (рис. 3).

По данным оптического моделирования зоны концентраций касательных напряжений приурочены к кровельным частям надвиговых блоков и к их выдвигающимся вдоль разрывных нарушений участкам (см. рис. 3, б). Непосредственно над таким участком центрального блока расположена изотропная точка, вблизи которой, как уже говорилось ранее, нормальные напряжения одинаковы, а касательные близки к нулю. Иными словами, этот участок находится в условиях все-

стороннего сжатия и в нем отсутствуют вторичные трещины тектоногенного происхождения (см. рис. 3, б, в). Напротив, в этом участке должно происходить сжатие осадков и резкое уменьшение их пористости. По данным сейсморазведки, скв. 12366 расположена именно в таком участке, поэтому кварцевый песчаник, отобранный из этой скважины в интервале залегания тюменской свиты (при сравнительно небольшой глубине залегания – 2350 м), имеет пористость всего около 5–6 %, а по внешнему виду он напоминает кварцит (см. рис. 3, в, врезка – фотография петрографического шлифа). Очевидно, что бурить разведочные или эксплуатационные скважины в такой структурно-тектонической ситуации нельзя, т.к. в этих участках породы-коллекторы обладают крайне низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

Следующая оптическая модель позволяет проследить распределение напряжений в тех случаях, когда слои характеризуются изменяющейся мощностью, например, имеют клиновидную форму (рис. 4). Наиболее актуальным моделирование таких ситуаций является для отложений абалакской и баженовской свит, в которых предполагается наличие выклинивающихся компетентных слоев, сложенных карбонатным и/или кремнистым материалом [5, 6].

Наличие таких слоев в оптической модели в случае роста симметричного поднятия заметным образом не влияет на характер распределения напряжений в модели (см. рис. 4, а). Отмечается лишь некоторое снижение уровня касательных напряжений в наиболее тонких (утоняющихся частях) клиновидных слоев, что особенно хорошо видно на примере верхнего клиновидного слоя, над и под которым прогнозируются зоны деструкции, а в нем самом – таковые отсутствуют (см. рис. 4, б). Поэтому можно предположить, что выклинивающиеся участки компетентных слоев в зонах дробления будут присутствовать



**Рис. 6.** 2D седиментационная модель главного поднятия Кальчинского месторождения.

(а) – с опрокинутой складкой и “застывшими волнами”, между горизонтами Т и Б рядом с левой стенкой модели присутствует опрокинутая складка, образовавшаяся в результате соскальзывания слоя черной глины по крылу поднятия к его основанию; (б) – после препарирования “застывших волн”.

в виде монолитных блоков, отколовшихся от основной более мощной части пласта, “плавающих” во вмещающих их более пластичных осадках.

## 2D тектоно-седиментационное моделирование

С помощью 2D седиментационных моделей попробуем разобраться в механизме формирования бескорневых поднятий, которые наблюдаются на сейсмических разрезах (см. рис. 1, б, в). В межблочном пространстве соседних последовательно поднимающихся блоков отмечается увеличение мощности осадков, а также появление небольших по амплитуде “бескорневых” поднятий (рис. 5, а). Увеличение мощности осадков и формирование этих поднятий в межблочном пространстве происходит в результате нагнетания в него осадков крыльями антиклинальных блоков вследствие их последовательного роста. Разборка двумерной седиментационной модели позволила детально изучить форму бескорневых поднятий, образовавшихся в межблочном пространстве (см. рис. 5, б). На снимке хорошо видно, что если соседние антиклинальные блоки имеют различную амплитуду, то возникающие в межблочном пространстве поднятия оказываются наклоненными

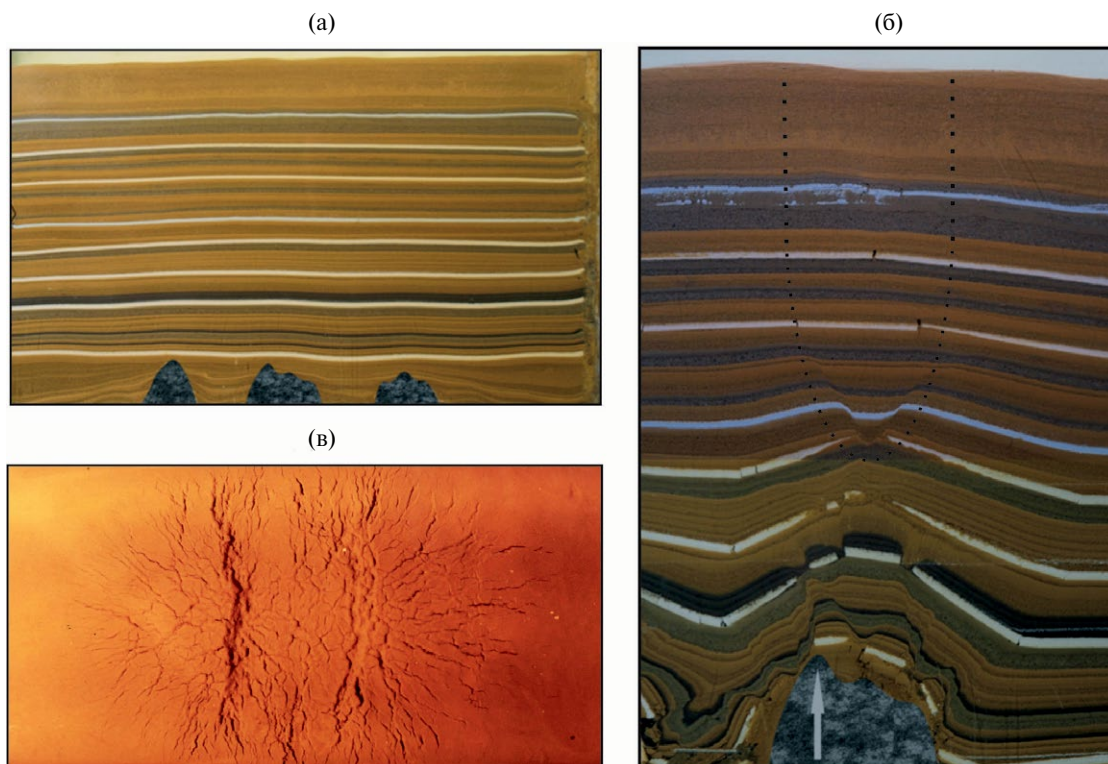
в сторону менее амплитудного блока (см. рис. 5 а, б).

При двумерном седиментационном моделировании роста конседиментационного поднятия произошло соскальзывание отлагаемого слоя осадков, вследствие чего на самой вершине антиклиналя от него практически ничего не осталось, а у боковых стенок модели образовались опрокинутые складки (рис. 6, а). Толщина описываемого слоя по направлению вниз по крыльям поднятия увеличилась, а в подстилающих его осадках возникли своеобразные завихрения, напоминающие застывшие волны (см. рис. 6, а). Очистка описываемого слоя позволила более детально рассмотреть форму этих застывших волн, возникших вследствие соскальзывания по нему перекрывающих его осадков (см. рис. 6, б). На обнажившейся поверхности хорошо видно, что самые крупные из них образовались вблизи вершины поднятия (см. рис. 6, б). На самом деле крупные “волны” возникли и вблизи боковых стенок модели, но они оказались срезанными в процессе разборки модели, так как в самом начале этого процесса (разборки) на них просто не обратили внимание. Однако их можно разглядеть на снимке, сделанном до разборки модели (см. рис. 6, а). Таким образом, самые крупные “волны” в подстилающем обсуждаемые осадки слое, образовались в момент разгона слоя (вблизи вершины поднятия) и в момент его торможения (у его основания). В транзитной зоне, где скорость скольжения осадков этого слоя была примерно одинаковой, крупных застывших волн не возникло. Таким образом, волнообразные формы, наблюдаемые на сейсмических разрезах, могут являться описанными выше “застывшими волнами”, возникшими в осадках вследствие скольжения по ним подводных суспензионных, турбидитных и подобных им потоков.

Двумерные седиментационные модели помогают также понять механизм формирования зон разуплотнения или просадки в осадочной толще, которые часто наблюдаются на сейсмических разрезах на некотором расстоянии от вершин поднятий, о чем уже говорилось ранее (см. рис. 1, а, в, см. рис. 2, а). Для этого сравним исходную седиментационную модель и ту же модель после роста центрального антиклинального блока (рис. 7, а, б). Отчетливо показано, что вследствие роста центрального антиклинального блока в первоначально субпараллельных слоях над ним в осадках образовалась зона разуплотнения, проявившаяся в осадках в виде просадки (см. рис. 7, б).

Механизм формирования зоны разуплотнения или просадки заключается в следующем. Растущий антиклинальный блок смещает перекрывающие его осадки не только вверх, но и в стороны в субгоризонтальном направлении. Поэтому на некотором расстоянии от его вершины возникает зона растяжения, которая проявляется в виде просадки осадков над вершиной поднятия (см. рис. 7, б). Формирова-





**Рис. 7.** 2D седиментационная модель в исходном состоянии (а), после роста центрального поднятия с образованием над ним зоны разуплотнения осадков (б) и вид сверху на вышедшую на поверхность модели зону разуплотнения (в).

ние этой зоны было предсказано ранее при рассмотрении оптических моделей (см. рис. 2, а–в).

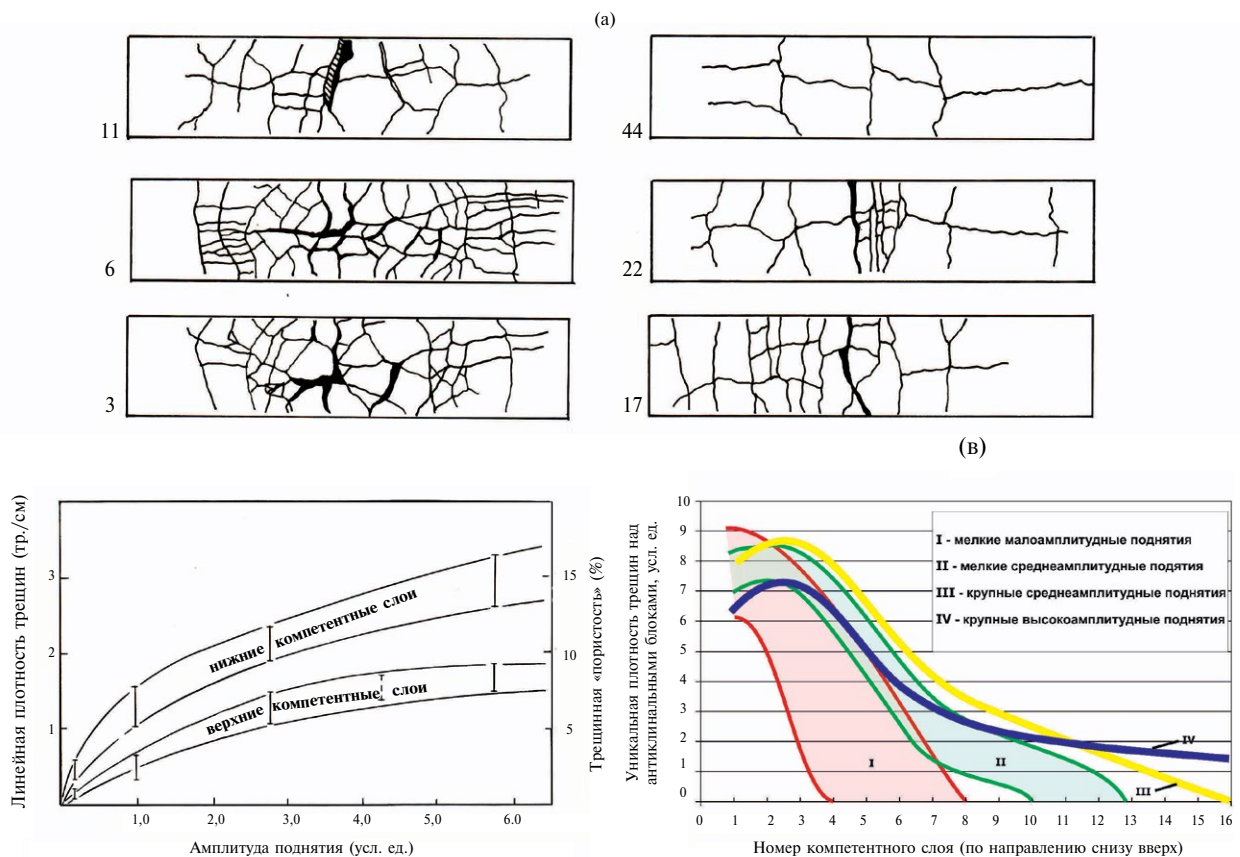
Если антиклинальный блок имеет достаточно большие размеры и амплитуду, то зона разуплотнения может выйти на поверхность седиментационной модели и в зависимости от формы поднятия проявиться на ней, например, в виде грабенообразного провала, испещренного многочисленными разнонаправленными дислокациями (см. рис. 7, в). Следует обратить внимание на то, что наблюдаемый провал находится в центре небольшого поднятия, формируемого растущим блоком на поверхности модели (см. рис. 7, б).

На примере одной из седиментационных моделей рассмотрим закономерности распределения трещинных дислокаций в компетентных слоях, возникших вследствие роста антиклинального блока, начиная от самых нижних и заканчивая самыми верхними. В качестве примера рассмотрим результаты расчистки компетентных слоев, в которых образовались трещины, в седиментационной модели, построенной на основе одного из сейсмических разрезов, пересекающих главное поднятие в пределах Кальчинского месторождения, расположенного в южной части Тюменской области (рис. 8, а). Двумерная седиментационная модель этого поднятия представлена на рис. 6, а. На очищенных компетентных слоях хорошо видны основные закономерности распределения и морфологии возникших в них дислокаций,

а также величина их раскрытости (см. рис. 8, а). Эти закономерности заключаются в следующем:

- если в нижних компетентных пластах ориентация возникших трещин напоминает структуру “разбитой тарелки”, то по направлению вверх они приобретают ортогональное взаиморасположение;
- плотность и раскрытость трещин по направлению вверх уменьшаются;
- в каждом компетентном слое возникла своя уникальная система трещин, в которой их расположение не повторяет таковую даже в соседних компетентных пластах;
- над самым куполом поднятия выделяется одна тещина, которую можно назвать главной, обладающая максимальной раскрытостью, которая более или менее совпадает по направлению и расположению в перекрывающих друг друга компетентных пластах, начиная с самых нижних до самых верхних.

Таким образом, трещины, образующиеся в различных компетентных пластах, имеющих небольшую мощность, как правило, не совпадают по своему расположению и ориентации, поэтому ожидать существования линейных разрывных нарушений, протягивающихся на значительные расстояния в неоднородной по составу и физико-механическим свойствам осадочной толще вряд ли можно считать правильным. Зоны дробления и в частности разуплотнения, скорее всего, пред-



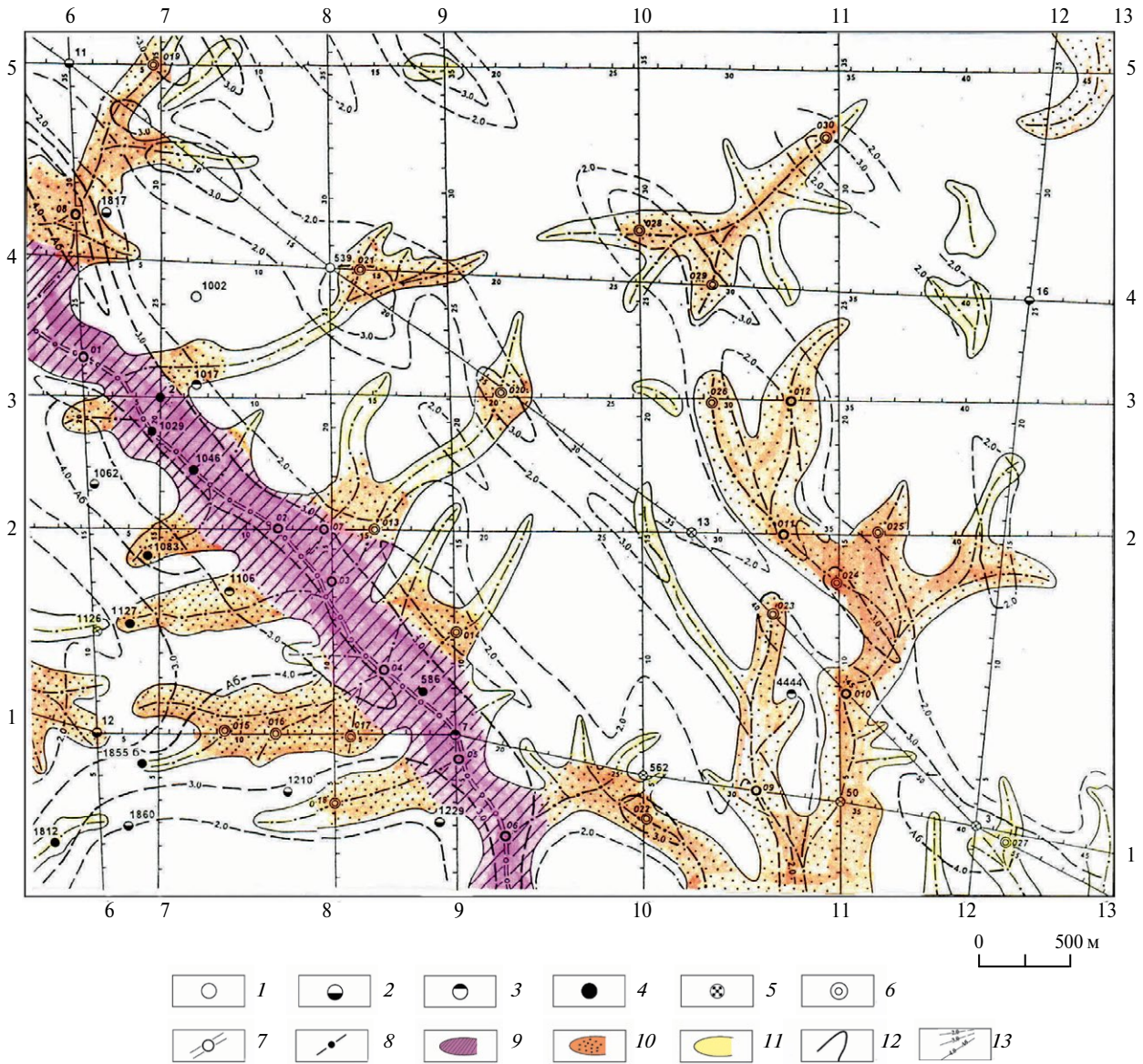
**Рис. 8.** Результаты препарирования компетентных слоев 2D седиментационной модели главного поднятия Кальчинского месторождения с распределением разрывных дислокаций (а), зависимости линейной плотности трещин и трещинной «пористости» от амплитуды поднятия (б) и удельной плотности трещин над антиклинальными блоками в зависимости от номера компетентного слоя для поднятий различных размеров (в). Обозначены (цифры) номера компетентных слоев по направлению снизу-вверх.

ставляют собой участки, в пределах которых многочисленные, вертикально ориентированные дислокации, несмотря на их различное расположение и ориентацию в горизонтальной плоскости, тем не менее, пересекаются друг с другом и представляют собой взаимосвязанную систему, по которой возможна эффективная вертикальная фильтрация флюидов. Подчеркнем, что все вышесказанное относится к осадочным толщам, в составе которых присутствуют маломощные компетентные слои, а их деформации происходят в результате роста антиклинальных структур. В компетентных породах, представленных, например, мощными толщами известняков, кремнистых сланцев и другими породами с похожими механическими свойствами, под действием тектонических напряжений возможно образование протяженных трещин, пересекающих все перечисленные толщи от их подошвы до самой кровли.

Зоны разуплотнения возникают в осадках любого типа. Однако в гранулярных коллекторах (песчаниках, алевролитах) они часто маскируются присутствующей первичной межзерновой пористостью и проницаемостью. Хотя наблюдаются высокоде-

битные зоны и повышенные фильтрационно-емкостные свойства образцов, поднятых из этих зон.

Совершенно другая ситуация возникает в осадках, в которых коллекторские свойства появляются исключительно в результате возникновения эпигенетических коллекторов трещинного и/или трещинно-кавернового типов в результате тектонических напряжений, например, вызванных растущими поднятиями. Примерами описываемых отложений являются осадки баженовской и абалакской свит, в которых образуются коллекторы именно таких типов в кремнистых и карбонатных литологических типах пород, названных автором потенциально продуктивными или сокращенно ППП [5, 6]. Установленные на основе тектонофизического моделирования зависимости между геометрическими размерами поднятий и размерами зон разуплотнения, позволили осуществить прогноз распространения перспективных участков для поисков углеводородных залежей в отложениях баженовской и абалакской свит на ряде площадей и месторождений [5, 6]. Примером такого прогноза может служить участок сейсморазведочных работ 3Д в пределах Ем-Еговской площади (рис. 9).



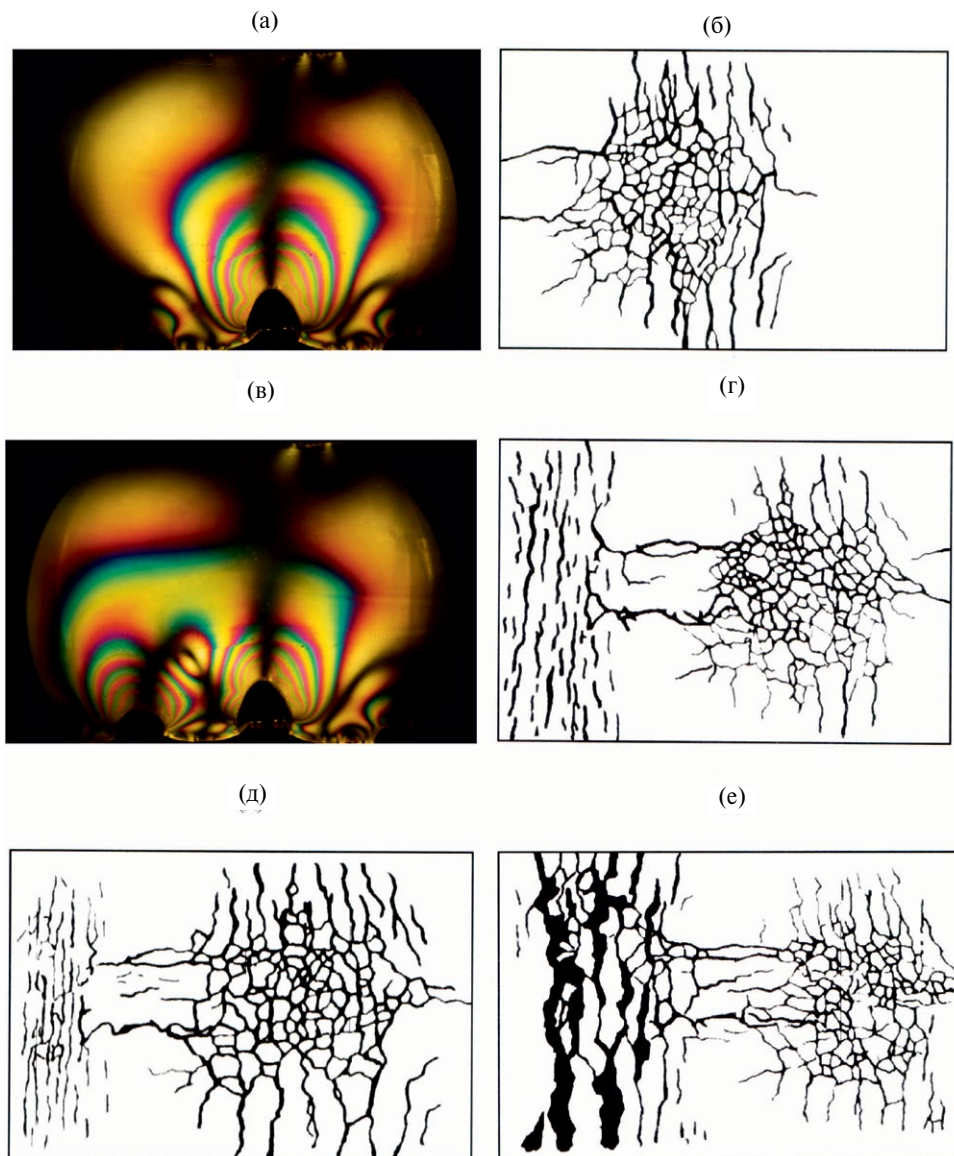
**Рис. 9.** Структурно-прогнозная схема размещения трещинных коллекторов в баженовской и абалакской свитах восточного участка Ем-Еговской площади по полученным данным сейсморазведки и тектонофизического моделирования.

1–6 – скважины: 1 – “сухие”; 2 – малодобитные; 3 – среднедобитные; 4 – высокодобитные; 5 – нет данных испытания; 6 – проектные; 7–8 – оси зон трещиноватости: 7 – максимальной; 8 – умеренной и слабой; 9–11 – зоны деструкции и трещинного коллекторообразования с удельными запасами углеводородов: 9 – высокими, 10 – средними, 11 – низкими; 12–13 – предполагаемые границы: 12 – прогнозного распределения трещинных коллекторов баженовской и абалакской свит по данным частоты трещиноватости в компетентных слоях, отвечающих горизонтам АБ и Б в тектоно-седиментационных моделях, 13 – вероятного трещинообразования по величинам касательных напряжений в компетентных слоях горизонтов АБ и Б в оптических моделях

На этой площади из-за сравнительно небольшой мощности осадочного чехла, с одной стороны, и довольно больших амплитуд поднятий, с другой – над их вершинами на земной поверхности образовалась зона просадки, механизм образования которой рассматривался ранее. Именно по этой зоне просадки в настоящее время протекает река Ем-Еган. Действительно, все высокодобитные скважины, пробуренные на бажено-абалакский комплекс,

сосредоточились именно в этой прогнозной высокоперспективной зоне разуплотнения и вторичной тектоногенной трещиноватости, расположенной, вдоль русла этой реки (см. рис. 9).

В завершение рассмотрения 2D оптических и седиментационных моделей проанализируем условия возникновения и принцип работы тектонического “насоса”, позволяющего эффективно перекачивать флюиды, заполняющие поровое про-



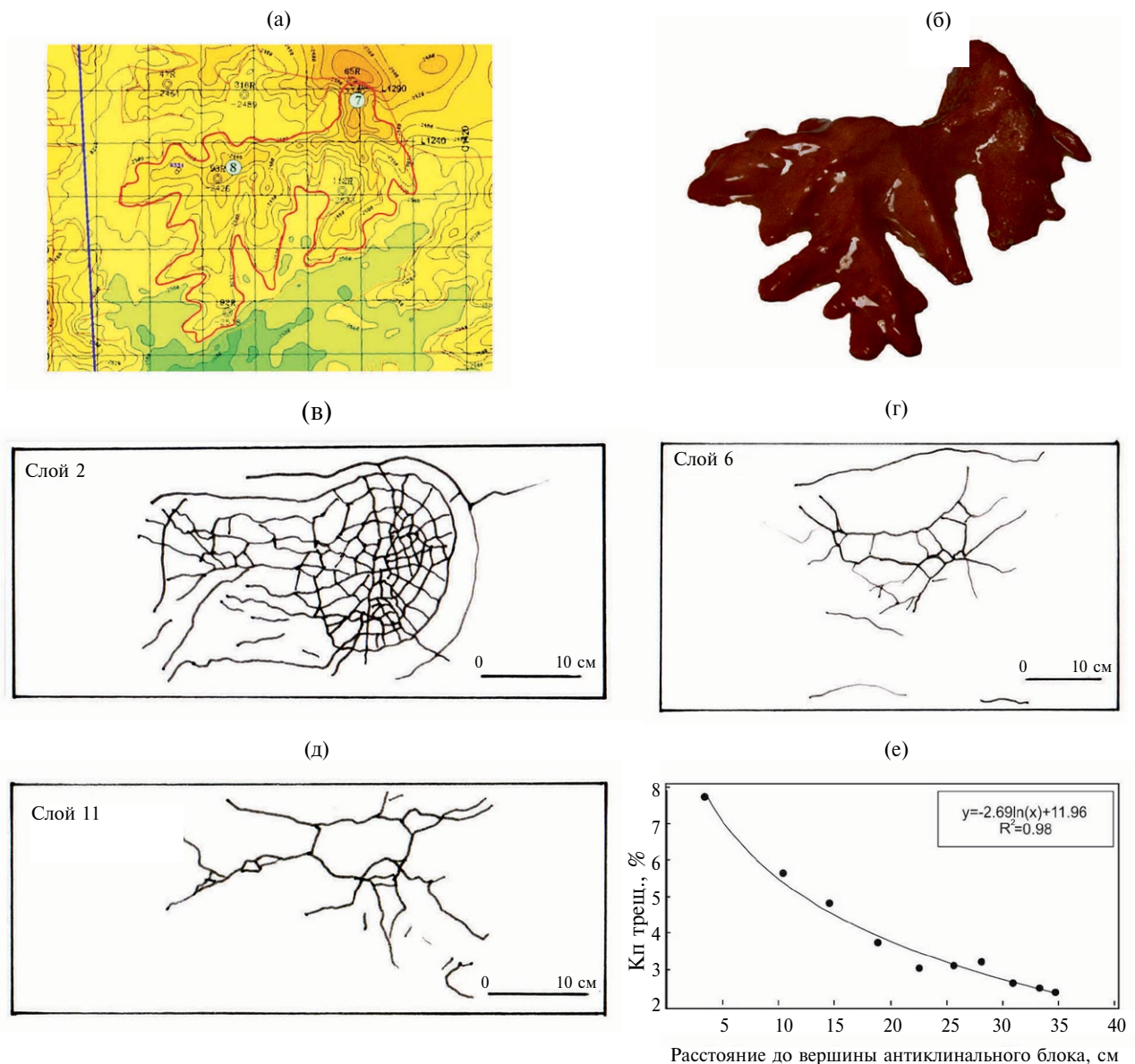
**Рис. 10.** Оптическая (а), (в) и седиментационная (б), (г), (д), (е) модели последовательно растущих антиклинальных блоков, с изменяющимися размерами зон трещиноватости и раскрытости находящихся в них трещин, образовавшихся над попеременно растущими поднятиями.

странство пород-коллекторов в латеральном направлении с одного участка на другой.

Вследствие роста симметричного антиклинального блока в оптической модели над ним формируется фотоизохроматическая картина, также имеющая симметричную форму (рис. 10, а). Зона напряжений, образуемая над вершиной этого же блока в седиментационной модели, проявляется в виде участка разуплотнения или вторичной (тектоногенной) трещиноватости, имеющей более или менее равномерное распределение дислокаций в этой трещинной зоне, хотя наиболее протяженные трещины в ней имеют преимущественное направление, ориентированное параллельно коротким сторонам модели (см. рис. 10, б).

Рост соседнего с ним поднятия происходит уже не в изотропной среде, а в напряженной обстанов-

ке, возникшей в осадках, благодаря росту первого поднятия. На фотоизохроматической картине, образовавшейся вследствие роста этого поднятия, хорошо видно, что уровень напряжений существовавший до этого момента над первым поднятием существенно уменьшился по величине после роста второго поднятия, в примыкающей к нему зоне. В то же время, над вторым поднятием, напротив, сформировалась зона повышенных напряжений, проявившихся в появлении изохром высоких порядков (см. рис. 10, в). Вследствие этого трещины, сформировавшиеся над вторым поднятием, оказались ориентированными субпараллельно в соответствии с распределением напряжений, возникших вследствие роста первого поднятия (см. рис. 10, г). Второе важное следствие роста второго поднятия заключается в том, что возник-



**Рис. 11.** Структурная карта и результаты трехмерного 3D седиментационного моделирования роста антиклинального блока в пределах Каменной площади

(а) – структурная карта фрагмента Каменной площади по горизонту А, выбранного для трехмерной седиментационной модели,

(б) – фотография антиклинального блока, имитирующего эту положительную структуру,

(в)–(д) – распределение трещинных дислокаций в компетентных слоях трехмерной седиментационной модели,

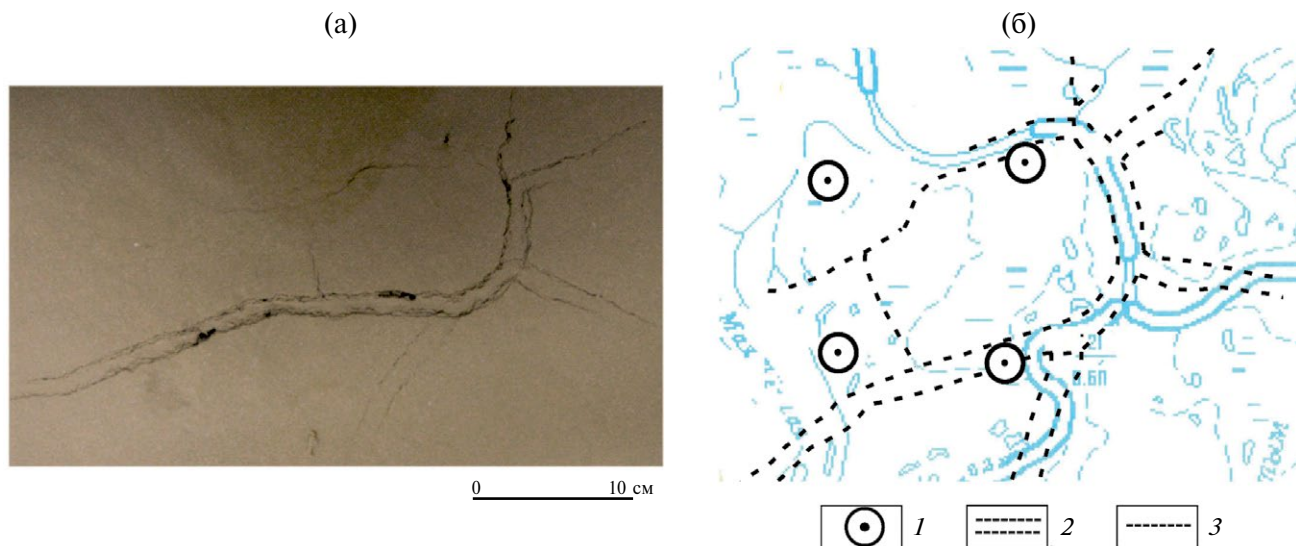
(е) – зависимость трещинной “пористости”, образовавшейся в компетентных слоях этой модели, от расстояния до вершины антиклинального блока.

Обозначены (цифры) номера компетентных слоев по направлению снизу-вверх.

шая ранее зона деструкции над первым поднятием заметно уменьшилась в своих размерах, а раскрытость трещин, образовавшихся над ним, также резко сократилась (см. рис. 10, г). Иными словами, рост второго более молодого поднятия вызвал сжатие трещинной зоны, образовавшейся над первым более старым поднятием и как следствие – перетекание флюидов, заполнявших эту более раннюю трещинную зону над первым поднятием, в новую

зону дислокаций, сформировавшуюся над вторым более молодым поднятием.

Возобновившийся рост первого поднятия вновь приводит к формированию широкой зоны дислокаций со значительной степенью раскрытости трещин, присутствующих в ней и, напротив, резко уменьшению раскрытости трещин, образовавшихся ранее над вторым поднятием (см. рис. 10, д). Следовательно, флюиды, запол-



**Рис. 12.** Зоны разуплотнения 3D седиментационной модели Каменной площади.  
 (а) – зона разуплотнения, вышедшая на поверхность модели Каменной площади,  
 (б) – проекция зоны разуплотнения на гидрографическую карту этого же участка Каменной площади.  
 1 – скважины; 2 – грабеновидные провалы; 3 – трещины

нявшие субпараллельную трещинную зону, существовавшую над вторым поднятием, по субперпендикулярной системе трещин, соединяющей обе зоны деструкции, вновь перетекли в реанимированную трещинную зону разуплотнения над первым поднятием.

Наконец, вследствие возобновления роста второго поднятия, над ним вновь восстановилась и расширилась существовавшая ранее зона деструкции, трещины, присутствовавшие в которой, резко увеличили раскрытость (см. рис. 10, е). Напротив, зона деструкции (разуплотнения) существовавшая до этого момента над первым поднятием, вновь значительно уменьшилась в своих размерах, а присутствовавшие в ней трещины сжались вследствие резкого уменьшения их раскрытости (см. рис. 10, е).

Очевидно, что возобновившийся рост второго поднятия вновь привел к перетеканию флюидов, насыщавших зону разуплотнения, существовавшую над первым поднятием, по той же субперпендикулярной сети трещин, соединяющей обе зоны разуплотнения в возобновленную и значительно увеличившую свою трещинную емкость зону разуплотнения, сформировавшуюся над вторым поднятием (см. рис. 10, е).

Таким образом, в случае последовательного роста двух близко расположенных (взаимодействующих между собой) поднятий они способны осуществлять перекачку флюидов в латеральном направлении из зон разуплотнения (деструкции), расположенных над их вершинами. При этом наиболее перспективной будет зона разуплотнения, расположенная над самым молодым поднятием, росшим в последнюю очередь. Поэтому, прежде

чем выбирать место для заложения поисково-разведочной или эксплуатационной скважины, следует провести палеотектоническую реконструкцию роста поднятий в пределах рассматриваемой площади или месторождения.

### 3D тектоно-седиментационное моделирование

В качестве примера 3D седиментационной модели рассмотрим таковую, построенную на основе сейсморазведочных данных, представляющую собой фрагмент с антиклинальным блоком, выбранным в пределах Каменной площади, расположенной на Красноленинском своде (рис. 11, а). По этой антиклинальной структуре была изготовлена модель, повторяющая все ее морфологические особенности (см. рис. 11, б). После чего проводилось моделирование роста этого поднятия, а затем, так же, как и при двумерном седиментационном моделировании, осуществлялась ее послойная разборка и изучались закономерности распределения трещин, образовавшихся после роста поднятия в компетентных слоях (см. рис. 11, в-д).

Анализ полученных результатов дал возможность построить зависимости подобные рассмотренным ранее при анализе 2D седиментационных моделей, например, величины трещинной (двумерной) пористости от расстояния до вершины антиклинального блока (см. рис. 11, е). Полученные зависимости позволили построить структурно-прогностную схему размещения трещинных коллекторов в бажено-абалакском комплексе Каменной площади подобную построенной для Емгоровской площади (см. рис. 9).

Поскольку антиклинальный блок, использованный в 3D седиментационной модели, достаточно

высокоамплитудный, то зона разуплотнения, образовавшаяся над его вершиной, вышла на поверхность модели в виде протяженных узких грабенообразных провалов и трещин. Подобная ситуация описывалась ранее при рассмотрении зоны разуплотнения (просадки), возникшей над антиклинальными структурами в пределах Ем-Еговского месторождения, где р. Ем-Еган протекает по этой зоне, представляющей собой малоамплитудный грабенообразный провал. В этой связи представляет живой интерес сопоставить расположение зоны разуплотнения, возникшей на поверхности трехмерной седиментационной модели рассмотренного ранее фрагмента Каменного месторождения (рис. 12, а), с реальной дневной поверхностью этого же участка. Наложение полученной в модели зоны разуплотнения на гидрографическую карту поверхности этого же участка показало, что полного соответствия провалов (отвечающих этим зонам разуплотнения) и русел речных проток и ручьев не наблюдается (см. рис. 12, б).

Так, в восточной части рассматриваемого участка отмечается почти идеальное совпадение зоны разуплотнения, вышедшей на поверхность модели с расположением проток реки Оби, причем даже ширина зоны разуплотнения, полученная при седиментационном моделировании, практически полностью совпадает с шириной русел этих проток (см. рис. 12, б). Но в западной половине этого же участка совпадения зон разуплотнения, протянувшихся в западном направлении (по данным седиментационного моделирования) с реальной гидрографической обстановкой этого же участка гораздо хуже. Отмечается лишь цепочка мелких озер, примыкающих к самой крупной из них и небольшой ручей, протекающий по этой же зоне разуплотнения в юго-западной части рассматриваемого участка (см. рис. 12, б). Отсутствие полного совпадения зон разуплотнения по данным седиментационного моделирования и реальной гидрографией этого участка, скорее всего, объясняется особенностями регионального уклона земной поверхности на рассматриваемой территории. В восточной части уклон поверхности совпадает с направлением зоны разуплотнения и обские протоки текут по этим зонам разуплотнения, а в западной части этой территории отсутствуют сколько-нибудь значительные водные артерии. Поэтому зоны разуплотнения, которые прогнозируются в этом участке, практически никак себя не проявили в условиях реальной земной поверхности, если не считать цепочки мелких озер и ручьев, тяготеющих к этим зонам (см. рис. 12, б).

Огромная зона разуплотнения возникла в районе Самотлорского месторождения, а само озеро Самотлор находится в самом центре этой зоны разуплотнения, вышедшей на поверхность и заполнившейся водой этого озера. Причем само озеро находится в центре малоамплитудного поднятия, то есть приподнято над окружающей его

территорией, чем отчасти напоминает кальдеру вулканической постройки. Аналогичная ситуация была смоделирована в седиментационной модели (см. рис. 7, б). Газы и, в первую очередь, метан, поднимающиеся из глубины по этой зоне разуплотнения, пронизанной субвертикальными трещинами, насыщают воду озера, делая ее непригодной для существования живых организмов, из-за чего в переводе с местного наречия оно называется мертвым озером [7].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из полученных результатов моделирования, зоны разуплотнения над растущими поднятиями возникают в любых типах осадков, присутствующих в составе Западно-Сибирского осадочного бассейна. Однако гораздо более важным является решение проблемы выделения этих зон в отложениях, в которых отсутствуют исходные (первичные) породы-коллекторы, а их появление обусловлено вторичными тектоническими, а точнее тектоно-гидротермальными процессами [6, 7]. Именно такое происхождение имеют породы-коллекторы, образующиеся в бажено-абалакском комплексе Западной Сибири [5, 6]. Поэтому более детально рассмотрим результаты тектонофизического моделирования с целью их использования для прогноза залежей углеводородов в этих отложениях.

Как показали проведенные эксперименты по тектонофизическому моделированию, плотность трещин, возникающих в компетентных слоях, а также величина их раскрытости и площадь формирующейся над поднятием зоны деструкции, при прочих равных условиях, зависит от их толщины: чем толще компетентный слой, тем меньше плотность образующихся в нем трещин, однако больше величина их раскрытости и значительнее площадь их распространения. Напротив, чем тоньше компетентные пласты, тем выше в них плотность трещин, но меньше их раскрытость и площадь их распространения. Кроме того, проявляется еще одна закономерность, связанная с тем, что радиус зоны трещиноватости, возникающей над растущим поднятием, зависит от его линейных размеров — чем больше радиус поднятия (при одинаковой амплитуде), тем значительнее латеральные размеры зоны дробления, формирующейся над ним.

Если растущие антиклинальные блоки довольно близко расположены по отношению друг к другу, то зоны трещиноватости, образовавшиеся над ними в осадках, моделирующих отложения бажено-абалакского комплекса, сливаются в единую обширную зону деструкции. Поэтому в природных условиях в такой зоне могут присутствовать значительные запасы углеводородов.

С практической точки зрения большое значение имеет прогноз средних расстояний меж-

ду трещинами, формирующимися в кремнистых и карбонатных пластах, являющихся потенциально продуктивными (ППП, по [5, 6]), так как от этого будет зависеть степень вероятности попадания в трещину или трещины ствола скважины. В этой связи сделаем по этому поводу ряд некоторых общих замечаний.

Наибольшая плотность трещин или минимальные расстояния между трещинами должны существовать в самых тонких ППП, поэтому максимальная вероятность попадания в процессе бурения скважины в трещинную зону существует в самых маломощных кремнистых и/или карбонатных слоях. Если принять в качестве оценочных, полученные экспериментальные данные, то можно предположить, что расстояние между трещинами в этих слоях будет примерно соответствовать их мощности в участках максимального дробления (вблизи оси зоны разуплотнения) или превышать их мощность в 4–6 раз в зонах умеренной трещиноватости (на заметном удалении от оси этой зоны). Поэтому если в 0.3–0.5-метровом ППП минимальное расстояние между трещинами может составить те же 0.3–0.5 метров в зоне максимального дробления, то в участках с умеренной трещиноватостью расстояние между ближайшими трещинами в пластах такой же мощности составит около 1.5–2.5 м, а в среднем – 0.5–1.0 м. В ППП, имеющих мощность 1.5–2.0 м, соответствующие расстояния между ближайшими трещинами будут изменяться от 1.5–2.0 м до 7.5–10.0 м.

Важно отметить, что из результатов седиментационного моделирования следует, что все трещины, входящие в состав или слагающие зону деформации, взаимосвязаны друг с другом, поэтому при попадании скважиной хотя бы в одну из трещин ею будет дренироваться вся эта трещиноватая зона.

С целью проверки полученных в экспериментах зависимостей между толщиной компетентных слоев и расстоянием между трещинами, образующимися в них, были проанализированы данные о трещиноватости в песчаниках и алевролитах, вскрытых в природных разрезах различных районов Карпат [8]. Анализ приведенных в этой работе результатов исследований показал, что в песчаниках и алевролитах флишевых отложений Карпат расстояние между субвертикальными трещинами превышает их толщину в 1.4–1.5 раз. Толщина этих пластов изменялась от первых сантиметров до двух с лишним метров, что в первом приближении соответствует мощности ППП, входящих в состав бажено-абалакского комплекса.

Отмечаются явные сходства в соотношениях мощности слоя и расстояниях между трещинами в нем. Так, в наших экспериментах расстояние между трещинами вблизи вершины антиклинального блока в среднем оказалось больше мощности компетентных слоев в 1.5–2.0 раза, а в природных объектах – в 1.4–1.5 раз.

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

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

Анализ зависимости расстояния продуктивных скважин, пробуренных на бажено-абалакский комплекс от оси зоны разуплотнения и их дебитом показал, что скважины, в которых получены притоки нефти из ППП, входящих в состав отложений баженовской и абалакской свит, расположены на расстоянии не более 500–1000 м от оси зон разуплотнения. Расстояние наиболее высокодебитных скважин от оси разуплотнения не превышает 300–350 м. Таким образом, полученные на основе моделирования результаты, в первом приближении соответствуют данным промысловых испытаний.

Изучение степени успешности прогнозов, выполненных на основе комплексирования данных сейсморазведки и тектонофизического моделирования на примере 14 площадей, показало, что этот показатель изменяется от 66 до 100 %. Было установлено, что степень достоверности прогнозов напрямую зависит от качества исходной геолого-геофизической информации. Поэтому при проведении поисково-разведочного и даже эксплуатационного бурения скважин на площадях, освещенных сейсморазведочными работами, следует проводить тектонофизическое моделирование в их пределах с целью выделения наиболее перспективных участков с максимально высокими фильтрационно-емкостными свойствами пород-коллекторов, чтобы организовать разведку и/или разработку углеводородных залежей в пределах этих площадей с наибольшей эффективностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причиной роста поднятий различного ранга являются магматические тела, поднимающиеся из астеносферы вверх по направлению к земной поверхности [6, 7]. В зависимости от их размеров образуются положительные структуры первого, второго и более мелких порядков. Их под-



нятие в перекрывающих их породах вызывает рост напряжений, при превышении величины которых прочности этих пород, формируются субвертикальные зоны дробления, механизм формирования которых был рассмотрен ранее с использованием методов тектонофизического моделирования. По мере подъема этих магматических тел внешнее давление, действующее на них, уменьшается, вследствие чего из них выделяются в свободном состоянии высокоэнталийные флюиды, содержащие в своем составе, кроме воды, метан и его гомологи, а также  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ , кислые компоненты ( $HF$ ,  $HCl$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ) и другие соединения. Эти поликомпонентные высокоэнталийные флюиды проникают по сформировавшимся над ними зонам дробления в перекрывающие их породы и мобилизуют воду, находящуюся в них в различном виде, сначала в породах фундамента, а затем и осадочного чехла, вследствие чего формируются гидротермальные флюиды [6, 7]. Образовавшиеся флюиды, благодаря высокой температуре (по данным гомогенизации газово-жидких включений в кристаллах гидротермального кварца, встреченных в отложениях баженовской и абалакской свит, достигающих 330–350 °С, возможно, и выше), активизируют процессы нефтидогенеза. Они, в виде гомогенного водно-нафтидного флюида, по сформировавшимся зонам дробления проникают в породы-коллекторы, заполняя их. По мере остывания этих первоначально гомогенных (однофазных) флюидов они распадаются на две (вода–нефть) или три (вода–нефть–газ) фазы и постепенно, под действием сил гравитации, формируются углеводородные залежи [6, 7].

В пределах площадей, где описываемые процессы происходили сравнительно недавно (в масштабах геологического времени) сохранились аномально высокие пластовые температуры, превышающие фоновые для этих же глубин на 30–40 °С [5–7].

Тектонические процессы, обусловленные подъемом из астеносферы магматических тел различных размеров, активно участвуют не только в формировании антиклинальных ловушек с повышенными фильтрационно-емкостными свойствами пород-коллекторов, но и в самом процессе генерации нефтидов. Причем это происходит не только за счет органического вещества, входящего в состав осадочного чехла, но и благодаря углеводородам (прежде всего метана и его гомологов), присутствующих в этих высокоэнталийных флюидах. Также происходит процесс гидрогенизации органического вещества, содержащегося в осадках, в результате его взаимодействия с водородом, присутствующим в составе этих флюидов.

Можно также предположить, что крупные внутриконтинентальные морские и озерные бассейны типа Каспийского, Аральского, Байкальского

и других — это мегазоны разуплотнения, сформировавшиеся на земной поверхности над крупными магматическими телами, подобно описанной ранее зоне разуплотнения, вышедшей на дневную поверхность в виде, например, озера Самотлор, но только значительно большего размера. Если это предположение справедливо, то под этими морями и озерами в содержащихся в осадочном чехле и фундаменте породах-коллекторах могли сформироваться углеводородные залежи с высокими коллекторскими свойствами.

**Благодарности.** Выражаю свою искреннюю благодарность своим учителям и коллегам: чл. корр. И.В. Лучицкому и д.г.-м.н. П.М. Бондаренко, благодаря которым мне удалось освоить методы экспериментальной тектоники и применить их с целью прогноза перспективных территорий для поисков и разработки углеводородных залежей в пределах Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В.В., Гзовский М.В. Экспериментальная тектоника. М. Недра, 1964, 118 с.
2. Бондаренко П.М., Лучицкий И.В. Сдвиги и зоны скальвания в тектонических полях напряжений // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии / И.В. Лучицкий, П.М. Бондаренко (ред.). М.: Наука, 1985. С.159–182.
3. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. Наука, 1975. 536 с.
4. 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.
5. Зубков М.Ю., Бондаренко П.М., Трухан Я.А., Лазарев А.Г. Прогноз углеводородных залежей в трещинных коллекторах баженовской и абалакской свит Восточно-Пальяновской площади на основе результатов сейсморазведки и тектонофизического моделирования // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО / В.А. Волков (ред.). Ханты-Мансийск: Путивель, 2000. С.174–187.
6. Зубков М.Ю. Коллекторы в бажено-абалакском комплексе Западной Сибири и способы их прогноза // Геология нефти и газа. 2014. № 5. С. 58–72.
7. Зубков М.Ю. Тектоногидротермальные процессы в юрских отложениях Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2017. № 1. С. 60–76.
8. Копытянский Р.С. Трещиноватость горных пород и ее значение в нефтегазовой геологии. Киев: Наукова думка. 1978, 216 с.
9. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А., Шлёнкин С.И., Арутюнов С.Л., Дыбленко В.П., Рогоцкий Г.В. Новые технологии и решение прикладных задач / Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. М.: Изд-во “ЦИТвП”, 2007. Т. 3. 434 с.
10. Лучицкий И.В., Бондаренко П.М. Моделирование полей напряжений над интрузивным куполом // Докл. АН СССР. 1974. Т. 216. № 2. С. 316–318.

11. *Осокина Н.Д.* Пластичные и упругие низко-модульные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М.: Изд-во АН СССР, 1963, 196 с.
12. Патент на изобретение № 2183332 “Способ прогнозирования зон развития вторичных коллекторов трещинного типа в осадочном чехле”. Авт.: М.Ю. Зубков, П.М. Бондаренко. Приоритет от 0.8. 11. 2000.
13. *Фрохт М.М.* Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1948. Т. 1. 432 с.
14. *Фрохт М.М.* Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1950. Т. 2. 488 с.
15. *Хаимова-Малькова Р.И.* Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. М.: Наука, 1970. 116 с.
16. *Alai R., Mohamed A.B., Taha M.T.A.* Fracture characterization in reservoirs through seismic attributes // *First Break*. 2014. Vol. 32. No 10. P. 83–92.
17. *Dorn G.A., Dominguez J.* Post-stack attribute-based fracture characterization: A case study from the Niobrara shale // *First Break*. 2017. Vol. 35. No 5. P. 85–89.
18. *Hale D.* Methods to compute fault images, extract fault surfaces and estimate fault throws from 3D seismic images // *Geophysics*. 2012. Vol. 78. No 2. P.33–43.
19. *Jaglan H., Qayyum F., Huk H.* Unconventional seismic attributes for fracture characterization // *First Break*. 2015. Vol. 33. No 3. P.101–109.
20. *Nurhasan A., Davis T.L.* Interpretation of wrench faulting and fault-related pressure compartmentalization, Wattenberg Field, Denver Basin Colorado // *First Break*. 2016. Vol. 34. No 2. P. 53–61.
21. *Williams R.M., Pascual-Cebrian E., Gutmanis J.C., Paton J.S.* Delineating fractures in the sub-seismic domain through seismic and image log analysis: a North Sea case study // *First Break*. 2017. Vol. 35. No 3. P. 49–57.

## Application of Experimental Tectonic Methods in Petroleum Geology on the Examples of Deposits in Western Siberia

M.Yu. Zubkov

*West-Siberian Geological Center, Ltd, Tyumen, 625002, Russia  
e.mail: zubkovmyu@mail.ru*

Received October 3, 2018; revised January 29, 2019; accepted January 28, 2019

**Abstract** — Modeling of the most common types formation of anticlinal and uplift-thrust tectonic structures was carried out with using optical polarization and tectonic-sedimentary methods based on seismic sections analysis of various areas and deposits located in the West Siberian oil and gas basin that were selected for examples. Experiments with using the optical-polarization method allowed us to research the nature of the stress-regime arising in the gelatin models of the sedimentary cover due to the growth of anticlinal blocks and uplift-thrust dislocations. By the level of tangential stresses and orientation of isoclinal in optical models, zones of probable tectonogenic fracture and the direction of cracks are predicted. 2D tectonic-sedimentation modeling made possible to explain the mechanism of formation of “rootless” uplifts, zones of subsidence or decompression in sediments, the principle of tectonic “pump” function, and to obtain dependencies between size and shape of uplift, density and opening of cracks formed above, to calculate the value of fracture “porosity”, as well as lateral dimensions of zones of tectonogenic fracturing. 3D tectono-sedimentation modeling allowed to link hydrography of the earth surface of the simulated area with decompression of zones that came to the surface in the models. These zones of decompression can serve as a search sign for exploration of highly productive zones containing hydrocarbon deposits.

**Keywords:** optical-polarization and tectono-sedimentation modeling, prediction of tectonogenic fracture zones, hydrocarbon reservoirs, types of anticlinal and uplift-thrust tectonic structures