



Зубков М.Ю.
кандидат геолого-минералогических наук,
ООО «Западно Сибирский Геологический Центр»
ZubkovMYu@mail.ru

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЕ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ – ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОГНОЗЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЗОН ДЛЯ РАЗВЕДКИ И ВЫБОРЕ СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ

На примере простейших тектонических структур, выделенных по данным сейсморазведки выполнено тектонофизическое моделирование их формирования двумя методами: оптико-поляризационным и тектоно-седиментационным, причем последний метод представлен двумя вариантами – двумерным и трехмерным. На основе проведенного тектонофизического моделирования установлен механизм формирования зон разуплотнения (просадки) осадков, где возникает дополнительная вторичная пористость в гранулярных коллекторах, а первоначально монолитные кремнистые и карбонатные пласты приобретают трещинную и трещинно-каверновую вторичную емкость. Установлены участки, в которых происходит всестороннее сжатие пород-коллекторов, и они в значительной степени теряют первичную пористость. Рассмотрен принцип работы тектонического «насоса», получены зависимости между размерами и формой поднятий, с одной стороны, и плотностью и раскрытостью трещин, величиной трещинной «пористости», формирующихся над ними, а также латеральными размерами зон тектоногенной трещиноватости, с другой. Трёхмерное тектоно-седиментационное моделирование дало возможность помимо получения зависимостей между теми же параметрами, что и при двумерном седиментационном моделировании, установить связь гидрографии земной поверхности моделируемой площади и зон разуплотнения, вышедших на поверхность моделей на этом же участке, что, в свою очередь, может служить поисковым признаком при разведке высокопродуктивных зон в породах-коллекторах, содержащих углеводородные залежи, присутствующих в пределах таких участков. Полученные в процессе экспериментального моделирования зависимости между морфологией и размерами антиклинальных структур и зонами вторичной (тектоногенной) трещиноватости используются при построении прогнозных схем с зонами разуплотнения, в которых формируются участки, характеризующиеся повышенной продуктивностью различных категорий, для чего в качестве исходных данных используются результаты сейсморазведочных работ. Успешность выполняемых на основе тектонофизического моделирования прогнозов варьирует от 66 до 100%, что зависит от качества исходной геолого-геофизической информации. Приведен пример оборудования и способа его использования с целью определения направления «главного стресса» на полноразмерных образцах керна и его привязки к сторонам света с помощью палеомагнитного метода. Уточнён смысл понятия «главный стресс». В статье освещены природные и геотехнологические условия одного из крупнейших и богатейших Юбилейного месторождения алмазов (Западная Якутия). И те и другие условия относятся к категории экстремальных, что значительно усложняет освоение. Показаны история отработки и ближайшие перспективы объекта.

Ключевые слова: Бажено-абалакский комплекс, сейсмические разрезы, тектонофизическое моделирование, оптико-поляризационный и тектоно-седиментационный методы, зоны разуплотнения и сжатия, направление «главного стресса», палеомагнитный метод.

В настоящее время большинство старых месторождений углеводородов (УВ) находятся на завершающей стадии разработки, поэтому нефтяным и газовым компаниям приходится вести разведку и последующую разработку сложных объектов с низкими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС), запасы в которых часто относятся к категории трудно извлекаемых (ТРИЗы). К таким объектам, в частности, относятся отложения баженновской свиты и её аналогов, а также ачимовская толща. Поэтому остро стоит проблема поисков в таких отложениях участков с достаточно высокими ФЕС. Кроме того, существует необходимость выбора способов разработки этих сложных в геологическом отношении объектов.

Накопленная к настоящему времени геолого-промысловая и геофизическая информация свидетельствует о неравномерном распределении напряжений, существующих в осадочном чехле, что приводит к возникновению зон сжатия и растяжения (разуплотнения). Если напряжения, возникающие в чехле, превышают предел прочности пород, входящих в его состав, то происходит формирование вторичной (тектонической) трещиноватости. В зависимости от величины напряжений она проявляется либо в виде мелких трещин, имеющих ту или иную протяженность и раскрытость без смещения разделенных трещинами участков относительно друг друга, или же образуются крупные разрывы, разбивающие осадочную толщу на блоки, которые имеют большую или меньшую амплитуду смещения относительно друг друга. В результате этого в пределах месторождения возникают участки, имеющие различные по абсолютной высоте ВНК, а в продуктивных пластах формируются зоны с резко неоднородными ФЕС, обусловленные возникновением вторичной (тектонической) трещиноватости.

Анализ успешности осуществления гидроразрывов продуктивных пластов (ГРП) в пределах различных месторождений, а также величины кратности повышения дебитов после их проведения показывает, что оба эти параметра изменяются в очень больших пределах, что трудно объяснить только возникновением трещин гидроразрыва и преодолением скин-эффекта. Отмеченные несоответствия также могут быть связаны с присутствием в осадочном чехле природной (тектонической) трещиноватости.

Таким образом, прогноз геодинамического состояния осадочного чехла имеет важное практическое значение, так как позволяет повысить достоверность геологических и гидродинамических моделей конкретных поисковых или разрабатываемых участков с целью размещения

разведочных и/или эксплуатационных скважин, а также при выборе методов повышения нефтеотдачи, например, с использованием ГРП.

Для решения этих задач предлагается использовать комплексирование данных сейсморазведки с выполненным на их основе тектонофизическим моделированием, а также результаты определения направления «главного стресса» на полноразмерном керне с последующей привязкой его к сторонам света палеомагнитным методом.

Аппаратура и методы исследований

В качестве основы для тектонофизического моделирования выбирались главные разновидности тектонических структур, встреченные в осадочном чехле Западно-Сибирского мегабассейна, для чего использовались результаты сейсморазведочных работ. С этой целью использовались структурные карты, построенные по главным отражающим горизонтам и сейсмические разрезы.

На основе сейсмических разрезов осуществлялось двумерное моделирование образования разнообразных антиклинальных структур. С целью трёхмерного тектонофизического моделирования использовались объёмные модели антиклинальных структур, которые строились на основе структурных карт по отражающему горизонту А (кровельная часть фундамента).

При проведении тектонофизического моделирования в качестве основного признака подобия между моделью и природным объектом считалось их геометрическое сходство друг с другом [1-7].

Тектонофизическое моделирование осуществлялось двумя способами оптико-поляризационным (далее для краткости просто «оптическим») и тектоно-седиментационным (также для краткости далее по тексту просто «седиментационным»). Причем седиментационное моделирование проводилось двумя способами двумерным и трехмерным.

Оптический метод исследования напряжений основан на явлении двулучепреломления в прозрачных аморфных оптически активных материалах, таких как желатин, эпоксидные смолы или оргстекло), подвергнутых деформации. В результате деформации изменение двойного лучепреломления в оптически активных материалах находится в прямой зависимости от величины напряжений, которые формируются в деформируемом теле [1-8].

При оптическом моделировании эквивалентным материалом служили 12-18% водно-глицериновые растворы желатина, моделирующие упруго-хрупкие и упругие тела.

На основе съёмки изохром и изоклин осуществлялось построение траекторий нормальных

и касательных напряжений, возникающих в под-
вергшейся деформации модели в результате фор-
мирующегося в ней двулучепреломления [1-11].

Изохроматические полосы отвечают равным
значениям разности показателей преломления
($n_1 - n_3$), и, соответственно, равным значениям
разности главных нормальных напряжений σ_1
и σ_3 , что равно половине максимального касател-
ельного напряжения τ_{max} . Картины изохром
позволяют получить представление о характере
распределения напряжений в испытываемой мо-
дели, их относительной величине, которая соот-
ветствует номеру полосы по всему полю, а также
о положении зон концентрации напряжений (по
плотности полос) и расположении изотропных
точек, где $\sigma_1 = \sigma_3$, а $\tau_{max} = 0$ [6].

Оптический метод применяется для уста-
новления участков с повышенными значениями
касательных напряжений τ_{max} и прогноза в их
пределах разрывных нарушений (трещин), со-
впадающих по направлению с траекториями
нормальных и касательных напряжений, постро-
енных по карте изоклин оптического поля [1-11].

Поскольку прогноз разновидности разрыв-
ного нарушения – отрыва, скола или сдвига
связан с необходимостью нахождения предель-
ных значений разрушающих напряжений в мо-
делируемых объектах, то на диаграммах на-
носятся оба возможных их вида (нормальные
и касательные). Формирование того или иного
типа напряжений обусловлено определенной
тектонической обстановкой: при односторон-
нем сжатии возможны сколы и/или отрывы, а
в зонах растяжения – только отрывы. Там, где
происходят сдвиги возможно формирование
сколов и отрывов.

Седиментационный метод представлен
двумя разновидностями.

Первая разновидность – **двумерное** sedi-
ментационное моделирование.

Прежде чем начинать строить двумерные
седиментационные модели, анализировались
масштабные характеристики моделируемых
тектонических структур, а также определялись
мощности всех юрских и меловых осадков, мо-
делируемых с помощью этого метода.

Двумерное моделирование проводилось в
камерах с линейными размерами 50x30x10 см.
В нижней части камеры помещались подвижные
блоки, с помощью которых моделировался рост
поднятий заданной формы [2-7].

Модели изготавливались из двух основ-
ных типов осадков: прочных (компетентных),
имитирующих карбонатные, кремнистые по-
роды, песчаники и алевролиты с карбонатным
цементом, а также некомпетентных (пластич-
ных), имитирующих песчано-алевритовые и

глинистые пласты. Первые изготавливались из
цемента, а вторые – из песчано-алевритового и
глинистого материала [2-7].

Вторая разновидность – **трёхмерное** sedi-
ментационное моделирование.

В отличие от двумерного седиментационного
моделирования, которое позволяет имитировать
только отдельные плоские вертикальные фраг-
менты рассматриваемой территории по анало-
гии с сейсмическими разрезами, трёхмерные
седиментационные модели позволяют получать
более полную информацию о плотности трещин,
формирующихся вследствие роста одного или
нескольких антиклинальных блоков в пределах
выбранной площади по её высоте [2-7]. С этой
целью используются данные о структуре поверх-
ности выбранного антиклинального участка, по
отражающему горизонту «А», по которому из-
готавливаются объёмные модели интересующих
поднятий. В трёхмерную седиментационную мо-
дель, также, как и в двумерную, закладываются
тонкие (толщиной 2-4 мм) компетентные (це-
ментные) слои с целью последующего опреде-
ления ориентации и плотности трещин, которые
образуются в них вследствие их деформации
воздымающимися трёхмерными антиклиналь-
ными блоками [2-7].

После окончания экспериментов оба типа
седиментационных моделей подвергаются по-
слойной разборке с целью изучения характера
распределения трещин в каждом из компетент-
ных слоёв, их ориентации в пространстве, про-
тяженности, плотности, а также их величины
раскрытости [2-7].

Отметим также очень важное для тектоно-
физического моделирования обстоятельство,
что все исследованные нами структуры имели
постседиментационный, то есть очень моло-
дой (вероятнее всего кайнозойский) возраст.
Этот факт подтверждается тем, что все анти-
клинальные структуры, установленные на сейс-
мических разрезах, прослеживаются до самых
верхних горизонтов, входящих в состав оса-
дочного чехла Западно-Сибирского осадочного
бассейна, а зоны разуплотнения, возникающие
над вершинами поднятий, часто проявляются
на дневной поверхности, о чём более подробно
будет сказано позднее.

Определение направления «главного стрес-
са» осуществлялось следующим образом.

Деформации, возникающие в образце в ре-
зультате его одноосного сжатия, определялись
измерителями линейных перемещений (ЛИР
19), которые распределялись по диаметру пол-
норазмерного образца через 30° друг от друга
(рис. 1). Предварительно на его торце обяза-
тельно проводилась «нулевая» линия, чтобы после

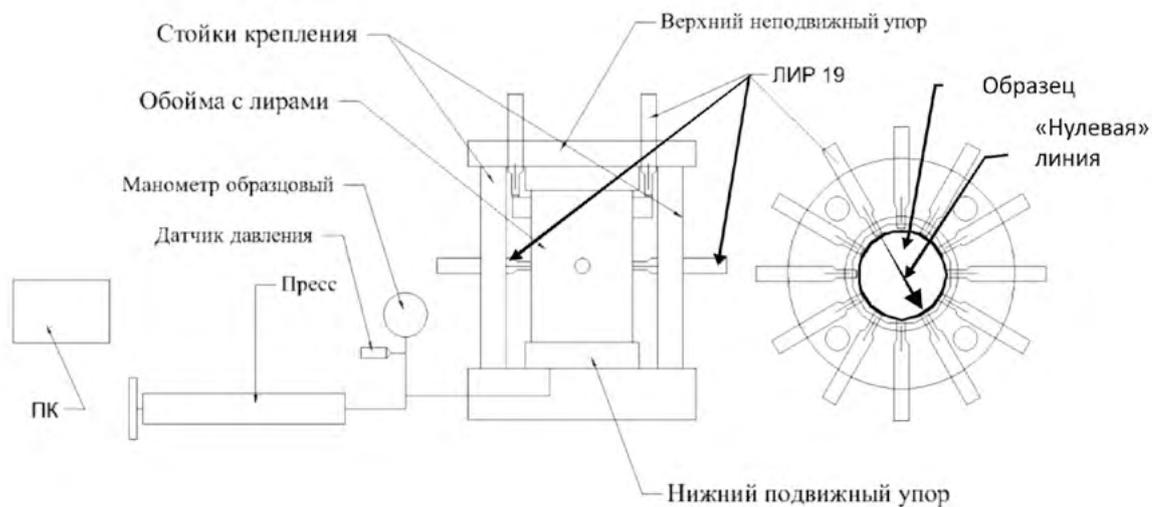


Рис. 1.
 Схема установки для определения направления «главного стресса» (по [12])

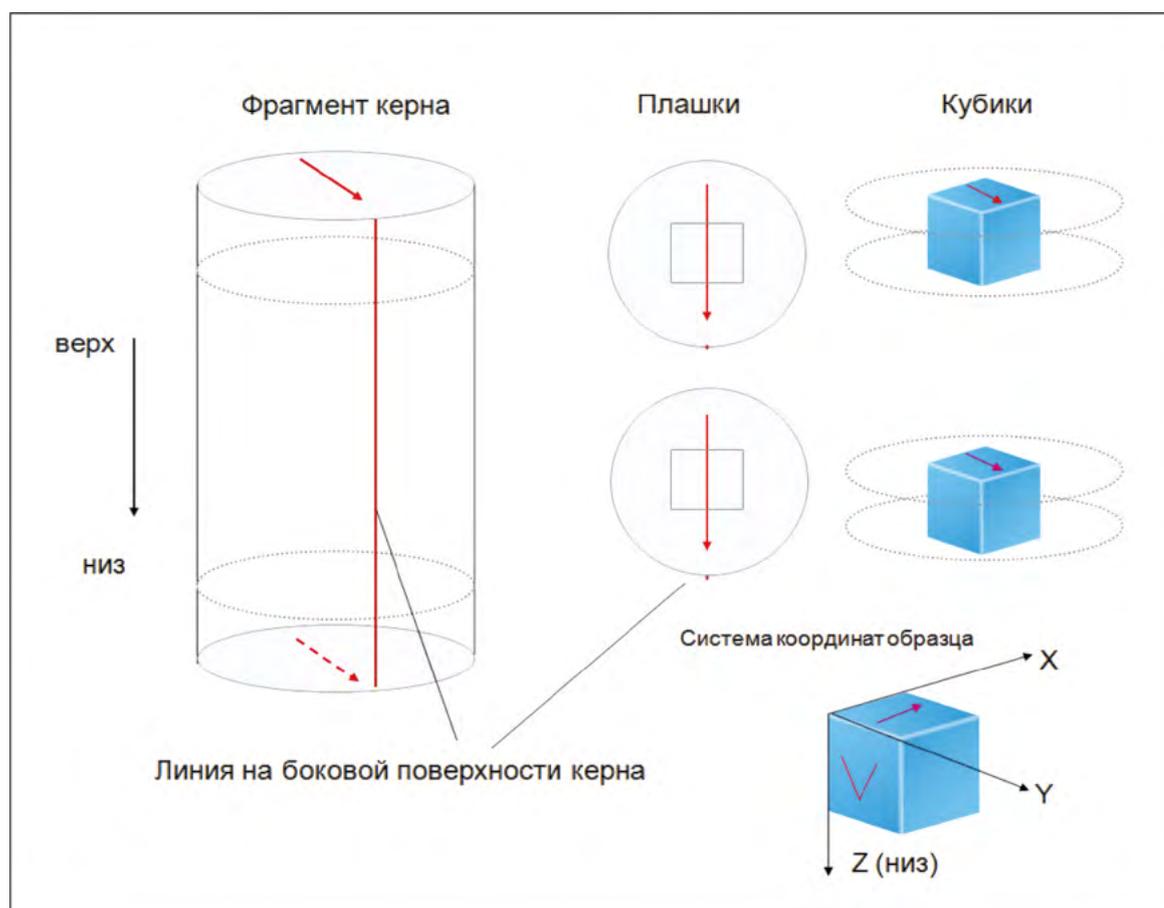


Рис. 2.
 Последовательность маркировки полноразмерных образцов керна с целью их привязки к сторонам света палеомагнитным методом ([по 12])

завершения измерений по ней можно было сориентировать полученное направление «главного стресса» по сторонам света с помощью палеомагнитного метода [12].

Помимо определения величины деформации образца, происходящей в результате постепенного роста одноосной нагрузки, в тех же направлениях устанавливались скорости распространения продольных волн (V_p). По полученным данным определялись направления, в которых наблюдались максимальные значения деформаций и скоростей (V_p). Нагружение образцов в процессе проведения исследований с целью определения величины их деформации при одноосном сжатии производилось с шагом в 0.5 МПа. При определении значений V_p шаг увеличения одноосного давления составлял 1.5 МПа. Нагружение образцов заканчивалось при давлении 7.5 МПа, поскольку при более высоких давлениях существует высокая степень вероятности, что образцы могут деформироваться и даже разрушиться [12].

После завершения измерений деформационных и акустических свойств полноразмерных образцов из них изготавливаются «плашки» вы-

сотой 2 см, которые отрезались от верхней и нижней частей каждого из исследованных образцов. Затем из них изготавливались кубики с таким же ребром, равным 2 см (рис. 2). Для того, чтобы не запутаться, сначала на плашках, а затем и на кубиках наносились стрелки, которые указывали на нарисованную ранее на торце полноразмерного образца вертикальную («нулевую») линию (рис. 2). Чтобы не перевернуть кубик «вверх ногами», на одной из его граней наносится знак V, указывающий направление «низ» по оси Z (см. рис. 2).

У образцов измерялись следующие их скалярные магнитные характеристики: k - объемная магнитная восприимчивость; NRM - величина естественной остаточной намагниченности и рассчитывался фактор Q (он же фактор Кегигсбергера), равный отношению остаточной намагниченности к наведённой [13]. Процедура ориентирования керна состояла в определении направления вязкой намагниченности образца, в предположении, что она показывает направление современного магнитного поля в месте бурения [13].

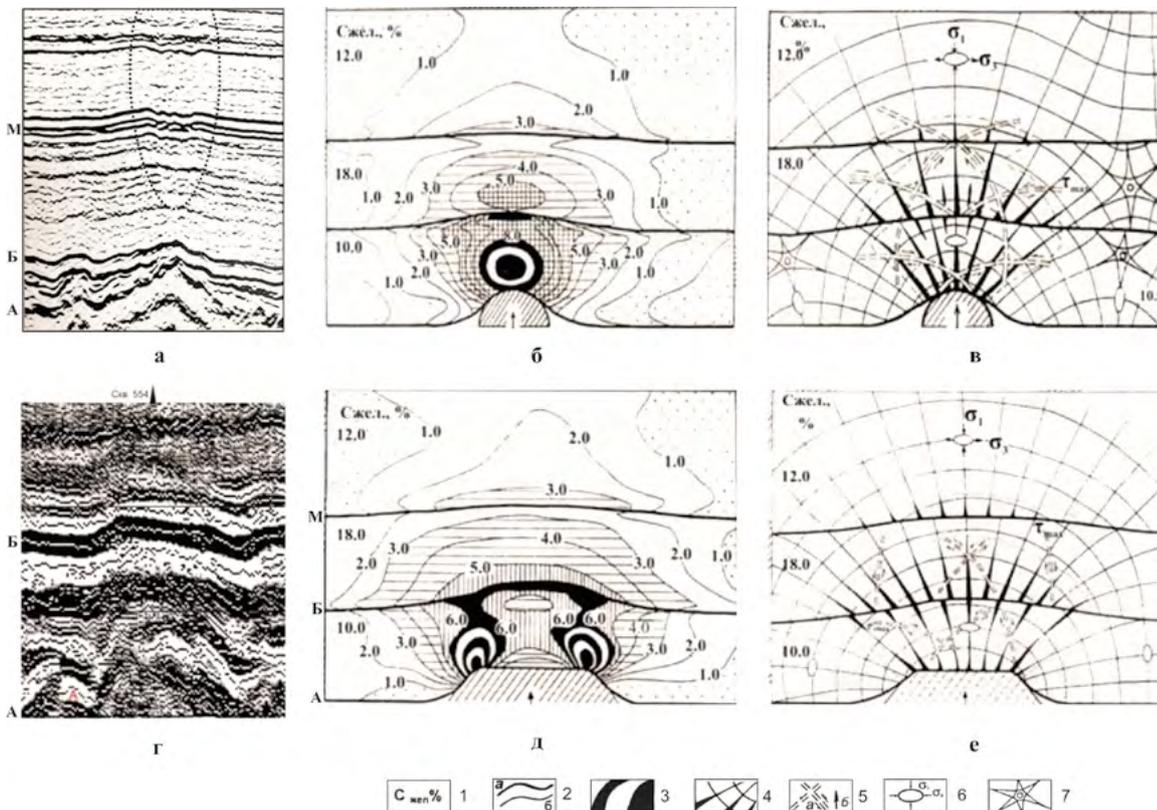


Рис. 3. Примеры базовых сейсмопрофилей (а, г) и расшифровка построенных на их основе оптико-поляризационных моделей (б, в, д, е); а - Пальняновская площадь, г - Салымское месторождение. Условные обозначения: 1 - концентрация желатина; 2 - а - границы между желатиновыми слоями, б - изохромы (уровни касательных напряжений); 3 - максимальные значения изохром (более 8); 4 - траектории нормальных напряжений (σ_1), их уширения - прогнозируемые трещины; 5: а - траектории касательных напряжений (τ_{max}), б - направление движения антиклинальных блоков; 6 - эллипсоид деформации; 7 - изотропная точка (по [6] с изменениями)

Определение вязкой намагниченности (VRM) осуществлялось по результатам полного ступенчатого размагничивание образца на основе диаграмм Зийдервельда (совмещение на одном рисунке двух ортогональных проекций траектории движения конца вектора остаточной намагниченности в процессе ее разрушения) [14]. Оптимальный интервал выделения вязкой намагниченности определялся экспериментальным путем и для выбранного в качестве примера образца он определялся в интервале температур от 80 до 200°C, что согласуется с теоретическими расчетами [15]. Направление оси X из вертикальной системы координат в географическую систему координат осуществляется по направлению вязкой намагниченности с учетом местного магнитного склонения (*Dz*), рассчитанного с помощью онлайн калькулятора с сайта Geomagnetism для географического положения изучаемой скважины. При расчётах учитывается также величина местного магнитного склонения [12].

Результаты исследований

Рассмотрим результаты оптического моделирования на примерах двух простейших антиклинальных структур, встречаемых на сейсмических разрезах различных месторождений и площадей Западной Сибири (*рис. 3*).

В моделях условно выделены три слоя. Нижний слой имитирует юрские отложения (интервал от кровли фундамента (А) – до кровли баженовской свиты (Б), средний (интервал Б-М) – это преимущественно неокомские осадки, а верхний (выше М) – более молодые меловые отложения [6].

Первая оптическая модель позволяет изучить распределение напряжений и осуществить прогноз тектонической трещиноватости в осадках, возникающих в результате роста симметричного поднятия, напоминающего своеобразный «подземный вулкан» (*рис. 3а*). Забегая вперед, обратим внимание на то, что над вершиной высокоамплитудного симметричного поднятия, присутствующего на сейсмическом разрезе, изображенном на этом рисунке, на некотором расстоянии от его вершины образовалась зона разуплотнения или просадки (см. *рис. 3а*).

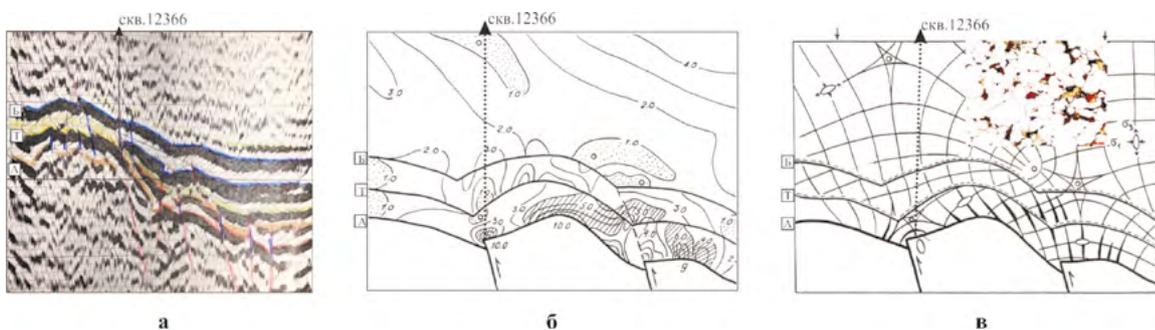
Вследствие роста симметричного поднятия в желатиновой модели возникают напряжения, уровню которых соответствуют изохромы различных порядков. Чем выше порядок изохром, тем значительнее напряжения, существующие в этом участке, и тем больше вероятность возникновения в этих участках трещинных дислокаций (*рис. 3б, в*).

Чтобы определить наиболее вероятную ориентацию трещин, которые могут возникнуть в

участках с повышенными значениями напряжений, используются направления изоклин, присутствующих в оптических моделях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальная концентрация напряжений и, соответственно, максимальная трещиноватость будет наблюдаться непосредственно над вершиной антиклинальной структуры, причём трещины будут иметь субвертикальную ориентацию (см. *рис. 3в*). Зона дробления будет увеличивать латеральные размеры по направлению вверх, достигая максимальной ширины на границе нижнего («юрского») и среднего («неокомского») желатиновых слоёв в интервале залегания «баженовской свиты», а затем она вновь начинает уменьшаться в латеральных размерах, полностью исчезая немного выше границы между средним и верхним (верхнемеловым) слоями (см. *рис. 3в*).

По мере роста поднятия сначала возникают трещины в области сжатия, образующейся непосредственно над его вершиной. Позднее в результате продолжающегося его роста постепенно на некотором удалении (на границе нижнего (юрского) и среднего (неокомского) слоёв, а также в самом («неокомском» слое) возникает зона растяжения, которая также характеризуется повышенными значениями касательных напряжений и в которой также возникают условия для образования субвертикальных трещин отрыва. Постепенно по мере роста этого поднятия трещины, сформировавшиеся в нижней зоне сжатия, поднимаются вверх, а трещины отрыва, образовавшиеся в зоне растяжения, расположенной в верхних слоях, устремляются вниз и в некоторый момент обе зоны дробления могут соединиться, образовав единую высокопроницаемую субвертикальную зону по которой становится возможной эффективная миграция флюидов снизу-вверх или в обратном направлении в зависимости от направления градиентов пластовых давлений между нижними и верхними породами-коллекторами или нефтематеринскими толщами и породами-коллекторами [6].

Распределение напряжений, возникающих в результате вздымания трапециевидного поднятия заметным образом, отличается от рассмотренного выше, сформировавшегося над симметричным поднятием (*рис. 3д*). Так, если в модели с симметричным поднятием первый участок максимальных концентраций напряжений (в зоне сжатия) формируется непосредственно над вершиной этого поднятия, а второй на некотором удалении от него (зона разуплотнения), то в рассматриваемой модели с трапециевидным поднятием участки с максимальными напряжениями или зонами сжатия сформировались над его крыльями, а в непосредственной близости


Рис. 4.

Фрагмент сейсмического разреза Пальяновской площади с расположенной на нём скв. 12366 (а) и результатами интерпретации оптико-поляризационной модели, построенной на его основе (б, в); на врезке (в) приведена фотография шлифа кварцевого песчаника, отобранного из интервала тюменской свиты, вскрытой этой скважиной. Отражающие горизонты: А – кровля фундамента, Т – кровля тюменской и Б – баженовской свит; (условные обозначения см. на рис. 3), стрелками показаны направления движения антиклинальных блоков (по [6])

от его плоской вершины присутствует участок с низкими значениями напряжений (см. **рис. 3д**). Вторым участком повышенных напряжений (зона растяжения) в этой модели возник также на некотором удалении от её вершины, причём он имеет гораздо большую латеральную протяженность, чем таковая, сформировавшаяся над первой (симметричной) моделью (см. **рис. 3б, д**). Высокопроницаемые трещинные зоны с субвертикальной ориентацией в этой модели прогнозируются на краях этого поднятия, а в центральной части над его плоской вершиной вполне могут сохраниться нераздробленные участки (см. **рис. 3д, е**). Поэтому интенсивная вертикальная миграция флюидов в этом случае возможна лишь на бортах трапециевидного поднятия, а не в его центральной части [6].

Обратим внимание на тот немаловажный факт, что высокодебитная скважина 554Э, пробуренная на Салымском месторождении, имевшая начальный дебит газоконденсата 350 м³/сут, попала именно в такую же, рассмотренную ранее, структурно-тектоническую ситуацию. Её «виртуальный» ствол находится как раз в субгоризонтальной протяженной зоне дробления, приуроченной к границе нижнего («юрского») и среднего («неокомского») слоёв оптической модели, имитирующих зону распространения верхнеюрских отложений, представленных бажено-абалакским комплексом (БАК) (см. **рис. 3г-е**).

В обеих рассмотренных ранее моделях прогнозируемые трещины ориентированы субвертикально по отношению к вершинам поднятий, а на их крыльях и вниз к основанию поднятия, они начинают наклоняться и принимать всё более пологое (вплоть до субгоризонтального) положение (см. **рис. 3в, е**).

В качестве примера более сложной оптической модели рассмотрим таковую с надвигово-взбросовыми дислокациями, имитирующими структурно-тектоническую ситуацию, в которой

находится скв. 12366, пробуренная в пределах Пальяновской площади (**рис. 4а**).

Анализ результатов оптического моделирования показал, что зоны, где происходит концентрация касательных напряжений, приурочены к кровельным частям надвиговых блоков и к их выдвигающимся вдоль разрывных нарушений участкам (см. **рис. 4б**). Важно обратить внимание на тот факт, что непосредственно над таким участком центрального блока сформировалась изотропная точка, вблизи которой, нормальные напряжения одинаковы во всех направлениях, а касательные напряжения практически равны нулю [6]. То есть рассматриваемый участок расположен в условиях всестороннего сжатия, поэтому в нём не образовались вторичные тектогенные трещинные дислокации (см. **рис. 4б, в**). Более того, в этом участке происходит интенсивное сжатие осадков, что приводит к резкому ухудшению их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС). Анализ результатов сейсморазведки показал, что скв. 12366 расположена именно в таком участке, поэтому чисто кварцевый песчаник, поднятый из этой скважины из подошвенной части тюменской свиты имеет пористость всего около 5-6 %, а по внешнему виду он очень напоминает кварцит, несмотря на сравнительно небольшую глубину его залегания – всего 2350 м (см. врезку с фотографией его прозрачного петрографического шлифа на **рис. 4в**). Исходя из полученных данных можно заключить, что бурить разведочные и/или эксплуатационные скважины в рассматриваемой структурно-тектонической ситуации не следует, так как в таких участках породы-коллекторы характеризуются крайне низкими ФЕС.

Двумерные седиментационные модели также позволяют разобраться с механизмом возникновения зон просадки или разуплотнения в осадках, которые часто наблюдаются на сейсмических разрезах на некотором расстоянии от

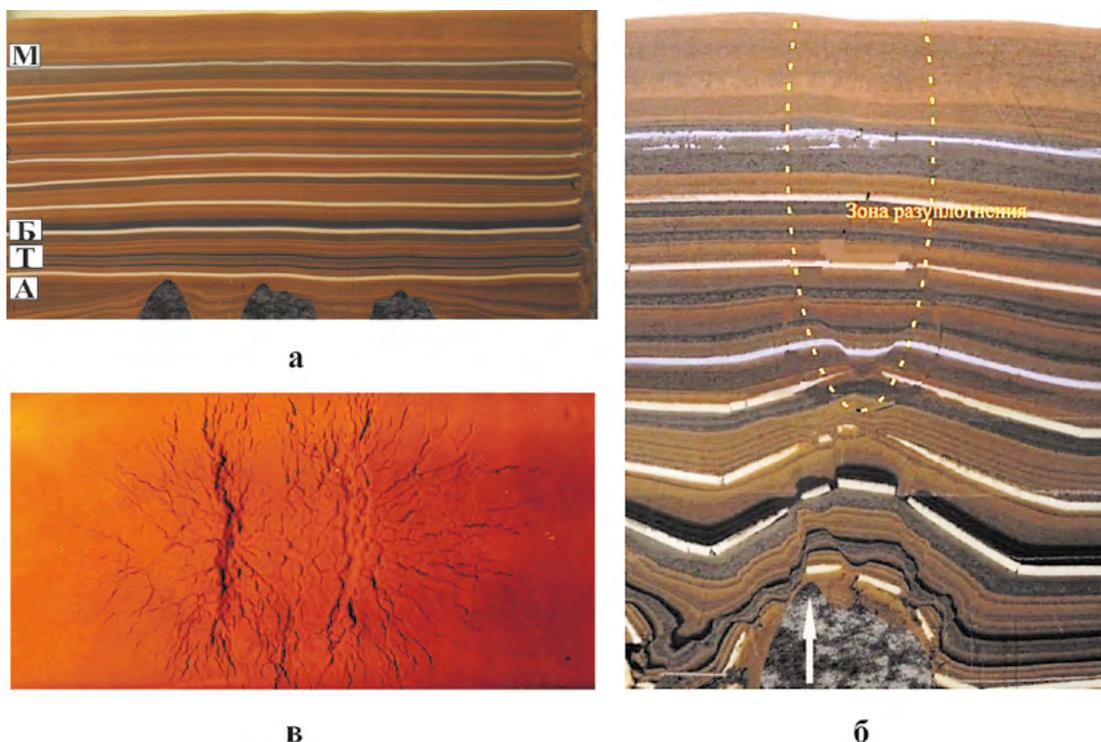


Рис. 5. Фотографии двумерной седиментационной модели в исходном состоянии (а), после роста центрального поднятия с образованием над ним зоны разуплотнения или просадки осадков (б) и вид сверху на вышедшую на поверхность модели зону разуплотнения (в) (по [6])

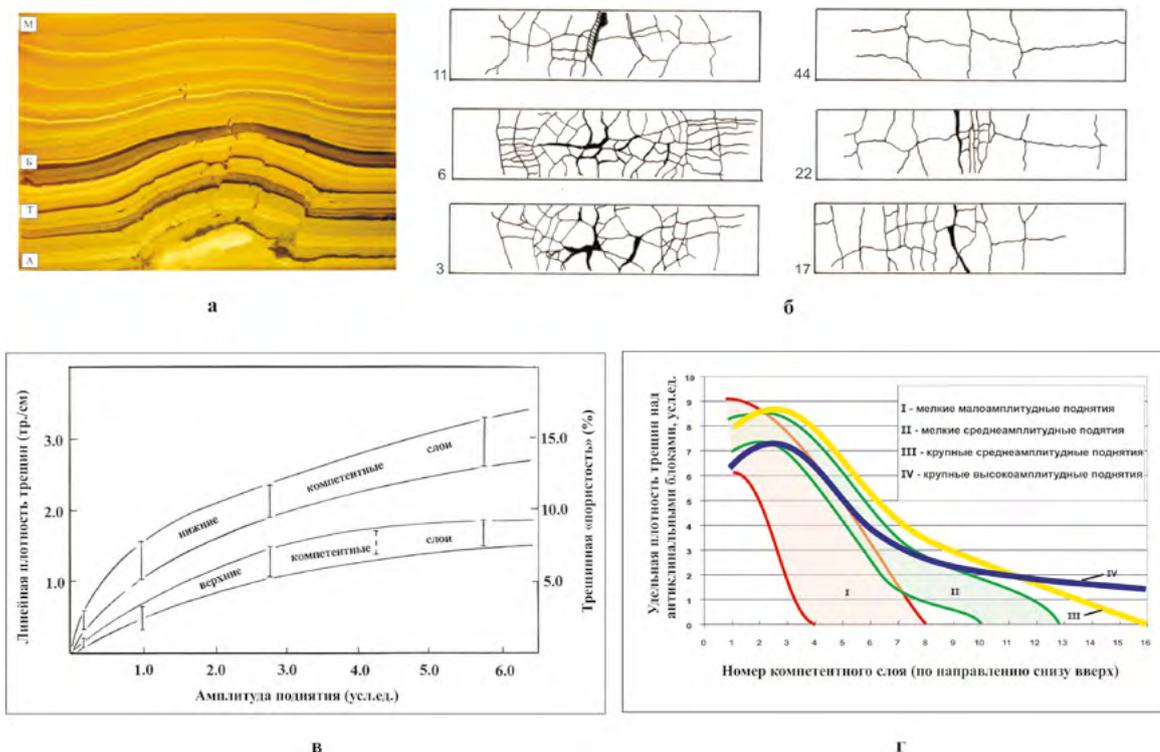


Рис. 6. Результаты препарирования компетентных слоёв двумерной седиментационной модели главного поднятия Кальчинского месторождения (а) с распределением в них разрывных дислокаций (б), зависимости линейной плотности трещин и трещинной «пористости» от амплитуды поднятия (в) и удельной плотности трещин над антиклинальными блоками в зависимости от номера компетентного слоя для поднятий различных размеров (г); цифрами обозначены номера компетентных слоёв по направлению снизу-вверх (по [6] с изменениями)

вершин поднятий, о чём уже говорилось ранее (см. *рис. 3а*). Для этого проведем сравнение исходной седиментационной модели и той же модели после завершения роста центрального поднятия (*рис. 5а, б*). На этих рисунках хорошо видно, что вследствие его роста в слоях, расположенных над ним, сформировалась зона разуплотнения в виде просадки осадков (*рис. 5б*). Зоны разуплотнения или просадки образуются следующим образом. Воздымающийся антиклинальный блок перемещает перекрывающие его осадки не только вверх, но и в стороны (в субгоризонтальном направлении). Именно поэтому на некотором расстоянии от его вершины возникает зона растяжения, которая проявляется в виде просадки осадков над его вершиной (см. *рис. 5б*). Формирование такой зоны разуплотнения или просадки было предсказано ранее при рассмотрении оптических моделей (см. *рис. 3а-в*).

В том случае, когда антиклинальный блок имеет достаточно крупные размеры и большую амплитуду, образующаяся над ним зона разуплотнения вполне может проявиться на поверхности седиментационной модели и в зависимости от его формы проявиться на ней, например, в виде грабенообразного провала с многочисленными трещинными дислокациями (*рис. 5в*). Следует обратить внимание на то, что наблюдаемый провал расположен в центре малоамплитудного поднятия, которое образовалось на поверхности модели вследствие роста антиклинального блока (см. *рис. 5б*).

На примере седиментационной модели с центральным высокоамплитудным поднятием, расположенным на Кальчинском месторождении, рассмотрим закономерности распределения трещинных дислокаций, сформировавшихся в компетентных слоях, в результате роста этого поднятия, начиная от самых нижних и заканчивая самыми верхними (*рис. 6а*). В препарированных компетентных слоях хорошо проявились главные закономерности распределения и морфологии сформировавшихся в них трещин, а также величина их раскрытости (см. *рис. 6б*). Перечислим установленные закономерности [6]:

- в нижних компетентных пластах ориентация сформировавшихся трещинных дислокаций похожа на структуру «разбитой тарелки», а по направлению вверх они ориентируются ортогонально;
- плотность трещин и их раскрытость по направлению вверх уменьшаются;
- в каждом компетентном слое сформировалась своя индивидуальная система трещин, которая не повторяет таковую даже в соседних подстилающих и перекрывающих их компетентных пластах;
- только над апикальной частью поднятия наблюдается единственная тещина, которую ус-

ловно можно считать главной (с максимальной раскрытостью), которая более или менее совпадает по направлению простираения в чередующихся компетентных слоях, начиная с самых нижних и до самых верхних (см. *рис. 6б*).

Таким образом трещины, образующиеся в различных компетентных пластах, имеющих небольшую мощность, как правило, не совпадают по своему расположению и ориентации, поэтому не следует ожидать существования линейных разрывных нарушений, протягивающихся на значительные расстояния в неоднородной по составу и физико-механическим свойствам осадочной толще. Вероятнее всего, что зоны дробления и, в частности, разуплотнения, представляют собой участки, в пределах которых многочисленные, вертикально ориентированные трещинные дислокации, несмотря на их различное расположение и ориентацию в осадочной толще, тем не менее, пересекаются друг с другом, формируя взаимосвязанную систему, по которой возможно осуществление эффективной вертикальной фильтрации флюидов в направлении падения величины пластового давления. Необходимо обратить особое внимание на то, что всё вышесказанное справедливо по отношению к осадочным толщам, состоящим из маломощных компетентных слоёв, перемежающихся с пластичными, а их деформации происходят в результате роста антиклинальных блоков. В мощных прочных (компетентных) породах, таких, как, например, известняки, кремнистые сланцы и других породах со схожими прочностными свойствами, в результате воздействия на них значительных по величине тектонических напряжений вполне вероятно возникновение протяженных трещин, пересекающих все эти мощные толщи компетентных пород от их подошвы до самой кровли.

Следует также отметить, что зоны разуплотнения формируются в осадках любого типа. Однако в гранулярных типах коллекторов, представленных, например, песчаниками и алевролитами, они часто маскируются присутствующей в них первичной межзерновой пористостью и проницаемостью. Однако такие участки выделяются на фоне окружающих высокими дебитами расположенных в их пределах скважин, а керн, отобранный в таких участках, характеризуется повышенными ФЕС.

Однако существуют породы, в которых коллектора образуются лишь в результате тектоно-гидротермального воздействия на них. Именно к таким отложениям относятся баженовская и абалакская свиты, в которых коллектора являются вторичными и формируются только в результате тектонических напряжений, например, вызванных растущими поднятиями (как в рассмотренных ранее примерах). В них образу-

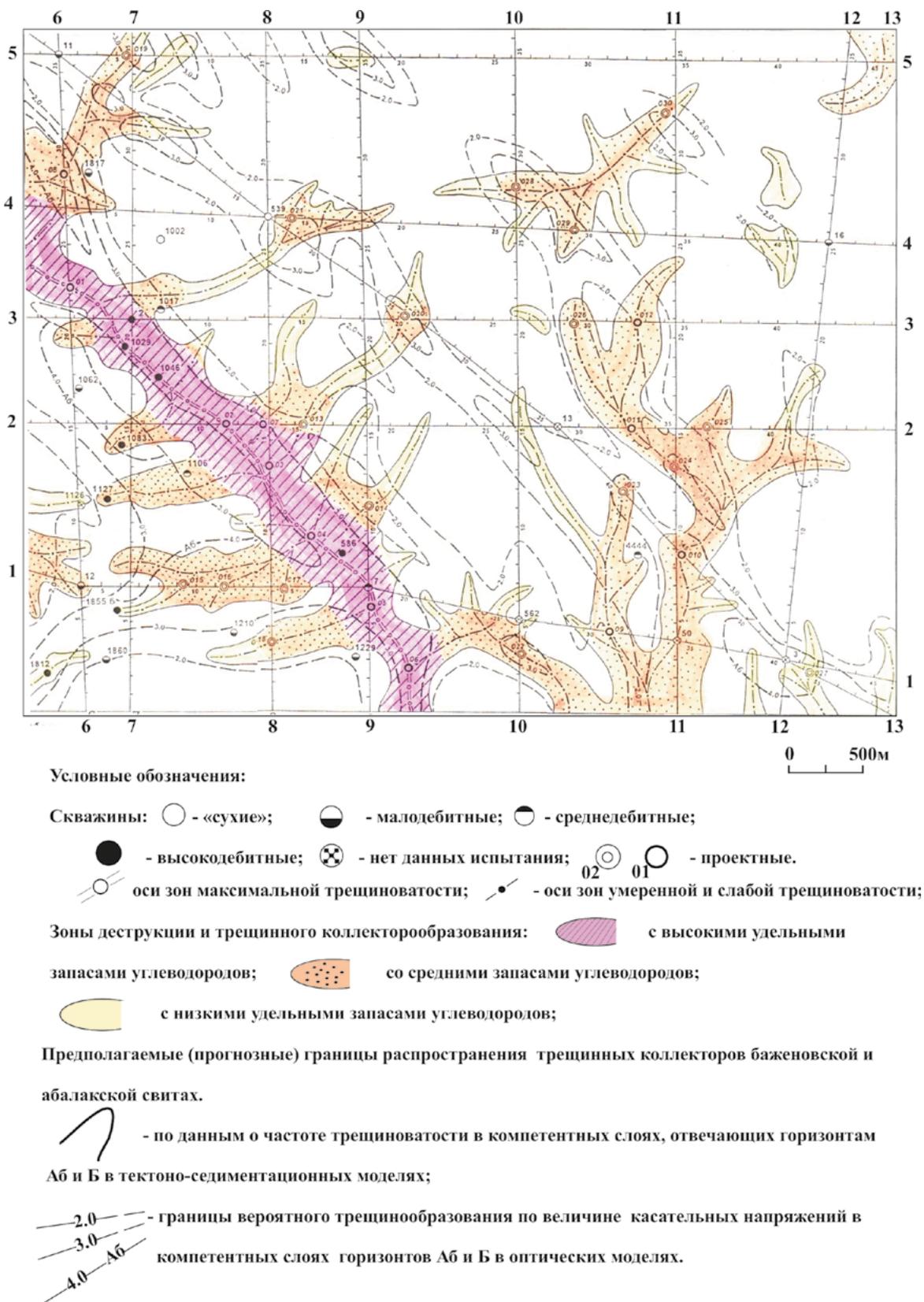


Рис. 7. Структурно-прогностическая схема размещения трещинных коллекторов в баженовской и абалакской свитах восточного участка. Ем-Еговской площади (по данным сейсморазведки и тектонофизического моделирования)

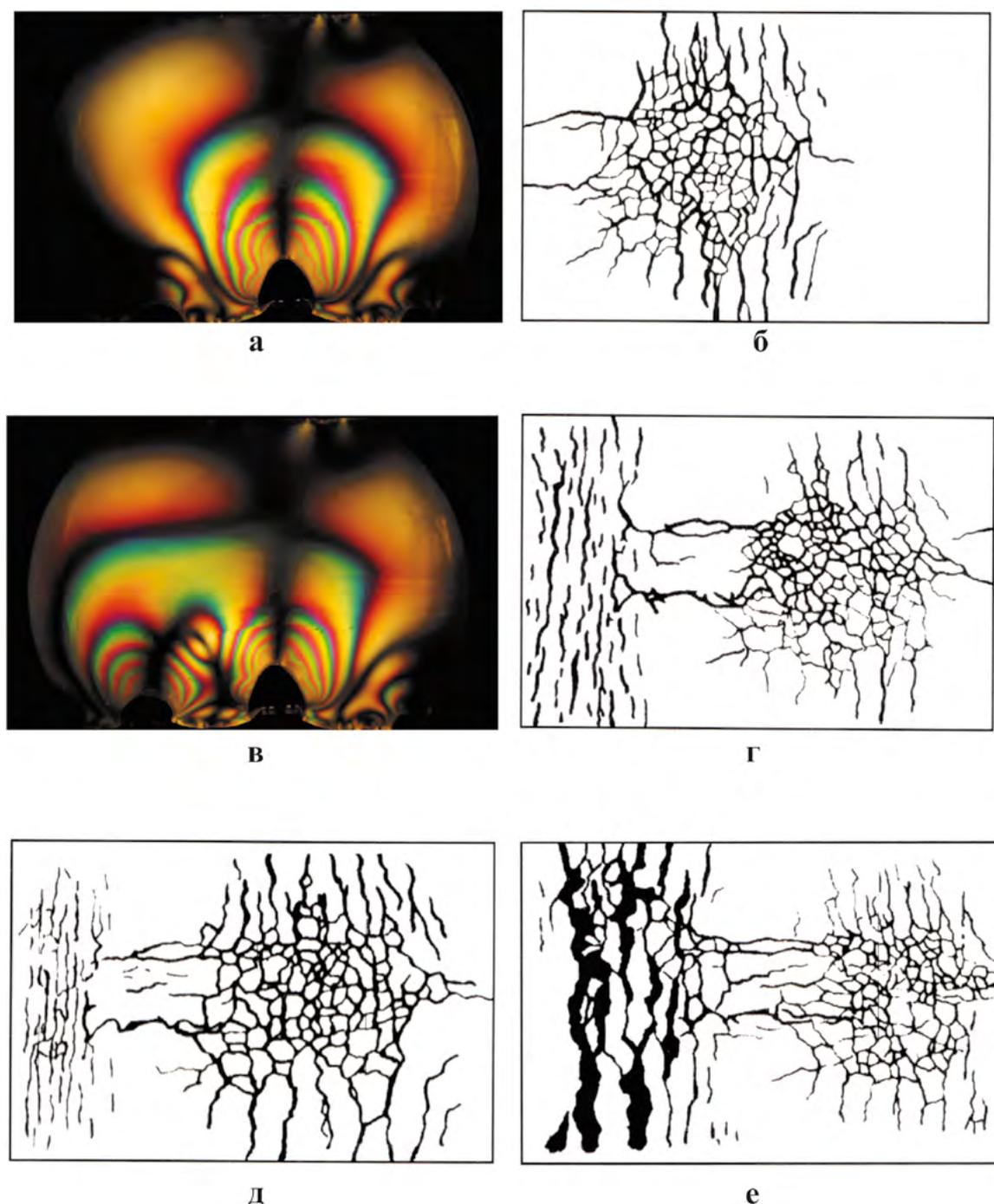


Рис. 8. Фотографии оптической модели последовательно растущих антиклинальных блоков (а, в), а также седиментационной модели с теми же блоками (б, г-е) – с изменяющимися размерами зон трещиноватости и раскрытости трещин, присутствующих в них, образовавшихся над попеременно растущими поднятиями (пояснения в тексте) (по [2 и 6])

ются вторичные коллекторы трещинного и/или трещинно-кавернового типов в кремнистых и карбонатных литологических типах пород, соответственно, названных автором потенциально продуктивными или сокращённо ППП [2-6].

В результате проведения тектонофизического моделирования были установлены зависимости между размерами и морфологией поднятий, с одной стороны, и геомеханическими свойствами

вторичных коллекторов трещинного типа, а также размерами зон, в пределах которых они могут образовываться. Часть полученных зависимостей приведена на рис. 6в и г. Эти зависимости дали возможность осуществить прогноз площади распространения перспективных участков для поисков углеводородных залежей в БАК на ряде площадей и месторождений [2-6]. Примером такого прогноза, может служить структурно-прогнозная

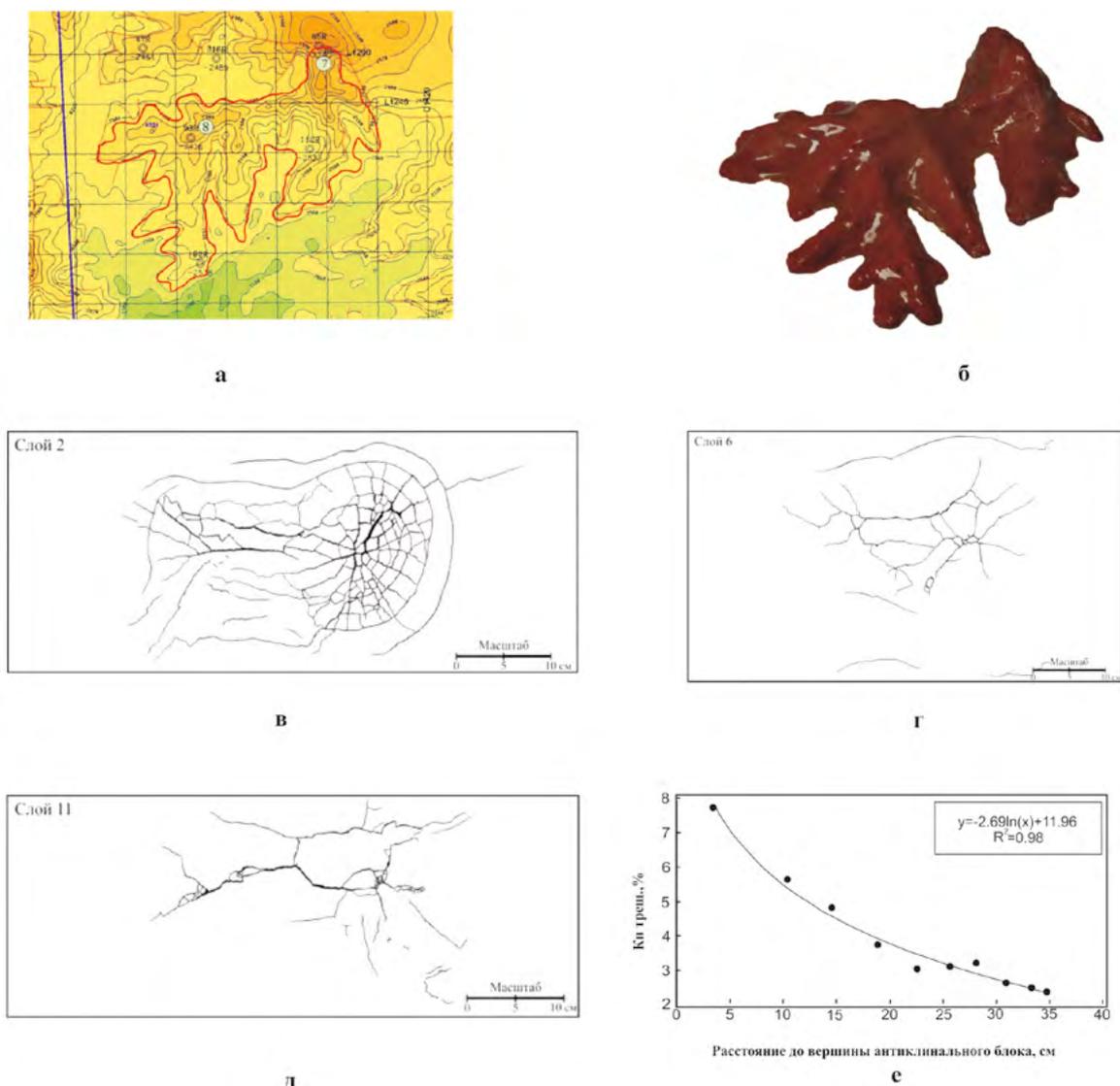


Рис. 9. Фрагмент структурной карты Восточно-Каменной площади по горизонту А (а), фотография антиклинального блока, имитирующего эту положительную структуру (б), распределение трещин в компетентных слоях трёхмерной седиментационной модели, образовавшихся в них вследствие роста этой антиклинальной структуры (в-д) и зависимость трещинной «пористости» образовавшейся в компетентных слоях этой модели от расстояния до вершины антиклинального блока (е); нумерация компетентных слоёв идет по направлению снизу-вверх

схема, построенная в пределах. Ем-Еговского месторождения с использованием данных сейсморазведочных работ 3Д и проведенного на их основе тектонофизического моделирования (рис. 7).

На этой площади из-за сравнительно небольшой толщины осадочного чехла и, напротив, довольно больших амплитуд сформировавшихся поднятий, над их вершинами на дневной поверхности сформировалась зона просадки, механизм образования которой рассматривался выше. Именно по возникшей зоне просадки в настоящее время протекает река. Ем-Еган [6]. Анализ продуктивности скважин, пробуренных на БАК в пределах этой площади, показал, что все высокодебитные скважины, сосредоточи-

лись в пределах этой прогнозной высокоперспективной зоны разуплотнения, к которой приурочена максимальная плотность вторичной тектоногенной трещиноватости, расположенной, вдоль русла реки. Ем-Еган (см. рис. 7).

В завершение рассмотрения двумерных оптических и седиментационных моделей проанализируем условия возникновения и принцип работы тектонического «насоса», работа которого дает возможность эффективно перекачивать пластовые флюиды, находящиеся в поровом пространстве пород-коллекторов в латеральном направлении [2, 6].

В результате роста симметричного антиклинального блока в оптической модели над ним формируется фотоизохроматическая картина, также

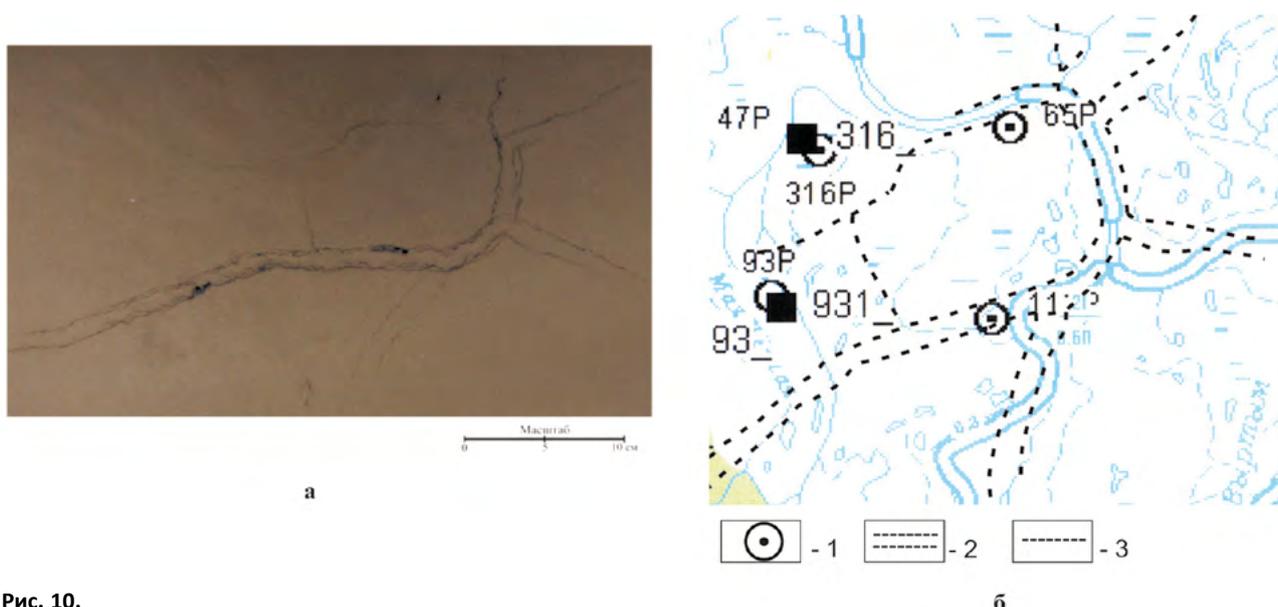


Рис. 10. Фотография зоны разуплотнения трехмерной седиментационной модели Восточно-Каменной площади (см. предыдущий рисунок), вышедшая на её поверхность (а) и её проекция на гидрографическую карту этого же участка (по [6])

Условные обозначения: 1 – скважины; 2 – грабеновидные провалы; 3 – трещины

имеющая симметричную форму (рис. 8а). Зона напряжений, образующаяся над вершиной этого же блока в седиментационной модели, выделяется в виде участка разуплотнения или вторичной тектогенной трещиноватости, имеющей более или менее равномерное распределение дислокаций в этой трещинной зоне. Однако наиболее протяженные трещины в этой зоне всё же преимущественно направлены вдоль оси поднятия параллельно коротким сторонам модели (рис. 8б).

Рост соседнего с ним поднятия происходит уже не в изотропной среде, а в напряженной обстановке, 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, заметно уменьшился по величине после роста второго поднятия, в примыкающей к нему зоне, а над вторым поднятием, напротив, сформировалась зона повышенных напряжений, проявившихся в появлении изохром высоких порядков (рис. 8в). В результате этого роста трещины, образовавшиеся над вторым поднятием, оказались ориентированными вполне определённым (субпараллельным) образом в соответствии с распределением напряжений, возникших вследствие роста первого поднятия (рис. 8г). Второе важное следствие роста второго поднятия заключается в том, что возникшая ранее зона деструкции над первым поднятием заметно уменьшилась в своих размерах, а раскрытость трещин, образовавшихся над ним, также резко сократилась (см. рис. 8г). Иными

словами, рост второго более молодого поднятия вызвал сжатие трещинной зоны, возникшей над первым более старым поднятием и как следствие – переток флюидов, заполнявших эту более раннюю трещинную зону над первым поднятием, в новую зону дислокаций, сформировавшуюся над вторым более молодым поднятием [6].

Возобновившийся рост первого поднятия вновь приводит к расширению образовавшейся ранее зоны трещинных дислокаций и увеличению степени их раскрытости но, напротив, резко уменьшению раскрытости трещин, образовавшихся ранее над более молодым вторым поднятием (рис. 8д). Очевидно, что флюиды, заполнявшие ранее субпараллельную трещинную зону, возникшую над вторым поднятием, по 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 даже расширилась существовавшая ранее зона деструкции. Трещины, которые находились в ней, резко увеличили свою раскрытость (рис. 8е). Напротив, зона деструкции и разуплотнения, существовавшая до этого момента над первым поднятием, вновь значительно уменьшилась в своих размерах, а присутствовавшие в ней трещины сжались из-за резкого уменьшения их раскрытости (см. рис. 8е). Очевидно, что возобновившийся рост второго поднятия вновь привёл к перетеканию флюидов, насыщавших зону разуплотнения, существовавшую над первым поднятием, по той же сети трещин, соединяю-

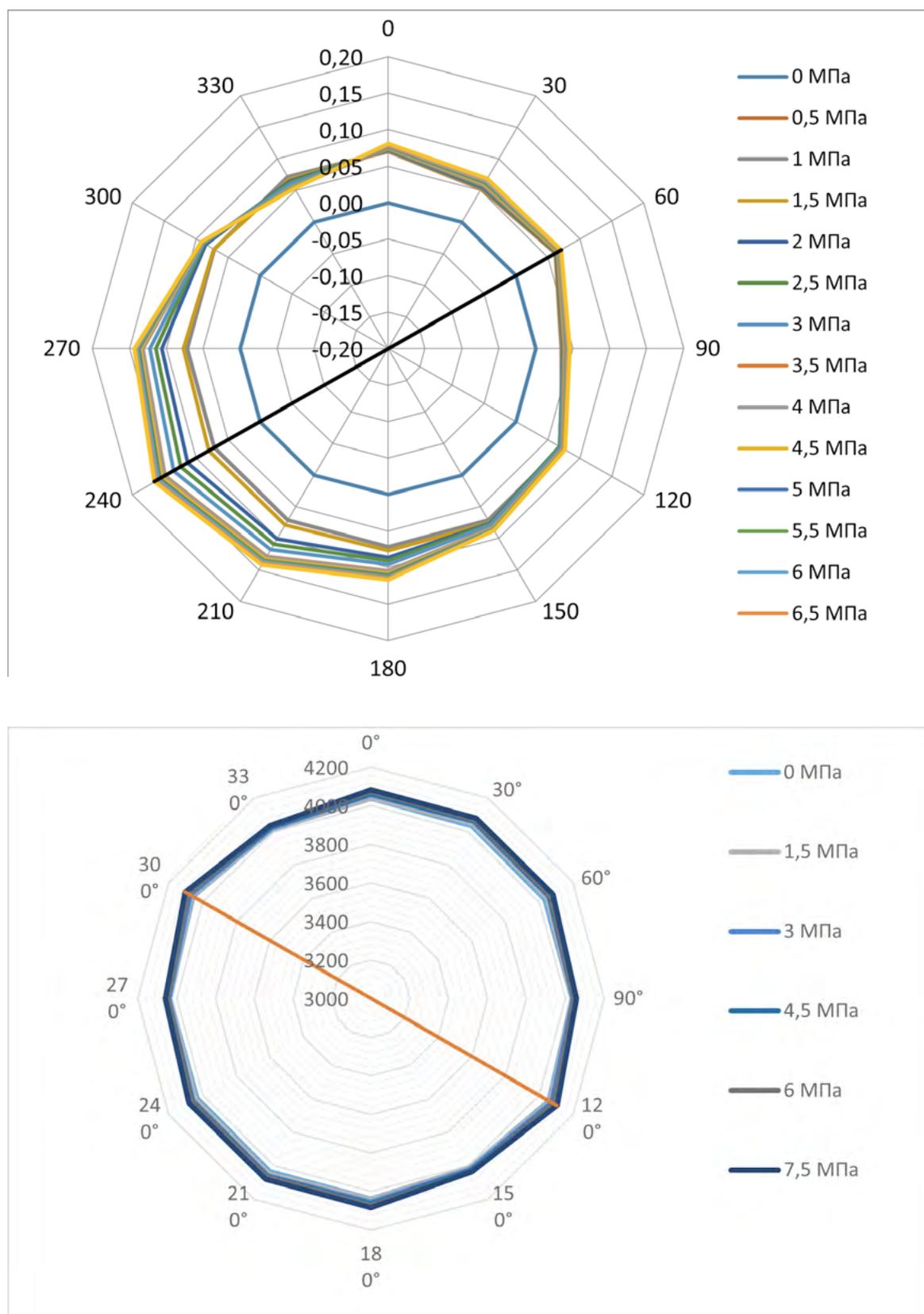


Рис. 11. Направления максимальной деформации (а) и максимальной скорости продольной волны (б) в образце с однонаправленным типом деформации (по [12] с изменениями)

щей обе зоны разуплотнения в возобновленную и значительно увеличившую свою трещинную ёмкость зону разуплотнения, возникшую над вторым поднятием (см. *рис. 8е*).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что 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, причём наиболее перспективной будет зона разуплотнения, образовавшаяся над самым молодым поднятием, которое воздымалось в последнюю очередь. Поэтому прежде, чем выбирать место для заложения поисково-разведочной или эксплуатационной скважины следует провести палеотектоническую реконструкцию последовательности роста соседних поднятий в пределах рассматриваемой площади или месторождения.

Примером трёхмерной седиментационной модели, построенной на основе сейсморазведочных данных, может служить фрагмент с антиклинальным блоком, выбранным в пределах Каменной площади (*рис. 9а*). На основе выбранной антиклинальной структуры была изготовлена модель, повторяющая все её морфологические особенности (*рис. 9б*). Затем осуществлялось моделирование роста этого поднятия. После завершения моделирования, так же, как и в случае двумерного седиментационного моделирования, производилось её послойное препарирование и исследовались закономерности распределения трещин в компетентных слоях, возникших после роста поднятия (*рис. 9в-д*).

На основе полученных результатов были построены зависимости подобные рассмотренным ранее при изучении двумерных седиментационных моделей. Примером может служить, величина трещинной, то есть «двумерной пористости» от расстояния до вершины антиклинального блока (*рис. 9е*). Полученные зависимости позволили построить структурно-прогнозную схему размещения трещинных коллекторов в БАК Каменной площади подобную рассмотренной ранее, подготовленную для Ем-Ёговской площади (см. *рис. 7*).

Так как антиклинальный блок, который использовался в рассматриваемой трёхмерной седиментационной модели имел достаточно высокую амплитуду, то зона разуплотнения, образовавшаяся над его вершиной, проявилась на поверхности модели в форме протяженных узких грабенообразных провалов и трещин (*рис. 10а*). Подобная ситуация описывалась ранее при анализе зоны разуплотнения (просадки), сформировавшимися над антиклинальными структура-

ми в пределах. Ем-Ёговского месторождения, где река. Ем-Еган протекает непосредственно по такой зоне, представляющей собой малоамплитудный грабенообразный провал.

В связи со сказанным любопытно провести сопоставление расположения зоны разуплотнения, сформировавшейся на поверхности рассматриваемой трёхмерной седиментационной модели и рассмотренного ранее фрагмента Каменного месторождения (см. *рис. 10а*), с реальной дневной поверхностью этого же участка. Наложение образовавшейся при моделировании зоны разуплотнения на гидрографическую карту поверхности этого же участка позволило установить, что идеального совпадения просадок (отвечающих рассматриваемым зонам разуплотнения) и русел речных протоков и ручьёв не наблюдается (*рис. 10б*).

Действительно, если в восточной части рассматриваемого участка отмечается прекрасное совпадение зоны разуплотнения, сформировавшейся на поверхность модели, с расположением протока реки Оби. При этом даже ширина зоны разуплотнения, полученная при выполненном трёхмерном седиментационном моделировании, практически полностью совпадает с шириной русел этих протоков (см. *рис. 10б*). То в западной половине этого же участка зоны разуплотнения, протянувшиеся в западном направлении (установленные по результатам седиментационного моделирования) совпадают гораздо хуже с реальной гидрографической обстановкой. Отмечается лишь цепочка мелких озёр, примыкающих к самой крупной из зон разуплотнения и небольшой ручей, протекающий по этой же зоне разуплотнения в юго-западной части рассматриваемого участка (см. *рис. 10б*). Отсутствие полного совпадения зон разуплотнения, полученных по результатам седиментационного моделирования и реальной гидрографией этого участка, вероятнее всего, объясняется особенностями регионального уклона земной поверхности на рассматриваемой территории. В восточной части уклон поверхности совпадает с направлением зоны разуплотнения и обские протоки совпадают с этими зонами разуплотнения, а в западной части этой территории отсутствуют сколько-нибудь значительные водные артерии. Поэтому зоны разуплотнения, которые были получены в результате трёхмерного тектонофизического моделирования на этом участке, практически никак не проявились в условиях гидрографии рассматриваемого участка земной поверхности, если не рассматривать цепочки мелких озёр и ручьёв, тяготеющих к этим зонам (см. *рис. 10б*).

Полученные результаты моделирования позволяют сделать предположение, что огром-

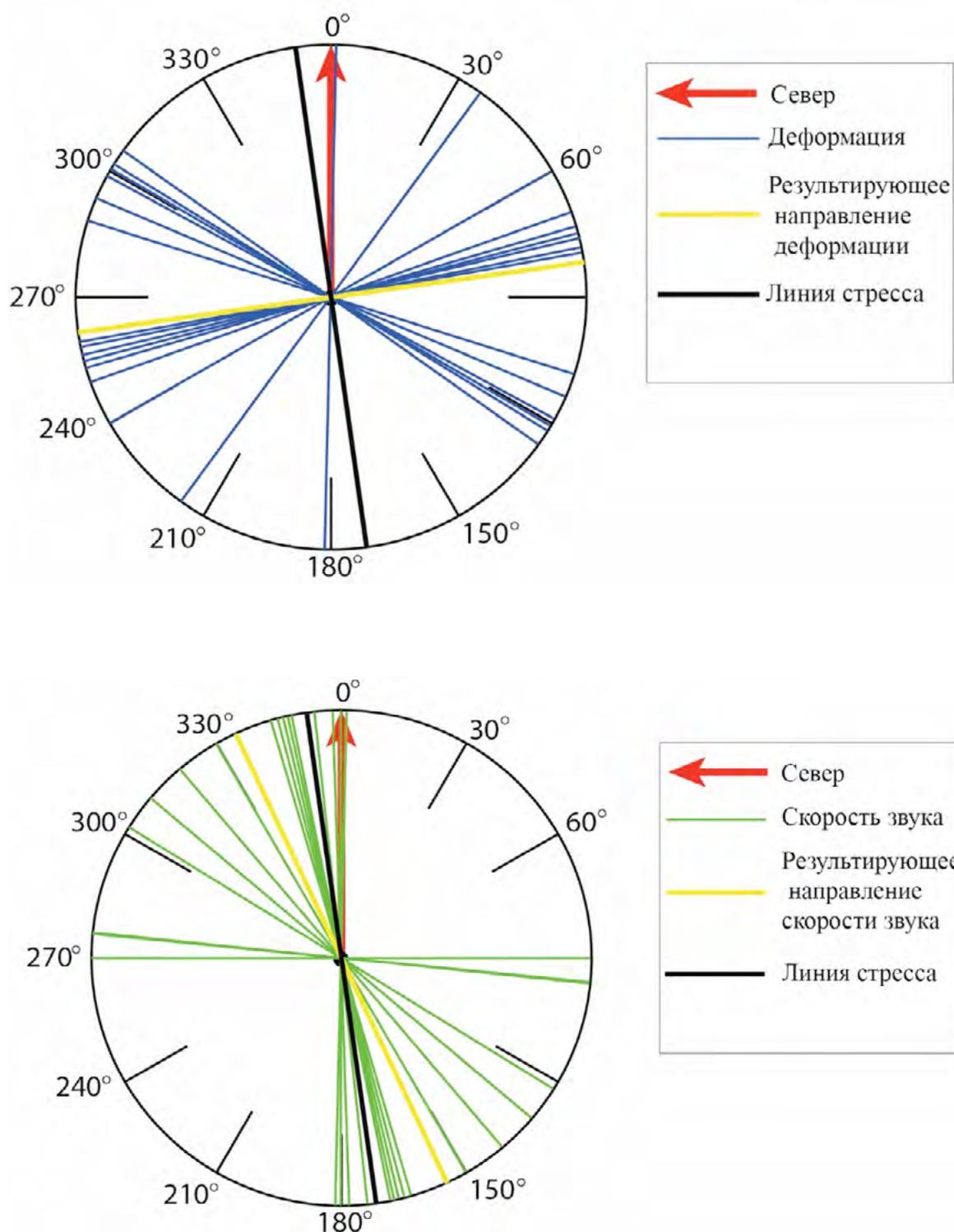


Рис. 12. Направления максимальных деформаций, исследованных образцов с усреднённым их направлением (а), направления максимальных скоростей продольной волны в тех же образцах с усреднённым их направлением (б), а также привязкой полученных усреднённых значений к сторонам света и выделением направления «главного стресса» обоими методами (по [12] с изменениями)

ная зона разуплотнения возникла в районе Самотлорского месторождения, а само озеро Самотлор находится в самом центре этой зоны разуплотнения, вышедшей на поверхность в виде просадки. Причём само озеро находится в центре малоамплитудного поднятия, то есть немного приподнято над окружающей его территорией, чем отдаленно напоминает кальдеру вулкана. Похожая тектоно-структурная ситуация была смоделирована с использованием двумерной седиментационной модели (см. *рис. 5б*). В рассматриваемой ситуации газы и, в первую очередь, метан, поднимающиеся из глубины по этой зоне разуплотнения, пронизанной субгоризонтальными трещинными дислокациями, насыщают воду озера, из-за чего она становится непригодной для существования живых организмов, что послужило причиной того, что в переводе с хантейского оно называется «мёртвым озером» [6].

Перейдем к следующей важной теме, связанной с определением «главного стресса» в осадочной толще с использованием образцов полноразмерного керна.

Керн, поднятый на поверхность из скважины и даже пролежавший какое-то время в кернохранилище, характеризуется своеобразной «деформационной памятью», обусловленной сохранившимися в нём микротрещинами, образовавшимися вследствие неоднородного распределения напряжений, существовавших в пластовых условиях, в которых он находился до того, как был поднят на поверхность. Этим объясняется тот факт, что в процессе одноосного сжатия его диаметр изменится закономерным образом, как бы «вспоминая» неоднородность поля напряжений, существовавших в пласте [12].

В качестве примера рассмотрим диаграмму, полученную при испытании образца, имеющего преимущественно однонаправленное увеличение его диаметра при постепенном росте одноосного сжатия (*рис. 11а*).

По результатам акустических исследований также определено направление максимальных значений V_p на завершающем этапе сжатия образца (см. *рис. 11б*).

Поскольку, как известно, микротрещины, имеющиеся в образце ориентированы вдоль или параллельно направлению «главного стресса», которому подвергалась порода, из которой был выбурен этот образец, то максимальные скорости распространения V_p совпадают с его ориентацией [12].

Напротив, максимальное увеличение диаметра образца при его одноосном сжатии происходит в перпендикулярном по отношению к «главному стрессу» направлении. Следова-

тельно, максимальные значения скорости V_p и диаметра образца при последовательном увеличении одноосной нагрузки в идеале должны быть ориентированы перпендикулярно по отношению друг к другу (см. *рис. 11а, б*).

Нанесение результатов исследований на диаграммы максимальных деформаций и скоростей распространения V_p показало, что, направления главного стресса, полученные обоими методами, практически совпадают, а расхождение в их направлениях составляет всего 17° (*рис. 12а, б*). В рассматриваемом случае ориентация «главного стресса», определённая по результатам исследованного образца обоими способами, почти совпадает с направлением север-юг (см. *рис. 12а, б*).

В заключение обратим внимание на то, что термин «главный стресс», в том смысле как он обычно употребляется не совсем корректен, поэтому в тексте настоящей публикации он взят в кавычки. На самом деле в осадочной толще максимальное нормальное напряжение (σ_1) ориентировано вертикально. Именно поэтому в образцах керна, отобранных из вертикальных скважин, трещины, присутствующие в отобранном из них керне, представленным компетентными породами (карбонатами, песчаниками с карбонатным цементом и т.п.) практически всегда ориентированы субвертикально. В описанном в настоящей работе способе определения направления «главного стресса» напряжение σ_1 имитировалось именно путём создания одноосного сжатия образца [12].

Более правильно под термином «главный стресс» следует понимать среднюю величину нормального напряжения (σ_2). И среднее, и минимальное (σ_3) значения нормального напряжения ориентированы в горизонтальной плоскости, но направление образовавшихся природных трещин всегда будет совпадать именно с ориентацией напряжения σ_2 . Как раз это направление и было определено на примере описанного ранее образца. Важно отметить, что в этом же направлении будут распространяться и трещины гидроразрыва.

В тех случаях, когда в условиях пласта величина σ_2 достаточно велика по сравнению с σ_3 и в осадках уже образовались трещины тектоногенного происхождения, то гидроразрыв пласта будет происходить именно по этим уже «готовым» природным трещинам. В случае выбора направления при бурении горизонтальных скважин также важно знать ориентацию «главного стресса» или σ_2 , так как их направление должно быть перпендикулярным к направлению σ_2 . При проведении многостадийного гидроразрыва пласта в такой скважине направление трещин

гидроразрыва будет совпадать с ориентацией «главного стресса» или σ_2 .

Обсуждение полученных результатов

Из анализа полученных результатов моделирования можно заключить, что зоны разуплотнения над поднятиями возникают в любых типах осадочных пород, слагающих Западно-Сибирский осадочный бассейн. В гранулярных коллекторах более высокие ФЕС пород-коллекторов в таких зонах отчасти маскируются исходной межзерновой пористостью и проницаемостью. Однако по данным разработки в этих участках отмечаются повышенные дебиты нефти и/или газа, а при петрофизических исследованиях образцов, отобранных из этих участков, устанавливаются так называемые «двойные» пористость и проницаемость, которые объясняются присутствием в этих образцах как исходной межгранулярной, так и вторичной трещинной пористости, и особенно проницаемости [6].

Гораздо более важным является решение задачи прогноза этих зон в отложениях, характеризующихся отсутствием первичных пород-коллекторов, в которых появление эпигенетических коллекторов связано с воздействием вторичных тектонических и/или тектоно-гидротермальных процессов [4, 5]. Примером таких вторичных пород-коллекторов, являются коллекторы, образующиеся в БАК Западной Сибири [3-5]. С целью прогноза их расположения, а значит и содержащихся в них залежей УВ, проанализируем более подробно результаты тектонофизического моделирования.

Для этого рассмотрим закономерности, наблюдаемые в распределении трещин и их плотности в зависимости от амплитуды поднятий, а также толщины компетентных слоёв, имитирующих карбонатные и кремнистые пласты (ППП), входящие в состав БАК, а также их положения в осадочном разрезе [3-6].

В результате проведенных тектонофизических экспериментов было установлено, что плотность трещин, формирующихся в компетентных слоях, а также величина их раскрытости и площадь формирующейся над поднятием зоны деструкции, при прочих равных условиях, зависит от их мощности: чем толще компетентный слой, тем меньше плотность образующихся в нём трещинных дислокаций, однако больше их раскрытость и значительно больше площадь их распространения. Наоборот, чем тоньше компетентные пласты, тем больше в них плотность трещин, но меньше их раскрытость и площадь их распространения. Кроме того, радиус зоны трещиноватости, формирующейся над поднятием, зависит от его линейных размеров – чем он больше (при

одинаковой амплитуде поднятий), тем значительно больше латеральные размеры зоны дробления, возникающей над ним [6]. Необходимо также иметь в виду, что если образовавшиеся поднятия расположены близко по отношению друг к другу, то зоны дробления, сформировавшиеся над ними в осадках, моделирующих отложения БАК, сливаются в единую обширную зону деструкции. Поэтому в такой зоне в реальных (природных) осадках БАК могут находиться значительные по объёму запасы УВ.

Для практического применения полученных при тектонофизическом моделировании результатов большое значение имеет прогноз средних расстояний между трещинами, образующимися в компетентных пластах (ППП), так как от этого будет зависеть степень вероятности попадания в трещину или трещины ствола пробуренной скважины.

Наибольшая плотность трещин или, соответственно, минимальные расстояния между образовавшимися тектоногенными трещинами должны сформироваться в самых тонких ППП, поэтому максимальная вероятность попадания в процессе бурения скважины в трещинную зону существует в самых маломощных кремнистых и/или карбонатных слоях, входящих в состав БАК. 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 толщину 1.5-2.0 м, соответствующие расстояния между ближайшими трещинами будут изменяться от 1.5-2.0 м до 7.5-10.0 м [6].

Из результатов седиментационного моделирования вытекает очень важный в практическом отношении вывод, что все трещины, образующиеся в ППП в пределах зоны деструкции, взаимосвязаны друг с другом, поэтому при попадании скважиной хотя бы в одну из трещин ею будет дренироваться вся эта зона.

Используя приведённые выше оценки расстояний между ближайшими трещинами в компетентных пластах различной мощности, при бурении скважин на обсуждаемые верхнеюрские объекты, чтобы не пропустить зону тектониче-

ского дробления (зону разуплотнения), после бурения скважин необходимо делать хотя бы неглубокий (малообъёмный) гидроразрыв пласта с протяженностью трещин порядка 15-20 м [6].

Следующей чрезвычайно важной с точки зрения разработки трещинных коллекторов задачей является достоверный прогноз ориентации возникающих тектоногенных трещин. На основе полученных экспериментальных данных можно заключить, что над небольшими изометричными поднятиями формируются округлые зоны дробления, напоминающие по форме структуру «разбитой тарелки», в которой по краям образуются дугообразные трещины, а в центральной части радиальные и реже – субперпендикулярные (см. *рис. 6б*). Над крупным продолговатым поднятием формируется субперпендикулярная сеть трещин, причём преобладают трещины, ориентированные вдоль его оси и бортов, эти же трещины имеют максимальную раскрытость. Поэтому при бурении наклонных и горизонтальных скважин необходимо учитывать морфологию поднятия, над которым прогнозируется существование тектоногенной зоны трещиноватости.

Уточнить направление прогнозируемых трещин можно используя описанный ранее способ определения направления «главного стресса» на полноразмерных образцах с привязкой к сторонам света с помощью палеомагнитного метода (см. *рис. 11, 12*).

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

Анализ зависимости расстояния продуктивных скважин, пробуренных на БАК от оси зоны разуплотнения и их дебитом показал, что скважины, в которых получены притоки нефти из ППП, входящих в состав БАК, расположены на расстоянии не более 500-1000 м от оси зон разуплотнения. Расстояние наиболее высокодебитных скважин в обе стороны от оси зоны разуплотнения не превышает 300-350 м [3, 6]. Таким образом, полученные на основе моделирования результаты, хорошо согласуются с данными промысловых испытаний.

Анализ 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 % [6]. Было установлено, что степень достоверности прогнозов напрямую зависит от качества исходной геолого-геофизической информации. Поэтому при проведении поисково-разведочного и эксплуатационного бурения скважин на площадях, освещенных сейсморазведочными работами, чтобы грамотно организовать разведку и/или разработку УВ залежей в пределах этих площадей, следует проводить тектонофизическое моделирование в их пределах с целью выделения наиболее перспективных участков с максимально высокими ФЕС пород-коллекторов. Ориентацию трещин следует уточнять с помощью методики определения направления «главного стресса» на полноразмерном керне [12].

Выводы

1. Комплексирование данных сейсморазведки и выполненных на их основе результатов тектонофизического моделирования позволило объяснить механизм формирования зон разуплотнения (просадки) в осадочном чехле, зон уплотнения, в которых породы-коллекторы имеют крайне низкие ФЕС и принцип работы «тектонического насоса», способствующего эффективному формированию УВ залежей.

2. Реконструкция механизма образования зон вторичной (тектоногенной) трещиноватости, выполненная на основе тектонофизического моделирования и данных сейсморазведки, даёт возможность осуществлять прогноз распространения продуктивных зон в БАК (главным образом в ППП, входящих в его состав), а также в любых других (гранулярных) осадках, слагающих Западно-Сибирский мегабассейн.

3. На основе комплексирования результатов определения деформационных и акустических свойств образцов в процессе их одноосного сжатия возможно восстановление направления «главного стресса» в анализируемой осадочной толще.

4. Микротрещины, присутствующие в образцах, ориентированы параллельно направлению «главного стресса», поэтому максимальные значения скорости продольной волны направлены в том же направлении, а максимальные значения деформации образцов, наоборот, в перпендикулярном по отношению к направлению «главного стресса».

5. В предлагаемом способе определения направления «главного стресса» максимальные значения нормального напряжения, которое в

пластовых условиях ориентировано вертикально, моделируются путём одноосного сжатия полноразмерных образцов.

6. Направление «главного стресса» или максимального нормального напряжения (σ_1) ориентировано в вертикальном направлении, а в горизонтальной плоскости (параллельно отло-

жению осадков или слоистости) определяется ориентация промежуточного значения нормального напряжения (σ_2), в направлении которого ориентированы природные микротрещины, уже присутствующие; в этом же направлении в пласте будут возникать новые (искусственные) трещины в случае проведения в нём ГРП. 

Литература

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. Наука. 1975. 536 с.
2. 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.
3. 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. Ред. В.А. Волков. Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Ханты-Мансийск: «Путиведь», 2000. С. 174-187.
4. Зубков М.Ю. Коллекторы в бажено-абалакском комплексе Западной Сибири и способы их прогноза. Геология нефти и газа. № 5. 2014. с. 58-72.
5. Зубков М.Ю. Тектоногидротермальные процессы в юрских отложениях Западной Сибири. Геология нефти и газа. 2017. № 1. С. 60-76.
6. Зубков М.Ю. Применение методов экспериментальной тектоники в нефтяной геологии на примере месторождений Западной Сибири. Геотектоника. № 3. 2019. С. 92-109.
7. 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.
8. 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.
9. Фрохт М.М. Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1948, Т. 1, 432 с.
10. Фрохт М.М. Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1950, Т. 2, 488 с.
11. Хаимова-Малькова Р.И. Методика исследований напряжений поляризационно-оптическим методом. М.: Наука, 1970. 116 с.
12. Зубков М.Ю. Определение направления «главного стресса» в осадочной толще и его ориентация по сторонам света с помощью палеомагнитного метода. «Каротажник». НТВ АИС, Вып. 2 (296), 2019, с. 23-33.
13. Большаков В.А. Использование Магнетизма горных пород при изучении новейших отложений М., ГЕОС, 1996, 192 с.
14. Zijdeveld J.D.A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results. Methods in paleomagnetism. Eds. Collinson D.W., Creer K.M., and Runkorn S., Elsevier, Amsterdam, 1967, p.254-286.
15. Буров Б.В., Балабанов Ю.П., Ясонов П.Г., Храмов А.Н., Ржевский Ю.С. Способ ориентирования скважин в пространстве. Авт. свидетельство. М. кл.Г. 01 в. 3/08, 1978.

UDC 550.34.013.4:553.98.061.4

M.Yu. Zubkov, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, LLC «West Siberian Geological Center», ZubkovMYu@mail.ru

TECTONOPHYSICAL AND PETROPHYSICAL MODELING – INNOVATIVE DIRECTIONS IN FORECASTING PROMISING ZONES FOR EXPLORATION AND SELECTING METHODS FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROCARBON DEPOSITS

Abstract: On the example of the simplest tectonic structures identified according to seismic survey data, tectonophysical modeling of their formation was performed by two methods: optical-polarization and tectonic-sedimentary, the latter method being represented by two variants: two-dimensional and three-dimensional. On the basis of the conducted tectonophysical modeling, a mechanism was established for the formation of zones of decompaction (subsidence) of sediments, where additional secondary porosity occurs in granular reservoirs, and initially monolithic siliceous and carbonate layers acquire fractured and fractured-cavernous secondary capacity. Areas have been identified in which there is a comprehensive compression of reservoir rocks and they largely lose their primary porosity. The principle of operation of the tectonic «pump» is considered, the dependences between the sizes and shape of uplifts, on the one hand, and the density and opening of fractures, the magnitude of fracture «porosity» formed above them, as well as the lateral dimensions of tectonic fracture zones, on the other hand, are obtained. Three-dimensional tectono-sedimentary modeling made it possible, in addition to obtaining dependencies between the same parameters as in two-dimensional sedimentation modeling, to establish a relationship between the hydrography of the earth's surface of the modeled area and the decompaction zones that came to the surface of the models in the same area, which, in turn, can serve as a search feature in the exploration of highly productive zones in reservoir rocks containing hydrocarbon deposits present within such areas. The dependences between the morphology and sizes of anticlinal structures and zones of secondary (tectonogenic) fracturing, obtained in the course of experimental modeling, are used in the construction of predictive schemes with decompaction zones, in which zones characterized by increased productivity of various categories are formed, for which the results of seismic surveys are used as initial data. The success of forecasts based on tectonophysical modeling varies from 66 to 100%, which depends on the quality of the initial geological and geophysical information. An example of the equipment and the method of its use in order to determine the direction of the «principal stress» on full-sized samples and its binding to the cardinal points using the paleomagnetic method is given. The meaning of the concept of «main stress» is clarified.

Keywords: Bazheno-Abalaksy complex, seismic sections, tectonophysical modeling, optical-polarization and tectonic-sedimentary methods, zones of deconsolidation and compression, direction of «main stress», paleomagnetic method.