

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ:
ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
И ЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ**

© В.М. Полохов¹, М.М. Довбнич², В.П. Солдатенко², Я.В. Мендрий², 2011

¹*Приднепровская геофизическая разведочная экспедиция, Новомосковск, Украина*

²*Национальный горный университет, Днепрпетровск, Украина*

On the example of 3D seismic data from one of the Dniepr-Donetsk basin areas it was shown the possibility of complexation of geomechanical modeling and additional rapid analysis of seismic data. This complexation is used for solving problems related to the determination of probable directions of hydrocarbon natural migration, researching of reservoir filter-capacitive characteristics changes, modeling of hydrocarbon traps formation and development in difficult geological conditions, as well as delineation of high fractured zones and prediction of abnormally pressured zones, etc.

Keywords: geomechanics, stress-deformed state, oil and gas geology.

Введение. Наличие областей аккумуляции углеводородов в осадочной толще генетически связано как с условиями седиментации, так и с вторичными изменениями свойств геологической среды, обусловленными наряду с иными и геодинамическими процессами. При этом именно напряженно-деформированное состояние является той ключевой характеристикой среды, анализ которой позволяет прогнозировать влияние геодинамических факторов, обуславливающих деформационные процессы в осадочной толще, на формирование зон разуплотнения и повышенной трещиноватости, областей увеличения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов, направление естественной миграции углеводородов, развитие зон аномально высоких пластовых давлений (АВПД) и пр.

Все перечисленные задачи нефтегазовой геологии, решение которых возможно с привлечением информации о напряженно-деформированном состоянии среды, связаны с двумя группами физических эффектов, возникающими под действием механических напряжений, а именно:

- нарушение сплошности, увеличение пустотного пространства и проницаемости горных пород под действием механических напряжений;
- изменение давления флюида в коллекторе в зависимости от напряженно-деформированного состояния.

Эффекты, возникающие в осадочной толще под действием тектонических напряжений, отображаются и в волновых полях. В частности, это нарушения сплошности среды – зоны повышенной трещиноватости.

Цель работы – комплексный анализ тектонических напряжений, полученных на основе геомеханического моделирования с результатами дополнительной обработки сейсмических данных при прогнозе нефтегазоперспективности объектов Днепровско-Донецкой впадины в сложных геологических условиях.

Методика исследований. Геологическая среда подвержена воздействию механических силовых полей различной природы и, как следствие, находится в некотором напряженно-деформированном состоянии. В общем случае в любой точке геологической среды действуют независимые силовые поля, в первую очередь литостатическое, обусловленное весом вышележащих пород, и тектоническое, связанное с тектоническими (геодинамическими) процессами. Пространственное распределение тектонических напряжений более сложное, чем литостатических. Опираясь терминами разведочной геофизики, можно сказать, что тектонические напряжения аномальны по отношению к литостатическим. Имеет место широкий спектр причин, приводящих к возникновению тектонических напряжений. В условиях осадочной толщи одна из основных причин – процессы деформирования слоев осадочных пород.

На сегодня сейсморазведка – единственный геофизический метод, позволяющий, с одной стороны, выполнить детальные структурные построения исследуемой толщи, отражающие суммарные деформации, которые испытывала геологическая среда в ходе эволюции, от накопления толщ осадков до проявления современной неотектоники, с другой – на основе анализа скоростей распрост-

ранения упругих волн и плотности дать весьма точную информацию об упругих свойствах среды. Такие сведения, в свою очередь, позволяют построить геомеханическую модель, представляющую собой структурную модель с заданными упругими свойствами. Как следствие, появляется информация, необходимая для оценки напряженно-деформированного состояния среды, обусловленного протекающими в ней деформационными процессами. В последние годы исследователи неоднократно отмечали возможность изучения напряженно-деформированного состояния на основе структурно-скоростных моделей среды по данным сейсморазведки при решении задач нефтегазовой геологии [1–6].

Предлагаемый в настоящей работе подход позволяет выполнять оценку напряжений, связанных с протекающими в ней деформационными процессами, в рамках упругой изотропной модели среды [6] и включает в себя несколько этапов (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема методики оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе структурно-скоростных моделей

Остановимся на каждом из этапов более подробно.

- 1. Создание 3D геомеханической модели среды.** Выполнение этапа предполагает анализ структурно-скоростных моделей, создание цифровой 3D структурной модели среды и ее “начинки” упругими модулями – коэффициентом Пуассона и модулем Юнга. Практически единственным источником информации об упругих постоянных горных пород в естественном залегании являются данные о скоростях распространения продольных и поперечных волн и плотности.
- 2. Расчет тензора литостатических напряжений.** Наличие модели распределения упругих модулей в среде дает возможность оценки и литостатических напряжений. В условиях спокой-

ного рельефа и пологих структур такая оценка может быть выполнена с помощью аналитических выражений, полученных А.И. Динником для упругой изотропной среды [7]. Можно применять и другие уравнения, в соответствии с которыми возможна оценка вертикальных и горизонтальных литостатических напряжений в зависимости от глубины, плотности и упругих свойств среды [5]. Для геологически более сложных ситуаций возможно определение литостатических напряжений путем решения уравнений равновесия [1].

- 3. Восстановление вероятных перемещений точек геологической среды на границах осадочной толщи (граничные условия при расчете тектонических напряжений).** Данный этап является важнейшим звеном в оценке тектонических напряжений. При его выполнении используется следующая рабочая гипотеза. Тектоническое силовое воздействие, создающее поле напряжений, находит отражение в особенностях строения осадочной толщи (гипсометрия отражающих границ, тектонические нарушения, изменение относительной мощности пластов и пр.). Особенности этапа не позволяют его полностью формализовать. Авторами разработаны оригинальные подходы к расчету перемещений тектонической природы на основе анализа структурной модели исследуемой среды с учетом имеющейся априорной информации о геологическом развитии территории исследований.

- 4. Создание конечно-элементной модели, расчет перемещений, тензора деформаций и тензора тектонических напряжений.** Для расчета напряженно-деформированного состояния геологической среды применяется метод конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений. С целью снижения вычислительных затрат в настоящей работе использовались многосеточные варианты МКЭ [8]. Методом вычислительного эксперимента определены оптимальные стратегии вычислений на последовательности сеток. Согласно анализу численных результатов, применение разработанных многосеточных вычислительных алгоритмов существенно, в некоторых случаях на два порядка, снижает затраты машинного времени при расчете напряженно-деформированного состояния геологической среды.

На основе полученных тензоров напряжений вычисляются две характеристики: сумма нормальных напряжений и интенсивность касательных напряжений. Первая характеризует изменение объема без изменения формы (можно выделить области сжатия и растяжения), вторая – изменение формы без изменения объема (позволяет выделять области действия скалывающих напряже-

ний). С помощью комплексного анализа этих двух величин получают ответ на вопрос об основных особенностях напряженно-деформированного состояния среды, и именно они, главным образом, используются при последующей геологической интерпретации. На основе получаемой в ходе расчетов 3D модели распределения тектонических напряжений строятся сечения в заданных направлениях и выполняется их последующая геологическая интерпретация.

Вычислительные алгоритмы, применяемые в настоящей работе, реализованы в виде пакета программ, с использованием которого проводятся все необходимые расчеты напряженно-деформированного состояния геологической среды.

Как отмечалось выше, возможность использования информации о напряженно-деформированном состоянии геологической среды при решении задач нефтегазовой геологии обусловлена двумя группами физических эффектов. Остановимся на них более подробно.

Многочисленные исследования в механике, тектонофизике, структурной геологии и других областях науки позволяют выяснить основные механизмы нарушения сплошности и изменения проницаемости среды под действием механических напряжений. И хотя различные типы коллекторов (порový, трещинный, сложный) по-разному реагируют на напряженно-деформированное состояние, не вызывает сомнения, что под действием растягивающих и/или скалывающих напряжений происходит увеличение емкостных свойств и проницаемости коллектора независимо от его типа. Очевидно, что прогнозирование таких областей возможно на основе анализа зон действия растягивающих и интенсивных скалывающих напряжений.

Динамика флюида в коллекторе представляет собой сложное явление, во многом зависящее от изменения давления флюида, которое, в свою очередь, также определяется напряженным состоянием.

В изотропном коллекторе, в соответствии с законом Дарси, скорость флюидопотока прямо пропорциональна градиенту давлений [5]:

$$\vec{V} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } P,$$

где k – коэффициент проницаемости; μ – вязкость флюида.

Как следствие, интенсивность динамики флюида будет определяться модулем, а ее направление – ориентировкой вектора градиента. При этом давление в коллекторе будет определяться как литостатическими, так и тектоническими напряжениями [9], а именно шаровой составляющей тензора напряжений $P \sim (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$. В случае анизотропного коллектора скорость флюидопото-

ка будет зависеть еще от матрицы коэффициентов проницаемости

$$\begin{aligned} V_x &= -\frac{1}{\mu} \left(k_{xx} \frac{\partial P}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial P}{\partial y} + k_{xz} \frac{\partial P}{\partial z} \right), \\ V_y &= -\frac{1}{\mu} \left(k_{xy} \frac{\partial P}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial P}{\partial y} + k_{yz} \frac{\partial P}{\partial z} \right), \\ V_z &= -\frac{1}{\mu} \left(k_{xz} \frac{\partial P}{\partial x} + k_{yz} \frac{\partial P}{\partial y} + k_{zz} \frac{\partial P}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

где V_i – компонента вектора скорости фильтрации; k_{ij} – компоненты симметричной матрицы коэффициентов проницаемости.

Свойства матрицы коэффициентов проницаемости также во многом связаны с напряженно-деформированным состоянием среды. Следовательно, данные о напряженно-деформированном состоянии геологической среды позволяют осуществлять прогноз динамики флюида в коллекторе – прогнозировать области пониженных давлений (области стока флюида) и направления миграции флюида.

Возникающие под действием тектонических напряжений нарушения сплошности геологической среды будут приводить к возникновению ряда эффектов, что отражается и в волновом поле, а именно: ухудшается качество прослеживаемости субгоризонтальных осей синфазности, связанное с изменением акустических свойств на границе; возникают наклонные оси синфазности дифрагированных и дуплексных волн. Необходимо отметить, что в реальных условиях данные эффекты визуально практически не различимы на фоне помех.

Среди разнообразия подходов к изучению зон дезинтеграции геологической среды можно выделить так называемые экспресс-методы, основная цель которых – оценка наличия потенциальных зон нарушения сплошности. Не претендуя на изучение внутреннего строения и оценки степени проницаемости и флюидонасыщенности таких зон, они, тем не менее, позволяют проследить эти зоны на участке исследований и в некоторых случаях сделать выводы об их генезисе.

В настоящей работе для изучения областей потенциальных зон трещиноватости использовано два подхода: трассирование и последующий анализ наклонных осей синфазности дуплексных и дифрагированных волн и расчет когерентности.

Как отмечалось выше, трассирование осей синфазности дифрагированных и дуплексных волн от слабоконтрастных по физическим свойствам трещиноватых зон в условиях помех оказывается затруднительным без применения дополнительных процедур обработки временных разрезов. Одним из перспективных направлений, позволяющих решить данную задачу, является

использование статистических методов выделения слабых геофизических аномалий [10], а именно – метода самонастраивающейся фильтрации. Данный алгоритм позволяет “приспосабливаться” к изменению свойств сигнала и помех, причем значения оценок этих свойств получают непосредственно в процессе самой обработки. При решении задач выделения сигнала на фоне помехи исходят из предположения о том, что исходное поле представляет собой наложение некоррелируемых помех на совокупность неизвестных по форме сигналов различного направления (простираения). За сигнал принимается некоторый регулярный процесс с математическим ожиданием, не равным нулю, регистрируемый по нескольким профилям (или трассам) со смещением (или без смещения) от профиля к профилю. В настоящей работе использовался алгоритм самонастраивающейся фильтрации, выполненный в пакете COSCAD (А.А. Никитин, А.В. Петров и др.). В программе реализован алгоритм самонастраивающейся фильтрации, который базируется на расчете статистики Хоттеллинга, являющейся оценкой энергетического отношения сигнал/помеха. Статистика вычисляется в скользящем двумерном окне при различных его наклонах. Данный алгоритм предназначен для выявления и трассирования слабых линейных аномалий, соизмеримых по амплитуде с уровнем помех в условиях отсутствия информации о форме аномалий.

В качестве меры когерентности принято отношение первого собственного значения ковариационной матрицы к общей энергии записи в окне.

Преимущества данной меры когерентности показаны в работе [11]. Среди них, прежде всего, следует выделить ее нечувствительность к амплитудным вариациям, вплоть до смены полярности. В скользящем окне, которое непрерывно перемещается по профилю и времени, вычисляется ковариационная матрица. Размер окна по времени определяется частотой сейсмической записи, а по профилю зависит от ширины выделяемых аномальных зон и, как следствие, определяет разрешенность и детальность результатов. Первое собственное значение ковариационной матрицы отражает сигнальную часть записи, а сумма квадратов ее диагональных элементов – общую энергию сигнала. Их отношение, которое приписывается центральному отсчету, и выступает мерой когерентности. Для уменьшения влияния на результаты расчетов разноинтенсивных субгоризонтальных осей синфазности данные в пределах окна анализа нормируются на их среднеквадратический уровень. Учет региональных наклонов отражающих горизонтов осуществляется посредством перебора углов наклона скользящего окна.

Более подробно методика данных процедур рассмотрена в работе [12].

Результаты и выводы. В качестве примера настоящих исследований рассмотрим результаты, полученные на одной из площадей в Днепровско-Донецкой впадине. На основе структурной модели среды по данным 3D сейсморазведки и скоростных законов $V_p(h)$ и $V_s(h)$ по ВСП-ЗС была построена толстослоистая 3D геомеханическая модель и выполнен расчет напряжений (рис. 2). Тек-

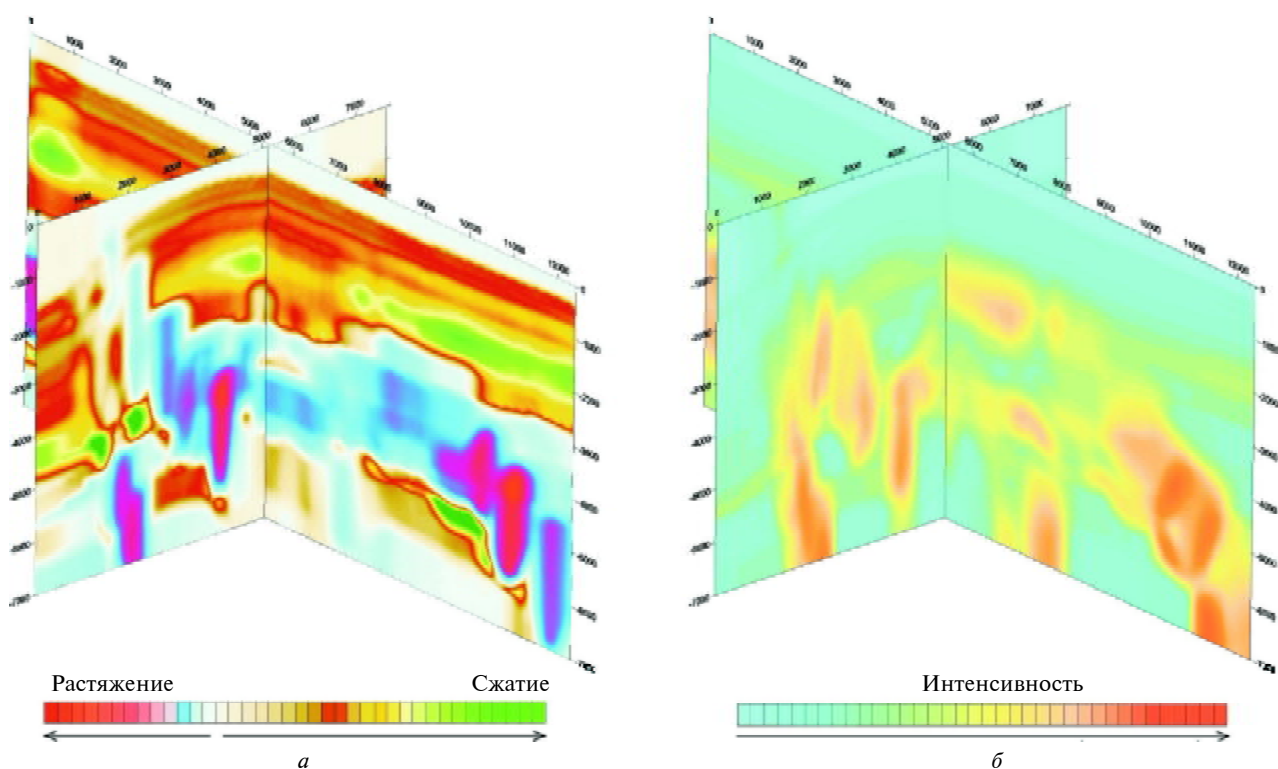


Рис. 2. Схематическая 3D модель распределения суммы нормальных (а) и интенсивности касательных (б) тектонических напряжений по данным геомеханического моделирования

тонические напряжения, получаемые в результате использования изложенного выше подхода, можно рассматривать как аномальные напряжения, действующие в массиве пород по отношению к нормальным – литостатическим. Совершенно очевидно, что величины этих напряжений будут меняться со временем за счет неупругих процессов. Выполнение расчетов в рамках упругих моделей не позволяет проводить подобного рода исследования. Для оценки неупругих эффектов необходимо располагать как данными о неупругих свойствах среды, определение которых само по себе является непростой задачей, так и “разверткой во времени” процессов деформирования осадочной толщи в геологическом прошлом, что также крайне сложная задача. Можно допустить, что учет неупругих эффектов, хоть и является крайне важным при изучении длиннопериодных геологических процессов, в данных условиях не столько уточнит, сколько запутает получаемую информацию о напряженно-деформированном состоянии среды. Вместе с тем, несмотря на то что абсолютные значения напряжений, рассчитанные в рамках упругой и неупругой моделей, будут существенно различаться, основные качественные особенности полей напряжений (зоны сжатия–растяжения, области интенсивных касательных напряжений, направление главных осей напряжений) будут в целом соблюдаться. А так как при геологической интерпретации используются именно они, то становится очевидным – отношение “геологическая содержательность”/“сложность модели” выше при использовании упругих моделей.

Таким образом, на основе структурно-скоростных моделей, получаемых в ходе сейсмических исследований, возможна оперативная оценка тектонических напряжений, возникающих в осадочной толще при ее деформировании, и литостатических. Именно первые из них, по мнению авторов, обуславливают особенности развития зон трещиноватости, влияют на изменение фильтрационно-емкост-

ных свойств пород-коллекторов, аномальную флюидодинамику и т. п., в то время как вторые определяют, прежде всего, нормальную флюидодинамику.

Информация о напряженном состоянии среды послужила основой для построения схемы районирования коллекторов карбона по увеличению фильтрационно-емкостных свойств (рис. 3, а) и аномальной флюидодинамики (рис. 3, б), обусловленных тектоническими напряжениями.

Напряженно-деформированное состояние геологической среды – один из факторов, определяющих и развитие зон АВПД. Важную роль в фор-

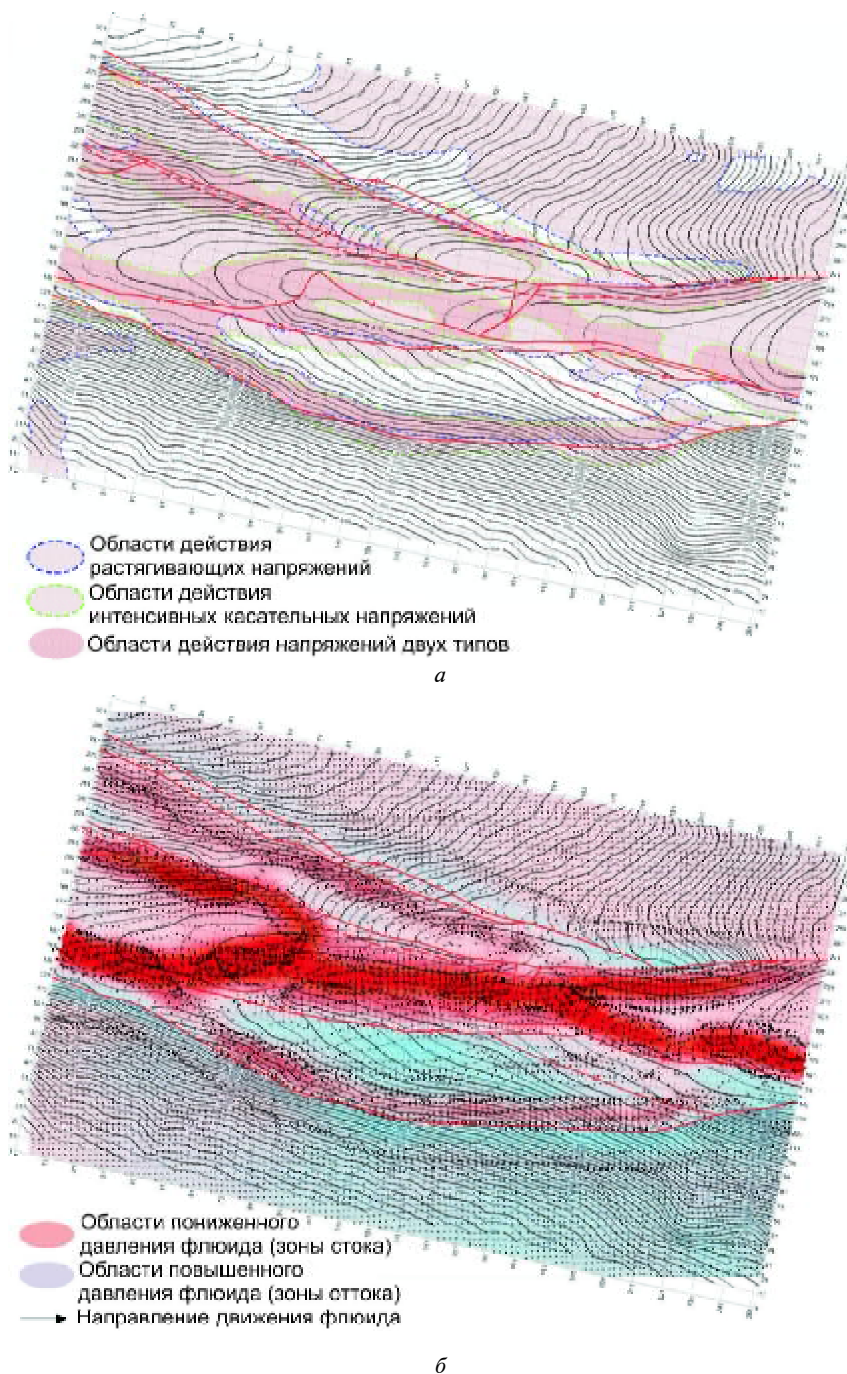


Рис. 3. Результаты районирования по изменению фильтрационно-емкостных свойств (а) и прогнозирования аномальной флюидодинамики (б) в породах-коллекторах продуктивного горизонта Б-3 по данным геомеханического моделирования

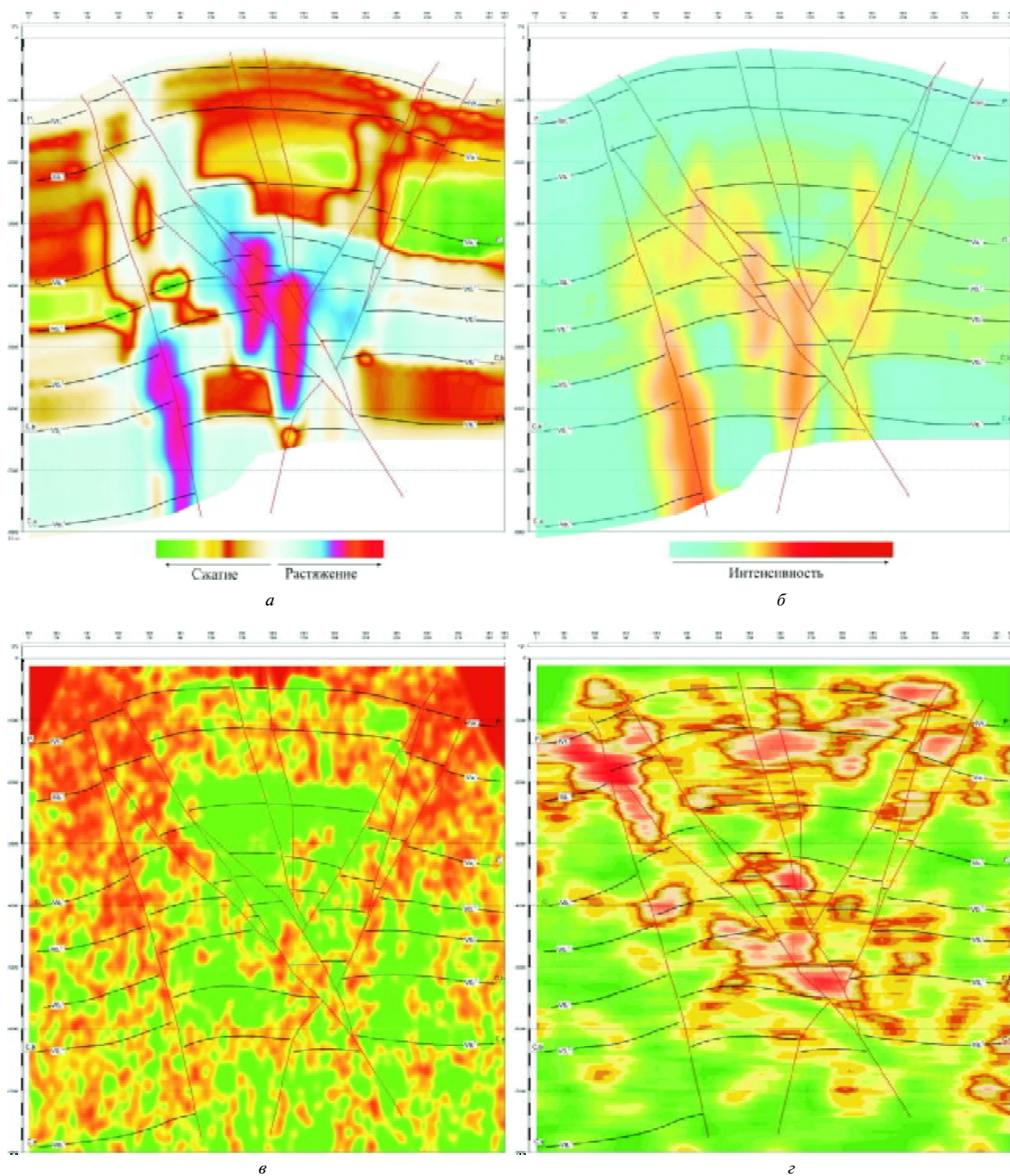


Рис. 4. Сопоставление вертикальных сечений 3D модели распределения суммы нормальных (а) и интенсивности касательных (б) тектонических напряжений с результатами расчета когерентности (в) и плотности наклонных осей синфазности дуплексных и дифрагированных волн (г)

мировании таких зон играют тектонические процессы, а фактически — изменения напряженно-деформированного состояния среды. Тектонические условия — наличие в разрезе аномалий растягивающих и скалывающих напряжений и связанных с ними зон нарушения сплошности скелета пород-коллекторов — существенный фактор формирования зон АВПД.

Параллельно с исследованием особенностей напряженного состояния выполнялся анализ воз-

можных аномальных эффектов в волновом поле, связанных с возникновением зон нарушения сплошности под действием механических напряжений. С использованием оригинальных подходов по данным 3D сейсморазведки были выполнены расчет когерентности, трассирование и последующий анализ наклонных осей синфазности дуплексных и дифрагированных волн (рис. 4)

Комплексный анализ результатов геомеханического моделирования и экспресс-анализа сейс-

мических данных, направленного на выделение потенциальных зон нарушения сплошности среды, дает возможность говорить о взаимосвязи прогнозируемых областей дезинтеграции с аномалиями механических напряжений. Это, в свою очередь, позволяет сформулировать возможные механизмы генезиса таких зон и скорректировать тектоническую модель исследуемой структуры, по-новому рассматривать формирование и развитие ловушек углеводородов в сложных геологических условиях.

Результаты, полученные в условиях различных регионов, в частности Днепровско-Донецкой впадины [13] и Западной Сибири [14], и их геологическая интерпретация дают основания утверждать, что использование информации о напряженно-деформированном состоянии как дополнительного критерия приведет к повышению степени достоверности и геологической содержательности широкого круга задач нефтегазовой геологии. По мнению авторов, геомеханическое моделирование на основе структурно-скоростных моделей и оценка напряженно-деформированного состояния геологической среды обязательны для максимально полной характеристики исследуемых нефтегазовых объектов. Наряду с решением традиционных задач нефтегазовой геологии, предлагаемый подход, на наш взгляд, может оказать существенную помощь при разведке сланцевого газа и метана угольных месторождений, изучении естественных хранилищ CO₂ и др.

1. *Сибиряков Б.П., Заикин А.Д.* Многоволновая сейсморазведка и прикладная геодинамика в нефтегазоносных областях // Геология и геофизика. – 1994. – № 5. – С. 49–55.
2. *Клещев К.А., Петров А.И., Шеин В.С.* Геодинамика и новые типы природных резервуаров нефти и газа. – М.: Недра, 1995. – 285 с.
3. *Каледин В.О., Ластовецкий В.П.* Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород применительно к нефтегазоп-

исковым задачам // Геофизика. – 1999. – № 3. – С. 63–68.

4. *Henk A.* Pre-drilling prediction of the tectonic stress field with geomechanical models // First Break. – 2005. – 23. – P. 53–57.
5. *Козлов Е.А.* Модели среды в разведочной сейсмологии. – Тверь: ГЕРС, 2006. – 480 с.
6. *Довбнич М.М., Солдатенко В.П., Бобылев А.А.* Оценка напряженно-деформированного состояния на основе структурно-скоростных моделей – новые возможности в решении задач нефтегазовой геологии // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 2. – С. 12–18.
7. *Динник А.Н.* Избранные труды. – Киев: АН УССР, 1956. – 307 с.
8. *Бобылев А.А., Гарт Э.Л.* Применение многосеточного метода конечных элементов к решению контактных задач с идеальными односторонними связями // Техническая механика. – Днепропетровск: ИТМ, 2003. – № 1. – С 126–134.
9. *Христианович С.А.* Об основах теории фильтрации // Физ.-техн. проблемы разработки полезн. ископаемых. – 1989. – № 5. – С.3–18.
10. *Никитин А.А.* Статистические методы выделения геофизических аномалий. – М.: Недра, 1979. – 280 с.
11. *Gersztenkorn A., Marfurt K.J.* Eigenstructure based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping // Geophysics. – 1999. – N 5. – P. 1468–1479.
12. *Довбнич М.М., Мачула М.С., Мендрий Я.В.* Опыт прогноза трещиноватых зон при изучении нефтегазоперспективности юрских отложений Северо-Западной Сибири // Геоинформатика. – 2010. – № 1. – С. 50–57.
13. *Довбнич М.М., Солдатенко В.П., Бобылев А.А.* Оценка напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе структурно-скоростных моделей // Материалы 10-й междунар. конф. “Геомодель-2008”. – Геленджик, 2008. – CD.
14. *Довбнич М.М., Солдатенко В.П., Цыганенко П.В. и др.* Опыт применения геомеханического моделирования при изучении нефтегазоперспективности юрских отложений севера Западной Сибири // Материалы 11-й междунар. конф. “Геомодель-2009”. – Геленджик, 2009. – CD.

Поступила в редакцию 16.05.2011 г.

В.М. Полохов, М.М. Довбнич, В.П. Солдатенко, Я.В. Мендрий

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ: ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ

На примере 3D сейсмических данных, полученных на одной из площадей в Днепровско-Донецкой впадине, показана возможность комплексирования геомеханического моделирования и дополнительного экспресс-анализа сейсмических данных при решении задач, связанных с определением вероятных направлений естественной миграции углеводородов, исследованием изменения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов, построением моделей формирования и развития ловушек углеводородов в сложных геологических условиях, оконтуриванием зон развития повышенной трещиноватости, прогнозированием зон аномально высоких пластовых давлений и пр.

Ключевые слова: геомеханика, напряженно-деформированное состояние, нефтегазовая геология.

**ГЕОМЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ОСАДОВІЙ ТОВЩІ:
ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ І ЙОГО ГЕОЛОГІЧНЕ ТЛУМАЧЕННЯ**

На прикладі 3D сейсмічних даних, що отримані на одній з площ Дніпровсько-Донецької западини, показано можливість комплексування геомеханічного моделювання та додаткового експрес-аналізу сейсмічних даних для розв'язання задач, пов'язаних з визначенням імовірних напрямків природної міграції вуглеводнів, вивченням змін фільтраційно-ємнісних властивостей колекторів, побудовою моделей формування та розвитку пасток вуглеводнів у складних геологічних умовах, оконтуренням зон розвитку підвищеної тріщинуватості, прогнозуванням зон аномально високих пластових тисків тощо.

Ключові слова: геомеханіка, напружено-деформований стан, нафтогазова геологія.