

УДК 550.83

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ ГЕОФИЗИКИ И ГЕОМЕХАНИКИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЗОН СКОПЛЕНИЯ СВОБОДНОГО МЕТАНА

Довбнич М. М., Мендрий Я. В., Виктосенко И. А.

(Национальный горный университет,
г. Днепрпетровск, Украина)

Розглядаються механізми формування зон скупчення вільного метану в вуглепородному масиві, обумовлені природними процесами тріщиноутворення. Обговорюються можливості геофізичних технологій і геомеханічного моделювання в підвищенні ефективності досліджень при прогнозуванні зон підвищеної продуктивності - „Sweet Spots“.

The mechanisms of coal bed methane (CBM) production sweet spots zones caused by tectonic destruction zones formation processes are considered. The opportunity of geophysical methods and geomechanical modeling in increasing the efficiency of geological and geophysical investigation by prediction CBM production sweet spots is discussed.

Разработка и внедрение технологий прогнозирования скоплений угольного метана является важнейшей задачей угольной геологии. Ее успешное решение, с одной стороны, открывает новые перспективы в освоении нетрадиционных источников углеводородов, которые ранее были недоступны, а с другой – позволит повысить безопасность ведения горных работ при добыче угля.

Национальный горный университет является одним крупнейших исследовательских центров Украины, где на протяжении более чем 50 лет занимаются проблемой изучения метана при разработке угольных месторождений шахтным способом. На се-

годняшний день, в условиях развития проектов диверсификации источников углеводородов, как основы энергетической безопасности Украины, значительно увеличился интерес к добыче угольного метана – нетрадиционного источника углеводородов. Объединение опыта горных инженеров, геологов-угольщиков и возможностей современных геофизических технологий дает основание надеяться на успешное решение проблемы прогноза зон скопления свободного метана, представляющих интерес для промышленного извлечения.

Донбасс является крупнейшим в Европе газо-угольным бассейном, для большей территории которого характерно высокое содержание метана в углях. В этих условиях разработка угольных месторождений должна проводиться с обязательной добычей и промышленным использованием угольного метана [1]. К настоящему времени выполнен огромный объем исследований, посвященных изучению газоносности угольных месторождений [2]. Важной отличительной особенностью угольного метана является то, что в отличие от газовых месторождений, где газ находится главным образом в одной фазе – свободной, а в зоне газовой воды контакта в двух – свободной и водорастворенной, в угленосных толщах газ находится в трехфазном состоянии: в виде водорастворенного, свободного и сорбированного углистым веществом, рассеянным в породах или сконцентрированным в угольных пластах [3]. Газоносность этих толщ определяется суммарной емкостью двух типов коллекторов: порового пространства пород и сорбционной способности органического вещества. В целом, доля свободного газа в угленосных формациях Донбасса невелика и по данным разных авторов колеблется в пределах 5-15 %. Основной объем метана находится в сорбированном виде. В настоящее время, большинство геологов-угольщиков полагают, что наиболее перспективными коллекторами, в которых могут формироваться скопления свободного метана, являются песчаники. В тоже время они отмечают, что в условиях высокой степени метаморфизма угленосной толщи, пористость песчаников минимальна (первые проценты), низкие значения проницаемости (сотые и десятые доли миллдарси) песчаников препятствуют перераспределению газа и воды, и, как следствие, концентрации газа в виде скоплений, пред-

ставляющих промышленный интерес [4]. Извлечение метана из практически непроницаемых песчаников невозможно без дополнительного воздействия, например гидроразрыва. Роль поровых коллекторов утрачивает ключевое значение при промышленном извлечении горючих газов из углепородного массива.

В этих условиях наиболее актуальной задачей при разведке метана является прогнозирование в углепородном массиве зон скопления подвижного метана в свободном состоянии. Наличие областей миграции и аккумуляции метана в углепородном массиве генетически связано как с условиями седиментации, так и с вторичными изменениями свойств геологической среды, обусловленными, главным образом, тектоническими процессами. Причем последние играют важнейшую роль. Природные процессы трещинообразования в углепородном массиве можно считать одним из ведущих факторов формирования скоплений свободного метана [5]. Переход в свободное состояние и подвижность горючих газов определяется наличием пустотного пространства и путей миграции, в первую очередь, открытой трещиноватости и дизъюнктивных нарушений. В свободном состоянии метан во вмещающих породах мигрирует до встречи с ловушкой, способной удерживать и накапливать его. Локальные нарушения сплошности углепородного массива, приуроченные к метановой зоне и не имеющие выхода на поверхность, являются благоприятными для скопления свободного метана в трещинах. История тектонического развития и тектоническое строение месторождения имеет основное значение в перераспределении газов и формировании их скоплений.

Прогноз зон тектонических деструкций углепородного массива является важнейшей задачей угольной геологии на всех этапах эксплуатации угольных месторождений. И если тектонические нарушения большой и средней амплитуды достаточно уверенно картируются на этапе разведки угольных месторождений на основе геологической информации, полученной по данным бурения, то малоамплитудные и безамплитудные зоны тектонических деструкций обычно устанавливаются лишь в ходе ведения горных работ.

Геофизические технологии занимают лидирующие позиции при изучении областей деструкции геологической среды тектонического генезиса.

В настоящее время одним из динамично развивающихся направлений исследовательской деятельности коллектива кафедры геофизических методов разведки Национального горного университета является разработка подходов оценки напряженно-деформированного состояния среды на основе геолого-геофизических данных, моделирования и прогнозирования эффектов, возникающих в осадочной толще при ее деформировании в ходе тектонической эволюции.

Применительно к задаче прогноза зон скопления угольного метана использование геофизических технологий возможно для различных масштабных уровней. В настоящей работе рассмотрены некоторые возможности инновационных подходов анализа геофизических данных, разработанных на кафедре геофизических методов разведки НГУ, при региональных и детальных исследованиях.

Напряженно-деформированное состояние геологической среды тектонической природы является важнейшим из факторов развития зон тектонических деструкций углепородного массива. В этой связи, на региональном уровне прогноз геодинамически активных зон для которых характерен высокий уровень тектонических напряжений и с которыми гипотетически могут быть связаны области нарушения сплошности среды, является ключевым этапом в региональном прогнозе зон повышенной продуктивности при добыче угольного метана.

Привлечение информации о неотектонике и геодинамике при прогнозе региональных зон развития газодинамических явлений и областей повышенной продуктивности при добыче метана не ново. Эти идеи нашли отражение в работах Г. А. Конькова, В. С. Вереды, В. А. Привалова и др. [6-9].

В ранее опубликованных работах авторов [10, 11] было показано, что геодинамически активные зоны тектоносферы проявляются в аномалиях напряжений, обусловленных нарушением равновесного состояния Земли. В первую очередь такие зоны, при условии достаточности величины действующих в них напряже-

ний, проявляють себе як сейсмічески активные [12]. В рассматриваемых напряжениях находят отражение элементы, являющиеся тектонической основой сейсмогенерирующих структур.

В условиях Донбасса с такими зонами могут быть связаны и области развития повышенной трещиноватости углепородного массива. Теоретические предпосылки связи зон миграции и скопления метана в углепородном массиве с особенностями напряженного состояния геологической среды позволяют использовать поля напряжений, обусловленные нарушением равновесного состояния, в качестве дополнительного прогностического критерия при решении задач регионального прогноза зон повышенной продуктивности. Рабочей гипотезой таких построений может быть следующее утверждение: *зоны повышенной продуктивности определяются степенью деформационных процессов, протекающих в осадочной толще, которые в свою очередь находят отражение в составляющих поля механических напряжений, обусловленного нарушением равновесного состояния.*

На сегодняшний день разработаны алгоритмы расчета полей напряжений, обусловленных нарушением равновесного состояния, на основе анализа аномалий геоида [10].

В условиях Донецкого бассейна выполнение расчетов по оценке механических напряжений геологической среды, обусловленных нарушением равновесного состояния, выполнялось на основе материалов наземной гравиметрической съемки масштаба 1:200000 и цифровой модели рельефа. Для большей части территории региона, на основании авторской методики [10, 11], по сети 4×4 км было выполнено восстановление аномалий геоида по наземным гравиметрическим данным – аномалиям силы тяжести в редукции Фая. Полученные аномалии геоида послужили основой для расчета полей напряжений территории исследований. Для ряда участков, представляющих особый интерес подобные исследования выполнялись по сети 1×1 км.

Привлечение информации о полях напряжений, обусловленных нарушением равновесного состояния, позволило выполнить районирование территории Донбасса на предмет регионального прогноза областей повышенной трещиноватости и, как следствие, повышенной продуктивности. На рисунке 1 приведен

фрагмент схемы подобных построений. Сопоставление результатов регионального прогноза зон повышенной продуктивности с данными независимых исследований, в частности в пределах шахты им. А. Ф. Засядько [13], показало его высокую эффективность.

Региональный прогноз зон повышенной продуктивности метана является важным звеном в стратегии принятия решений о детальном геолого-геофизическом исследовании, но его результаты не могут быть основой для проектирования мест заложения эксплуатационных скважин.

Единственным геофизическим методом, позволяющим выполнять максимально детальный и точный прогноз зон тектонических деструкций углепородного массива, является сейсморазведка. Мировой опыт и перспективы применения на Украине сейсмического метода при поисках, разведке и добыче метана угольных месторождений рассмотрен в работе [14].

В угольную геологию основные методические приемы интерпретации данных сейсморазведки при изучении тектоники пришли из нефтегазовой геологии. В нефтегазовой геологии интерес к областям тектонических деструкций как к зонам, контролирующим скопления углеводородов, привел к развитию и разработке различных подходов к их обнаружению. Существует широкий набор подходов, использующих в качестве поискового признака отдельные особенности проявления зон нарушений сплошности среды в волновом поле [15].

Зоны нарушения сплошности среды со значительными амплитудами смещений достаточно хорошо проявляются в волновом поле и визуально уверенно прослеживаются. Их выделение не требует дополнительных процедур анализа сейсмических данных. В тоже время, малоамплитудные и безамплитудные зоны тектонических деструкций хотя и находят отражение в волновом поле, но их прогноз является крайне субъективным и неоднозначным. В этих условиях обязательным является применение специальных вычислительных алгоритмов, ориентированных на усиление аномальных эффектов в волновом поле, обусловленных зонами тектонических деструкций.

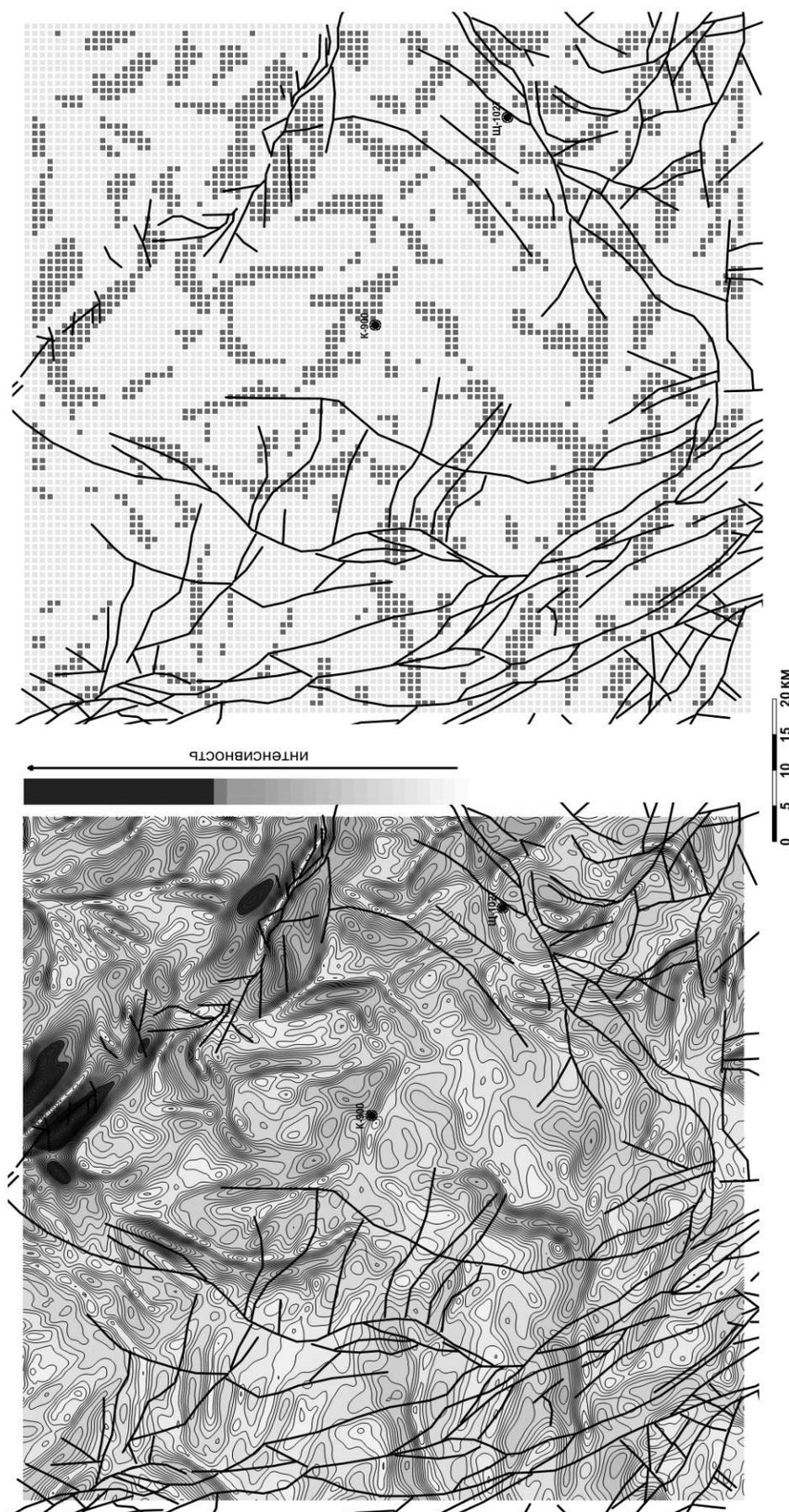


Рис. 1. Фрагмент схемы поля интенсивности скальвующих напряжений, обусловленных нарушением равновесного состояния, (а) и схемы регионального прогноза зон повышенной проницаемости (б)

В настоящей работе для изучения областей потенциальных зон нарушения сплошности углепородного массива был использован оригинальный подход расчета когерентности сейсмических данных, реализованный в авторском пакете программ (разработчик Я. В. Мендрий).

Когерентность, как мера неоднородности сейсмического пространства получила широкое распространение при картировании малоамплитудных и безамплитудных разрывных нарушений и зон трещиноватости. Оценка сейсмической когерентности по 3D данным представляет собой радикально иной способ отображения сейсмической информации для выделения тонких структурных и литологических особенностей геологического разреза [16]. Не претендуя на изучение внутреннего строения и оценки степени проницаемости и флюидонасыщенности зон тектонических деструкций, расчет и анализ когерентности, тем не менее, позволяют, как проследить системы зон тектонических деструкций на участке исследований, так и в ряде случаев сделать выводы об их генезисе.

В данной работе в качестве меры когерентности принято отношение первого собственного значения ковариационной матрицы к общей энергии записи. Преимущества данной меры когерентности показаны в работе [17]. Оценка когерентности обычно выполняется из предположения о горизонтальности осей синфазности, то есть без учета наклонов границ. Для данных с наклонными отражающими границами это ведет к заведомо ложным результатам. В целях повышения вычислительной эффективности и геологической содержательности, в настоящей работе используются наклонно-управляемые алгоритмы. Для учета наклона рефрактора предложено вычислять когерентность вдоль аппроксимирующей поверхности. Наличие такой поверхности позволяет рассчитывать дополнительную характеристику – кривизну. Данный параметр также можно рассматривать как признак проявления тектонических деструкций в волновом поле [18].

Как пример реализации описанного подхода при прогнозе зон тектонических деструкций углепородного массива рассмотрим результаты переинтерпретации материалов 3D сейсморазведки, полученных на поле шахты «Краснолиманская». Данные

работы выполнялись по решению Правительственной комиссии по исследованию причин и ликвидации последствий аварии, произошедшей на шахте «Краснолиманская» 23.05.2008 г. Исследования, проводившиеся в режиме научной кооперации исследовательских и производственных организаций (УкрНИМИ НАН Украины, Приднепровская геофизическая разведочная экспедиция и др.), являются уникальным для Украины геофизическим экспериментом в условиях угольных шахт. Полученные исходные полевые материалы могут быть использованы в качестве тестовых при внедрении различных подходов прогнозирования зон тектонических деструкций в условиях угольных месторождений.

Площадь выполнения 3D сейсморазведочных работ расположена в пределах блока шахтного поля, сильно осложненного дизъюнктивными нарушениями. Некоторые из них имеют значительную амплитуду и были зафиксированы буровыми работами на этапе разведки. В тоже время, многие вопросы о деталях тектонической модели исследуемой территории остаются открытыми.

На рассматриваемой площади проведены 3D сейсморазведочные работы по современной технологии площадной съемки методом общей глубинной точки с использованием продольных волн. В результате обработки получен куб суммарного волнового поля по площади $3,6 \times 1,5$ км.

Именно эти материалы были использованы для анализа по указанной выше методике. В ходе расчетов были получены кубы когерентности и кривизны (рис. 2). Используя информацию о гипсометрии угольного пласта l_3 , для более детального анализа аномальных эффектов от зон тектонических деструкций, было построено сечение кубов данных атрибутов вдоль указанного пласта. Совместный анализ срезов когерентности и кривизны позволяет достаточно уверенно проследить зоны тектонических деструкций в пределах территории исследования. При этом отбиваются как нарушения сплошности со значительной амплитудой смещений, так и малоамплитудные зоны. Важно отметить, что прогнозируемые зоны хорошо подтверждаются результатами проведенных позже горных работ (рис. 3, а).

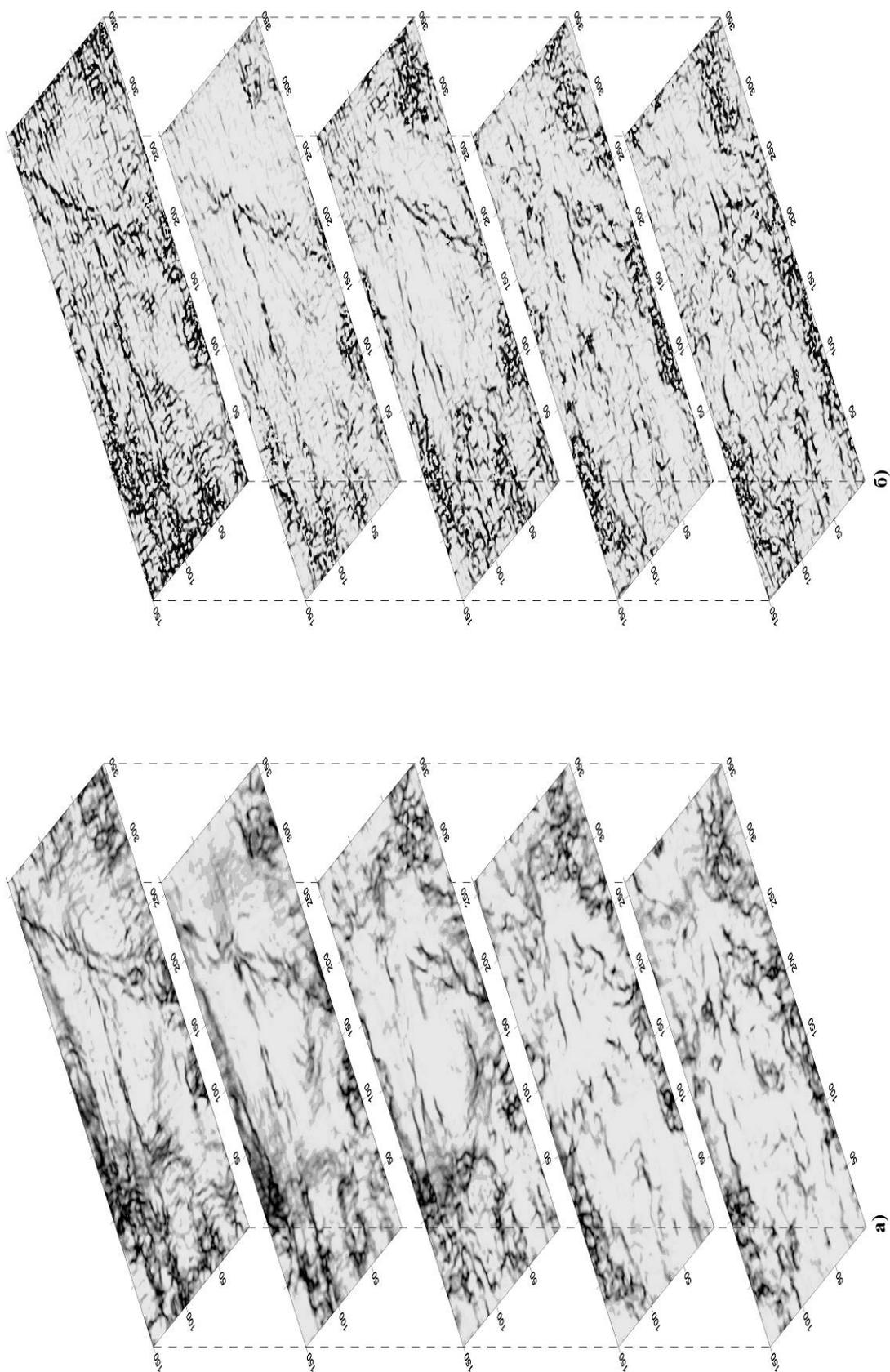


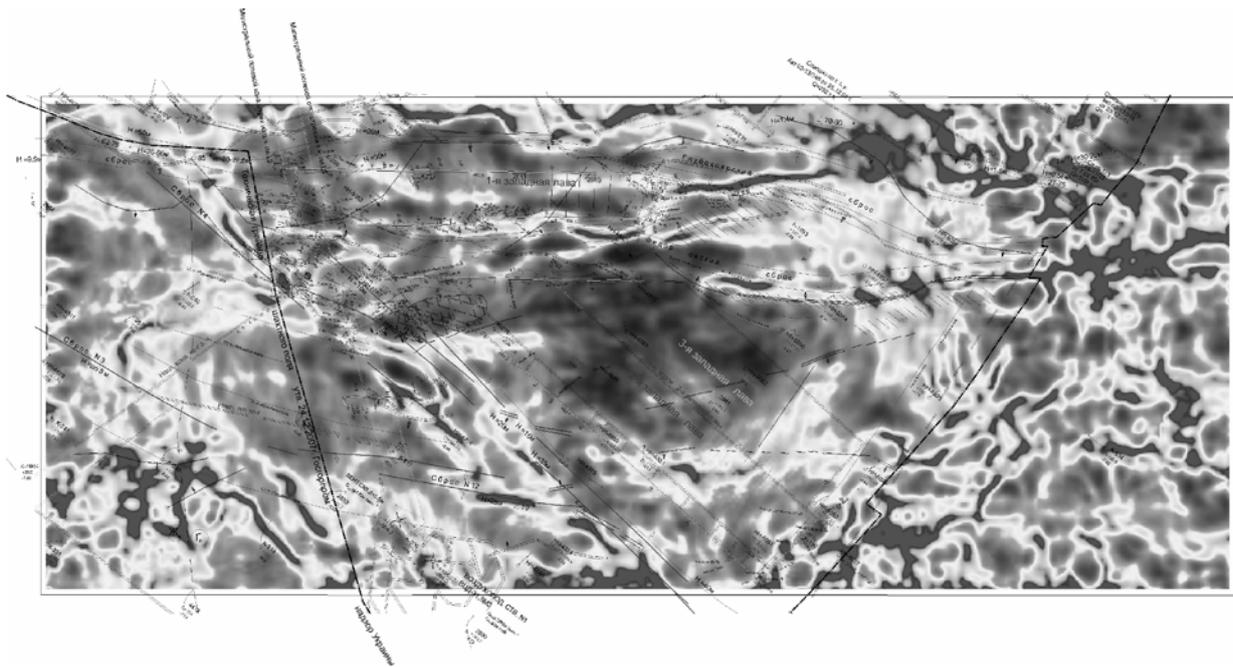
Рис. 2. Горизонтальные сечения куба когерентности (а) и куба кривизны (б)

Очевидно, что одной из важнейших характеристик, определяющих формирование зон тектонических деструкций, является напряженно-деформированное состояние геологической среды тектонической природы. Имеет место широкий спектр причин, обуславливающих возникновение тектонических напряжений. Особую роль играют тектонические напряжения, связанные с деформационными процессами в осадочной толще.

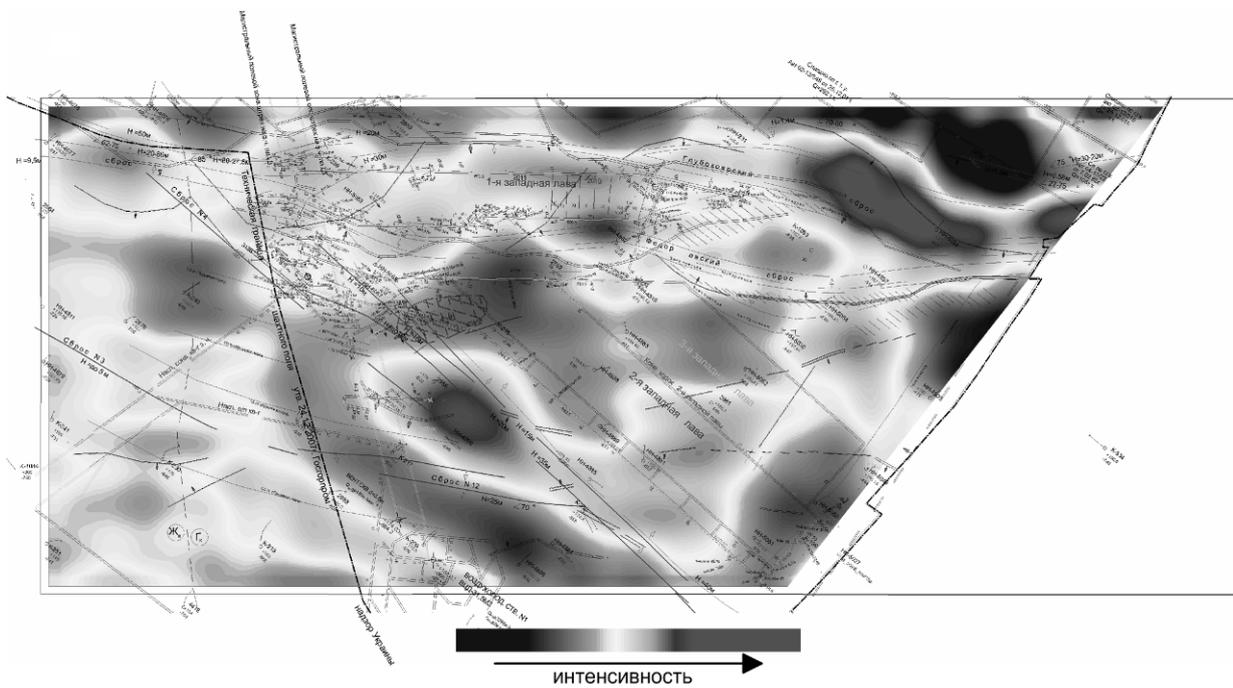
Сейсморазведка является единственным геофизическим методом, позволяющим с одной стороны выполнить детальные структурные построения исследуемой толщи, где находят отражение суммарные деформации, которые испытывала геологическая среда в ходе своей эволюции от накопления толщ осадков до проявления современной неотектоники, а с другой – на основе анализа скоростей распространения упругих волн и плотности дать весьма точную информацию об упругих свойствах среды [19]. Подобная информация, в свою очередь, позволяет 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. Однако в условиях угольных месторождений эта информация является “экзотической”. В тоже время, отличительной особенностью разведки угольных месторождений, является относительно высокая степень их изученности буровыми работами. Как следствие, имеется априорная информация о структурно-тектонических моделях исследуемых площадей.

Данная информация может послужить основой для предварительной оценки напряженно-деформированного состояния углелепородного массива, обусловленного протекающими в нем деформационными процессами.

Это в свою очередь позволит выполнить локализацию перспективных участков для постановки детальных сейсморазведочных работ с целью уточнения структурно-тектонической модели, прогнозирования зон тектонических деструкций, способствующих при наличии слабопроницаемых покрышек формированию скоплений свободного метана.



а)



б)

Рис. 3. Схема сопоставления среза когерентности (а) и интенсивности скалывающих тектонических напряжений (б) с выкопировкой из плана горных работ по пласту l_3

Используемый в настоящей работе подход позволяет выполнять оценку напряжений, связанных с протекающими в ней деформационными процессами, в рамках упругой изотропной модели среды [20]. На основе данных о гипсометрии угольных пластов была получена схема интенсивности скальвающих тектонических напряжений по пласту l_3 (рис. 2, б).

Комплексный анализ результатов геомеханического моделирования и анализа сейсмических данных, направленного на выделение потенциальных зон нарушения сплошности среды, дает основание делать выводы о связи прогнозируемых областей дезинтеграции с аномалиями механических напряжений, обусловленных деформационными процессами в осадочной толще. Полученные на сегодняшний день практические результаты дают основание утверждать, что использование в качестве важного прогностического критерия информации о результатах геомеханического моделирования и прогнозирования эффектов, возникающих в осадочной толще при ее тектоническом деформировании, повысит достоверность и геологическую содержательность локализации зон тектонических деструкций как основы изучения скоплений свободного метана и откроет новые перспективы в освоении нетрадиционных источников углеводородов.

Авторы выражают благодарность специалистам УкрНИИ-МИ НАН Украины, УкрГГРИ и Приднепровской геофизической разведочной экспедиции за предоставленные геолого-геофизические материалы, ценные консультации и замечания.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Газоносность угольных месторождений Донбасса / А.В. Анциферов, М.Г. Тиркель, М.Т. Хохлов и др.; под общ. ред. Н.Я. Азарова. – К.: Наук. думка, 2004. – 232 с.
2. Газоносность и ресурсы метана угольных бассейнов Украины. Т. 1 / А.В. Анциферов, А.А. Голубев, В.А. Канин и др. – Донецк: Вебер, 2009. – 456 с.
3. Коллекторы метана в угленосных формациях Донбасса / Майборода А.А., Анциферов В.А., Голубев А.А. и др. // Нау-

- кові праці УкрНДМІ НАН України. Випуск 4. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України, 2009. – С. 6 – 15.
4. Лукинов В.В. Горно-геологические условия образования скоплений свободного метана на угольных месторождениях // Науковий вісник НГУ – 2007. – № 4. – С. 55 – 59.
 5. Временная инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов при проведении геологоразведочных работ. – М.: Недра, 1966. – 67 с.
 6. Коньков Г.А. О связи новейших и современных тектонических движений с метаноносными и выбросоопасными зонами в условиях Донецкого бассейна // Докл. АН СССР. – 1962. – № 3. – С. 670 – 673.
 7. Вереса В.С., Юрченко Б.К. О соотношении газодинамических зон, трещиноватости углей и температурного режима Донбасса с современными тектоническими движениями // Современные движения земной коры. – М.: Недра, 1968. – том 4. – С. 80 – 89.
 8. Привалов В.А. Тектоническая природа зон выбросоопасности в Донбассе // Уголь Украины. – 2003. – № 3 – С. 33 – 37.
 9. Panova O.A., Privalov V.A., Sachsenhofer R.F., Antsiferov V.A. The Importance of Tectonic Control in Delineation of CBM Production Sweet Spots in the Donets Basin (Ukraine) // extended abstracts, 73th EAGE Conference & Exhibition. – Vienna (Austria), 2011. P-172. CD.
 10. Довбнич М.М. Нарушение геоизостазии и напряженное состояние тектоносферы // Геофизический журнал – 2008. – № 4 – С. 123 – 132.
 11. Довбнич М.М., Демьянец С.Н. Поля напряжений тектоносферы, обусловленные нарушением геоизостазии и геодинамика Азово-Черноморского региона // Геофизический журнал – 2009. – № 2. – С. 107 – 116.
 12. Довбнич М.М., Демьянец С.Н. Геодинамическая и геотектоническая позиция полей геоизостатических напряжений сейсмоактивных сегментов Украины // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 2. – С. 57 – 63.
 13. Viktosenko I.A., Dovbnich M.M., Kanin V.A. Regional Zoning of Dynamic Phenomena in Mines – The Innovative Approaches in

- Gravimetry // extended abstracts, 73th EAGE Conference & Exhibition. – Vienna (Austria), 2011. P-281. CD.
14. Применение сейсморазведки при решении проблемы добычи метана угленосных формаций / Анциферов А.В., Анциферов В.А., Тиркель М.Г. и др. // Геофизический журнал – 2010. – Т. 32, N 5. – С. 117 – 125.
 15. 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.
 16. Sullivan E.C., Marfurt K J., Lacazette A., and Ammerman M. Application of new seismic attributes to collapse chimney in the Fort Worth basin // Geophysics – 2006. – V. 71. – P. 111 – 119.
 17. Gersztenkorn A., Marfurt K.J. Eigenstructure based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping // Geophysics – 1999. – V. 64. – P. 1468 – 1479.
 18. Al-Dossary S., Marfurt K.J. 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation // Geophysics – 2006. – V. 71. – P. 41 – 51.
 19. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии – Тверь: ГЕРС, 2006. – 480 с.
 20. 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.