

Раздел 4. Техничко-экономические проблемы горного производства

УДК 622.02:536.244:550.834

В.А. Васильковский¹, М.М. Довбнич², Я.В. Мендрий²

НОВЫЕ ПОДХОДЫ АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ГАЗОВЫХ РЕСУРСОВ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

¹ Институт физики горных процессов НАН Украины,
49600, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2-а.

² Государственное ВУЗ «НГУ»,
49005 г. Днепр, пр. Дмитрия Яворницкого, 19.

Рассматриваются механизмы формирования зон скопления свободного метана в углепородном массиве, обусловленные природными процессами трещинообразования. Обсуждаются возможности комплексирования геофизических технологий и геомеханического моделирования в повышении эффективности исследований при прогнозировании зон повышенной продуктивности – „Sweet Spots”.

Ключевые слова: геофизические методы, трещиноватость, газоносность, десорбция, метан.

Введение

Одним из основных регионов Украины, с которым связаны основные перспективы промышленной добычи метана, является Донбасс – крупнейший в Европе газо-угольный бассейн, 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 газовойодяного 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 угле-

носных 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, представляющих 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.

1. Основная часть

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. Переход в свободное состояние и подвижность горючих газов определяется наличием пустотного пространства и путей миграции, в первую очередь, открытой трещиноватости и дизъюнктивных нарушений.

Механохимические превращения в зонах естественной трещиноватости и увеличение суммарной поверхности, вызванное диспергированием угля, приводит к росту объема метана, адсорбированного на поверхности гранул и открытых пор. Расконсервация такой зоны в ходе добычных работ должна сопровождаться практически мгновенным переходом адсорбированного метана в свободное состояние, а его энергия при расширении пойдёт на перемещение разрушенного угля вдоль выработки. Индикатором области нарушения сплошности углепородного массива является рост содержания летучих веществ. Приложение к образцу угля некоторых видов напряжений может приводить к изменению фильтрационных и диффузионных характеристик движения метана в угле, структура которого имеет блочное строение. В блочной модели каменный уголь представляет собой совокупность мельчайших образований – блоков, свободный объём между которыми составляет объём открытых пор и трещин. Блоки, размер которых очень мал, распределены по всему объёму гранул и через систему трещин и открытых пор сообщаются с

поверхностью угля. В такой модели диффузия метана происходит из закрытых пор и микропор малых частиц – блоков, средний размер которых не зависит от размера гранулы угля [5].

Основным резервуаром метана в блоковой модели являются блоки угля. Кроме этого метан содержится также в открытых порах угля. При десорбции наряду с диффузией из блоков происходит фильтрация газа открытыми порами, которая «регулирует» скорость выхода поступающего из блоков газа.

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 деструкций геологической среды тектонического генезиса. Модель формирования зон скопления свободного метана должна определять выбор комплекса геофизических методов и особенности анализа полученных геолого-геофизических данных.

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].

Более 50 лет назад была отмечена приуроченность газоносных зон к областям контрастных тектонических движений и обоснована генетическая связь этих зон с новейшими движениями и аномальными напряжениями. В частности Г.А. Коньковым отмечалось, что при наличии достаточно интенсивных напряжений имеются условия, как для образования очагов внезапных выбросов, так и для медленной генерации свободного метана. Тектонические напряжения рассматривались как общая геологическая причина газодинамических явлений и процессов формирования скоплений свободного метана.

В ранее опубликованных работах авторов настоящей статьи [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 напряжений, проявляют себя как сейсмически активные [12]. Рассматриваемые напряжения можно рассматривать как индикатор аномальных тектонических напряжений, в них находят отражение элементы, являющиеся тектонической основой сейсмогенерирующих структур.

В условиях Донбасса с такими аномальными зонами могут быть связаны и области развития повышенной генерации свободного метана. 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].

Региональный прогноз зон повышенной продуктивности метана является важным звеном в стратегии принятия решений о детальных геолого-геофизических исследованиях, но его результаты не могут быть основой для проектирования мест заложения эксплуатационных скважин. Эффективное решение этой задачи возможно только путем максимально детального изучения зон тектонических деструкций, а именно построение 3D модели их развития в углепородном массиве, моделирование возможного генезиса данных зон и т.п.

Геофизические технологии – эффективный инструмент изучения особенностей тектонического строения исследуемых территорий. В условиях осадочных толщ сейсморазведка является геофизическим методом, позволяющим выполнять максимально детальный и точный прогноз зон тектонических деструкций углепородного массива. Мировой опыт и перспективы применения на Украине сейсмического метода при поисках, разведке и добыче метана угольных месторождений рассмотрен в работе [15].

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 [16].

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.

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 [17]. 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 [18]. 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 [19].

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 [20]. 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 углепородного 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.

Используемый в настоящей работе подход позволяет выполнять оценку напряжений геологической среды, связанных с протекающими в ней деформационными процессами, в рамках упругой изотропной модели среды [21].

2. Результаты и выводы

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 методики [10, 11], по сети 4x4 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 1x1 км.

Привлечение информации о полях напряжений, обусловленных нарушением равновесного состояния, позволило выполнить районирование территории Донбасса на предмет регионального прогноза областей повышенной тектонической активности и возможной повышенной продуктивности. На рисунке 1 приведен фрагмент схемы подобных построений.

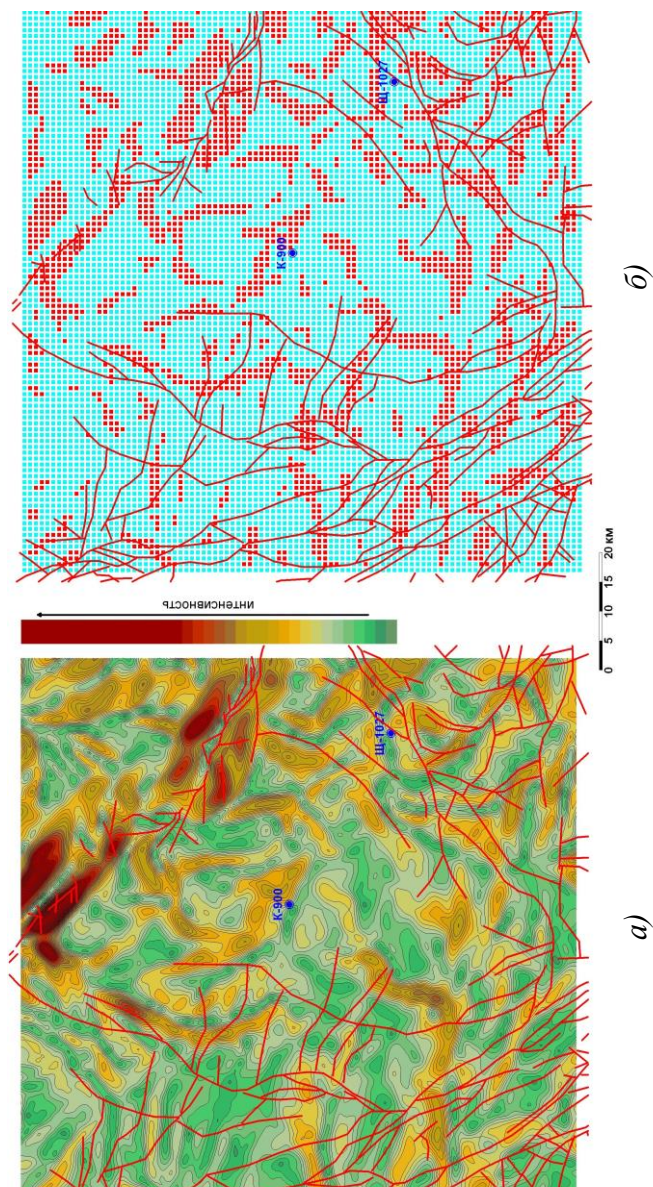
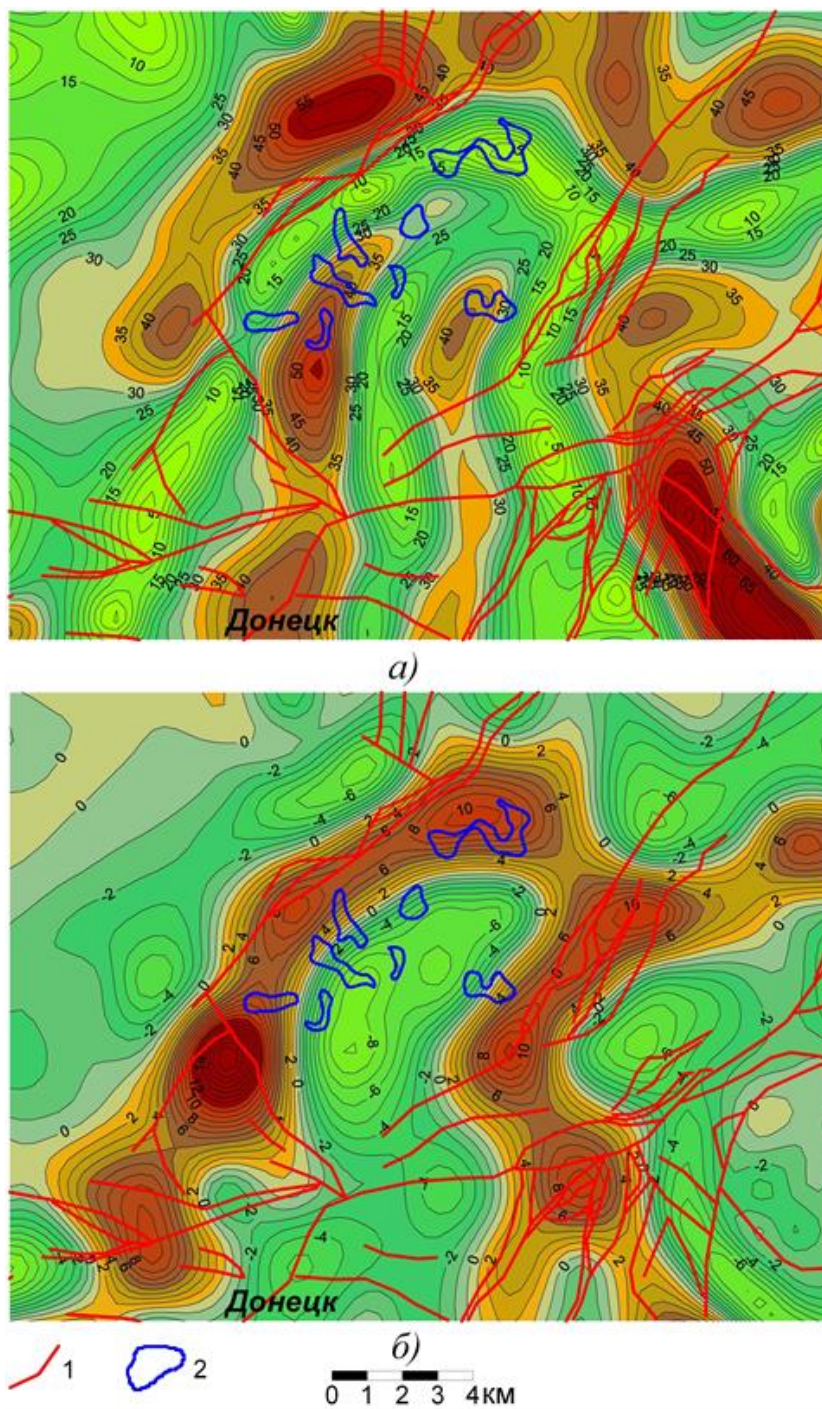


Рис. 1. Фрагмент схемы поля интенсивности скалывающих напряжений, обусловленных нарушением равновесного состояния, (а) и схемы регионального прогноза зон повышенной продуктивности метана (б)

Сопоставление результатов регионального прогноза зон повышенной продуктивности с данными независимых исследований [13], в частности в преде-



1 – тектонические нарушения; 2 – прогнозные зоны скопления метана [13].

Рис. 2. Схема сопоставления прогнозных зон скопления метана в пределах поля шх. им. А.Ф. Засядько с напряжениями, обусловленными нарушением равновесного состояния (кПа): *a* – скалывающие напряжения; *б* – напряжения сжатия-растяжения

Именно эти материалы были использованы для анализа по указанной выше методике. В ходе расчетов были получены кубы когерентности и кривизны. 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).

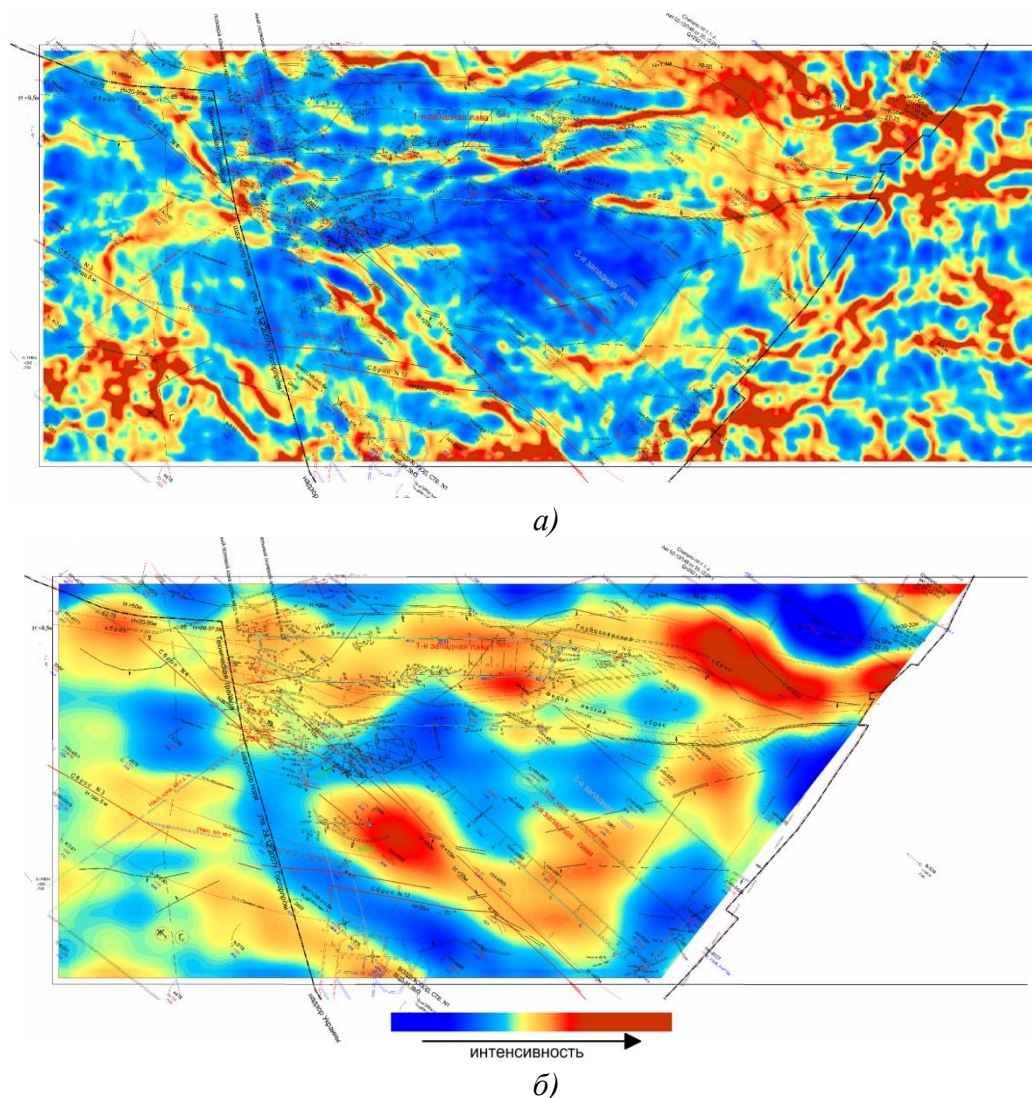


Рис. 3. Схема сопоставления среза когерентности (а) и интенсивности скалывающих тектонических напряжений (б) с выкопировкой из плана горных работ по пласту l_3

На основе данных о гипсометрии угольных пластов была получена схема интенсивности скалывающих тектонических напряжений геологической среды по пласту l_3 , связанных с протекающими в ней деформационными процессами (рис. 3,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 локализованных зонах тектонической активности, результатов геомеханического моделирования и прогнозирования эффектов, возникающих в осадочной толще при ее тектоническом деформировании, повысит достоверность и геологическую содержательность изучения зон тектонических деструкций как основы прогнозирования скоплений свободного метана и откроет новые перспективы в освоении нетрадиционных источников углеводородов.

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 / А.А. Майборода, В.А. Анциферов, А.А. Голубев [и др.] // Наукові 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 / В.В. Лукинов // Науковий вісник НГУ – 2007. – № 4. – С. 55–59.
5. Васильковский В.А. Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля / В.А. Васильковский, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. под ред. А.Д. Алексева. – Донецк: ИФГП НАНУ, 2006. – № 9. – С. 62-70
6. Коньков Г.А. О связи новейших и современных тектонических движений с метаноносными и выбросоопасными зонами в условиях Донецкого бассейна / Г.А. Коньков // Докл. АН СССР. – 1962. – № 3, Т. 143. – С. 670-673.
7. Вереда В.С. О соотношении газодинамических зон, трещиноватости углей и температурного режима Донбасса с современными тектоническими движениями / В.С. Вереда, Б.К. Юрченко // Современные движения земной коры. – М.: Недра, 1968. – том 4. – С. 80-89.
8. Привалов В.А. Тектоническая природа зон выбросоопасности в Донбассе / В.А. Привалов // Уголь Украины. – 2003.– № 3– С. 33–37.

9. The Importance of Tectonic Control in Delineation of CBM Production Sweet Spots in the Donets Basin (Ukraine) / O.A. Panova, V.A. Privalov, R.F. Sachsenhofer, V.A. Antsiferov // extended abstracts, 73th EAGE Conference & Exhibition. – Vienna (Austria), 2011. P-172. CD.
10. Довбнич М.М. Нарушение геоизостазии и напряженное состояние тектоносферы / М.М. Довбнич // Геофизический журнал – 2008. – № 4 – С. 123-132.
11. Довбнич М.М. Поля напряжений тектоносферы, обусловленные нарушением геоизостазии и геодинамика Азово-Черноморского региона / М.М. Довбнич, С.Н. Демьянец // Геофизический журнал – 2009. – № 2. – С. 107-116.
12. Довбнич М.М. Геодинамическая и геотектоническая позиция полей геоизостатических напряжений сейсмоактивных сегментов Украины / М.М. Довбнич, С.Н. Демьянец // Науковий вісник НГУ. – 2010. – №2. – С. 57–63.
13. Перспективы комплексного геолого-геофизического прогноза зон скопления метана на угольных месторождениях Донбасса / В.А. Гончаренко, В.К. Свистун, Т.В. Герасименко и др. // Науковий Вісник НГУ. – 2007. – № 4. – С. 73-77.
14. Viktosenko I.A. Regional Zoning of Dynamic Phenomena in Mines – The Innovative Approaches in Gravimetry / I.A. Viktosenko, M.M. Dovbnich, V.A. Kanin // extended abstracts, 73th EAGE Conference & Exhibition. – Vienna (Austria), 2011. P-281. CD.
15. Применение сейсморазведки при решении проблемы добычи метана угленосных формаций / А.В. Анциферов, В.А. Анциферов, М.Г. Тиркель [и др.] // Геофизический журнал – 2010. – Т. 32, № 5. – С. 117–125.
16. Довбнич М.М. Опыт прогноза трещиноватых зон при изучении нефтегазоперспективности юрских отложений Северо-Западной Сибири / М.М. Довбнич, М.С. Мачула, Я.В. Мендрій // Геоинформатика – 2010. – № 1. – С. 50–57.
17. Application of new seismic attributes to collapse chimney in the Fort Worth basin / E.C. Sullivan, K.J. Marfurt, A. Lacazette, M. Ammerman // Geophysics – 2006. – V. 71. – P. 111–119.
18. Gersztenkorn A. Eigenstructure based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping / A. Gersztenkorn, K.J. Marfurt // Geophysics – 1999. – V. 64. – P. 1468–1479.
19. Al-Dossary S. 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation / S. Al-Dossary, K.J. Marfurt // Geophysics – 2006. – V. 71. – P. 41–51.
20. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии / Е.А. Козлов. – Тверь: ГЕРС, 2006. – 480 с.
21. Геомеханическое моделирование деформационных процессов в осадочной толще: оценка напряженно-деформированного состояния и его геологическое истолкование / В.М. Полохов, М.М. Довбнич, В.П. Солдатенко [и др.] // Геоинформатика – 2011. – № 3. – С. 46–53.

В.А. Васильковський, М.М. Довбнич, Я.В. Мендрій

**НОВІ ПІДХОДИ АНАЛІЗУ ГЕОФІЗИЧНИХ ДАНИХ ПРИ
ПРОГНОЗУВАННІ ГАЗОВИХ РЕСУРСІВ ВУГЛЕПОРОДНОГО
МАСИВУ**

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

Ключові слова: геофізичні методи, тріщинуватість, газоносність, десорбція, метан.

V.A. Vasilkovskiy, M.V. Dovbnich, Ya.V. Mendrii

NEW APPROACHES TO GEOPHYSICAL DATA ANALYSIS FOR PREDICTION OF GAS RESOURCES IN COAL ROCK MASS

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.

Keywords: geophysical methods, fracturing, foulness, desorption, methane.