

УДК 550.83

**ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ ПРИ ПРОГНОЗЕ ЗОН
ПОВЫШЕННОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ МЕТАНА**

Виктосенко И. А.

*(Национальный горный университет, г. Днепрпетровск,
Украина)*

Довбнич М. М., Полохов В. М.

*(Приднепровская геофизическая разведочная экспедиция,
г. Новомосковск, Украина)*

Розглядаються механізми формування зон скупчення вільного метану в вуглепородному масиві, обумовлені природними процесами тріщиноутворення. Обговорюються можливості геомеханічного моделювання деформаційних процесів в осадовій товщі як інструмент підвищення 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 geomechanical modeling in increasing the efficiency of geological and geophysical investigation by prediction CBM production sweet spots is discussed.

Разработка и внедрение технологий прогнозирования скопленений угольного метана является важнейшей задачей угольной геологии. 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 место-

рожденный 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 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, 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. 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.

При этом именно напряженно-деформированное состояние является той ключевой характеристикой среды, анализ которой позволяет прогнозировать степень влияния тектонических факторов, обуславливающих деформационные процессы в осадочной толще, на формирование зон разуплотнения и повышенной трещиноватости, областей увеличения фильтрационно-емкостных свойств пород, направление естественной миграции углеводородов и пр.

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 действует ряд независимых силовых полей, в первую очередь это 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 являются аномальными по отношению к литостатическим напряжениям. Имеет место широкий спектр причин, обуславливающих возникновение тектонических напряжений. В условиях

осадочной толщ *одна* из причин – процессы деформирования слоев осадочных пород.

На сегодняшний день сейсморазведка является единственным геофизическим методом, позволяющим, с одной стороны, выполнить детальные структурные построения исследуемой толщи, в которых 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. 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 в своих работах отмечали возможность изучения напряженно-деформированного состояния на основе структурно-скоростных моделей среды по данным сейсморазведки при решении задач нефтегазовой геологии [6-11].

Предлагаемый в настоящей работе подход позволяет выполнять оценку напряжений, связанных с протекающими в ней деформационными процессами в рамках упругой изотропной модели среды [11], и включает в себя ряд этапов, на которых остановимся более детально.

1. Создание 3D геомеханической модели среды.

Выполнение данного этапа предполагает анализ структурно-скоростных моделей, создание цифровой 3D структурной модели среды и ее “начинка” 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 для оценки и литостатических напряжений. В

условиях спокойного рельефа и пологих структур оценка литостатических напряжений может быть выполнена с помощью аналитических выражений, полученных А. И. Динником для упругой изотропной среды [12]. 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 [10]. Для геологически более сложных ситуаций возможно определение литостатических напряжений путем решения уравнений равновесия [6].

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 данного 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 в форме метода перемещений (МКЭ). С целью снижения вычислительных затрат в настоящей работе использовались многосеточные варианты МКЭ [13]. Методом вычислительного эксперимента определены оптимальные стратегии вычислений на последовательности сеток. Анализ полученных численных результатов показал, что использование разработанных многосеточных вычислительных алгоритмов позволяет существенно, в некоторых случаях на два порядка, снизить затраты машинного времени при

расчете напряженно-деформированного состояния геологической среды.

На основе полученного тензора напряжений вычисляются две характеристики: сумма нормальных напряжений и интенсивность касательных напряжений. Первая характеризует изменение объема без изменения формы (позволяет выделять зоны сжатия и растяжения); вторая – изменение формы без изменения объема (позволяет выделять области действия скалывающих напряжений). Комплексный анализ этих двух величин позволяет дать ответ на вопрос об основных особенностях напряженно-деформированного состояния среды, и именно они, главным образом, используются при последующей геологической интерпретации. Получаемая в ходе расчетов 3D модель распределения тектонических напряжений позволяет строить сечения в заданных направлениях и выполнять их последующую геологическую интерпретацию.

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

Результаты, полученные в условиях различных регионов, в частности в Днепровско-Донецкой впадине [14, 15] и Западной Сибири [16], и их геологическая интерпретация дают основания утверждать, что использование информации о напряженно-деформированном состоянии как дополнительного критерия позволит повысить достоверность и геологическую содержательность широкого круга задач нефтегазовой геологии. По мнению авторов геомеханическое моделирование на основе структурно-скоростных моделей и оценка напряженно-деформированного состояния геологической среды является обязательным для максимально полной характеристики исследуемых нефтегазоносных объектов.

Необходимо отметить, что в условиях угольных месторождений Украины сейсморазведочная информация, необходимая в качестве исходных данных при рассмотренных выше построениях, является “экзотической”. В тоже время, отличительной особенностью разведки угольных месторождений, является относи-

тельно 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 тектоническими деформационными процессами.

В качестве примера реализации вышеизложенного подхода в условиях угольных месторождений рассмотрим результаты, полученные для центральной части Донецко-Макеевского углепромышленного района.

На основе данных бурения о гипсометрии угольных пластов была построена цифровая структурная модель исследуемой толщи, которая наряду с обобщенными сведениями об упругих модулях массива, послужила основой для оценки напряженно-деформированного состояния углепородного массива, обусловленного протекающими в нем тектоническими деформационными процессами.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты визуализации подобных расчетов для пласта m_3 .

Многочисленные исследования в механике, тектонофизике, структурной геологии и других областях науки позволяют выявить основные механизмы нарушения сплошности и изменения проницаемости среды под действием механических напряжений. И хотя различные типы коллекторов (поровый, трещинный, сложный) по-разному реагируют на напряженно-деформированное состояние, не вызывает сомнения, что под действием растягивающих и/или скальвающих 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 скальвающих напряжений.

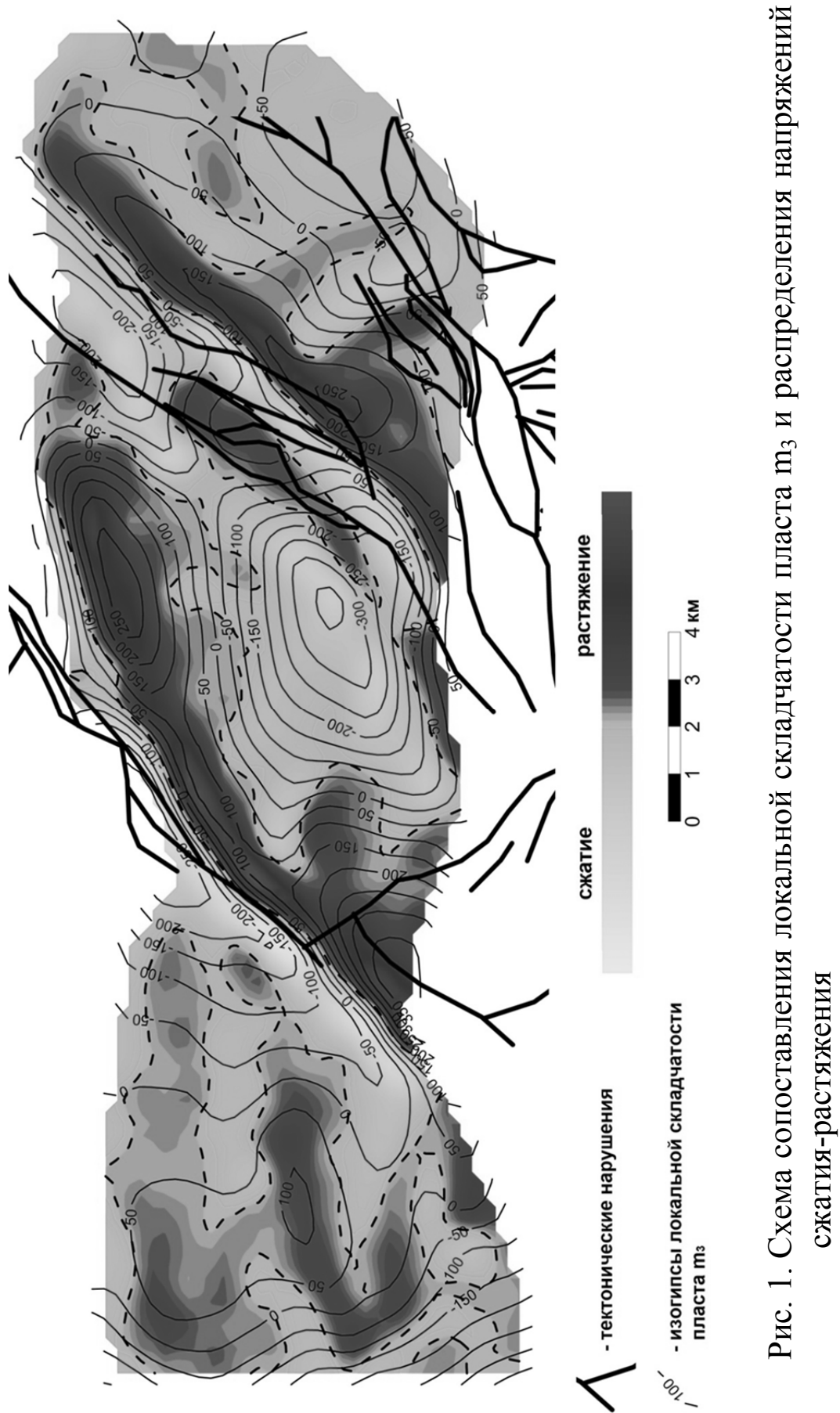


Рис. 1. Схема сопоставления локальной складчатости пласта m_3 и распределения напряжений сжатия-растяжения

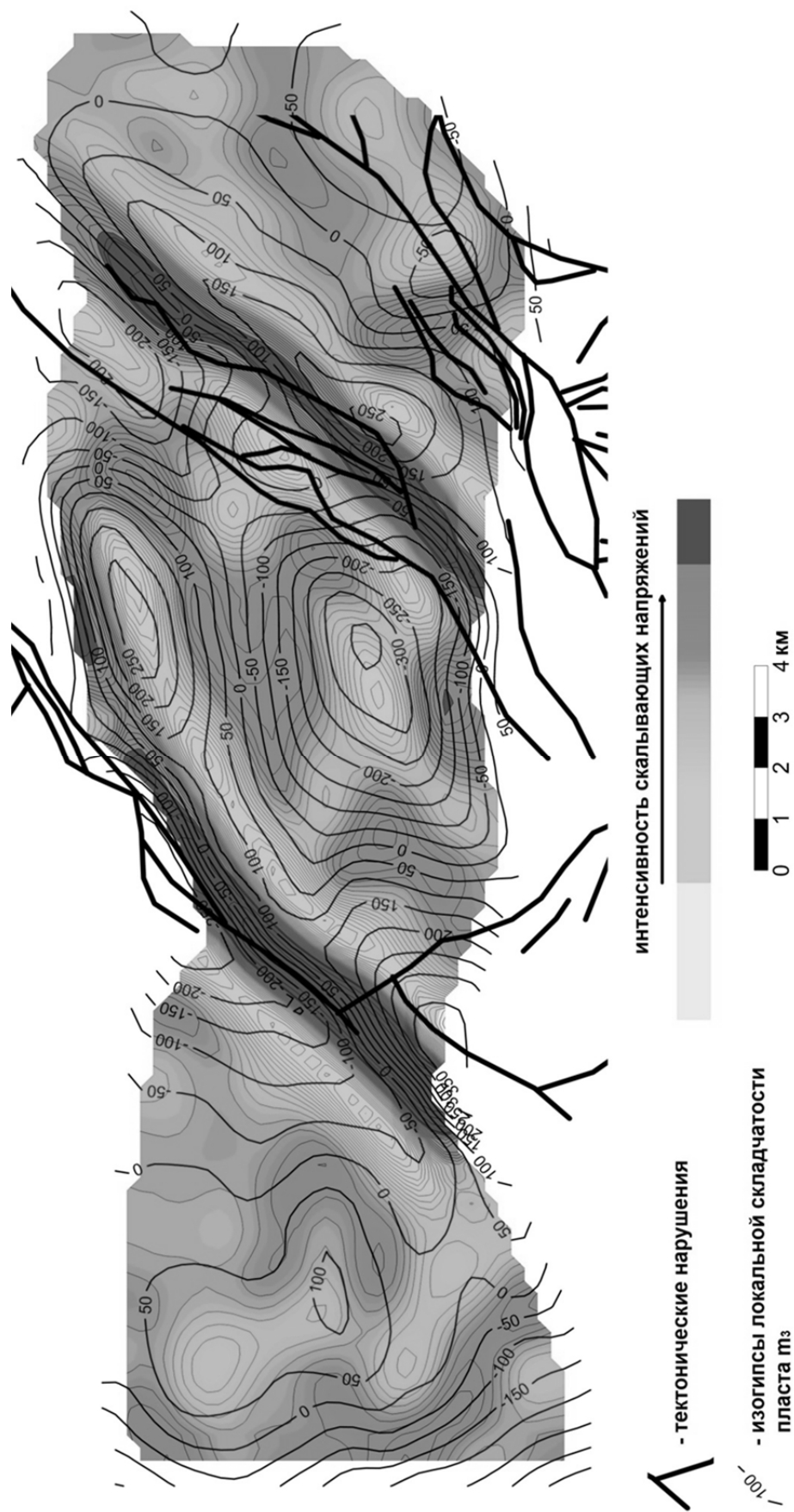


Рис. 2. Схема сопоставления локальной складчатости пласта m_3 и распределения интенсивности скалывающих напряжений

Полученные на сегодняшний день практические результаты дают основание утверждать, что использование в качестве важного прогностического критерия 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.

Комплексный анализ результатов геомеханического моделирования, геофизических и геологических данных позволяет сформулировать как возможные механизмы генезиса зон тектонических деструкций, так и скорректировать тектоническую модель рассматриваемой структуры, по-новому взглянуть на формирование и развитие ловушек углеводородов в сложных геологических условиях.

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. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. Випуск 4. — Донецьк, Укр-НДМІ 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. Сибиряков Б. П., Заикин А. Д. Многоволновая сейсморазведка и прикладная геодинамика в нефтегазаносных областях // Геология и геофизика. — 1994. — № 5. — С. 49—55.
7. Клещев К. А., Петров А. И., Шеин В. С. Геодинамика и новые типы природных резервуаров нефти и газа. — М. : Недра, 1995. — 285 с.
8. Каледин В. О., Ластовецкий В. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород применительно к нефтегазопоисковым задачам // Геофизика. — 1999. — № 3. — С. 63—68.
9. Henk A. Pre-drilling prediction of the tectonic stress field with geomechanical models // First Break. — 2005. — V. 23. — P. 53—57.
10. Козлов Е. А. Модели среды в разведочной сейсмологии. — Тверь : ГЕРС, 2006. — 480 с.
11. 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.
12. Динник А. Н. Избранные труды. — К. : АН УССР, 1956. — 307 с.
13. 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.
14. Довбнич М. М., Солдатенко В. П., Бобылев А. А. Оценка напряженно-деформированного состояния геологической среды на основе структурно-скоростных моделей // Материалы 10-й Международной конференции Геомодель-2008. — Геленджик, 2008. CD.
15. Полохов В. М., Довбнич М. М., Солдатенко В. П., Мендрий Я. В. Геомеханическое моделирование деформационных процессов в осадочной толще: оценка напряженно-деформированного состояния и его геологическое истолкование // Геоинформатика. — 2011. — № 3. — С. 46—53.

16. Довбнич М. М., Солдатенко В. П., Цыганенко П. В., Онищенко С. А., Мачула М. С., Мендрий Я. В. Опыт применения геомеханического моделирования при изучении нефтегазоперспективности юрских отложений севера Западной Сибири // Материалы 11-й Международной конференции Геомодель-2009. — Геленджик, 2009. — CD.