

УДК 550.834

**ПРИМЕНЕНИЕ МИГРАЦИИ ДУПЛЕКСНЫХ ВОЛН ДЛЯ
ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПРИ ПОИСКАХ
УГОЛЬНОГО МЕТАНА В ДОНБАССЕ**

Анциферов А. В., Тиркель М. Г.
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Горняк З. В., Мармалевский Н. Я.
(УкрГГРИ, г. Киев, Украина)

Костюкевич А. С.
(Tesseral Technologies Inc., г. Калгари, Канада)

Хромова И. Ю.
(ЛУКОЙЛ, г. Москва, Россия)

Показано приклад виділення субвертикальних зон тріщинуватості у вугільній формації Донбасу на підставі міграції дуплексних хвиль.

A case study of using migration of duplex waves to trace zones of near-vertical fracturing in coal formation of the Donets Basin is described.

Введение

Угольные месторождения одновременно являются и месторождениями метана. Во многих регионах мира: США, Канаде, Австралии и др. добыча метана на угольных месторождениях имеет промышленные масштабы [1]. Метан образовывается в процессе углефикации пород, представляющей собой преобразование растительных остатков в уголь. Метан сохраняется как в угольных пластах, так и в породах, что их вмещают. Газ находится в сорбированном, водорастворенном и свободном состоянии. Сорбированное состояние твердого раствора характерно для угольных пластов и вмещающих их пород, содержащих рассеян-

ную и концентрированную органику. В этом состоянии метан практически не извлекается из породы. Водорастворенный и свободный газ концентрируется в основном в пористых и трещиноватых породах, к которым относится как уголь, так и вмещающие его породы.

Миграция газа из газоматеринских пород, которыми является уголь или органические остатки вмещающих его пород, осуществляется в соответствии с несколькими основными механизмами. Важнейшим из них является тектоническая и техногенная трещиноватость. Благодаря трещиноватости газ переходит из связанного состояния в свободное и приобретает способность мигрировать вдоль зон трещиноватости к ловушкам. Поэтому большинство ловушек угольного метана приурочено к зонам трещиноватости.

Основные методы сейсморазведки, направленные на поиск зон трещиноватости, основаны на изучении азимутальной анизотропии скоростей и амплитуд отраженных волн. Наиболее эффективные методики поиска таких зон основаны на технологии 3D-3C сейсморазведки. Shuck и др. [16] показали пример успешного картирования зоны повышенной трещиноватости угля и повышенного порового давления в коллекторах месторождения Cedar Hill (USA). Они основывались на комплексном изучении структуры отражающих границ, азимутальных AVO-зависимостей и характеристик поляризации волн.

Peng и др. [15] показали практический пример применения 3D сейсморазведки для изучения зон скоплений метана. Они также проанализировали специфические особенности проявления AVO-эффекта при разведке угольного метана по сравнению с AVO-эффектом при разведке природного газа в классических коллекторах (например, песчаниках). Имеются и другие работы подобного направления.

Методы азимутальной 3D сейсморазведки являются эффективными в случае ярко выраженной НТИ-среды, приводящей к эффективной азимутально-зависимой анизотропии. При этом требуются значительные апертуры наблюдений, обеспечивающие как широкую азимутальность, так и большие углы падения волн на границу. Однако в случае, когда угольный газ насыщает от-

дельные трещиноватые зоны, мощность которых не превышает нескольких десятков метров, изолированные ненарушенной породой, азимутальная анизотропия на доступных для сейсморазведки частотах практически не проявляется. В данной статье рассматривается возможность выделения и прослеживания субвертикальных отражающих границ, образующихся в зонах газонасыщенной трещиноватости. Для этой цели мы применяем миграцию дуплексных волн (МДВ) [11]. В работе [6] показано, что продуктивности скважин в трещиноватом коллекторе на одном из месторождений России с коэффициентом корреляции 0,94 коррелируется с амплитудами сейсмических изображений, сформированных на основе МДВ. Это дает основание предполагать, что зоны трещиноватости, которые являются как каналами подвода, так и ловушками угольного метана могут быть диагностированы на основании МДВ.

В данной статье мы на основании данных 3D сейсморазведки, полученных на участке №2 шахты „Западно-Донбасская” ОАО „Павлоградуголь”, показываем пример выделения потенциально газонасыщенных зон трещиноватости на основе МДВ.

Миграция дуплексных волн

Еще совсем недавно считалось, что задача формирования сейсмических изображений субвертикальных границ не имеет решения, поскольку волны, отраженные от таких границ, не достигают поверхности наблюдения при наземной сейсморазведке.

Найл и др. [9] показали возможность формирования изображений субвертикальных границ с помощью возвратных волн в условиях резко градиентного изменения скорости по вертикали. Наличие вертикального градиента скоростей приводит к образованию рефрагированных волн, которые, отразившись от вертикальных границ, достигают поверхности наблюдения. При отсутствии такого градиента скоростей используются дуплексные волны, которые двукратно отражаются: сначала от субгоризонтальной границы, а потом от целевой субвертикальной (или в обратном порядке), и благодаря этому достигают поверхности наблюдений. Свойства дуплексных волн были исследованы в работах

[4, 5 и др.], в которых показано, что их энергия вполне достаточна для использования в геологических целях.

Первое сейсмическое изображение вертикальной границы с использованием дуплексных волн получил McMechan [14]. Для этого он использовал миграцию на основе двухстороннего волнового уравнения, реализованную способом обращения волнового поля во времени (reverse time migration – RTM) [7]. Особенностью этой миграции является то, что при формировании изображения вертикальной границы с использованием скорости близкой к истинной, однократно отраженные волны становятся существенными помехами. По этой причине из синтетической сейсмограммы, которая использовалась для получения изображения вертикальной границы, McMechan вычел однократно отраженную волну, т.е. отделил однократно отраженные волны от дуплексных.

Farnez и др. [8] показали пример формирования 3D изображения вертикальной приштоковой границы при помощи дуплексных волн в технике RTM. Проблему фильтрации помех, связанных с однократно отраженными волнами, они решили путем введения референтной скорости, значительно отличающейся от истинной скорости в области соляного штока. Этот подход позволяет эффективно решать вопрос борьбы с однократно отраженными волнами. Однако в этом случае основными возможными объектами МДВ становятся только границы соляных штоков. Они характеризуются тем, что временная задержка, связанная с истинным пробегом волны внутри соли и пробегом в рамках модели с референтной скоростью, оказывается значительной. Для зон разрывных нарушений, трещиноватости и других подобных геологических объектов характерна сопоставимость их ширины с длиной сейсмической волны. Использование референтной скорости, отличающейся от истинной внутри такого тела, не приводит к временной задержке, достаточной для подавления помех RTM. Этот факт является причиной того, что RTM в такой постановке не дает возможности формирования изображений зон трещиноватости.

В то же время миграция дуплексных волн, основанная на преобразовании Кирхгофа [11], имеет возможность формировать

сейсмические изображения как границ соляных штоков [10], так и малоамплитудных нарушений, зон трещиноватости [12, 13], субвертикальных неоднородностей и другие.

В отличие от обычных видов миграции МДВ кроме глубинно-скоростной модели требует задание субгоризонтального отражающего горизонта (опорного горизонта). Изображение субвертикальных границ формируется выше указанного горизонта.

Результаты

На участке № 2 шахты „Западно-Донбасская” ОАО „Павлоградуголь” МДВ была выполнена в пределах двух интервалов глубин. Для этого были выбраны две опорные границы. Первая на уровне горизонта c_8 , который соответствует кровле угольной толщи визейского возраста и вторая на уровне горизонта c_1 , соответствующего подошве этой толщи. На рис. 1 показан стратиграфический срез полученного при помощи МДВ куба, расположенный на расстоянии 70 м от горизонта c_8 .

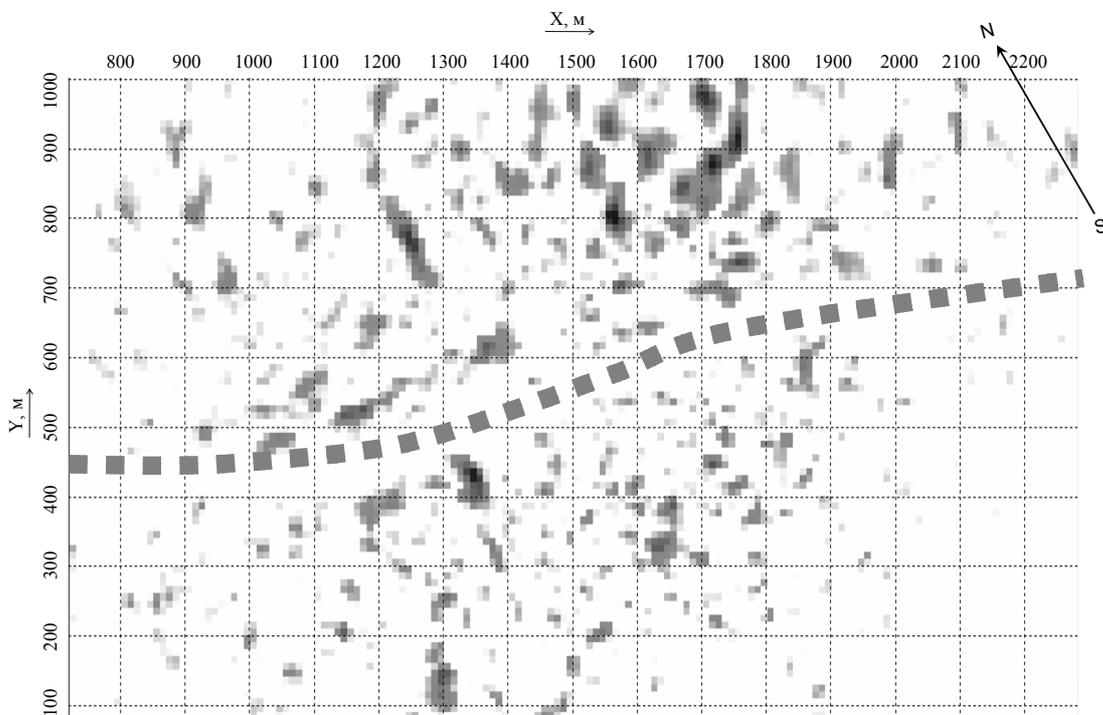


Рис. 1. Стратиграфический срез куба МДВ для опорного горизонта c_8

На рис. 2 показан вертикальный срез куба МДВ, на котором видны субвертикальные границы, связанные с прогнозными зонами трещиноватости.

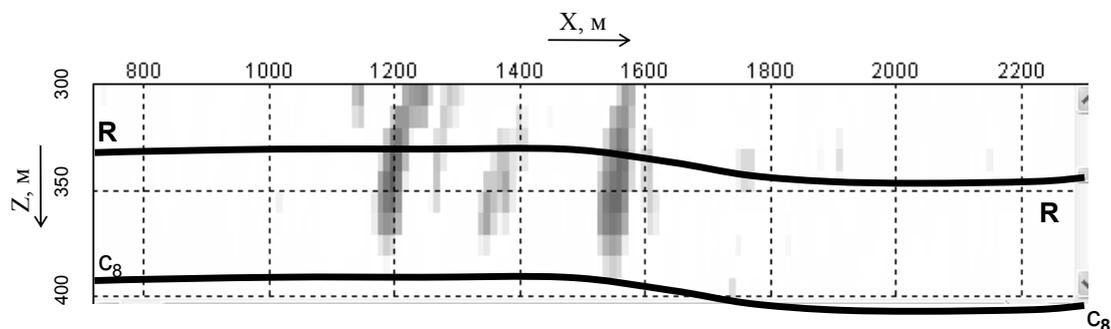


Рис. 2. Вертикальное сечение куба МДВ вдоль линии $Y=800$ для опорного горизонта c_8

На рис. 3 показано положение разрывных нарушений, полученных по МДВ и вынесенных на структурную карту по горизонту c_8 . Указанные нарушения обозначены цифрами.

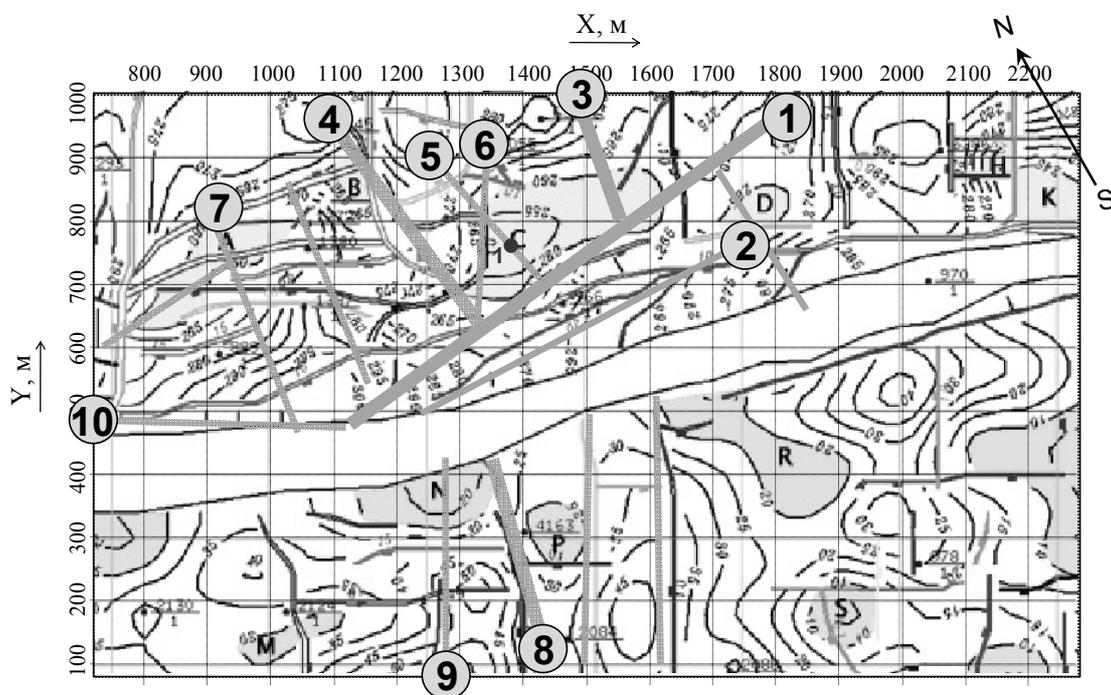


Рис. 3. Структурная карта по горизонту c_8 с результатами интерпретации куба МДВ

Участок работ разделяется крупным, порядка 200 м, Богдановским сбросом с опущенным северным крылом. Северная часть представляет практический интерес с точки зрения поисков метана, так как вся угольная толща на этом участке находится в пределах зоны метаноносности, в то время как угольная толща в южной части участка находится выше зоны метаноносности.

По результатам стандартной интерпретации в пределах горизонта s_8 выделено 37 нарушений, осложняющих Терновскую антиклинальную структуру. Нарушения могут быть сгруппированы в три системы: северо-восточного простирания, юго-западного простирания и параллельную указанному выше крупному сбросу. Указанные нарушения делят площадь на блоки в пределах которых выделены тектонически экранированные ловушки. Эти блоки значительно детализируют Терновскую антиклинальную структуру, которая была выделена до проведения 3D сейсморазведки.

Из рис. 3 можно видеть, что наряду с указанными выше нарушениями по результатам МДВ выделены дополнительные субвертикальные границы меридионального и широтного простирания. Сам факт того, что эти нарушения не были выделены в результате обычной интерпретации говорит о том, что они относятся к малоамплитудным нарушениям и, возможно являются, зонами трещиноватости, которые представляют наибольший интерес с точки зрения поиска метана. Это объясняется тем фактом, что тектонические усилия, приводящие к появлению значительных нарушений, видимых по смещению границ на сейсмических материалах, приводят не только к разуплотнению коллектора, но и к разрушению покрышки с последующей дегазацией территории. В то же время тектонические усилия, приводящие к образованию зон трещиноватости, как правило, не разрушают покрышку, что способствует сохранности залежи.

Анализ сейсмофациальных карт свидетельствует о том, что нарушения северо-западного и юго-восточного простирания являются конседиментационными. Такие нарушения, как правило, являются непроницаемыми и экранируют залежи углеводородов. Вторым фактором, определяющим залежь является наличие канала подвода, роль которого могут выполнять зоны трещинова-

тости. Таким образом наибольшие шансы наличия углеводородов должны быть в тектонически экранированных ловушках, экранированных косидементационными нарушениями и пересекаемыми зонами трещиноватости, выделенными по данным МДВ. Один из примеров такой ловушки показан на рис. 3, где она обозначена буквой С и пересекается прогнозной зоной трещиноватости, обозначенной цифрой 5.

На рис. 4 показан стратиграфический срез второго куба МДВ, полученного с базовой границей на уровне горизонта c_1 . Здесь также выделяются прогнозные зоны трещиноватости меридионального и широтного простирания.

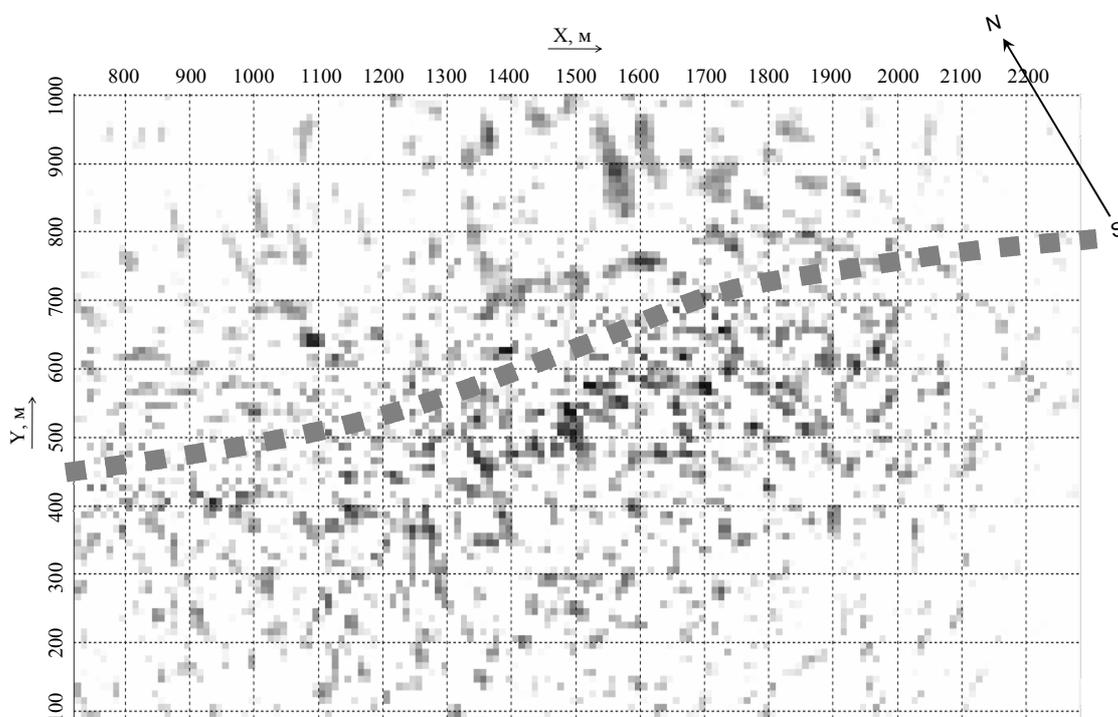


Рис. 4. Стратиграфический срез куба МДВ для опорного горизонта c_1

Вертикальный срез второго куба МДВ показан на рис. 5. На срезе достаточно ярко проявляются субвертикальные границы, относящиеся к прогножным зонам трещиноватости. Их положение на структурной карте по горизонту c_1 показано на рис.6. Независимое выделение субвертикальных границ одного и того же направления на 3D сейсмических изображениях, полученных на

разных уровнях, существенно повышают вероятность прогноза их наличия.

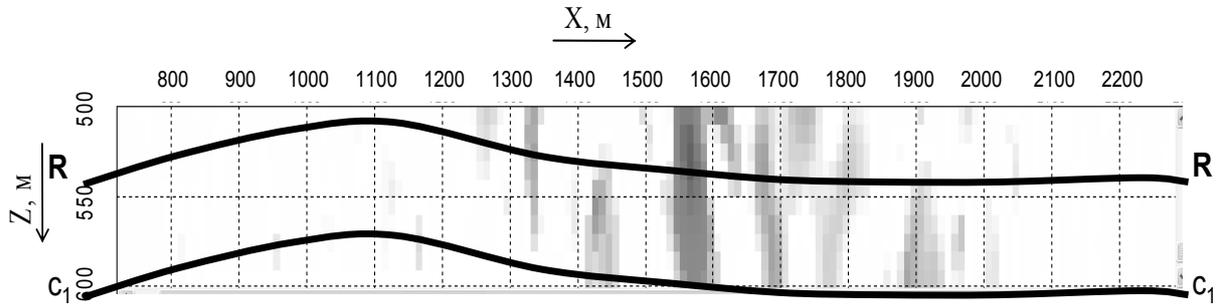


Рис. 5. Вертикальное сечение куба МДВ вдоль линии $Y=800$ для опорного горизонта c_1

Более того, интенсивное по амплитуде изображение субвертикальной границы, обозначенной на уровне горизонта c_1 цифрой 4 (рис. 6) практически полностью совпадает с изображением субвертикальной границы, полученной на уровне горизонта c_8 и обозначенной цифрой 5 (рис. 3).

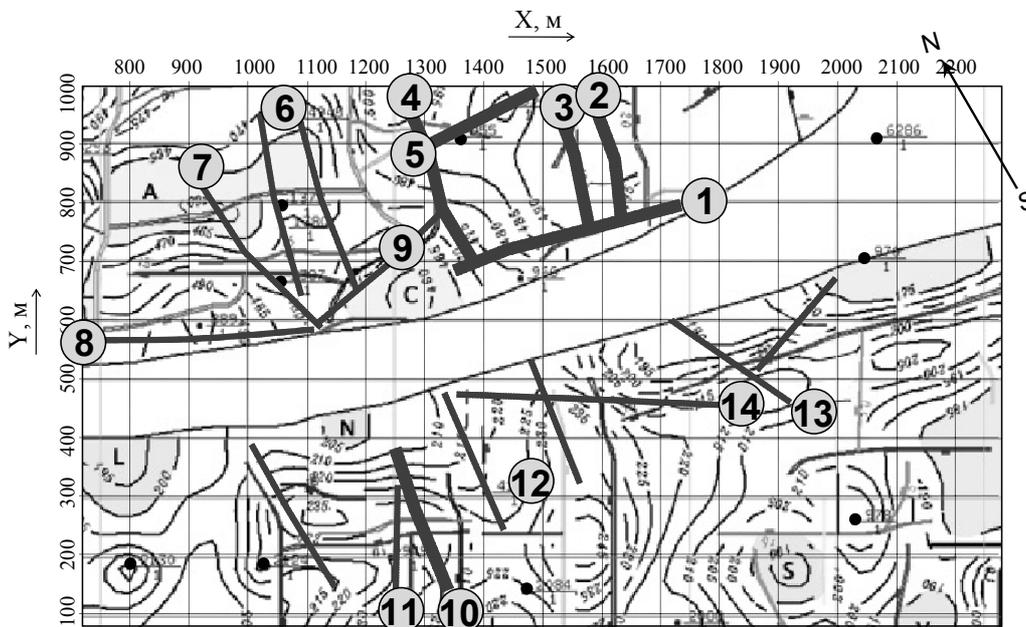


Рис. 6. Структурная карта по горизонту c_1 с результатами интерпретации куба МДВ

Данный факт может свидетельствовать о том, что это единая зона нарушения, имеющая практически вертикальное падение и пересекающая всю угольную толщу (250 м). Такой канал подвода является наиболее эффективным, так как имеет значительную площадь дренажа. Можно прогнозировать, что рассматриваемая зона является не только каналом подвода, но и резервуаром для углеводородов по аналогии с подобными зонами, описанными в работах [6, 12] на основе данных бурения.

На рис. 7 показан пример специальной пост миграционной обработки куба МДВ для горизонта s_1 . В результате процедуры МДВ на интерпретацию подаются данные, осложненные низко-, средне- и высокочастотными шумами, сопоставимыми по интенсивности амплитуд с полезным сигналом. Основное отличие шумовых компонент от полезных отражений состоит в их форме.

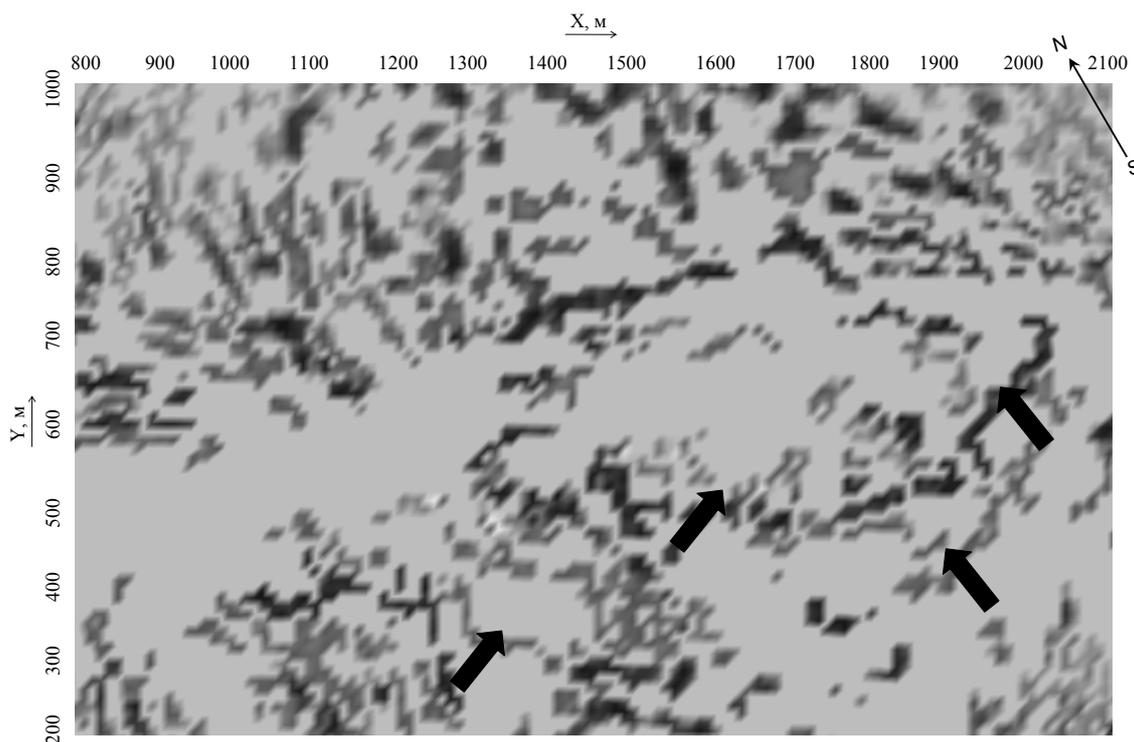


Рис. 7. Стратиграфический срез куба МДВ для опорного горизонта s_1 после выполнения процедуры экстракции линейных аномалий

Низкочастотная компонента, связанная с помехами, генерируемыми опорной и другими субгоризонтальными границами,

характеризується крупномасштабною, плавно змінюючоюся по площаді гетерогенністю. Середнечастотна компонента, отражаюча следи расстановки, характеризується регулярністю, параллельністю лініям приєма. Высокочастотна складова характеризується малою розмірністю, несвязністю, изометричністю.

Для освобождения полезного сигнала, связанного с линейными субвертикальными неоднородностями, от всех видов вышперечисленных шумов результативные данные МДВ необходимо провести через процедуры пост миграционной обработки: фильтрацию и экстракцию [3, 6].

На этапе фильтрации исходный куб сглаживается. И сглаженный куб вычитается из исходного для получения разностного куба. С помощью этой процедуры исходные данные освобождаются от низко- и среднечастотной составляющей.

Процедура экстракции заключается в экстрагировании из волнового поля протяженных амплитудных аномалий, путем освобождения его от мелких изометричных разрозненных аномалий. На этом этапе описание волнового поля происходит в терминах объемных тел – вокселей. Вокселем является объемное геометрическое тело, центром которого является один отсчет волнового поля, а его размеры определяются расстоянием между отсчетами. В ходе экстракции из волнового поля должны быть извлечены связные объемные тела. Связность определяется типом соприкосновения вокселей друг с другом.

Поскольку куб имеет 6 граней, 12 ребер между гранями, 8 вершин, то наиболее строгим типом связности считается случай, когда воксели соприкасаются только гранями (6). Наиболее мягким типом связности считается случай, когда воксели соприкасаются и гранями, и ребрами, и вершинами кубиков (26). Для экстракции линейных тел выбирается строгий тип связности.

Как можно видеть из рис. 7, в результате описанных выше процедур пост миграционной обработки были выделены новые элементы, форма которых близка к дугам концентрических окружностей. Эти элементы, в основном наблюдаются в приподнятом южном блоке и на рис. 7 показаны стрелками.

Вероятной природой их образования является вертикально направленное давление, в результате которого была образована и Терновская антиклинальная структура. Подобного рода структуры, осложняющие купола и именуемые “черепажовыми”, описаны в работе Белоусова [2]. Поскольку на уровне горизонта s_1 указанный блок уже находится в зоне метанонности, подобные объекты также представляют значительный интерес.

Выводы

Наличие зон трещиноватости углепородного массива повышает вероятность присутствия угольного метана в свободном состоянии, что позволяет производить его промышленную добычу. Поиск зон трещиноватости стандартными методами сейсморазведки, как правило, затруднен. Использование миграции дуплексных волн позволяет решить эту задачу на основе стандартных сейсмических наблюдений 3D. Совместный анализ данных структурной интерпретации, сейсмофациальных исследований и результатов миграции дуплексных волн позволяет надеяться на повышение эффективности прогноза угольного метана.

Благодарность

Авторы благодарны сотрудникам УкрГГРИ Сергию Г. Б. и Постниковой Н. И., а также сотруднику УкрНИМИ Компанцу А. И. за полезные обсуждения и содействие в обработке и интерпретации материалов.

СПИСОК ССЫЛОК

1. А. В. Анциферов, С. В. Гошовский, Н. В. Жикаляк, Н. Я. Мармалевский, М. Г. Тиркель, Ю. К. Тяпкин. Мировой опыт и перспективы применения в Украине сейсмического метода при поисках, разведке и добыче метана угольных месторождений // Геофизический журнал. – 2008. – 6, Т. 30. – С. 3-20.
2. Белоусов И. И. Основные вопросы геотектоники. – Гостехиздат, 1954.

3. Горняк З. В., Костюкевич А. С., Линк Б., Мармалевский Н. Я., Мерщий В. В., Роганов Ю. В., Хромова И. Ю. Изучение вертикальных неоднородностей с использование миграции дуплексных волн // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 1. – С. 3-14.
4. Костюкевич А. С., Мармалевский Н. Я., Горняк З. В., Роганов Ю. В., Мерщий В. В. Конечно-разностное моделирование дуплексных волн, отраженных от субвертикальных границ. – Геофизический журнал. – 2001. – 23, 3. – С. 110-114.
5. Луценко Б. Н. Интерпретация сейсмических волн в сложных средах. – М.: Недра, 1987. – 120 с.
6. Хромова И. Ю. Миграция дуплексных волн – метод картирования трещиноватых зон тектонического генезиса // Геология нефти и газа. – 2008.– № 3. – С. 3-15
7. Baysal E., Kosloff D.D. and Sherwood J.W.C. Reverse time migration: // Geophysics. – 1983. – 48. – P. 1514-1524
8. Farmer, P. A., Jones I. F., Zhou H., Bloor R. I., Goodwin M. C. Application of reverse time migration to complex imaging problems // First Break. – 2006. – 24. – P. 65-73.
9. Nail D., Hill N.R., Stefani J. Imaging salt with turning seismic waves // Geophysics. – 1992.– 57. – P. 1453-1462
10. Marmalyevskyy N., Roganov Y., Gornyak Z., Kostyukevych A., and Mershchiy V. Migration of Duplex Waves.// 75th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts. – 2005. – P. 2025-2028.
11. Marmalyevskyy N., Gornyak Z., Kostyukevych A., Mershchiy V., Roganov Y. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves// Patent US 7,110,323 B2. – 2006.
12. Marmalevskiy N., Link B.H., Roganov Y., Kostyukevych A., Gornyak Z. Duplex wave migration – a practical and effective tool for imaging vertical boundaries.// 69th EAGE Conference and Exhibition, Expanded Abstracts .– 2007. – P283.
13. Marmalevskiy N., Antsiferov A., Gornyak Z., Khromova I., Kostyukevych A., Tirkel M. Duplex wave migration for coal-bed methane prediction // EAGE 67th Conference and Technical Exhibition, Amsterdam. – 2009. – P066.

14. McMechan, G. A., Migration by extrapolation of time-depent boundary values // *Geophys. Prosp.* – 31. – 1983. – P. 412-420
15. Peng S., Chen H., Yang R., Gao Y., Chen X. Factors facilitating or limiting the use of AVO for coal-bed methane // *Geophysics.* – 2006. – 71, № 4. – P. C49-C56.
16. Shuck E. L., Davis T. L., Benson R. D. Multicomponent 3-D characterization of a coalbed methane reservoir // *Geophysics.* – 1996. – 61, № 2. – P. 315-330.