

## Идентификация обрушений трубок, заполненных брекчияй в угольных шахтах на основе интервальных атрибутов сейсмических данных 3D. Identification of collapse breccia pipes in coal mines based on 3D seismic interval attributes

Huo Quan-Ming,<sup>1,\*</sup> Wang Yang<sup>1</sup> и Zhang Xing-Ping<sup>1</sup>

## Краткое содержание

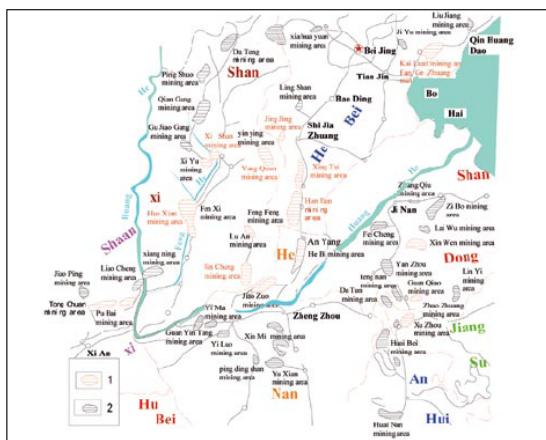
Трубы брекчии обрушения образуются погружением трубчатых тел в покрывающих породах в пустоты выщелачивания в известняках или слоях эвапоритов. В северном Китае, трубы, заполненные брекчиией обрушения известны на некоторых угольных месторождениях, на которых имело место выщелачивание подстилающих известняковых слоев. Ввиду своей высокой проницаемости, трубы брекчии обрушения являются очень серьезной угрозой безопасности для подземных угольных шахт, которые могут быть быстро затоплены, если горная выработка пересечет трубку. Угроза, которую они представляют, препятствует вводу в действие современных механизированных методик выемки длинными забоями, призванных улучшить производительность. В последние годы был достигнут некоторый успех в применении высокоразрешенной сейсмической съемки МОВ в целях обнаружения трубок брекчии обрушения перед проходкой, при этом успех обнаружения составил 60—70%. Мы разработали новый метод идентификации трубок брекчии обрушения на основе интервальных атрибутов сейсмических данных 3D. Результаты демонстрируют, что методика имеет разрешение выше, чем половина доминирующей длины волны сейсмического сигнала и может визуализировать форму трубок там, где они пересекают пласт угля до этого уровня точности.

## Введение

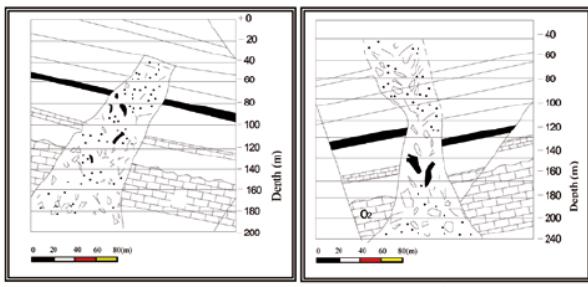
Трубки брекчии обрушения встречаются на Каменноугольных и Пермских угольных месторождениях Северного Китая (Рисунок 1). Согласно Liangtao Ge et al. (2001), более чем 2876 трубок было обнаружено в 45 угольных шахтах, расположенных в провинциях Shanxi, Hebei, Shandong, Shaanxi, Hebei, Henan, и Jiangsu, а также в других провинциях Китая, большинство из которых расположены в провинциях Shanxi и Hebei, особенно в районе реки Fenhe. В области разработки Xishan, было найдено 1300 трубок брекчии обрушения с плотностью до 70 на  $\text{км}^2$ ; в области разработки Huo Xian, плотность составила до 34 на  $\text{км}^2$ ; и более чем 450 трубок было найдено на площади 99  $\text{км}^2$  области разработки Yangquan.

Трубы брекчии обрушения создаются при погружении трубчатых тел в покрывающих породах в пустоты выщелачивания в известняках или слоях эвапоритов. На угольных месторождениях Северного Китая, выщелачивание происходило в мощных ордовикских известняках, которые подстилают разрез угленосных слоев. Ввиду высокой проницаемости, трубы брекчии обрушения являются очень серьезной угрозой безопасности для подземных угольных шахт, которые могут быть быстро затоплены, если горная выработка пересечет трубку. Угроза, которую они представляют, препятствует вводу в действие современных механизированных методик выемки длинными забоями, призванных улучшить производительность.

Типичным примером изучения является случай, произошедший на шахте Fangezhuang в области разработки Kailuan. Ранее во время разработки было обнаружено восемь сухих трубок брекчии обрушения. Между тем, 2 августа 1984, произошел очень серьезный прорыв воды, когда при разработке была пересечена девятая трубка брекчии обрушения. Вода фонтанировала со средним дебитом более чем  $2000 \text{ м}^3 \text{ hf}^{-1}$  за первый период 10 часов, быстро затопляя шахту и создавая угрозу соседней шахте.



**Рисунок 1** Распределение областей угольных разработок в северном Китае, где были обнаружены трубы брекчии обрушения. Легенда: (1) области разработки, где были обнаружены трубы; (2) области разработки, где не было обнаружено трубок (After Liangtao Ge et al., 2001).



**Рисунок 2** Схема разреза типичной трубы брекчии обрушения, найденной в области разработки Jingjing провинции Shanxi в Северном Китае.

<sup>1</sup> Research Institute of Coal Geophysical Exploration, China National Administration of Coal Geology, Zhuozhou, Hebei, China.

<sup>1\*</sup>Автор, с которым можно вести переписку, E-mail: Hqm2@vip.sina.com.

В результате, финансовые потери насчитывают несколько сотен миллионов RMB (китайских юаней).

Геофизические методы, которые ранее применялись к задаче обнаружения трубок брекчии обрушения перед тем как выполнять выемку, включают высокоточные методы грави- и магниторазведки, метод переходных процессов ЭМ поля (Huo Quanming et al., 1994), георадар (Zhang Jian, 2006), и 2D сейсмопрофилирование МОВ. В недавнем прошлом, высокоразрешенный сейсмический метод 3D на отраженных волнах широко использовался для изучения трубок брекчии обрушения (Jianyi Tang and Zheng Fang, 1998; Jianyi Tang et al., 1998; Zuozhou Shi et al., 1998; Zhao Pu and Xizun Wu, 2005). Он применялся как на равнинах, например в районах добычи Kailuan и Xingtai, а также в горной местности, например в районах добычи Yangquan, Xishan, и Jincheng. Тем не менее, метод, применяемый для идентификации трубок брекчии обрушения по сейсмическим данным 3D, был преимущественно основан на интерпретации разрезов сейсмических профилей и временных срезов на рабочей станции, что зависит от точности изображений и опыта интерпретатора. Степень успеха при обнаружении трубок диаметром 30 м и более, был в диапазоне 60-70%, и

это не отвечает требованиям надежной добычи угля с использованием современных механизированных методик разработок.

Мы разработали методику количественного описания и идентификации трубок брекчии обрушения по данным сейсморазведки 3D на отраженных волнах на основе интервальных атрибутов. Результаты показывают, что обнаружение трубок существенно улучшилось при использовании оптимизированных интервальных атрибутов, и стало возможным выявлять трубы диаметром менее 30 м.

### Геологические характеристики трубок брекчии обрушения

Типичные формы трубок брекчии обрушения, распространенных в угленосных слоях северного Китая, показаны на Рисунке 2. Большинство трубок имеет овальную или округлую форму в плане, меньшая часть из них имеет неправильную форму. Многие трубы имеют конусность в вертикальном направлении, соответствуют конусу или более неправильной фигуре. Их диаметр имеет диапазон от десятков метров до нескольких сотен метров, а их высота варьирует от -100 м до 500-600 м. Нижняя часть трубок внутри известняков, там где пустоты выщелачивания были заполнены брекчий обрушения, могут достигать нескольких десятков метров в высоту.

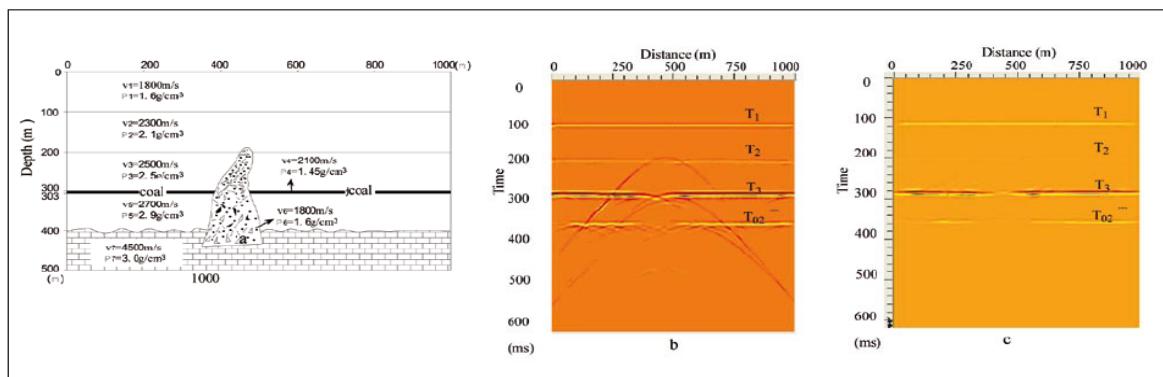


Рисунок 3 Сейсмическое моделирование трубок брекчии обрушения диаметром 80 м, пересекающих угольный пласт мощностью 3 м: (а) модель; (б) результат моделирования на основе волнового уравнения Кирхгофа, представляющий суммарный сейсмический разрез; и (с) разрез, мигрированный во временной области.

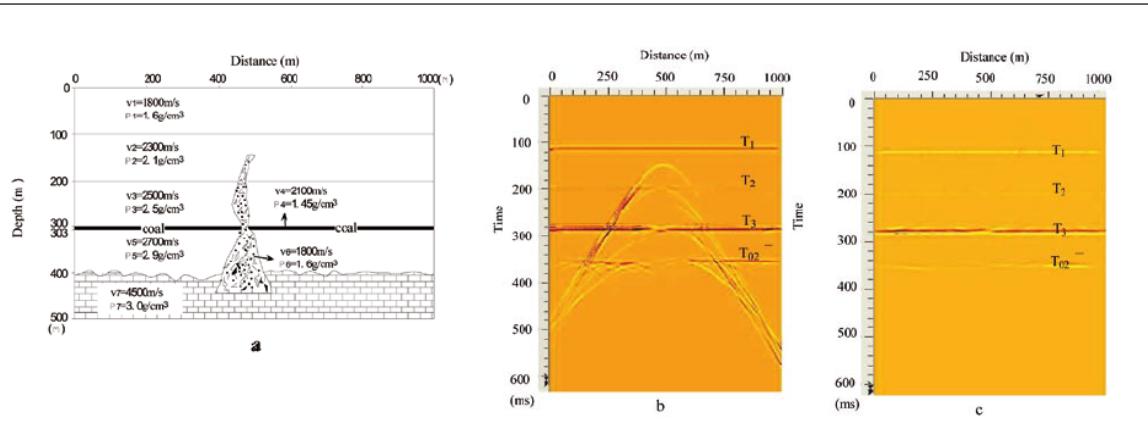


Рисунок 4 Сейсмическое моделирование трубок брекчии обрушения диаметром 20 м пересекающих угольный пласт: (а) модель; (б) результат моделирования на основе волнового уравнения Кирхгофа, представляющий суммарный сейсмический разрез; и (с) разрез, мигрированный во временной области.

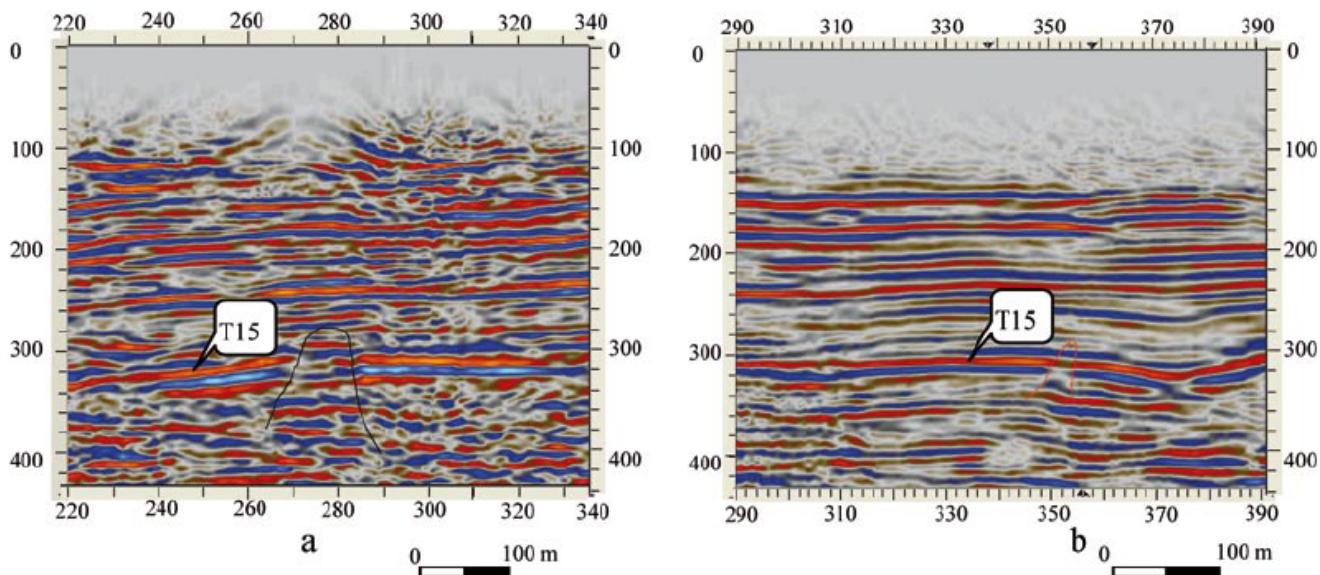


Рисунок 5 Изображение трубок брекчии обрушения на сейсмических временных разрезах. Ось синфазности T15 - горизонт основного угольного пласта номер 15, имеющего мощность 3.0-5.2 м, (а) Имеется четкий разрыв со сменой характера отражения в том месте, где широкая трубка пересекает горизонт T15, (б) Наблюдается ослабление амплитуды сигнала, но при этом нет смены характера отражения там, где узкая трубка пересекает горизонт T15.

Брекчия в трубках состоит из хаотически организованных блоков и обломков с острыми краями и углами. Степень цементации может быть различной. Имеется существенная вариация плотности брекчии в различных трубках. По сравнению с породами стенок, брекчия имеет более низкую прочность и большую пористость, и слабо сцеплены. Цементация между брекчии и породами стенки также очень слабая, и наблюдаются развитые трещины в породах стенки.

### Сейсмическое моделирование трубок брекчии обрушения

#### Модель 1

В данной модели, ширина трубок в месте, где они пересекают угольный пласт 80 м, как показано на Рисунке 3а, мощность угольного пласта 3 м, а скорости и плотности каждого слоя показаны в Таблице 1. На Рисунке 3 б показан суммарный разрез, полученный по модельным данным на основе моделирования Кирхгофа на основе волнового уравнения 2D. Центральная частота сейсмического импульса равняется 75 Гц. Первичные отраженные волны от границ и дифрагированные волны от краев трубок брекчии обрушения легко выделяются. Самая высокоамплитудная часть дифрагированного сигнала – зеркальное отражение от верхней части трубы.

На рисунке 3с показан результат временной миграции с использованием  $f-k$  алгоритма. Дифракции были подавлены, и можно легко определить положение трубы в угольном горизонте по отсутствию отражения от угольного пласта.

#### Модель 2

В данной модели, ширина трубы брекчии обрушения в том месте, где она пересекает пласт угля, достигает только 20 м (Рисунок 4а), но кроме формы трубы, другие параметры те же, что и для модели 1. На Рисунке 4б показан суммарный разрез для модели на основе моделирования методом Кирхгофа на основе волнового уравнения 2D. По сравнению с рисунком 3б, единственным очевидным отличием является присутствие дополнительной оси синфазности дифрагированной волны от верхней части поверхности трубы.

На рисунке 4с приводится результат миграции  $f-k$  во временной области. Вновь дифракции были подавлены, но ось синфазности отраженной волны от угольного продолжает пласти прослеживаться через трубку, где имеет слабую амплитуду. Причиной чего является то, что миграция не подавляет дифракции с превосходной фокусировкой. Подобный малый разрыв прослеживаемости отражения будет трудно обнаружить на реальных сейсмических данных, при наличии наложений импульсов от многих других отражающих границ, чем те, что присутствуют в модели.

### Примеры трубок, отображаемых на временных сейсмических разрезах

На рисунке 5 приведены два сейсмических разреза по кубу сейсмических данных 3D, полученному в 9<sup>ой</sup> области выработки 2<sup>ой</sup> шахты Группы Угольной Промышленности Yangquan в провинции Shanxi. Ось синфазности T15, являющаяся отражением от основного угольного пласта 15, характеризуется высокой амплитудой и хорошей прослеживаемостью, в импульсе преобладает красная (мягкая) фаза, за которой идет синяя (жесткая) фаза. Наличие трубок брекчии обрушения, отмеченное на разрезах, было проверено путем подземной выемки.

	слой 1	слой 2	слой 3	Угольный пласт	слой 5	брекчия	Известняк
Скорость (м $\text{с}^{-1}$ )	1800	2300	2500	2100	2700	1800	4500
Плотность ( $\text{кг м}^{-3}$ )	1600	2100	2500	1450	2900	1600	3000
Мощность (м)	100	100	100	3	97		100

Таблица 1 Параметры модели 1.  
2008 EAGE www.firstbreak.org

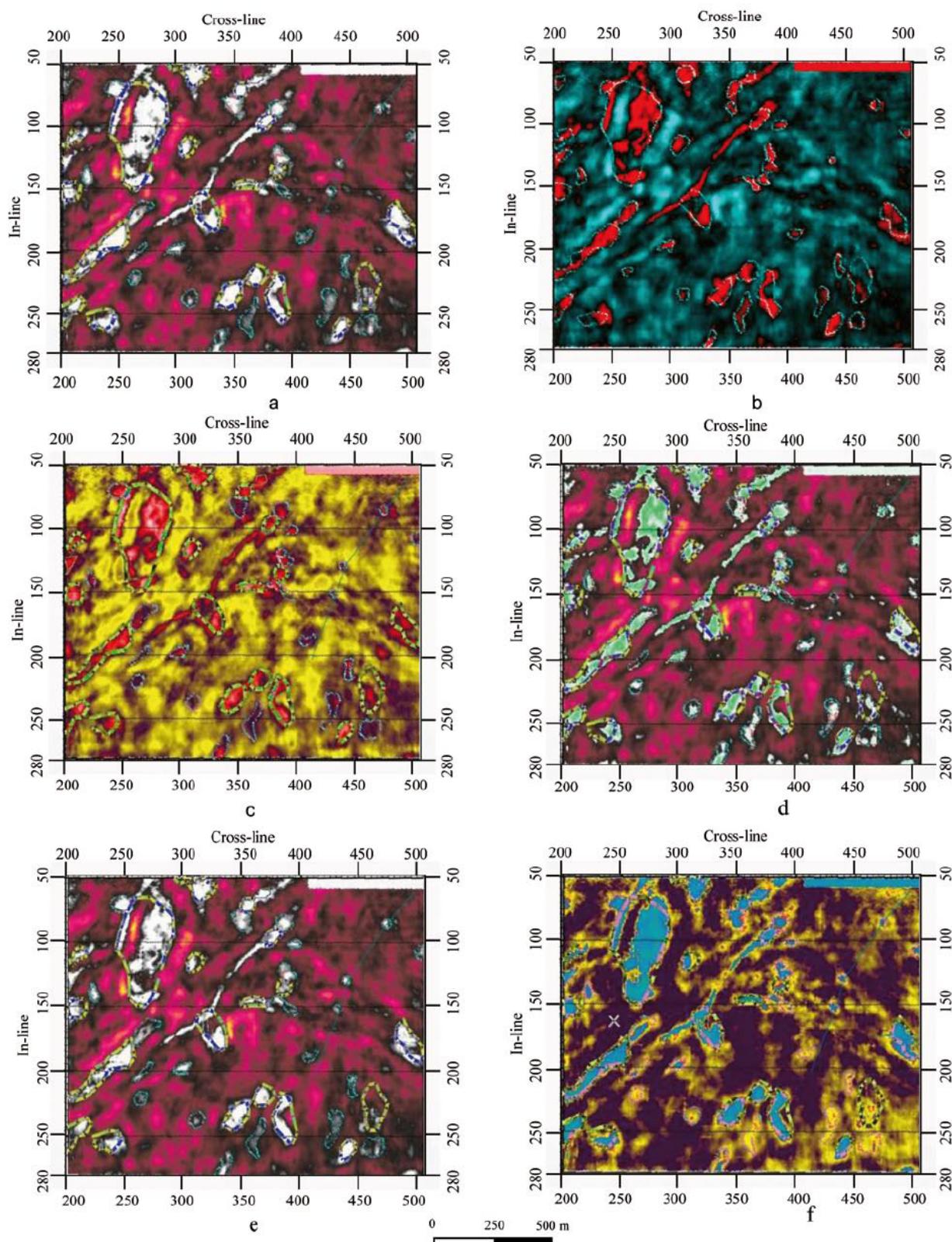
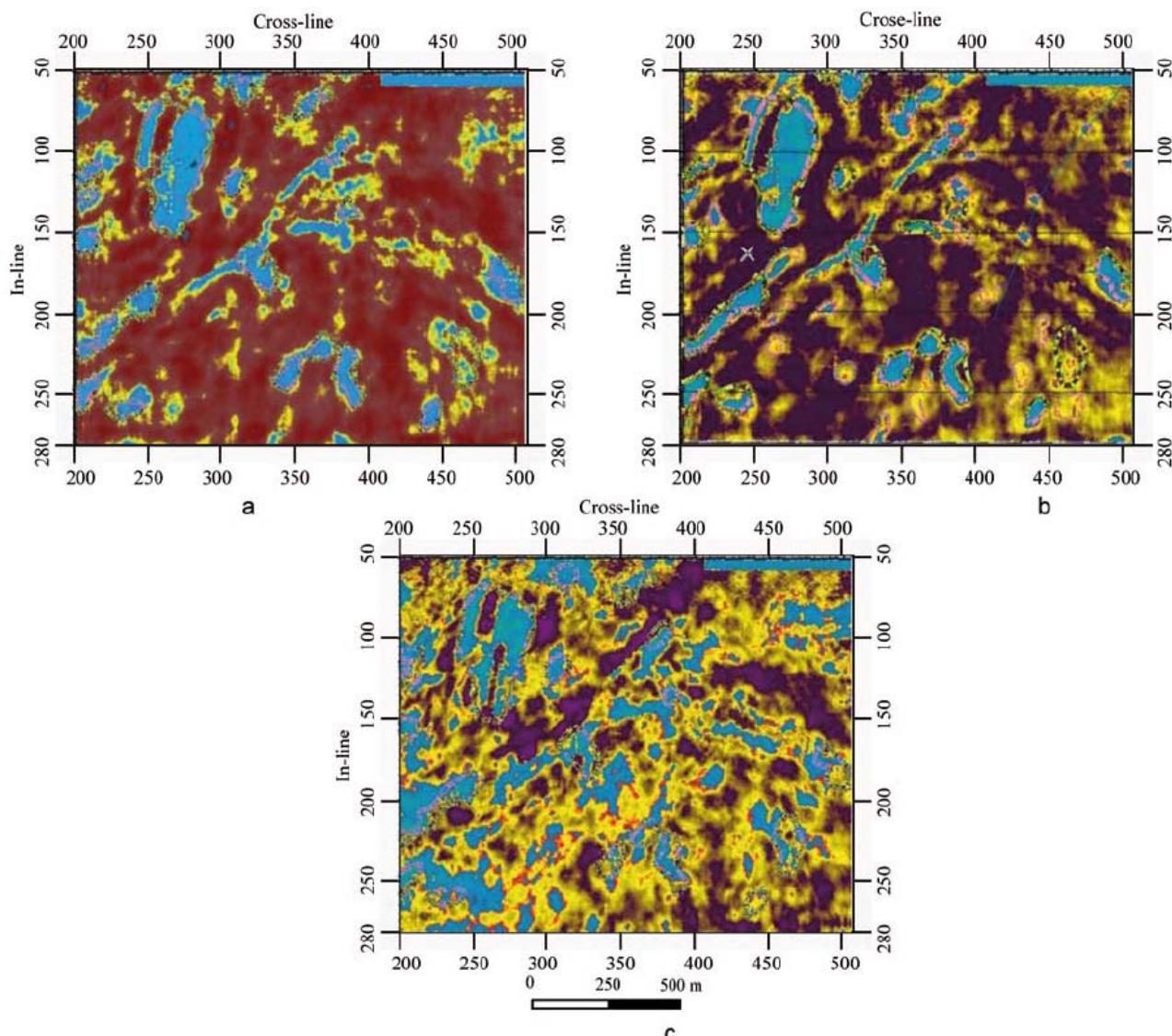


Рисунок 6 Интерпретация трубок брекчии обрушения на основе оптимизации сейсмических атрибутов в интервалах, прилегающих к горизонту T15: (а) стандартное отклонение; (б) энергия; (с) максимальное значение; (д) преобладающая абсолютная амплитуда; (е) комбинированная абсолютная амплитуда; и (ф) наклон амплитуды.



**Рисунок 7** Интервальный атрибут наклона амплитуды в различных окнах: (а) для окна 10 мс, простирающегося вверх от горизонта угольного пласта; (б) для окна 10 мс, простирающегося вниз от горизонта угольного пласта; и (с) для окна 20 мс, простирающегося вниз от горизонта угольного пласта.

Внешний вид трубок на реальных сейсмических разрезах похож на результаты моделирования синтетических данных.

#### Определение положения трубок с использованием сейсмических атрибутов

При 3D сейсмической интерпретации, разнообразные атрибуты отображают изменения литологии, физических свойств и структурных характеристик, которые трудно обнаружить на отображениях традиционных данных (Caineng Zou and Ying Zhang, 2002). Интервальные атрибуты, рассчитанные по значениям выборки данных во временном окне, привязанном к опорному горизонту. В данной работе показано, что некоторые интервальные сейсмические атрибуты можно использовать для получения четких изображений трубок брекчии обрушения вблизи горизонтов угля, а трубы небольшого диаметра могут быть надежно выделены. Типичные результаты показаны на Рисунке 6. Сейсмические данные 3D получены на 9<sup>ом</sup> разрабатываемом участке 2<sup>й</sup> шахты Группы Угольной Промышленности Yangquan в провинции Shanxi.

Имеется несколько факторов, которые необходимо рассмотреть при выборе интервальных атрибутов, таких как геометрия идентифицируемых структур, контраст акустического импеданса, и доминантная частота отражения от угольного пласта. Временное окно интервала должно быть достаточно длинным для того, чтобы сгладить эффекты шума, но не таким большим, чтобы смазать импульс от нарушенного угольного пласта, особенно для обнаружения небольших трубок обрушения. Длина окна и опорный горизонт - ключевые параметры. Иллюстративный пример эффекта смены выбора временного окна показан на рисунке 7 для атрибута наклона амплитуды на Рисунке 6б. Прежде всего, синтетические сейсмограммы были получены по кривым акустического и плотностного каротажа в скважинах с целью выделения отражения от основного угольного пласта на сейсмических данных. Горизонт для этого угольного пласта был пропикирован и проинтерполирован по всему кубу данных. Куб атрибута наклона амплитуды был рассчитан для трех временных интервалов: окно 10 мс непосредственно над пропикированным горизонтом; окно 10 мс непосредственно под пропикированным горизонтом; и окно 20 мс непосредственно под пропикированным горизонтом. Для двух

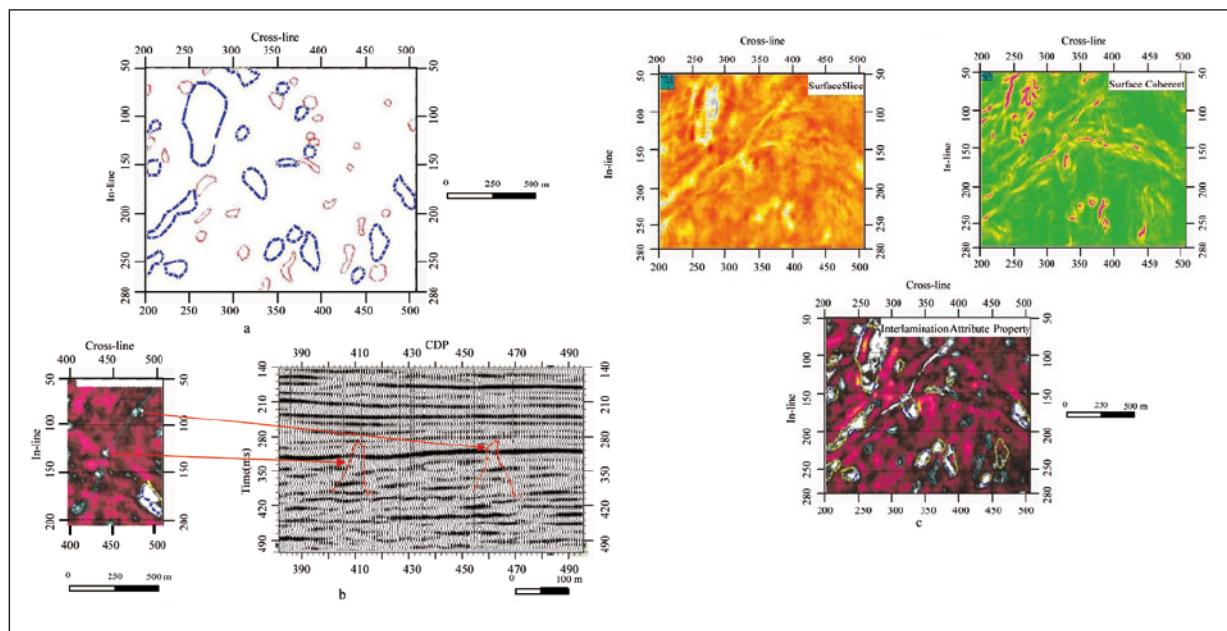


Рисунок 8 Сравнение результатов интерпретации по сейсмическим времененным разрезам и картам интервальных атрибутов, (а) Картирование распределения трубок брекции обрушения в горизонте угля. По результатам интерпретации сейсмических времененных разрезов было выделено только 19 трубок, отмеченных синим. Все 46 закартированных трубок было идентифицировано по интервальным атрибутам, (б) Часть карты стандартного отклоения интервальных атрибутов и сейсмический временной разрез через две трубы брекции обрушения малого диаметра, (с) Сравнение проинтерпретированных результатов по горизонтальному срезу амплитуд, интервальный срез когерентности, и интервальный срез результатирующей абсолютной амплитуды.

окон 10 мс, формы аномалий различны, но обе гораздо менее размыты, чем результат на Рисунке 7с при использовании окна 20 мс. При дальнейшем рассмотрении этого наблюдения оказывается, что наилучшее изображение приводится на Рисунке 7b, для окна 10 мс непосредственно под пропикированным горизонтом, потому, что оно наиболее четко сфокусировано. Доминирующая частота в этом наборе данных - 70 Гц, и мы считаем, что оптимальная длина окна будет обратно пропорциональна преобладающей частоте сигнала.

#### Сравнение результатов интерпретации временных разрезов и карт интервальных атрибутов

Рисунок 5а – это изображение по инлайну 95с Рисунка 7b, который пересекает большую трубку брекции обрушения между общими средними точками 320 и 350. Легко можно идентифицировать трубку на обоих рисунках. Тем не менее, трубы с меньшим диаметром более трудно идентифицировать на сейсмических временных разрезах с уверенностью. На рисунке 8а приведено сравнение положений 19 трубок, выделенных путем интерпретации сейсмических временных разрезов. В отличие от этого, 46 колонн было идентифицировано на основе интервальных атрибутов, включая все 19 трубок, выделенные по временным разрезам. Как видно из сейсмического временного разреза на Рисунке 8b, трубка с длинной осью менее 20 м в плоскости угольного пласта может быть легко пропущена, если использовать метод ручной интерпретации, тогда как положение и форма трубы в том месте, где она пересекает угольный пласт явно видна на карте атрибутов. Горизонтальный амплитудный срез вдоль угольного пласта, интервальный срез когерентности, и интервальный срез комбинированной абсолютной амплитуды приведены на Рисунке 8с. Изображения трубок брекции обрушения нечеткие как на амплитудном срезе, так и на срезе когерентности, но изображения

трубок, включая трубы малого диаметра, очень четкие на интервальном срезе комбинированной абсолютной амплитуды. (Комбинированная абсолютная амплитуда – это алгебраическая сумма абсолютных амплитуд самого большого положительного значения отсчета и самого большого отрицательного отсчета во временном окне).

#### Заключение

Изображение интервальных атрибутов на сейсмических данных 3D было успешно применено к определению геометрии трубки брекции обрушения в том месте, где они пересекают угольные пласти. Соотношение между сейсмическими атрибутами и контрастными физическими свойствами угля, прилегающих слоев осадочных пород и брекции очень сложные, поэтому оптимальные интервальные атрибуты для картирования могут варьировать для разных регионов. Помимо выбора определенных атрибутов, важными для выбора параметров являются длина интервального временного окна и положение опорного горизонта. Путем использования этого метода можно идентифицировать трубы брекции обрушения, длинная ось которых лежит на угольном пласте и равна 20 м.

#### Литература

Caineng Zou and Ying Zhang [2002] New practical seismic technologies for exploration and development of oil and gas. In: *Core Technology of Geophysical Exploration*. Publishing House of the Petroleum Industry, Beijing, 202-257 (in Chinese).

Huo Qianming, Wang Yuhai, Luo Guoping and Leng Guansheng [1994] The application of TEM on flood forecasting and control in coal mines. In: Xiangzhong Jiang (Ed.) *Application of TEM to Detection of Collapse Breccia Pipes in Coal Mines*. Northwest Industry University Press, Xi'an, 34-54 (in Chinese).

Jianyi Tang and Zheng Fang [1998] Practical seismic exploration technology in coal mining area. In: Jinsuo Mu and Shuming Ma (Eds.) *High-Resolution 3D Seismic Exploration in Coal Mining Areas*. Publishing House of the Coal Industry, Beijing, 72-150 (in Chinese).

Jianyi Tang, Yingxia Tang and Gao Yuan [1998] The 3D seismic technique for minor geological structures in coal mines. *Geophysical and Geochemical Prospecting*, 2, 99-108 (in Chinese).

Liangtao Ge, Guijun Ye and Honglie Gao [2001] Hydrogeology of coal fields in China. In: Jinsuo Mu and Shuming Ma (Eds.) *Characteristics of Coal Bed Hydrology*. Publishing House of the Coal Industry, Beijing, 188-189 (in Chinese).

Lingyun Study Group [2003] Research on the interpretation of sedimentary environment based on seismic attributes and its application. *Geophysical Exploration for Oil*, 38, 642-653 (in Chinese).

Zhang Jian [2006] The application of the underground radio wave penetration method in detecting the silo collapsing columns. *Research and Development of Scientific and Technological Information*, 19, 172-174 (in Chinese).

Zhao Pu and Xizun Wu [2005] How seismic has helped to change coal mining in China. *First Break*, 24 (2), 31-34.

Zuozhou Shi, Jianyi Tang and Zheng Fang [1998] New progress of seismic exploration technology for coal. *China Coal*, 24, 10-13 (in Chinese).

Получено 4 июля 2008; принято в печать 6 августа 2008.