



МЕТОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

А. А. Глухов, Е. В. Ребенок, Д. В. Кутепов, Л. Н. Крижановская

Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела,

E-mail: glukhov1964@yandex.ru, genich2008@yandex.ru, den92kyteпов@mail.ru, lnk_ukrnimi@mail.ru, ул. Челюскинцев 291, г. Донецк 83004, ДНР

Представлен разработанный и реализованный в программном обеспечении алгоритм сейсмической томографии углепородного массива, позволяющий оценивать тип и параметры геологических нарушений. Определение типа и характеристик нарушений при использовании метода сейсмического просвечивания проводится на основе анализа распределения отклонений кинематических, динамических и спектральных параметров волнового поля от их фоновых значений в плоскости исследуемого участка выемочного столба.

Шахтная сейсморазведка, метод сейсмического просвечивания, сейсмическая томография, сейсмическое просвечивание, волновое поле

SEISMIC TOMOGRAPHY METHOD FOR COAL-BEARING SOLID MASS

A. A. Glukhov, E. V. Rebenok, D. V. Kutepov, and L. N. Krizhanovskaya

Republican Academic Research and Design

Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying,

E-mail: glukhov1964@yandex.ru, genich2008@yandex.ru, den92kyteпов@mail.ru, lnk_ukrnimi@mail.ru, ul. Chelyuskintsev 291, Donetsk 83004, Donetsk People's Republic

The algorithm for seismic tomography of coal-bearing solid mass is developed and embodied in software. It allows evaluating the type and parameters of geological disturbances. When seismic exploration is used, the type and characteristics of disturbances are determined by analyzing the distribution of deviations in kinematic, dynamic and spectral parameters of the wave field from their background values in the plane of extraction panel area under study.

Mine seismic survey, seismic surveying method, seismic tomography, seismic exploration, wave field

Опережающий геофизический и в первую очередь сейсмоакустический прогноз структуры углепородного массива является надежным средством обеспечения эффективности и безопасности горных работ [1, 2]. В настоящее время достаточно хорошо изучены особенности взаимодействия сейсмических волновых полей с геологическими нарушениями различных типов [2–7], разработаны методики выполнения сейсмических работ и графы обработки результатов исследований для самых разных условиях [2–4, 8–11]. Надежность обнаружения аномалий современными методами сейсморазведки достигает 80 % [2], проблемой остается определение их типа и параметров.

Данная статья посвящена разработанному и реализованному в программном обеспечении алгоритму сейсмической томографии углепородного массива, который дает возможность не только определить положение аномалии, но и оценить ее тип путем анализа распределения отклонений параметров волнового поля от средних значений на исследуемом участке лавы.

Алгоритм томографии. В качестве исходных данных для обработки выступают наборы сейсмотрасс, полученные в результате сейсмического просвечивания [2, 4, 6] оконтуренного выработками участка лавы.

Граф обработки в программном обеспечении реализуется в следующих операциях:

- задание конфигурации системы наблюдений и привязка к ней наборов сейсмотрасс;
- предобработка сейсмотрасс (отбраковка, смена полярности, при необходимости фильтрация);
- определение параметров регистрируемых волновых пакетов (скорость первого вступления, скорость распространения максимума, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), характерная частота, ширина спектра, максимум модуля амплитуды, энергия и др.);
- статистический анализ волнового поля и получение средних по участку наблюдений значений параметров волновых полей;
- расчет и визуализация карт распределения отклонений параметров волнового поля от средних значений на исследуемом участке лавы;
- определение и интерпретация аномалий на основе применения прогнозных критериев.

Для построения карт распределения отклонений параметров волнового поля исследуемый участок условно разбивается на регулярную решетку элементарных ячеек e_{ij} с размерами сторон h и номерами i и j вдоль координатных осей X и Z соответственно.

Допустим к обработке принято M сейсмотрасс s_m ($m = 1, \dots, M$), для которых колебания, составляющие каждую из них, проходят расстояние R^m . В результате получены исследуемые характеристики A^m . Тогда можно оценить среднее значение характеристики:

$$\bar{A} = \sum_{m=1}^M A^m R^m / \sum_{m=1}^M R^m. \quad (1)$$

Пусть через зону e_{ij} проходят лучи N сейсмотрасс s_n ($n = 1, \dots, N$) длиной R^n . Каждый из этих лучей проходит по e_{ij} расстояние L_{ij}^n . В результате их обработки получены исследуемые характеристики A^n . Тогда величину

$$\bar{A}_{ij} = \sum_{n=1}^N A^n L_{ij}^n / \sum_{n=1}^N L_{ij}^n, \quad (2)$$

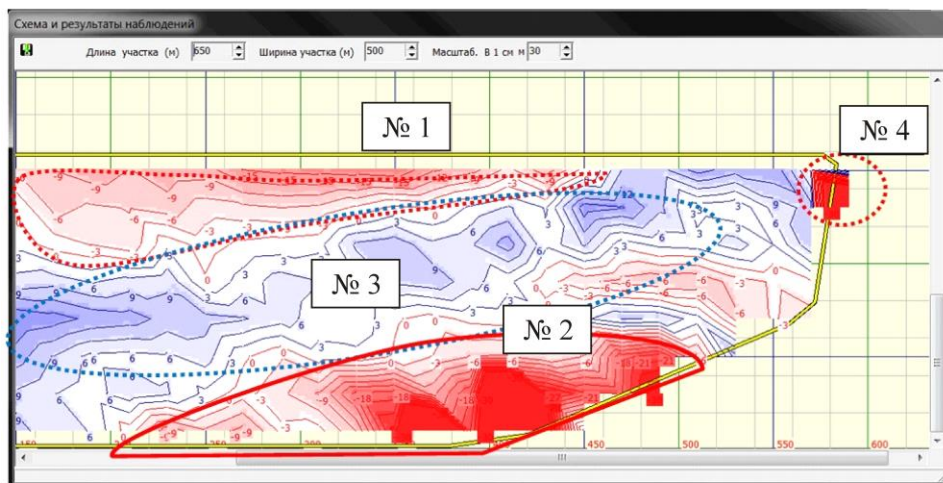
можно условно рассматривать как значение величины A в случае, если бы вся область наблюдений имела характеристики участка e_{ij} . Вычисление величин $\Delta \bar{A}_{ij} = \bar{A} - \bar{A}_{ij}$ является результатом одного из наиболее распространенных вариантов томографии. Чрезвычайно важен тот факт, что при этом неявно предполагается, что значение \bar{A} можно трактовать не только как характеристику сейсмотрассы, но и как характеристику среды в соответствующей зоне.

В качестве информативных параметров волнового поля в соотношениях (1) и (2) чаще всего выступают максимум модуля амплитуды волнового пакета, его характерная частота, ширина частотной характеристики, а также энергия волнового пакета. Амплитуды волновых пакетов получают непосредственно из сейсмограмм. Расчет амплитудно-частотных характеристик осуществляется на основе использования процедуры быстрого преобразования Фурье. Амплитудно-частотные характеристики рассчитываются по всей совокупности сейсмограмм для определенных наборов трасс, а также в заданных скоростных окнах.

Информативные волновые пакеты на амплитудно-частотных характеристиках сейсмотрасс формируют соответствующие пики, причем частотные диапазоны различных пакетов могут перекрываться или даже совпадать. Поэтому детальный анализ АЧХ каждого волнового пакета необходимо проводить в соответствующем скоростном окне. Как правило, рассчитывается характерная частота, амплитуда и ширина максимума основного пика АЧХ. Скоростные параметры волновых пакетов вычисляются по времени первых вступлений, либо по времени прихода максимума волнового пакета.

Пример практического использования. Для наглядности использования метода сейсмической томографии на рис. 1 представлен пример расчета картин распределения параметров волновых полей, зарегистрированных в лаве № 37К10-В шахты им. Т. Кузембаева (Казахстан).

а



б

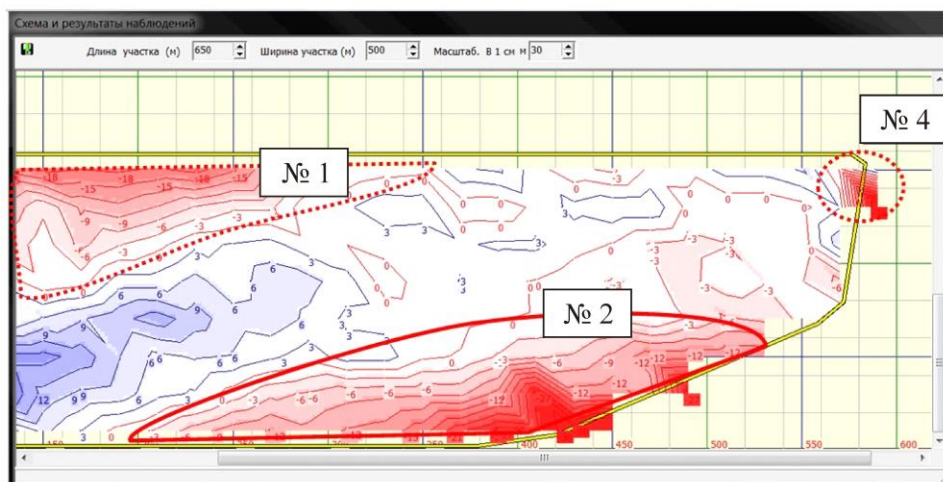


Рис. 1. Карта распределения отклонений: *а* — скорости максимума амплитуды; *б* — максимум модуля амплитуды каналовых волн (ш. Т. Кузембаева, Казахстан)

На рис. 1 можно выделить четыре зоны. Зоны № 1 и № 2 проявляются как области понижения амплитуды и скорости каналовых волн. В зоне № 1 максимальное отклонение параметров достигает 10–15 % в непосредственной близости от выработки. В зоне № 2 скорость и амплитуда уменьшаются в еще большей степени (20–25 %). Снижение амплитуды и скорости распространения каналовых волн указывают на повышенную трещиноватость угля и пород [2–4]. В зоне № 1 увеличение трещиноватости является следствием проходки выработки. Конфигурация и амплитуда отклонений в зоне № 2 свидетельствует о том, что повышенная трещиноватость вызвана влиянием разрывных тектонических нарушений. Отметим, что по результатам добычных работ было подтверждено наличие в границах зоны № 2 нескольких дизъюнктивов с амплитудой от 0.2 до 0.5 м.

Среднее значение рассчитываемых параметров зависит от степени нарушенности участка наблюдений. В лаве № 37К10-В присутствуют зоны геологических аномалий. Средние показатели по амплитуде и частоте сдвинуты соответствующим образом и ненарушенный участок лавы (зона № 3) выглядит как зона с положительными отклонениями рассматриваемых пара-

метров (как зона повышенного горного давления [2]). На границах области могут проявляться ложные аномальные зоны (№ 4). Основная причина — малое количество сейсмических лучей пересекающих данный участок.

В качестве второго примера использования метода сейсмической томографии представлены результаты сейсмических работ на шахте “Обуховская” (Россия). Основная цель экспериментов — прогноз зон замещения пород кровли песчаником, тектонической нарушенности и зон утонения пласта. На рис. 2 показано распределение в плане лавы отклонений амплитуд информативных волновых пакетов.

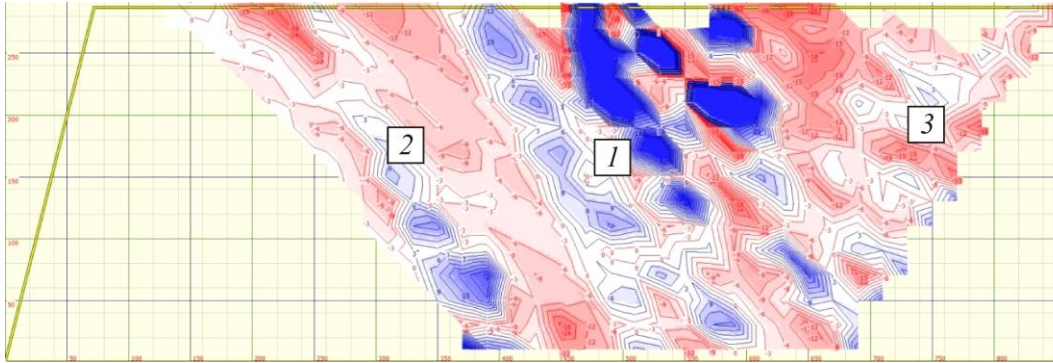


Рис. 2. Карта отклонений амплитуд боковых волн сжатия от средних по участку наблюдений значений (ш. “Обуховская”, лава № 28)

При анализе следует учитывать, что в отличие от предыдущего примера информативными являются боковые волны сжатия со скоростью распространения 4200–4500 м/с и доминирующие боковые волны сдвига (2450–2500 м/с). Каналовые волны не наблюдаются. Анализ карты распределения отклонений амплитуд боковых волн сжатия позволяет выделить потенциально ненарушенную зону № 1 и зоны возможных аномалий № 2 и № 3. Определить характер аномалий по одному признаку не представляется возможным.

Пример построения сейсмического изображения участка лавы на основе комплексирования информативных параметров приведен на рис. 3.

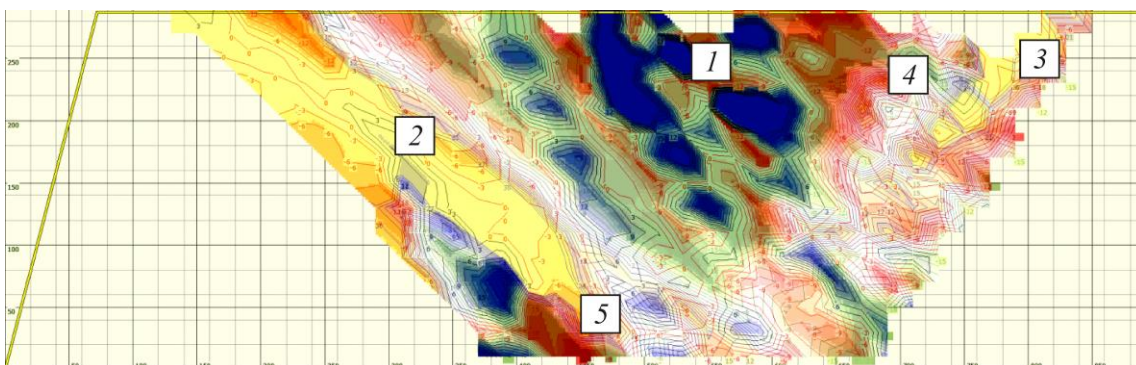


Рис. 3. Карта отклонений амплитуды и частоты информативных волновых пакетов от средних по участку наблюдений значений (ш. “Обуховская”, лава № 28)

В центральной части размещается зона № 1, в которой значения амплитуды, скорости распространения и частоты боковых волн сжатия близки к средним. Эту область (окрашена синим и зеленым цветом), а также неокрашенные участки можно считать зоной без существенных аномалий. Фрагментарно прослеживаются участки повышенной трещиноватости.

В областях № 2 и № 3 скорость и частота боковых волн сдвига выше средних значений (на 10–15%), в то же время амплитуда на 5% ниже. Программным комплексом данные зоны на карте выделяются желтым цветом. Такой характер отклонений свидетельствует о наличии

областей плотных вмещающих пород [2, 3]. Красным цветом на схеме выделены вероятные зоны наиболее значимых аномалий (области № 4, № 5). В этих зонах наблюдается падение амплитуды информативных волновых пакетов, которое сопровождается снижением скорости и частоты. В рассматриваемых условиях такие участки могут быть идентифицированы либо как мелкоамплитудная тектоническая нарушенность, либо как участки резкой смены литологии кровли.

ВЫВОДЫ

Представленный алгоритм обработки в настоящее время апробирован на ряде шахт России и Казахстана. Он позволяет повысить надежность интерпретации результатов сейсмических исследований. Ведется работа по его модернизации в плане автоматизации наиболее трудоемких операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Dresen L. and Rüter H.** Seismic Coal Exploration, Part B, Seismics: Handbook of Geophysical Exploration, Section I. Seismic Exploration. Pergamon, 1994, 486 pp.
2. **Antsiferov A. V.** Theory and practice of mine seismic survey, Donetsk, LLC Alan, 2002, 312 pp. [**Анциферов А. В.** Теория и практика шахтной сейсморазведки. — Донецк: ООО Алан, 2002. — 312 с.]
3. **Antsiferov A. V. and Glukhov A. A.** Mathematical modeling in mine seismic prospecting, Kiev, Naukova Dumka, 2012, 255 pp. [**Анциферов А. В., Глухов А. А.** Математическое моделирование в шахтной сейсморазведке. — Киев: Наук. думка, 2012. — 255 с.]
4. **Zakharov V. N.** Seismoacoustic forecasting and control of the state and properties of rocks in the development of coal deposits, Moscow, A. A. Skochinsky Institute for Mining, 2002, 172 pp. [**Захаров В. Н.** Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 2002. — 172 с.]
5. **Mason I., Buchanan D., and Boorer A.** Fault location by underground seismic survey, Institution of Electrical Engineers, 1980, vol. 127, pp. 322–336.
6. **Shepe F.** Investigation of the geological structure of coal seams by seismic method using SUMMIT II EX equipment, Mining Informational and Analytical Bulletin, 2012, no. 10, pp. 145–154. [**Шепе Ф.** Исследование геологического строения пластов каменного угля сейсмическим методом с помощью аппаратуры SUMMIT II EX // ГИАБ. — 2012. — № 10. — С. 145–154.]
7. **Lawrence M.** Advances in seismic reflection profiling for US coal exploration. Geophysics: the leading edge of exploration, Consolidation Coal Company Library, Pennsylvania, 1991, pp. 24–29.
8. **Friedel Michael J., Tweeton Darel R., Jackson M. J., et al.** Mining applications of seismic tomography, 62nd Annu. Int. SEG Meet, 1992, vol. 4, pp. 58–62.
9. **Hongliang W. and Maochen G.** Seismic Wave Propagation in Coal Seams: Finite Element Modeling and Field Tests, International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 229–385.
10. **Ruban A. D., Zakharov V. N., Averin A. P., and Vartanov S. A.** Software complex for iterative linear reconstruction of the structure and disturbance of a coal seam based on informative parameters during seismic transmission, Mining Informational and Analytical Bulletin, 2010, no. 3, pp. 177–182. [**Рубан А. Д., Захаров В. Н., Аверин А. П., Вартанов С. А.** Программный комплекс итерационного линейного восстановления строения и нарушенности угольного пласта на основе информативных параметров при сейсмодосветивании // ГИАБ. — 2010. — № 3. — С. 177–182.]
11. **Zakharov V. N. Averin A. P., and Vartanov S. A.** Analysis of ray tomography algorithms for predicting the disturbance of the extraction column, Mining informational and analytical bulletin, 2010, no. 3, pp. 183–190. [**Захаров В. Н., Аверин А. П., Вартанов С. А.** Анализ алгоритмов лучевой томографии для прогноза нарушенности выемочного столба // ГИАБ. — 2010. — № 3. — С. 183–190.]