

Результаты проведенных исследований предназначены для получения объективной геомеханической оценки за процессом деформирования междукамерных целиков при отработке Верхнекамского месторождения калийных солей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Министерства науки и образования РФ (рег. номер 122012000403-1),
а также гранта РФФИ № 20-45-596011.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 105-107.
2. Ударцев А.А., Паньков И.Л. Изучение характера деформирования сильвинита в условиях одноосного сжатия при различных режимах нагружения // Горное эхо. – 2022. – № 4 (89). – С. 54-59. – DOI: 10.7242/echo.2022.4.9.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.834:622.12

DOI:10.7242/echo.2023.2.7

О МЕТОДЕ ПРОГНОЗА ДИЗЬЮНКТИВОВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ И ПРИУРОЧЕННЫХ К НИМ ЗОН СКОПЛЕНИЯ МЕТАНА

А.В. Анциферов, А.А. Глухов, В.В. Туманов

*Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), г. Донецк*

Аннотация: В данной статье приведены основы метода дифрагированных волн для прогноза разрывных тектонических нарушений угольных пластов и приуроченных к ним зон вероятного скопления метана. Универсальность метода заключается в том, что он не адаптирован к определенным схемам наблюдений. Представлен алгоритм расчета сейсмических изображений зоны наблюдений. Описаны критерии наличия геологических аномалий. Описана последовательность процедур обработки данных сейсмических наблюдений.

Метод может быть использован геофизическими службами и специализированными организациями для обработки результатов сейсмических исследований в качестве дополнительного способа обработки и анализа данных сейсморазведки.

Ключевые слова: шахтная сейсморазведка, прогноз дизъюнктивов, зоны вероятного скопления метана, метод дифрагированных волн, обработка данных сейсморазведки, программное обеспечение.

Введение

В зонах тектонических структур достаточно часто наблюдается возрастание концентрации газов и тяжелых углеводородов. Такие образования можно рассматривать в качестве газосодержащих коллекторов. Их вскрытие горными выработками сопровождается выбросами газа и человеческими жертвами. При своевременном обнаружении таких аномалий и целенаправленном выполнении предварительной дегазации подобных аварий удалось бы избежать. Сейсмические методы, особенно методы шахтной сейсморазведки, являются достаточно апробированным средством обнаружения подобных аномалий [1].

В последние годы интерес к шахтной сейсморазведке существенно возрос. Наибольший прогресс наблюдается в КНР [3-6]. Ведутся подобные исследования в Европе [7], а также в России [8-12], где метод нашел широкое и всестороннее развитие. Разрабатываются новые прогрессивные методики [5, 6], алгоритмическая база обработки результатов сейсмических наблюдений [9, 10], анализируются вопросы математического моделирования [4]. При этом основная тенденция развития метода заключается в развитии многоволнового подхода [3], основы которого обоснованы в [2].

Особую актуальность имеют методы отраженных волн (МОВ) и сейсмической локализации (МСЛ), обеспечивающие возможность прогноза на участках, куда еще не дошли горные работы [1]. В качестве альтернативного инструмента могут быть использованы дифрагированные волны [13].

В данной статье дан анализ возможности использования дифрагированных волн для прогноза разрывных тектонических нарушений и приуроченных к ним зон вероятного скопления метана. Представлены математические соотношения основных процедур для построения сейсмических изображений исследуемой зоны. Описаны признаки наличия геологических аномалий. На реальном примере проиллюстрирован граф обработки результатов сейсмических наблюдений и особенности практического применения метода.

Теория метода

Рассмотрим задачу в плоскости залегания угольного пласта (см. рис. 1). На профиле наблюдений (вдоль выработки) располагаются пункты возбуждения (ПВ) колебаний S_k ($k=1..K$) и сейсмоприемники (СП) R_l ($l=1..L$).

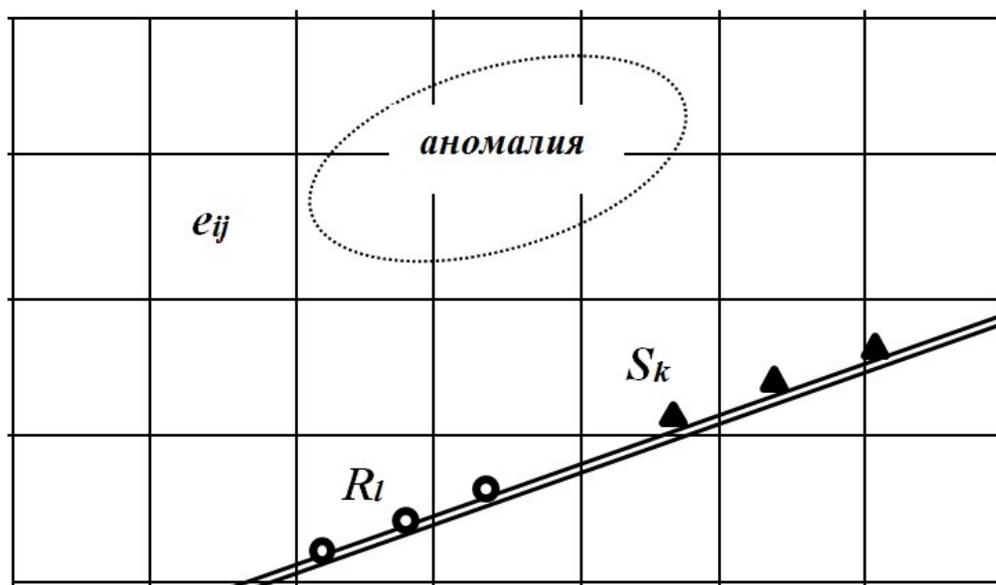


Рис. 1. К объяснению алгоритма метода дифрагированных волн

Расчет сейсмических изображений участка массива горных пород базируется на приведенном ниже алгоритме. Интересуемая зона разбивается на регулярную сеть ячеек e_{ij} со сторонами h и номерами i и j вдоль осей X и Z , соответственно.

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждая точка среды, куда достигла волна, является источником вторичных колебаний. Тогда рассчитать изображение A_{ij} ячейки e_{ij} можно по формуле

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L A_{ij}^{S_k R_l}, \quad (1)$$

где $A_{ij}^{S_k R_l}$ – соответствующие времени $T_{ij}^{S_k R_l}$ значения сейсмических отсчетов на сейсмоотрассе соответствующей СП R_l и ПВ S_k для пути распространения колебаний через ячейку e_{ij} . Время $T_{ij}^{S_k R_l}$ представимо в виде:

$$T_{ij}^{S_k R_l} = T_{ij}^{R_l} + T_{ij}^{S_k},$$

$$\text{где } T_{ij}^{R_l} = h/V \sqrt{(i - i_{R_l})^2 + (j - j_{R_l})^2}, \quad T_{ij}^{S_k} = h/V \sqrt{(i - i_{S_k})^2 + (j - j_{S_k})^2}, \quad (2)$$

где V – скорость распространения выбранной информативной волны (получаемая на практике процедурами скоростного анализа).

Необходимым условием применения предлагаемого метода является предварительная нормировка сейсмоотрасс для устранения разницы в уровнях записи, которая может быть следствием ряда причин. Это может быть различие сил ударов (взрывов) в пунктах возбуждения, различные условия закрепления сейсмоприемников. Уровни записи даже для сейсмоотрасс, получаемых соседними СП от одного ПВ, могут отличаться на порядок [1].

Нормировка выполняется по формуле

$$A(t) = A_0(t)K, \quad (4)$$

где $A(t)$ нормированные, $A_0(t)$ – исходные значения отсчетов на сейсмоотрассах, $K = C / \max(A_0(t))$, где C – коэффициент нормировки (единый для всего набора нормируемых сейсмоотрасс), $\max(A_0(t))$ – максимум амплитуды отсчетов исходной сейсмоотрассы.

В случае малой амплитуды информативной части сигнала может быть выполнена автоматическая регулировка уровня записи (АРУ). Данная процедура выражается в применении варианта формулы (4):

$$A(t) = A_0(t)K(t), \quad (5)$$

где $K(t) = \frac{C}{\max(A_0(t)) - \delta}$, $\max(A_0(t))$ – максимум амплитуды на фрагменте исходной сейсмоотрассы от $t-T/2$, до $t+T/2$, где T – ширина полосы усреднения, δ – пороговый уровень амплитуды.

Результаты математического моделирования

На ненарушенных участках горных работ сейсмическое изображение зоны наблюдений представляет собой совокупность эллипсов, образующих регулярную структуру. Пример такой картины полученной на практике приведен на рис. 2.

Геологические аномалии на сейсмических изображениях могут проявляться разнообразно. Различные варианты можно проиллюстрировать методами математического моделирования. Методика моделирования достаточно хорошо описана [4]. На первом этапе производится расчет теоретических сейсмограмм при заданном расположении нарушения и системы наблюдений. Затем выполняется обработка результатов модели-

рования и построение сейсмических изображений. Рассчитанное положение аномалии сравнивается с заданным в модели.

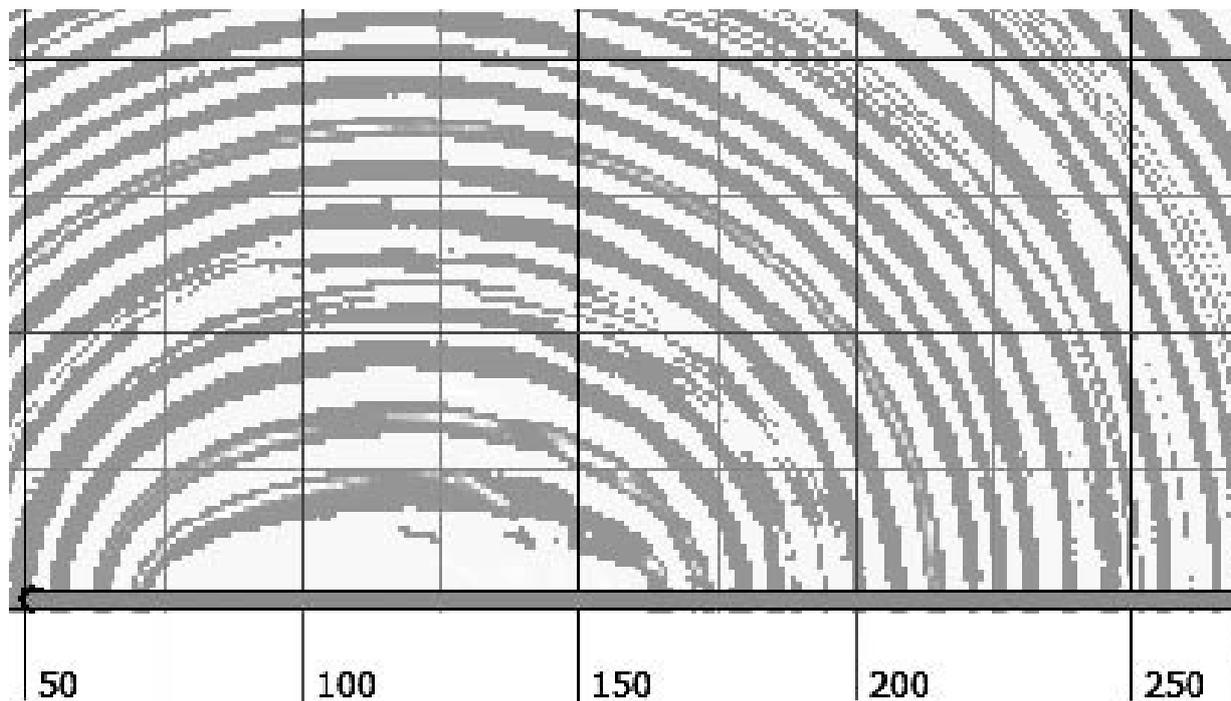


Рис. 2. Сейсмическое изображение ненарушенного участка шахтного поля

То, каким образом проявится зона нарушения на сейсмическом изображении, зависит от множества факторов и реализуется в разных вариантах (см. рис. 3). Во-первых, большое значение имеет то, напротив какого участка профиля расположено нарушение, во-вторых, его ориентация.

В идеальном для наблюдателя случае, если конфигурация системы наблюдений такова, что могут быть зарегистрированы отраженные волны, генерируется информативная картина расположения тектонического нарушения (см. рис. 3а). В общем случае зоны аномалий проявляются либо в виде локальных зон потери синфазности (см. рис. 3б, рис. 3в, рис. 3е), либо в изменении формы и направления характерных полос (см. рис. 3г), либо в виде синфазных максимумов в зоне аномалии (см. рис. 3д). Смещая профиль наблюдения относительно нарушения, мы можем получать совершенно разные по информативности изображения дизъюнктива. Наиболее актуальное из них получим в том случае, если средняя точка профиля будет расположена напротив нарушения.

Скоростной анализ является обязательной частью графа обработки. При изменении используемого значения миграционной скорости форма и расположение изображения аномалии может меняться.

Признаки нарушения проявляются всегда, но в различной форме, что существенно затрудняет интерпретацию.

Практическое использование

В качестве примера практического использования описанного выше метода рассмотрим результаты сейсмических экспериментов на участке 1086 лавы пласта c_{10}^6 шахты «Днепровская». Профиль наблюдения располагался вдоль выработки (1086 бортового штрека). Система наблюдений была ориентирована на использование метода

общей глубинной точки. Метод дифрагированных волн был использован в качестве альтернативного подхода.

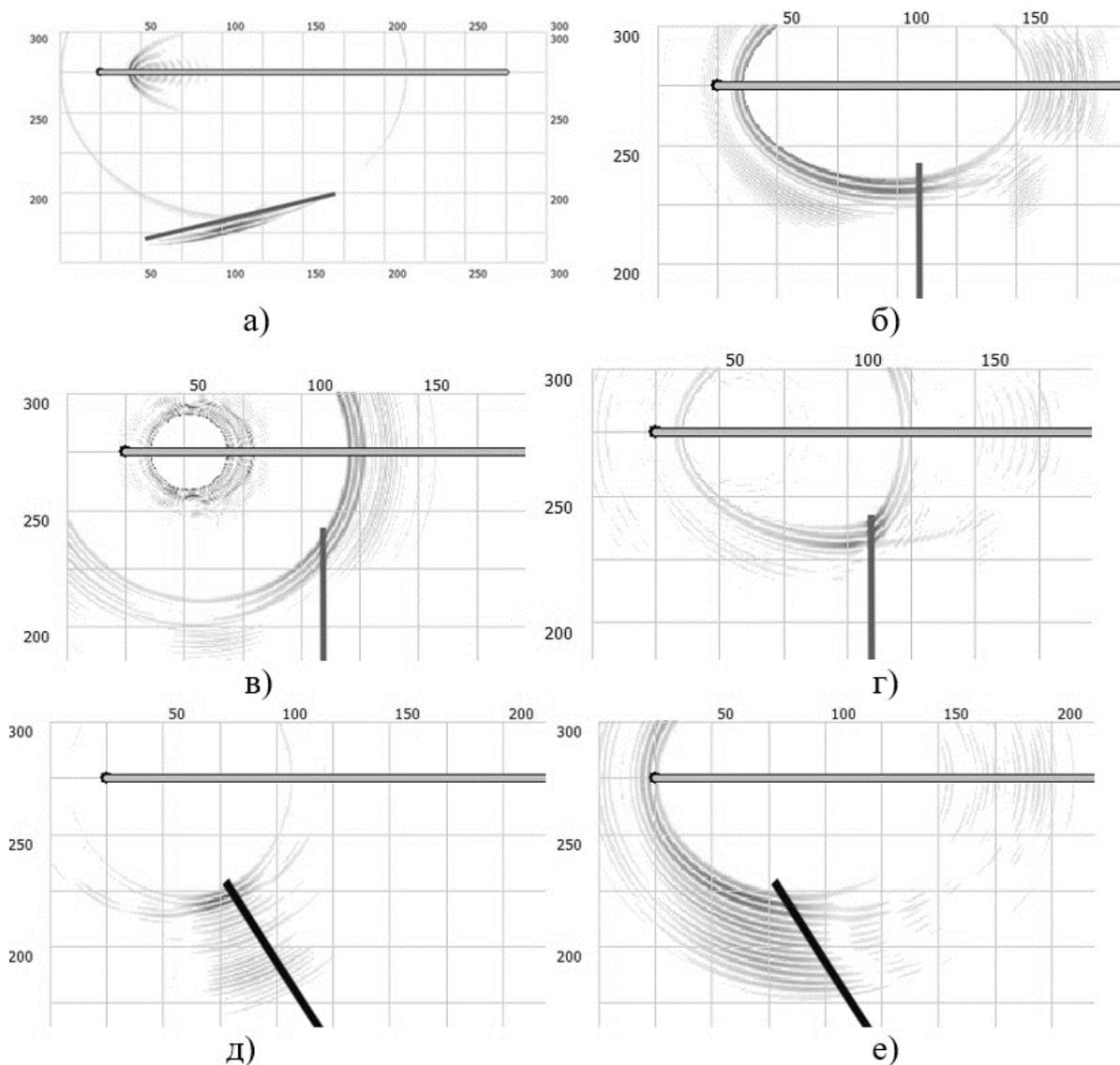


Рис. 3. Изображения дизъюнктива при различных вариантах расположения относительно профиля наблюдений

На рис. 4 представлено изображение области наблюдений. Четко прослеживается прямолинейный сегмент дизъюнктива от точки с координатами (200, 280), до точки (400, 200). Данный прогноз был подтвержден результатами отработки пласта.

В качестве другого примера приведем результаты обработки данных, полученных методом сейсмической локации (МСЛ) впереди забоя вентиляционного штрека 322 Д7-3 на шахте «Казахстанская» (Карагандинский угольный бассейн). Штрек проходится в плотных породах вне угольного пласта (Д₆). Сейсмические изображения углепородного массива были построены справа и слева от груди забоя. Согласно результатам анализа, справа от груди забоя выделяются две зоны потери синфазности сейсмической картины (см. рис. 5). Первая зона расположена вперед 50 м, вправо 20 от груди забоя. Вторая зона расположена 20 метров назад, 20-30 вправо от груди забоя. Аномалии прослеживаются в диапазоне скоростей от 1200 до 1450 м/с.

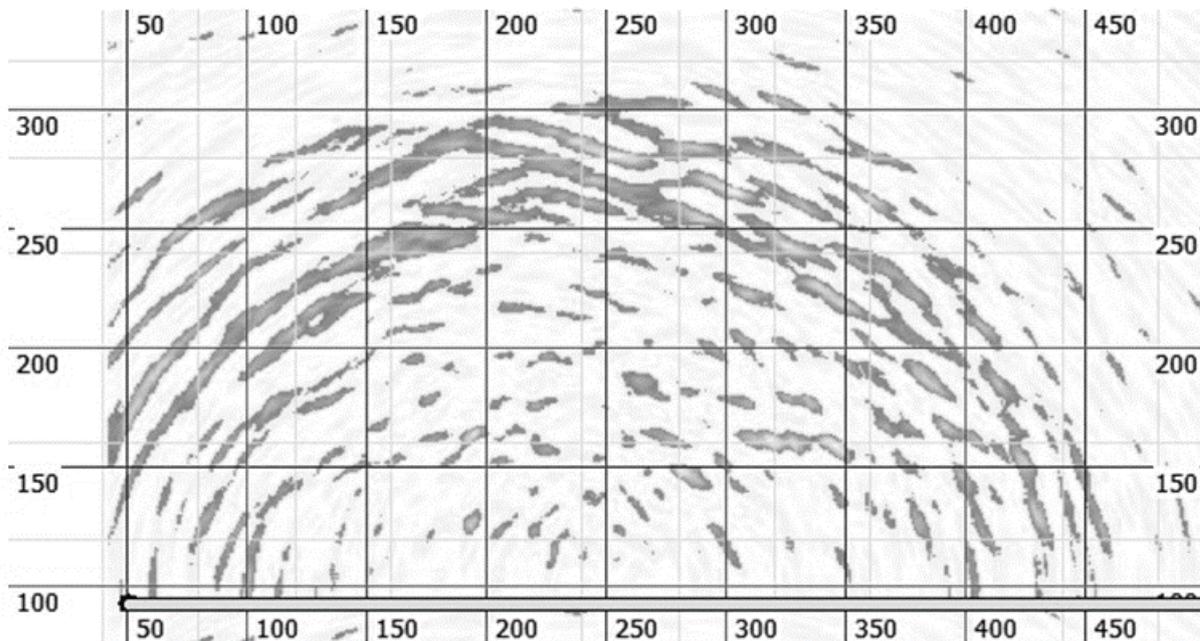


Рис. 4. Пример использования метода дифрагированных волн на участке 1086 лавы пласта c_{10}^6 шахты «Днепровская»

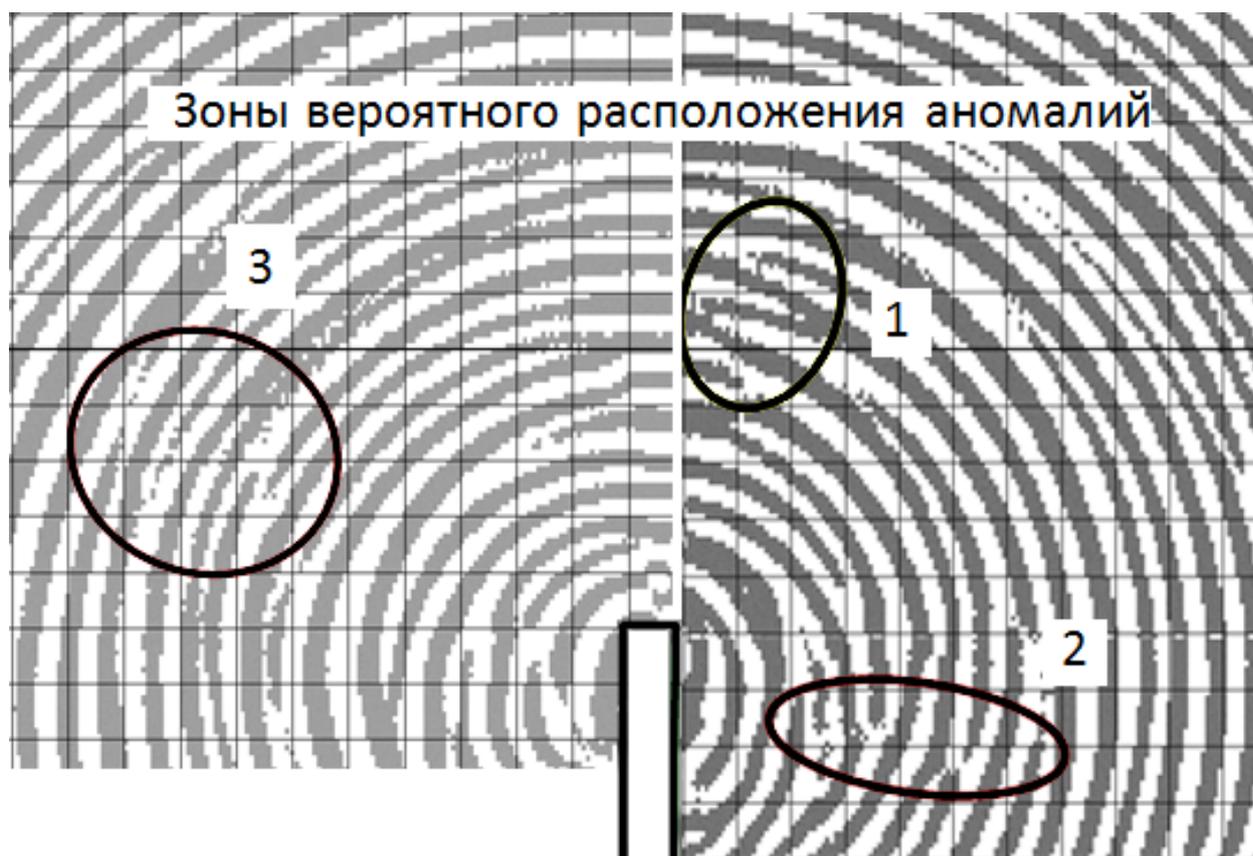


Рис. 5. Зоны вероятного расположения аномалий на участке вентиляционного штрека 322 Д7-3. Шаг масштабной сетки равен 10 м

Слева от груди забоя (60-70 м влево, 20-30 м вперед) в том же диапазоне скоростей выделяется не очень четкая третья зона потери синфазности сейсмической картины. Она не имеет ярко выраженного направления либо формы.

На рис. 6 представлены результаты сопоставления расположения аномальных зон, выделенных с использованием дифрагированных волн с результатами, полученными стандартным графом обработки МСЛ и с известными данными о горно-геологической ситуации.

Анализ показывает, что зона 1 – изображение полевого газодренажного бремсберга. Зона 2 – изображение вентиляционной сбойки. Предполагаемое тектоническое нарушение (зона 3) прослеживается слева от вентиляционного штрека 322 Д7-3 позади забоя. На уровне пласта Д₆ оно было подсечено горными работами.

Результаты прогноза зон 1 и 3 по методу учета дифрагированных волн полностью подтверждаются результатами стандартного подхода МСЛ.

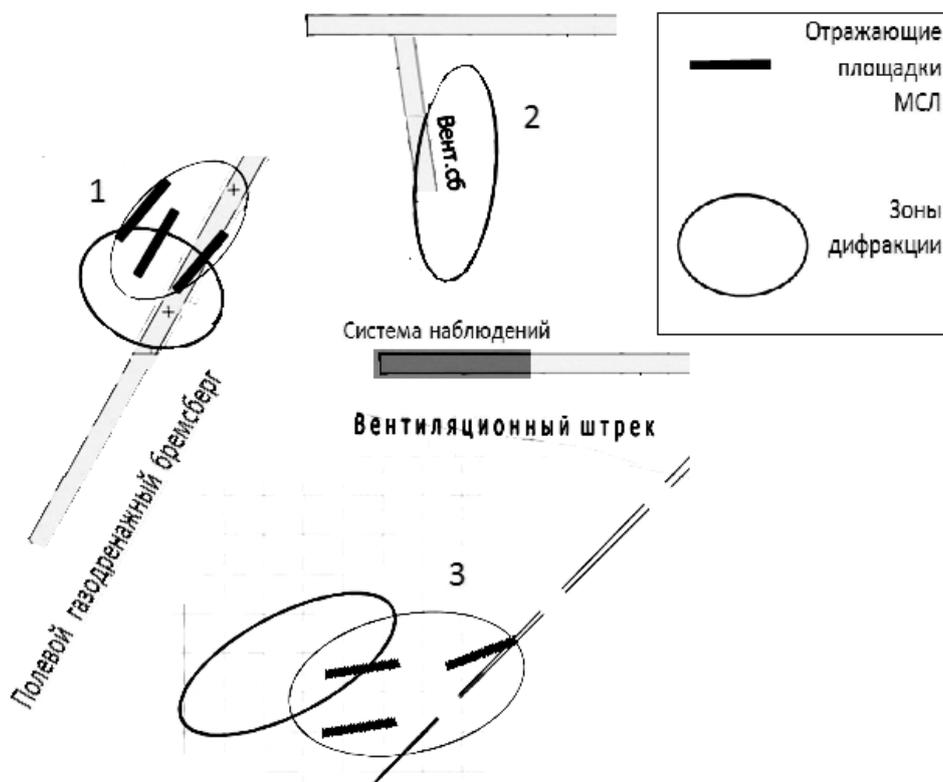


Рис. 6. Результаты сопоставления расположения аномальных зон, выделенных с использованием дифрагированных волн с результатами, полученными стандартным графом обработки МСЛ

Метод сейсмической локации при использовании стандартного графа обработки практически не позволяет распознать объект подобный сбойке (см. рис. 5, зона 2), ориентированной практически по направлению сейсмического луча. Сечение выработки мало по сравнению с длиной волны информативных волновых пакетов и не представляет собой существенную отражающую площадку. Поэтому зона 2 не могла быть выявлена стандартным МСЛ.

Особенность метода дифрагированных волн в том, что информативен и в случаях, когда сейсмические лучи пересекают аномалии по касательной. Случай зоны 2 – тому подтверждение. Аномалия выделяется очень четко. С другой стороны, прогноз расположения зон 1 и 3, вероятно, точнее при использовании стандартного подхода МСЛ. В связи с этим рекомендуется использовать обработку дифрагированных волн параллельно в дополнение к стандартным подходам.

Выводы

К настоящему времени рассмотренная методика успешно использована на ряде объектов по выявлению тектонических нарушений, в том числе потенциально опасных по выбросу газа. Обработывались сейсмические данные, полученные в ходе натурных наблюдений, проведенных на шахтах Донбасса. В частности, полученные на участке 7 откаточного штрека по пласту k_5 ш. Горняк на участке лавы 1086 по пласту c_{10}^B , ш. Днепровская. Кроме этого, методика была использована при обработке результатов экспериментальных работ различными методами на пластах D_6 и D_{1-2} на шахте «Шахтинская», D_6 шахты «Казахстанская», K_{10} на шахте им. Т. Кузембаева и на других объектах Карагандинского угольного бассейна (Казахстан).

Методика доказала свою информативность. Имеется существенный задел в плане ее дальнейшего совершенствования. Методика может быть использована геофизическими службами и специализированными геологоразведочными организациями, оснащенными сейсмостанциями в шахтном исполнении и соответствующим оборудованием для проведения работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тиркель М.Г., Анциферов В.А., Глухов А.А. Изучение газоносности угленосных формаций. – Донецк: Вебер, 2008. – 301 с.
2. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. – Донецк: Алан, 2003. – 312 с.
3. Lu J., Meng X., Wang Y., Yang Z. Prediction of Coal Seam Details and Mining Safety Using Multicomponent Seismic Data: A case History from China // *Geophysics*. – 2016. – V.81, № 5. – P. 149-165. – DOI: 10.1191/geo2016-0009.1.
4. Hongliang W., Maochen G. Seismic wave propagation in coal seams: finite element modeling and field tests // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2014. – V. 5, № 3. – P. 229-244. – DOI: 10.1504/IJMME.2014.064482.
5. Jiwen Teng, Songying Li, Mingkui Jia, Jie Lian, Honglei Liu, Guodong Liu, Wei Wang, Schape Volker, Lei Feng, Xiaoshuai Yao, Kang Wang, Yafen Yan, Wanpeng Zhang. Research and Application of In-seam Seismic Survey Technology for Disaster causing Potential Geology Anomalous Body in Coal Seam // *Acta Geologica Sinica*. – 20120. – V. 94, № 1. – P. 10-26. – DOI: 10.1111/1755-6724.14372.
6. Cai W., Dou L., Cao A., Gong S., Li Z. Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: A case study of Yima mining area, Henan, China // *Journal of Applied Geophysics*. – 2014. – V. 109. – P. 140-149. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.07.021.
7. Stewart A. Greenhalgh, Iain M. Mason, Cvetan Sinadinovski. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure // *Geophysics*. – 2016. – V. 65, № 6. – P. 1908-1919. – DOI: 10.1190/1.1444875.
8. Соколов С.В., Салтымаков Е.А., Кормин А.Н. Комплексные геофизические исследования состояния угленосного массива в условиях Кузбасса // *Вестн. Кузбасского гос. технич. ун-та*. – 2017. – № 2. – С. 66-71.
9. 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 // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2010. – № 3. – С. 177-182.
10. Захаров В.Н., Аверин А.П., Вартанов С.А. Анализ алгоритмов лучевой томографии для прогноза нарушенности выемочного столба // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2010. – № 3. – С. 183-190.
11. Аверин А.П., Белоусов Ф.С. Результаты сейсмического профилирования на выемочном участке угольной шахты // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы III конф. Междунар. науч. школы акад. К.Н. Трубецкого*. – М., 2018. – С. 151-154.
12. Захаров В.Н., Аверин А.П. Геофизическая оценка геодинамического состояния призабойного массива горных пород при подземных горных работах // *Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XXVI Междунар. науч. шк. им. акад. С.А. Христиановича / Крымский фед. ун-т [и др.]*. – Симферополь, 2016. – С. 90-94.
13. Глухов А.А. Алгоритм метода дифрагированных волн по прогнозу дизъюнктивов угольных пластов // *Журнал теоретической и прикладной механики*. – 2021. – №1. – С. 73-82.