ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11):87-98
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.834:622.12 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_87

О МОДЕЛИРОВАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОГНОЗУ ЗОНЫ РАЗУПЛОТНЕНИЯ ПОРОД НАД ОТРАБОТАННЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

А.А. Глухов[1], А.В. Анциферов[1], Ф.М. Голубев[1]

[1] Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), Донецк, Россия, e-mail: glukhov1964@yandex.ru

Аннотация: Представлен пример использования математического моделирования для анализа возможности детектирования зон разуплотнения над выработанным пространством. Разработана физико-геологическая модель зон разуплотнения над отработанным участком шахтного поля. Проведено математическое моделирование волновых полей в условиях, соответствующих методике проведения сейсмических экспериментов по схеме общей глубинной точки. Выполнена оценка эффективности использования метода отраженных волн и метода дифрагированных волн для обнаружения зон разуплотнения. Рассмотрены признаки, свидетельствующие о наличии данных зон на сейсмических разрезах, полученных при использовании метода общей глубинной точки, а также на сейсмических изображениях, полученных методом дифрагированных волн для случаев горизонтального и наклонного залегания слоев горных пород. Результаты математического моделирования иллюстрируют возможность детектирования зон разуплотнения над отработанным пространством. Зоны разуплотнения могут быть выделены на сейсмических разрезах общей глубинной точки по признаку наличия зоны дифракции и отражающих границ. На сейсмических изображениях, полученных по методу дифрагированных волн, такие зоны могут проявляться в виде областей синфазности, которые образуются при суммировании рассеянных волн.

Ключевые слова: деформации горного массива, зона разуплотнения, математическая модель, наземная сейсморазведка, отраженные волны, дифрагированные волны, метод общей глубинной точки, метод дифрагированных волн.

Благодарность: Исследования проводились в ФГБНУ «РАНИМИ» в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124061700022-3).

Для цитирования: *Глухов А. А., Анциферов А. В., Голубев Ф. М.* О моделировании сейсмических экспериментов по прогнозу зоны разуплотнения пород над отработанным пространством // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 87–98. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_87.

Modeling seismic experiments for weakness zone prediction in rock mass above mined-out voids

A.A. Glukhov[1], A.V. Antsiferov[1], P.M. Golubev[1]

[1] Republican Academic Scientific, Research and Design Institute for Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Donetsk, Russia, e-mail: glukhov1964@yandex.ru

Abstract: The article exemplifies the use of mathematical modeling for the detection of weakness zones above mined-out spaces in rock mass. A physical–geological model of weakness zones above a mined-out void is developed. The mathematical modeling of wave fields is carried out in the conditions conformable with the seismic experiments using the common depth point stack. Efficiency of the methods of reflected waves and diffracted waves in the weakness zone detection is evaluated. The signs of the weakness zones in the seismic profiles obtained using the common depth point stack and in the seismic images obtained using the method of diffracted waves for the cases of horizontal and inclined bedding of rocks are examined. The mathematical modeling results prove possibility of detection of weakness zones above mined-out areas. The weakness zones are identified in the seismic profiles obtained using the common depth point by the sign of a diffraction effect and reflecting boundary. Regarding the seismic images obtained using the method of diffraction waves, the weakness zones show up as the in-phase effects of combination of scattered waves.

Key words: rock mass deformations, weakness zone, mathematical model, land seismology, reflected waves, diffracted waves, common depth point method, diffracted wave method.

Acknowledgements: The study was carried out at RANIMI in the framework of the state contract, state registration no. 124061700022-3.

For citation: Glukhov A. A., Antsiferov A. V., Golubev P. M. Modeling seismic experiments for weakness zone prediction in rock mass above mined-out voids. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11):87-98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_87.

Введение

Проведение горных работ по добыче угля под землей ведет к оседанию и деформациям земной поверхности. Значительная часть населенных пунктов подвергалась многократной подработке, что отрицательно влияет на расположенные на поверхности объекты социальной и промышленной сферы. Это влечет за собой повреждение зданий и сооружений, вплоть до их полного разрушения.

Действующие методы прогнозирования деформаций земной поверхности не принимают во внимание специфику геологического строения угольного массива, уже подвергавшегося подработке. При этом имеется большой объем данных, полученных в результате маркшейдерских измерений, которые показывают расхождения между реальными деформациями и расчетными значениями, полученными по стандартным методикам. Это может приводить к непредсказуемым последствиям для инфраструктуры.

Для оценки воздействия многократной подработки на изменение физических характеристик горного массива требуется установить особенности изменения его параметров как в естественном напряженно-деформированном состоянии, так и после проведения первичной подработки. Реализация подобных исследований осуществима с использованием геофизических методов. Из геофизических методов сейсмический отличается высокой надежностью прогноза строения углепородных массивов [1]. Его наземные и шахтные разновидности нашли широкое применение в Российской Федерации [2—5], Китае [6—9], Германии и других странах [10—13]. В практическом смысле наибольшее распространение получил метод отраженных волн (МОВ). В РАНИМИ в качестве дополнительного инструмента

сейсморазведки предложены основы метода дифрагированных волн (МДВ) [14].

Правильная интерпретация данных полевых сейсмических исследований требует теоретического обоснования, которое возможно получить при помощи математического моделирования. В данной статье представлен пример использования математического моделирования для анализа возможности определения границ зон разуплотнения над выработанным пространством. Выполнена оценка эффективности использования метода отраженных волн и метода дифрагированных волн для обнаружения данных зон.

Постановка задачи и описание метода ее решения

Стоит отметить, что при математическом моделировании крайне важно обеспечить удовлетворительные критерии подобия между граничными условиями в моделях и горно-геологическими условиями на планируемом участке исследований, поэтому важно закладывать в основу сейсмической математической модели фактическую физико-геологическую модель для конкретного участка исследований [15]. Как показывает опыт работ [16 — 21], при выборе участка исследований для корректной интерпретации их результатов важно учитывать его физико-геологические особенности, а также необходимо соблюдение ряда требований к исследуемой горной выработке:

- отсутствие влияния на выработку вышележащих или нижележащих горных работ;
- глубина залегания выработки не должна превышать 600 м;
- наличие предварительной геологической информации по изучаемому участку;
- отсутствие тектонических нарушений, пересекающих массив от поверхности до выработки;
- выработка должна разрабатывать участок поверхности, свободный от застройки.

Анализ горнотехнических условий угледобычи Донецко-Макеевского угленосного района позволил определить горный отвод шахты им. Кирова в качестве перспективной площадки для исследований, а именно участок земной поверхности, находящийся в зоне влия-

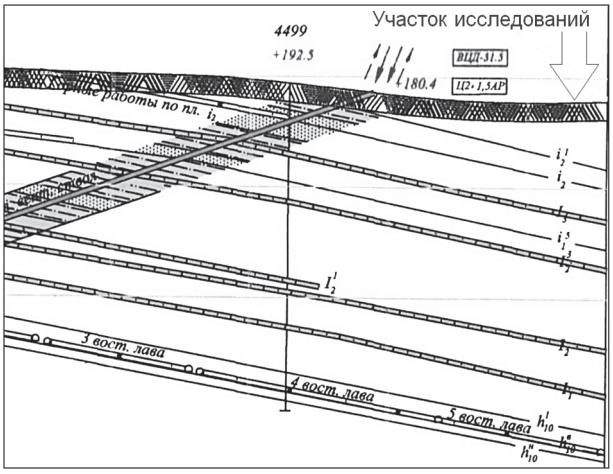

Рис. 1. Разрез с плана горных работ шахты им. Кирова
Fig. 1. Cross section from the stoping layout of the Kirov coal mine

ния 5-й, 6-й и 7-й восточных лав пласта h10в. Согласно схеме вскрытия, представленной на рис. 1, данный участок не подвергался разработке по другим пластам. Глубина ведения горных работ на выбранном участке варьируется от 324 до 430 м. Угол наклона пласта составляет 9°, вынимаемая мощность — 1,2 — 1,25 м.

Для стратификации и построения физико-геологической модели участка в качестве представительного разреза используется разрез скважины МС-183. В разрезе выделены три типа пачек: песчаниковая, аргиллитовая и смешанная. В песчаниковой пачке содержание слоев песчаника составляет более 50%. В аргиллитовой пачке содержится более 50% слоев аргиллитов. В пачке смешанного состава содержание песчаников, алевролитов или аргиллитов не достигает 50%. Из-за незначительного содержания (1 — 2%) известняки и угли в выделении пачек участия не принимают.

Выделенные в результате анализа пачки имеют следующий литологический состав и мощность:

• аргиллитовая пачка — глубина 0 — 42 м, мощность 42 м, процентное содержание горных пород пачки: 1% песчаник, 6% алевролит, 93% аргиллит;

• песчаниковая пачка — глубина 42 — 73 м, мощность 31 м, процентное соотношение состава: 68% песчаник, 9% алевролит, 23% аргиллит.

• аргиллитовая пачка — глубина 73 — 130 м, мощность 57 м, процентное соотношение состава: 6% песчаник, 10% алевролит, 83% аргиллит.

• смешанная пачка — глубина 130 — 161 м, мощность 31 м, процентное соотношение состава: 48% песчаник, 31% алевролит, 21% аргиллит.

• песчаниковая пачка — глубина 161 — 243 м, мощность 82 м, процентное соотношение состава: 54% песчаник, 14% алевролит, 32% аргиллит.

• аргиллитовая пачка — глубина 243 — 296 м, мощность 54 м, процентное соотношение состава: 15% песчаник, 27% алевролит, 58% аргиллит.

• песчаниковая пачка — глубина 296 — 437 м, мощность 141 м, процентное соотношение состава: 65% песчаник, 27% алевролит, 8% аргиллит.

Угольный пласт мощностью 1,1 м расположен в песчаниковой пачке, на глубине 424,2 — 425,3 м.

Для выделенных пачек были определены следующие характерные скорости распространения упругих волн сжатия: песчаниковая пачка — 4800 м/с, смешанная — 4600 м/с и аргиллитовая — 3940 м/с. Значения скоростей волн сдвига приняты равными 60% от значений скоростей волн сжатия.

Модели углепородного массива представляют собой наборы породных слоев (рис. 2), расположенных в соответствии с вышеописанной геологией объекта.

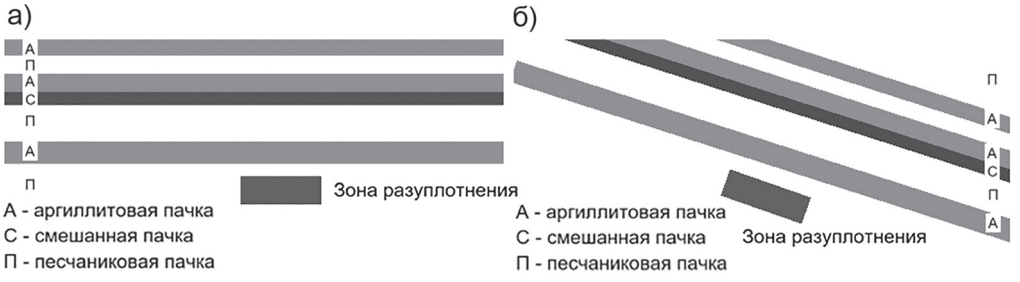

Рис. 2. Схемы моделирования углепородного массива: при горизонтальном залегании пород (а); с учетом угла падения (б)

Fig. 2. Coal rock mass modeling schemes: in case of flat rock bedding (a); taking into account the slope angle (b)

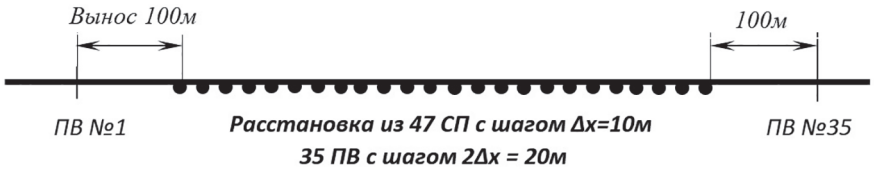

Рис. 3. Используемый профиль с центральной системой наблюдений
Fig. 3. The applied system with central observation detector arrangement

Моделируется горизонтальное залегание породных слоев, а также залегание под углом, соответствующим реальной ситуации. Базовые модели не содержат зоны разуплотнения над отработанным пластом. Они необходимы для сравнения результатов. Моделируемые зоны разуплотнения имеют размер 200 м протяженностью и 70 м по нормали к плоскости напластования. Нижняя граница (при наклонном расположении — ее центр) расположена на глубине 425 м.

Для анализа волнового поля моделировалась центральная система наблюдений со стационарной расстановкой сейсмоприемников (СП). Выбор данной системы обусловлен ее универсальностью. Данная схема заключается в том, что расстановка сейсмоприемников размещается с регулярным шагом на профиле напротив исследуемого участка. Возбуждение сейсмических колебаний производится последовательно с тем же (либо кратным) шагом таким образом, чтобы можно было при обработке использовать технологию общей глубинной точки (ОГТ). Выносы пунктов возбуждения (ПВ) выполняются по обе стороны от системы СП таким образом, чтобы обеспечить необходимую кратность наблюдений на всем исследуемом участке. Протяженность моделируемого профиля составляет 660 м. Система наблюдений симметрична (рис. 3). По центру профиля располагаются 47 СП с шагом Δx = 10 м. Максимальные выносы ПВ по обе стороны расстановки СП составляют 100 м. Шаг перемещения ПВ равен 20 м.

При анализе волнового поля используется разработанное в РАНИМИ программное обеспечение моделирования сейсмических волновых полей. В соответствии с тем, как при проведении реальных экспериментов пункт возбуждения переносится по профилю наблюдений, выполняется серия расчетов для последовательных положений ПВ в модели. Для каждого расчета формируется 47-канальная сейсмограмма в соответствии с расположением СП.

На следующем этапе для каждой из моделей набор из 35 сейсмограмм загружается в разработанный в РАНИМИ программный комплекс обработки данных сейсмических наблюдений, где выполняется обработка по методу общей глубинной точки (ОГТ) и методу дифрагированных волн (МДВ) [14]. Обработка выполняется так, как если бы данные были получены в реальных условиях. Формируется соответствующий прогноз, который затем сравнивается с моделью.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлены последовательные картины распространения сейсмических волн (SH-поляризации) через равные промежутки времени. Для иллюстрации выбраны волны данной поляризации ввиду относительной простоты картины. ПВ расположен по центру расстановки СП.

На первых фрагментах (0,1 с) представлен начальный этап, когда волны распространяются сферическими фрон-

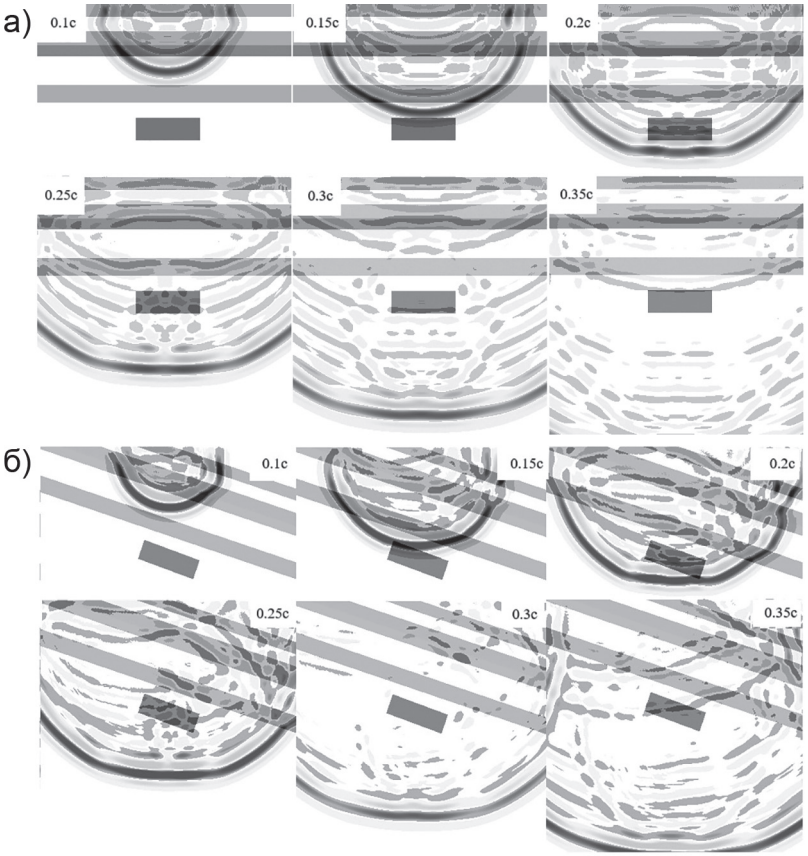

Рис. 4. Последовательные картины распространения сейсмических волн (SH-поляризации) через равные промежутки времени: при горизонтальном залегании пород (а); с учетом угла падения (б)
Fig. 4. Sequential pictures of seismic wave propagation (SH polarization) by equal time intervals: in case of flat rock bedding (a); taking into account the slope angle (b)

тами. Характерны изменения наклонов фронтов при преодолении границ раздела сред. Также можно наблюдать формирование отраженных волн верхними слоями пород. Вторые фрагменты (0,15 с) характеризуется тем, что сейсмическая волна достигла зоны разуплотнения. В породных слоях наблюдается система интерференционных волн. На последующих фрагментах в зоне разуплотнения формируется рассеянная волна.

В результате замедления в зоне разуплотнения характерно изменился фронт волны, проходящей через аномалию (0,2 с; 0,25 с). Интерес представляет то, что фронт рассеянных волн в плоскости модели имеет форму, близкую к окружности. Такие волны распространяются как вглубь пород, так и к поверхности (0,3 с; 0,35 с).

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что при распространении P/SV-волн на каждой границе раздела сред происходят трансформации колебаний P→SV, SV→P, что приводит к усложнению волновой картины. Но в целом принцип генерации рассеянных волн тот же, поэтому для краткости изложения результаты моделирования P/SV-волн в данной статье не приводятся.

Несмотря на то, что распределение скоростей пород в модели априори из-

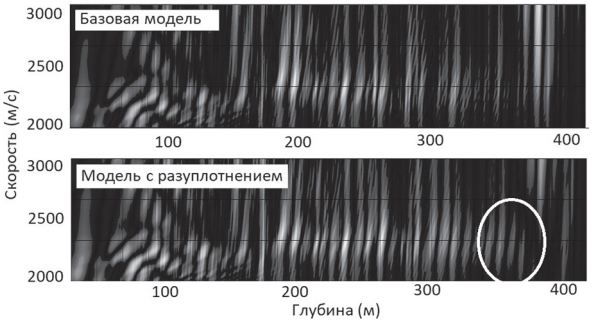

Рис. 5. Вертикальные спектры скоростей для моделей с горизонтальным залеганием пород
Fig. 5. Vertical velocity spectra for flat rock bedding models

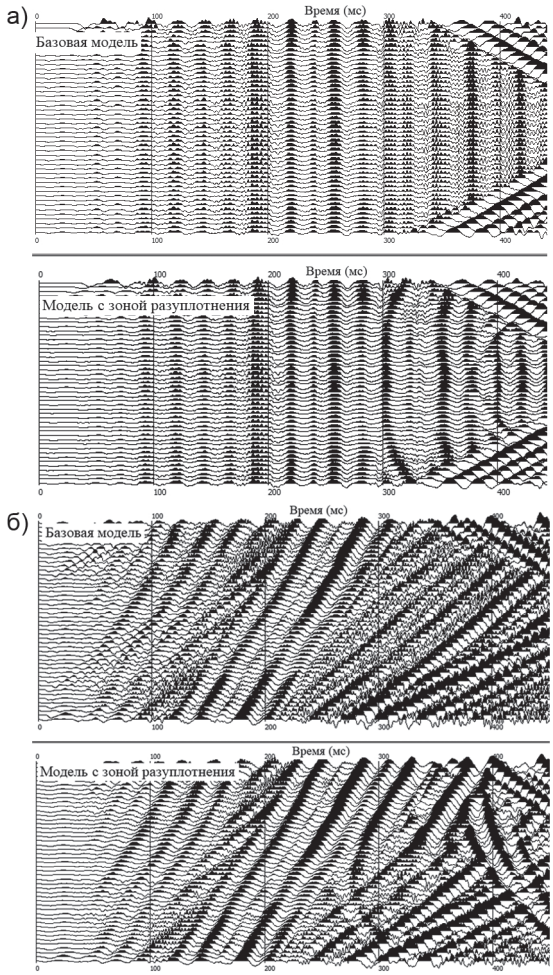

Рис. 6. Временные сейсмические разрезы ОГТ для моделей: при горизонтальном залегании пород (а); с учетом угла падения (б)
Fig. 6. CDP time seismic cross sections for models: in case of flat rock bedding (a); taking into account the slope angle (b)

вестно, для модели горизонтального залегания пород был выполнен расчет распределения скоростей распространения сейсмических волн по глубине. Соответствующие вертикальные спектры скоростей представлены на рис. 5. Видно, что наличие зоны разуплотнения приводит к изменению расположения характерных локальных максимумов на соответствующих глубинах.

На рис. 6 представлены разрезы ОГТ для моделей с горизонтальным залеганием пород и с учетом угла падения. При построении разрезов использовалось усредненное значение скорости распространения SH-волн, равное 2600 м/с. На разрезах отображаются основные отражающие границы. При горизонтальном залегании центральный участок зоны разуплотнения ввиду его значительной протяженности формирует отраженную волну. Ее первое вступление наблюдается приблизительно на 270 мс. Кроме этого, края зоны формируют классические дифрагированные волны, которые проявляются на сейсмических разрезах в виде участков гипербол. В случае наклонного залегания формируется классическая дифрагированная волна с вершиной гиперболы (значение времени 250 мс) по верхнему краю зоны разуплотнения. Результат моделирования подтверждает классические представления о том, как зона разуплотнения должна проявляться на разрезах ОГТ. Для пояснения следует отметить, что на разрезах видны и волны-помехи, отраженные от границ расчетной решетки (угловые об-

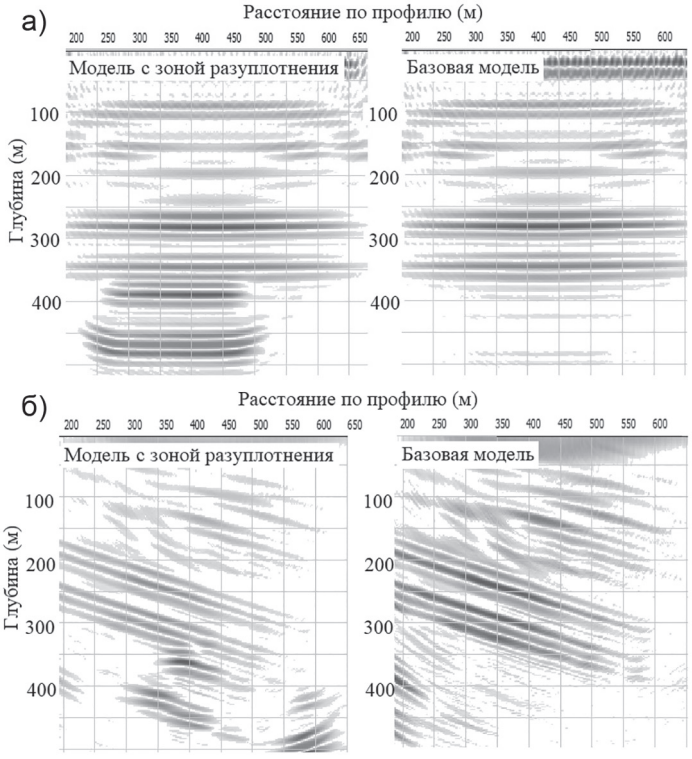

Рис. 7. Сейсмические изображения, полученные методом дифрагированных волн для моделей: при горизонтальном залегании пород (а); с учетом угла падения (б)

Fig. 7. Seismic images obtained by the diffracted wave method for models: in case of flat rock bedding (a); taking into account the slope angle (b)

ласти в правой части разрезов), поскольку она имеет конечные размеры. Размеры модели выбраны такими, что наличие подобных волн-помех на итоговых разрезах не мешает анализу общей картины.

На рис. 7 показаны сейсмические изображения, рассчитанные на основе использования метода дифрагированных волн с использованием усредненного значения скорости распространения SH-волн 2600 м/с. Сейсмические изображения наглядно иллюстрируют общий характер залегания породных слоев. Наличие зоны разуплотнения проявляется при пологом залегании пород как локальная зона формирования отраженных волн. В случае наклонного залегания проявляется ярко выраженная зона дифракции — как локализованная зона синфазных колебаний.

Этот результат согласуется с полученным ранее в работе [22], где представлены результаты моделирования сейсмических наблюдений зон разуплотнений различной конфигурации. В данной работе было показано, что зоны аномалии могут проявляться на сейсмических изображениях МДВ в виде областей синфазности, которые образуются при суммировании рассеянных волн.

Следует отметить, что приведенные результаты математического моделирования говорят о том, что упомянутые сейсмические методы позволят выделить зоны разуплотнения указанных размеров. Однако для определения конкретной природы таковых требуется геологическая интерпретация, основанная как на априорных представлениях о размещении тектонических нарушений, так и на данных о расположении зон, где произведена выемка угля.

В качестве реального примера выделения сейсмическим методом зоны разуплотнения над выработанным пространством можно привести результаты

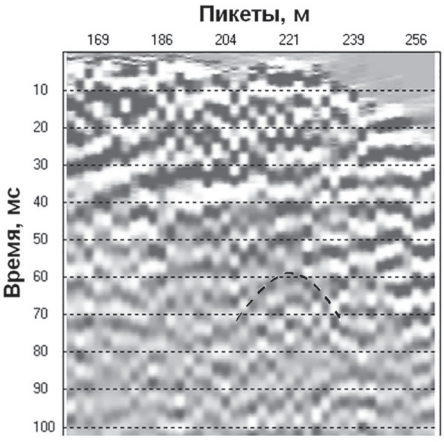

Рис. 8. Временной разрез ОГТ на участке вблизи с. Мариновка (ДНР) с выделенной гиперболой дифрагированной волны

Fig. 8. CDP time cross section at a site near the village of Marinovka (DPR) with the diffracted wave hyperbola outlined in bold

поиска специалистами РАНИМИ заброшенных выработок вблизи с. Мариновка (ДНР). Для иллюстрации на рис. 8 приведен пример временно́го разреза, на котором показано местоположение вызванной выработкой зоны разуплотнения. Она, как и на модельных разрезах, проявляется в виде гиперболы дифрагированной волны, вершина которой располагается в районе пикетов 204—239 на глубине порядка 75 м.

Выводы

Таким образом, результаты математического моделирования иллюстрируют возможность детектирования зон разуплотнения над отработанным пространством. Зоны разуплотнения могут быть выделены на сейсмических разрезах ОГТ по признаку наличия зоны дифракции и отражающих границ. На сейсмических изображениях, полученных по методу дифрагированных волн, такие зоны могут проявляться в виде областей синфазности, которые образуются при суммировании рассеянных волн. Безусловно, для подтверждения

природы зоны разуплотнения необходима геологическая интерпретация.

Полученные результаты моделирования являются базовыми для правильной интерпретации полевых исследований, которые позволят зафиксировать изменение свойств горного массива при первичной подработке земной поверхности горной выработкой по одному пласту, что может являться исходными данными для дальнейшего уточнения параметров сдвижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dresen L.* Seismic coal exploration, Part B, Seismics: Handbook of geophysical exploration. Pergamon, 1994, 486 p.

2. *Захаров В. Н.*, *Аверин А. П.*, *Вартанов С. А.* Анализ алгоритмов лучевой томографии для прогноза нарушенности выемочного столба // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 3. — С. 183—190.

3. *Соколов С. В.*, *Салтымаков Е. А.*, *Кормин А. Н.* Комплексные геофизические исследования состояния углепородного массива в условиях Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 2. — С. 66—70.

4. *Писаренко М. В.*, *Тайлаков О. В.*, *Соколов С. В.*, *Колмакова А. А.* О прогнозировании малоамплитудной нарушенности угольных пластов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2022. — № 2. — С. 356—366. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-356-366.

5. *Тайлаков О. В.*, *Уткаев Е. А.*, *Соколов С. В.*, *Салтымаков Е. А.*, *Макеев М. П.* Контроль устойчивости дегазационных скважин и процесса гидроразрыва угольного пласта в геофизических наблюдениях // Уголь. — 2024. — № S11(1187). — С. 152—156. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-152-156.

6. *Lu Jun, Meng Xinghun, Wang Yun, Yang Zhen* Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China // Geophysics. 2016, vol. 81, pp. 149—165. DOI: 10.1190/geo2016-0009.1.

7. *Hongliang W., 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. DOI: 10.1504/IJMME.2014.064482.

8. *Teng Jiwen, Li Songying, Jia Mingkui, Lian Jie, Liu Honglei, Liu Guodong, Wang Wei, Schape Volker, Feng Lei, Yao Xiaoshuai, Wang Kang, Yan Yafen, Zhang Wanpeng* Research and application of in-seam seismic survey technology for disaster causing potential geology anomalous body in coal seam // Acta Geologica Sinica. 2019, vol. 94, no. 2, pp. 199—211. DOI: 10.1111/1755-6724.14372.

9. *Cai Wu, Dou Linming, Cao Anye, Gong Siyuan* Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: A case study of Yima mining area, Henan, China // Journal of Applied Geophysics. 2014, vol. 109, pp. 140—149.

10. *Шепе Ф.* Исследование геологического строения пластов каменного угля сейсмическим методом с помощью аппаратуры SUMMIT II EX // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 10. — С. 145—154.

11. *Schott W., Waclawik W.* On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys // Canadian Geotechnical Journal. 2015, vol. 52, pp. 1—9. DOI: 10.1139/cgj-2014-0466.

12. *Waclawik P., Schott W.* Utilization of innovation of the ISS method — in seam seismics at the CSM Mine // Gornicze zagrozenia naturalne. 2011, vol. 2, pp. 517—524.

13. *Greenhalgh S. A.*, *Masonz I. M.*, *Sinadinovski C.* In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure // Geophysics. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 1908—1919. DOI: 10.1190/1.1444875.

14. *Глухов А. А.* Алгоритм метода дифрагированных волн по прогнозу дизъюнктивов угольных пластов // Журнал теоретической и прикладной механики. — 2021. — № 1 (74). — С. 73—82.

15. *Минаев В. А.*, *Фаддеев А. О.*, *Абрамова А. В.*, *Павлова С. А.* Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. — 2013. — № 5. — С. 58—63.

16. *Кашников Ю. А.*, *Шустов Д. В.*, *Якимов С. Ю.* Учет геомеханического состояния трещинно-порового коллектора при гидродинамическом моделировании // Записки Горного института. — 2025. — Т. 271. — С. 42—52.

17. *Пригара А. М.*, *Жуков А. А.*, *Царев Р. И.*, *Кашников Ю. А.* Решение задач эксплуатационной разведки и повышение безопасности горных работ с помощью шахтной сейсморазведки способом ПВРО // Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 23—27. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.02.

18. *Рыскин М. И.* Физико-геологическое моделирование как основа геологической интерпретации комплекса геофизических данных // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. — 2014. — Т. 14. — № 1. — С. 87—96. DOI: 10.18500/1819-7663-2014-14-1-87-96.

19. *Байбакова Т. В.* Комплексная интерпретация данных малоглубинной сейсморазведки в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 1. — С. 113—119.

20. *Барях А. А.*, *Санфиров И. А.*, *Дьяконов М. В.*, *Лобанов С. Ю.*, *Никифорова А. И.* Информационное обеспечение геомеханических расчетов устойчивости подработанного породного массива со сложным тектоническим строением // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — № 1. — С. ES1005. DOI: 10.2205/2024ES000894.

21. *Никифорова А. И.* Результаты сейсмостратиграфической интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки // Горное эхо. — 2023. — № 2(91). — С. 55—59. DOI: 10.7242/echo.2023.2.10.

22. *Глухов А. А.* Анализ информативности методов сейсморазведки для прогноза расположения зон вероятного скопления метана // Труды РАНИМИ. — 2023. — № 23 (38). — С. 9—20. ГИАБ

REFERENCES

1. Dresen L. *Seismic coal exploration, Part B, Seismics: Handbook of geophysical exploration*. Pergamon, 1994, 486 p.

2. Zakharov V. N., Averin A. P., Vartanov S. A. Analysis of ray tomography algorithms to predict disturbance of the extraction pillar. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 3, pp. 183—190. [In Russ].

3. Sokolov S. V., Saltymakov E. A., Kormin A. N. Integrated geophysical research of coal measures conditions in the Kuznetsk Basin. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017, no. 2, pp. 66—70. [In Russ].

4. Pisarenko M. V., Tajlakov O. V., Sokolov S. V., Kolmakova A. A. On predicting low-amplitude disturbance of coal seams. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2022, no. 2, pp. 356—366. [In Russ].DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-356-366.

5. Tajlakov O. V., Utkaev E. A., Sokolov S. V., Saltymakov E. A., Makeev M. P. Stability control of degassing wells and the process of hydraulic fracturing of the coal seam in geophysical observations. *Ugol'*. 2024, no. S11(1187), pp. 152—156. [In Russ].DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-152-156.

6. Lu Jun, Meng Xinghun, Wang Yun, Yang Zhen Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China. *Geophysics*. 2016, vol. 81, pp. 149—165. DOI: 10.1190/geo2016-0009.1.

7. Hongliang W., 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. DOI: 10.1504/IJMME.2014.064482.

8. Teng Jiwen, Li Songying, Jia Mingkui, Lian Jie, Liu Honglei, Liu Guodong, Wang Wei, Schape Volker, Feng Lei, Yao Xiaoshuai, Wang Kang, Yan Yafen, Zhang Wanpeng Research and application of in-seam seismic survey technology for disaster causing potential geology anomalous body in coal seam. *Acta Geologica Sinica*. 2019, vol. 94, no. 2, pp. 199—211. DOI: 10.1111/1755-6724.14372.

9. Cai Wu, Dou Linming, Cao Anye, Gong Siyuan Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: A case study of Yima mining area, Henan, China. *Journal of Applied Geophysics*. 2014, vol. 109, pp. 140—149.

10. Shepe F. Seismic approach to studying geological structure of coal measures aided by the SUMMIT II EX system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 10, pp. 145—154. [In Russ].

11. Schott W., Waclawik W. On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys. *Canadian Geotechnical Journal*. 2015, vol. 52, pp. 1—9. DOI: 10.1139/cgj-2014-0466.

12. Waclawik P., Schott W. Utilization of innovation of the ISS method — in seam seismics at the CSM Mine. *Gornicze zagrozenia naturalne*. 2011, vol. 2, pp. 517—524.

13. Greenhalgh S. A., Masonz I. M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*. 2016, vol. 65, no. 6, pp. 1908—1919. DOI: 10.1190/1.1444875.

14. Glukhov A. A. Algorithm of the diffracted wave method for predicting disjunctivities of coal seams. *Zhurnal teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki*. 2021, no. 1 (74), pp. 73—82.[In Russ].
15. Minaev V. A., Faddeev A. O., Abramova A.V., Pavlova S. A. Mathematical modeling of seismic risks. *Spetstekhnika i svyaz'*. 2013, no. 5, pp. 58—63. [In Russ].
16. Kashnikov Yu. A., Shustov D. V., Yakimov S. Yu. Accounting of the geomechanical state of a fractured-pore reservoir in hydrodynamic modeling. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 271, pp. 42—52. [In Russ].
17. Prigara A. M., Zhukov A. A., Tsarev R. I., Kashnikov Yu. A. Solving the problems of operational exploration and improving the safety of mining operations using mine seismic exploration by the PVRO method. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 4, pp. 23—27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.02.
18. Ryskin M. I. Physico-geological modeling as a basis for the geological interpretation of a complex of geophysical data. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2014, vol. 14, no. 1, pp. 87—96. [In Russ]. DOI: 10.18500/1819-7663-2014-14-1-87-96.
19. Baibakova T. V. Complex interpretation of shallow-depth seismic data in difficult mining and geological conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2014, no. 1, pp. 113—119. [In Russ].
20. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Dyakonov M. V. Lobanov S. Yu., Nikiforova A. I. Information support for geomechanical calculations of the stability of a depleted rock mass with a complex tectonic structure. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024, vol. 24, no. 1, pp. ES1005. DOI: 10.2205/2024ES000894.
21. Nikiforova A. I. Results of seismostratigraphic interpretation of shallow-depth seismic survey data. *Gornoe ekho*. 2023, no. 2(91), pp. 55—59. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2023.2.10.
22. Glukhov A. A. Analysis of seismic exploration methods informativity for predicting the location of areas of probable methane accumulation. *Transactions of RANIMI*. 2023, no. 23 (38), pp. 9—20. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глухов Александр Александрович[1] — д-р техн. наук,
старший научный сотрудник, зам. директора по научной работе,
e-mail: glukhov1964@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-9816-5628,
Анциферов Андрей Вадимович[1] — д-р техн. наук, профессор,
научный руководитель, e-mail: antsyferov_av@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0008-0684-6513,
Голубев Филипп Максимович[1] — канд. техн. наук,
зав. отделом геодинамических и геофизических процессов,
e-mail: alaby007@mail.ru, ORCID ID: 0009-0008-5093-4916,
[1] Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ)
Для контактов: Глухов А.А., e-mail: glukhov1964@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Glukhov[1], Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Deputy Director for Scientific Work, e-mail: glukhov1964@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9816-5628,
A.V. Antsiferov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Scientific Director, e-mail: antsyferov_av@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0008-0684-6513,
P.M. Golubev[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Department
for Geodynamic and Geophysical Processes,
e-mail: alaby007@mail.ru, ORCID ID: 0009-0008-5093-4916,
[1] Republican Academic Scientific, Research and Design Institute for Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), 283086, Donetsk, Russia.
Corresponding author: A.A. Glukhov, e-mail: glukhov1964@yandex.ru.

Получена редакцией 03.07.2025; получена после рецензии 31.07.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 03.07.2025; received after the review 31.07.2025; accepted for printing 10.10.2025.