

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ШАХТНОЙ ГЕОФИЗИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ

А.В. Садчиков¹, Н.М. Замалиев¹, Д.Р. Ахматнуров¹, Р.А. Мусин¹, Н.Ю. Ганюков¹

¹ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Караганда, Казахстан, e-mail: nailzamaliev@mail.ru

Аннотация: Карагандинский угольный бассейн характеризуется сложным строением. Наличие зон геологической нарушенности, таких как тектонические нарушения, размывы, изменчивая гипсометрия пласта и др., затрудняет проведение подземных горных работ. В настоящее время в мировой практике шахтная геофизика широко применяется с целью изучения геологического строения и решения различных горнотехнических задач. В Карагандинском бассейне в конце XX в. стали применяться методы шахтной геофизики. К таким методам относятся шахтная сейсморазведка и электроразведка. Первоначально сейсморазведочные работы выполнялись методом отраженных волн по методике общей глубинной точки. Однако по-прежнему актуальной остается проблема получения объективного изображения геологической среды, связанная с особенностями возбуждения упругих волн в шахтных условиях (особенности генерируемого волнового поля, закономерности его распространения, направленность источника). Разработан и применен метод шахтной сейсморазведки, основанный на регистрации каналовых и граничных волн, позволяющий получить детальную геолого-геофизическую модель участка месторождения. За счет обработки обоих типов волн достигается повышение разрешающей способности метода с получением информации как об угольном пласте, так и о вмещающих породах, а также о состоянии кровли пласта. Приведена методика измерений в шахтных условиях, показаны результаты опробования методики выполнения полевых работ в условиях шахт, получены сейсмические и диэлектрические характеристики с высокой контрастностью и четкой прослеживаемостью нарушенных зон.

Ключевые слова: Карагандинский угольный бассейн, тектонические нарушения, шахтная сейсморазведка, направленность источника, поперечные волны, каналовые и граничные волны, шахтная электроразведка, электроды.

Благодарность: Исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования для реализации научной и научно-технической программы IRN №BR24993009.

Для цитирования: Садчиков А. В., Замалиев Н. М., Ахматнуров Д. Р., Мусин Р. А., Ганюков Н. Ю. Применение методов шахтной геофизики для решения задач горно-геологического направления // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 6. – С. 109–124. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_109.

Application of mine geophysics method to solving problems of geology

A.V. Sadchikov¹, N.M. Zamaliyev¹, D.R. Akhmatnurov¹, R.A. Mussin¹, N.Yu. Ganyukov¹

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Kazakhstan e-mail: nailzamaliev@mail.ru

Abstract: The Karaganda Coal Basin has a complex structure. Geological damage zones, such as faults, washouts, variable hypsometry of seams, etc., impede underground mining operations. At the present time, mine geophysics is widely applied in the world for studying geological structure and solving various geotechnical problems. In the late 20th century, mine geophysics methods came into use in the Karaganda Basin. Such methods include mine seismology and electric exploration. Initially, seismic exploration used the common-depth-point reflection method. However, it yet remains highly relevant to obtain an objective pattern of the geological environment. This problem is connected with the features of excitation of elastic waves in mines (specifics of generated wave field, its propagation patterns, source directivity). The developed and trialed methods of underground seismic exploration involved recording of channel-wave and interface-wave signals, and allowed building a detailed geological-and-geophysical model of certain areas of a mineral deposit. Processing of both types of the waves enhances resolvability of the method, and provides information on coal, host rocks and coal roof. The underground measurement procedure is described, its full-scale trial results are reported, and the seismic and dielectric characteristics are obtained at a high contrast ratio and distinct traceability of damage zones.

Key words: Karaganda Coal Basin, faults, underground seismic exploration, source directivity, S-waves, channel-wave and interface-wave signals, underground electric exploration, electrodes.

Acknowledgements: The study was supported by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan in the framework of the target science and technology support program IRN No. R24993009.

For citation: Sadchikov A. V., Zamaliyev N. M., Akhmatnurov D. R., Mussin R. A., Ganyukov N. Yu. Application of mine geophysics method to solving problems of geology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(6):109-124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_109.

Введение

В современной шахтной геофизике ключевую роль играет использование передовых технологий, таких как геофизические симуляции и трехмерное моделирование, которые позволяют более точно воссоздавать геологическую структуру угольных пластов. Представленные методы способствуют лучшему пониманию распределения угольных залежей и снижают риск возможных геологических несогласий в ходе эксплуатации месторождений.

Кроме того, современные методы шахтной геофизики активно внедряют принципы мультидисциплинарного подхода, включая интеграцию данных из различных источников, таких как гравиметрия, магнитометрия и геохимические анализы.

Это обогащает информацию о составе угольных пластов, что, в свою очередь, улучшает возможности предсказания геологических структур и обеспечивает более надежные основы для разработки стратегий добычи [1].

Методы исследования

Метод сейсмотомографии успешно применяется как с поверхности, так и в шахтных условиях [2–4]. На рис. 1 приведена схема прохождения и регистрации отраженной и просвеченной волн. Из рисунка видно, что сейсмическая волна, проходя через нарушенные зоны, отражается от них (отраженные волны) и проходит сквозь них (прямые волны).

При методе отраженных волн сигнал исходит из пункта возбуждения 2 (ПВ 2) и фиксируется на поверхности в пунктах приема 2 и 3 (ПП 2 и ПП 3). Однако при недостаточной точности данных о скорости волны определение местоположения и границ нарушенного участка может содержать погрешности.

В методе сейсмического просвечивания сигнал генерируется в пункте возбуждения 1 (ПВ 1) и регистрируется в пункте приема 1 (ПП 1). Анализируя расстояние и время прохождения сигнала, можно вычислить скорость распространения волны. Данный метод позволяет получить более точную информацию о расположении нарушенной зоны и ее характеристиках, таких как размеры, амплитуда смещения угольного пласта [5–7].

На сегодняшний день шахтная сейсморазведка широко применяется с целью изучения геологического строения и решения горнотехнических задач и

выполняется с использованием как продольных (P), так и поперечных (S) волн [7–9].

Сейсмическая томография является ключевым инструментом прогнозирования структуры горного массива при сейсмическом просвечивании в шахтной сейсморазведке. Основой метода является анализ критериев, указывающих на наличие геологических структур и аномалий, включая изменения скорости сейсмических волн и отражения от границ пород [4, 10, 11].

Сейсмическая томография обеспечивает детальное изучение массива за счет анализа вариаций скорости распространения сейсмических волн в разных направлениях. Томографические изображения позволяют выявлять геологические неоднородности в зоне исследования [12, 13].

В ходе применения метода сейсмической томографии в шахтных условиях с использованием сейсмического просвечивания регистрация данных о волновом поле позволяет выделить неоднородности и изменения внутри горного массива. Эти данные затем подвергаются анализу с использованием томографических методов, что позволяет получить более полное представление о распределении свойств среды в трехмерном пространстве.

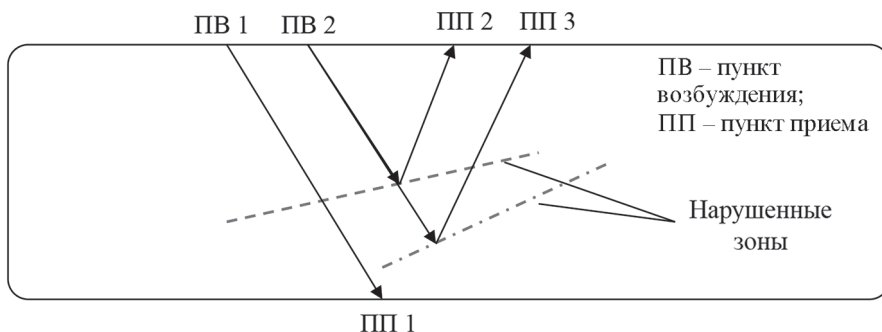


Рис. 1. Схема прохождения отраженных и прямых волн

Fig. 1. Diagram of reflected and direct wave propagation

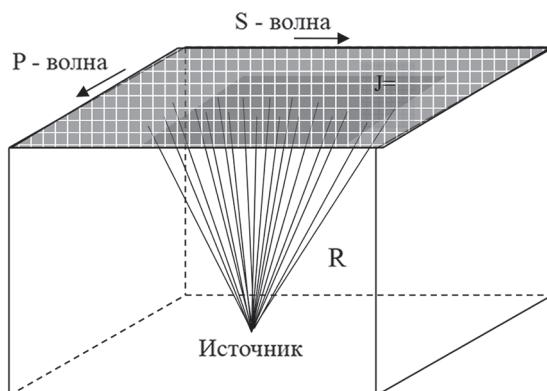


Рис. 2. Основы метода сейсмотомографии
Fig. 2. Fundamentals of the seismotomography method

Применение сейсмической томографии в шахтной сейсморазведке совместно с методом сейсмического просвечивания представляет собой важный этап в современных геофизических исследованиях. На исследуемом участке, разделенном на зоны J (рис. 2), осуществляется отбор совокупности сейсмических трасс, лучи которых проникают через соответствующую зону J . Этот этап является ключевым для сбора данных о волновом поле, что позволяет выделить и анализировать сейсмические волны, проходящие через различные геологические структуры.

Кроме того, полученные данные сейсмической томографии предоставляют важную информацию для оценки структурного состава горных массивов. Это позволяет более эффективно планировать и вести горные работы, учитывая разнообразие геологических формаций и их физических свойств. Таким образом, сейсмическая томография играет существенную роль в обеспечении успешной и разработки горнодобывающих проектов.

Принципы применения амплитудной томографии существенно отличаются от принципов скоростной.

Одной из наиболее важных регистрируемых характеристик волновых пакето-

тов является скорость первых вступлений. Ее можно рассчитать по формуле среднего значения:

$$V_N = \frac{L}{t} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{\sum_{i=1}^N \frac{L_i}{V_i}}, \quad (1)$$

где L — общая длина сейсмического луча, м; L_i — длина луча, м; V_i — скорость распространения волны исследуемого типа в зоне J , м/с; t — время движения волны, с; N — количество измерений; V_N — скорость распространения сейсмических волн, м/с.

Амплитуда волновых пакетов зависит от целого ряда параметров [1–3].

Во-первых, это естественное расхождение фронта колебаний при удалении от источника. Степень расхождения фронта волны зависит в первую очередь от ее природы.

В шахтной сейсморазведке широко используются интерференционные граничные и каналовые (нормальные) волны, образованные в результате каналирования колебательной энергии пластами полезных ископаемых (например, уголь, горючие сланцы). Они имеют иные законы убывания.

В дальней зоне изменение потенциала каналовых волн описывается законом

$$A = \frac{1}{\sqrt{r}}, \quad (2)$$

где A — амплитуда волны, м; r — радиус, м; a — потенциала граничных волн [1, 2, 3, 5]:

$$A = \frac{1}{\sqrt{r^2}}, \quad (3)$$

где A — амплитуда волны, м; r — радиус, м.

Во-вторых, это изменение амплитуды за счет поглощения средой колебательной энергии, которое описывается законом

$$A = \exp(-\beta r), \quad (4)$$

где A — амплитуда акустической волны, м; β — коэффициент затухания, м^{-1} ; r — расстояние от источника, м; $\exp(-\beta r)$ — показатель экспоненциального затухания.

Коэффициент затухания β также зависит от типа волн (каналовые, граничные и т.д.), их поляризации и частоты. Указанные зависимости достаточно хорошо изучены как теоретически, так и на практике [14, 15].

Учитывание характеристик направленности источников и приемников сейсмических колебаний представляет собой важную априорную информацию. Также важным фактором являются условия контакта источников колебаний и сейсмоприемников со средой, что часто требует сложного усреднения по многократным возбуждениям сигнала.

Дополнительно следует принимать во внимание рассеяние колебательной энергии на неоднородностях толщ горных пород. Этот аспект представляет собой сложную задачу, так как приходится учитывать как известные априори неоднородности, так и неизвестные объекты исследования. Такие факторы в совокупности влияют на точность и интерпретацию сейсмических данных в шахтной сейсморазведке [11].

С учетом вышеизложенного и анализа зависимостей (2) — (4) можно сде-

лать выводы относительно амплитуды и, следовательно, энергетической составляющей каналовой и граничной волн. Из этих зависимостей следует, что амплитуда каналовой волны выше по сравнению с граничной волной, что, в свою очередь, указывает на более высокую информативность данных при регистрации каналовых волн.

При обработке результатов, учитывающих энергетическую составляющую (амплитуду сигнала), необходимо также иметь в виду потерю энергии при прохождении сейсмической волной расстояния. Иными словами, для более точных результатов следует вводить соответствующие поправки, учитывающие длину пути, пройденного сейсмической волной. Это важное соображение при анализе и интерпретации данных шахтной сейсморазведки, направленной на получение более достоверной информации о геологической структуре и свойствах подземных образований.

Сейсмотомография представляет собой метод исследования внутренней структуры горных пород с использованием сейсмических волн. Она позволяет получать информацию о скоростях распространения волн в различных участках массива, что важно для выявления потенциальных нарушений и изменений в геологической структуре [4, 12, 13].

В процессе исследований с применением сейсмотомографии были выявлены зоны с аномальными значениями скоростей сейсмических волн, что может указывать на присутствие геологических нарушений. Эти данные позволяют более точно прогнозировать характеристики угольных пластов и обеспечивают важную информацию для планирования и проведения горных работ.

Кроме того, разработка и внедрение новых методов обработки сейсмических данных, учет особенностей энергетической составляющей сигнала и коррек-

Шахта имени Т. Кузембаева

лава 15В-К₁₄-3

Конвейерный штрек 14В-К₁₄-3

ПК – пикеты
СП – сейсмоприемники

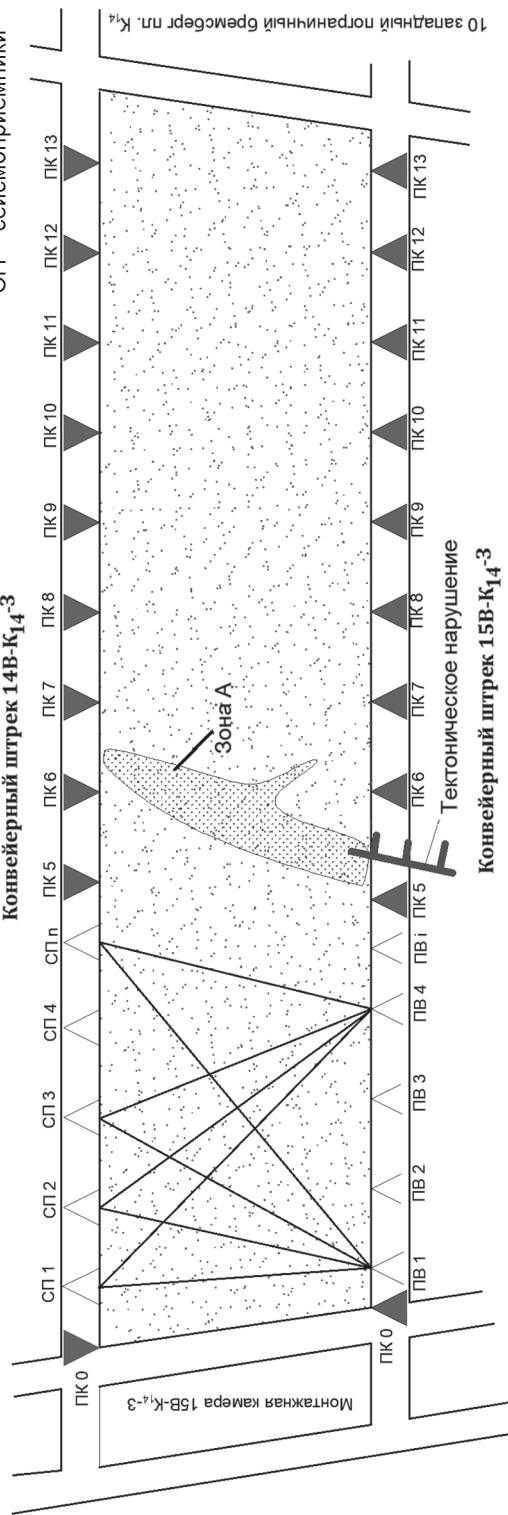


Рис. 3. Схема измерений и результат исследований геофизических работ в лаве 15В-К₁₄-3
Fig. 3. Measurement scheme and research results of geophysical surveys in longwall 15V-K₁₄-3

ция потери энергии при прохождении волны через горный массив значительно повышают эффективность сейсмотомографии и делают этот метод более точным и информативным.

Таким образом, использование современных методов геофизических исследований, таких как сейсмотомография, в Карагандинском угольном бассейне не только расширяет наши знания о геологической структуре, но и повышает эффективность горных работ, минимизируя риски и обеспечивая устойчивость в процессе добычи угля.

На рис. 3 показаны схема и результат измерений сейсмических волн в лаве 15В-К₁₄-3 на шахте им Т. Кузембаева. Измерения производились в конвейерном штреке 14В-К₁₄-3, а пункты возбуждения сейсмических колебаний находились в конвейерном штреке 15В-К₁₄-3. Расстояние между сейсмоприемниками, а также между пунктами возбуждения составляло 5 м.

Производилась регистрация как граничных, так и каналовых волн, с использованием шахтной сейсмостанции «Дружба». Обработка данных методом сейсмической томографии позволила выделить зону А (см. рис. 3), характеризующуюся пониженными значениями скорости сейсмических волн. Это свидетельствует о наличии тектонического нарушения, которое было подсечено в конвейерном штреке 15В-К₁₄-3 и подтверждено после отработки лавы. Данный метод не только выявляет распределение скоростей сейсмических волн, но и позволяет определить участки с измененными геологическими характеристиками.

Метод, основанный на изучении удельной электропроводности, называется методом сопротивлений. Существуют различные группы методов, включая изучение электромагнитных полей естественных и искусственных источников,

в том числе основанные на частотных характеристиках импульсных полей. Эти методы обеспечивают более детальную информацию о геологической структуре угольных месторождений, включая пространственное распределение удельной электропроводности [14, 15].

Проведение электроразведки в угольных шахтах, входящей в комплекс геофизических методов, оправдывает себя, предоставляя эффективный и недорогой инструмент, который не требует специального простоя горных работ. Изучение тектонических нарушений на угольных месторождениях находит важное применение в сейсморазведке и электроразведке, при этом последняя может быть более оперативной. Анализ многочисленных научных работ свидетельствует о том, что геофизические исследования в угольных шахтах успешны и экономически эффективны, а методы сейсморазведки и электроразведки являются наиболее информативными при изучении тектонических нарушений на угольных месторождениях [16 – 18].

Характеристики зон геологических нарушений имеют следующие особенности:

а) увеличение амплитуды смещения приводит к увеличению трещин, при этом наблюдается уменьшение степени преобразования. Это указывает на связь между амплитудой и механическими изменениями в породах в зонах нарушений;

б) наличие разрывов в физических свойствах контактирующих литологических различий в зонах геологического нарушения, таких как надвиг, обусловлено разуплотнением пород в лежачем крыле и их слабым уплотнением, особенно в зонах срыва висячего крыла. При увеличении амплитуды геологического нарушения величина физических свойств также возрастает, что может служить индикатором степени нарушения;

в) присутствует симметричное разуплотнение пород на обоих крыльях геологического нарушения. При увеличении амплитуды наблюдается прямо пропорциональное усиление изменений физических свойств. Это указывает на то, что воздействие на породы в зонах нарушений происходит с обеих сторон;

г) вещественно-петрографический состав угольных пластов и пород в зонах геологического нарушения остается неизменным. Это может свидетельствовать о сохранении химического состава пород при наличии только механических изменений. Для выявления и трассирования малоамплитудных нарушений угольных пластов в пределах выемочного столба применяется следующий комплекс методов шахтной электроразведки:

- трехэлектродное электропросвечивание;
- перпендикулярно-дипольное электропросвечивание;
- параллельно-дипольное электропросвечивание;
- синхронное трехэлектродное электропросвечивание;
- синхронное перпендикулярно-дипольное электропросвечивание;
- симметричное перпендикулярно-дипольное электропросвечивание.

В Карагандинском угольном бассейне шахтные работы проводились с се-

редины 80-х годов прошлого столетия. Опыт выполнения этих работ подчеркнул эффективность применения метода параллельно-дипольного электропросвечивания. Суть метода заключается в измерении электрического сигнала по стенкам горной выработки, созданного питающими электродами, расположенными параллельно в другой выработке.

Для осуществления электроразведочных исследований использовалась специальная низкочастотная электроразведочная аппаратура ШЭРС-4 в искробезопасном исполнении. Комплект аппаратуры включает в себя измерительный блок, источник тока (генератор), прижимные электроды типа ЭП-1 (рис. 4), а также набор питающих и приемных линий.

Этот метод предоставляет возможность детально исследовать электрические свойства горных пород и определять потенциальные аномалии в различных выработках. Применение низкочастотной электроразведки в шахтной геофизике позволяет получать важные данные о строении подземных образований с высокой точностью и эффективностью.

Электрод состоит из металлического корпуса 1 (см. рис. 4, а, б) в виде чаши, внутрь которого вставлен пористый материал 2, для улучшения контакта смоченный раствором медного купороса. С обратной стороны электрода (рис. 4, б)

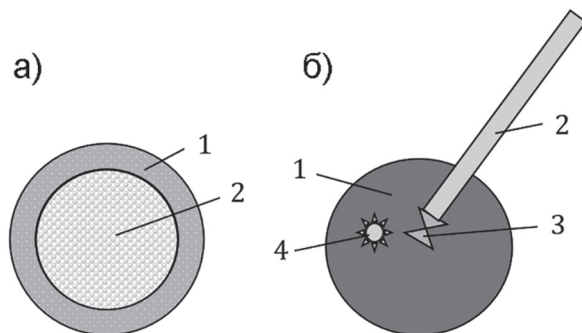


Рис. 4. Устройство электрода

Fig. 4. Electrode device



Рис. 5. Схема выделения аномальных зон
 Fig. 5. Scheme of anomalous zone identification

к корпусу 1 с помощью шарнира 3 прикреплена ручка 2 и имеется контакт 4 для крепления проводов к корпусу электрода.

Проведению геоэлектрических исследований предшествует подготовительный период, в течение которого осуществляется сбор информации по намеченному объекту исследований, необходимой для подготовки к проведению исследований и для последующей интерпретации их результатов.

Информация должна включать: задание на проведение исследований; описание горно-геологической ситуации, содержащее структурную колонку с указанием пород кровли и почвы пласта, а также горнотехнической ситуации, включая сведения о наличии отработанных пространств по периметру участка, условия доступа к угольному пласту и др.

Объем исследований выбранным комплексом методов определяется, исходя из двух этапов исследований: поискового и детализационного. Поисковый этап включает постановку поискового метода в обеих выработках. Объем исследований на детализационном этапе определяется путем суммирования объемов, необходимых для изучения аномальных зон, установленных поисковым методом. Схема типового выделения аномальных зон (X) поисковыми методами показана на рис. 5.

Для изучения одиночной аномальной зоны, расположенной вдали от сопря-

женной горной выработки — разрезной печи, лавы и др. (см. рис. 5), минимальный объем исследований любым из методов должен включать шесть профилей наблюдения, по три в каждой выработке, с расположением источника питающего диполя в области перекрытия его аномальной зоны, а также в выработке по обеим сторонам от аномальной зоны.

Расстояние между питающим электродом и вскрытым нарушением не должно быть менее 20–30 м для всех методов детальной разведки, так как в этом случае могут возникнуть ложные аномалии, не связанные с объектом исследования.

Точность результатов электропросвещения оценивается по контрольным ($\Delta U_{\text{конт}}$) и основным ($\Delta U_{\text{осн}}$) измерениям.

Величина относительной погрешности определяется по формуле

$$m_i = \frac{[\Delta U_{\text{осн}} - \Delta U_{\text{конт}}]}{\Delta U_{\text{конт}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $\Delta U_{\text{осн}}$ — изменение разницы потенциалов, мВ; $\Delta U_{\text{конт}}$ — изменение разницы потенциалов на контрольных точках, мВ.

Средняя относительная ошибка вычисляется по следующей формуле:

$$m_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i, \% \quad (6)$$

где n — число измерений; i — точка измерения.

Величина средней относительной ошибки не должна превышать 15%.

В шахтной крепи вдоль выработки прodelываются технологические отверстия, через которые электрод контактирует со стенками угольного пласта; происходит процесс измерения.

Обработка материалов исследований, полученных методами электропрофилеирования, производится по формуле

$$\rho_k = k \frac{\Delta U}{I}, \quad (7)$$

где ρ_k — кажущееся электрическое сопротивление, Ом·м; k — геометрический коэффициент установки, м; ΔU — разность потенциалов в приемной линии, мВ; I — сила тока в питающей линии, мА.

Геометрический коэффициент установки определяется по формуле

$$k = \frac{2\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}, \quad (8)$$

где AM , AN , MN — расстояние между соответствующими электродами, м.

На шахте им. Т. Кузембаева в Карагандинском угольном бассейне по пласту К, производились электроразведочные работы по указанной выше методике на предмет трассирования геологического нарушения, подсеченного выработкой 1 (рис. 6).

Из результатов исследований, проведенных дипольным электропрофилеированием, видно, что на графике (см. рис. 6) можно выделить зону А с повышенными значениями разности потенциала. Эта зона могла быть связана со «слепой» частью геологического нарушения, подсеченного горной выработкой 1.

В дальнейшем после отработки данного участка угольного столба было установлено, что зона А действительно связана с концевой частью нарушения.

Результаты

Результаты проведенного исследования показали, что метод сейсмотомографии позволяет эффективно выявлять зоны геологических нарушений в угольных шахтах. В ходе обработки данных,

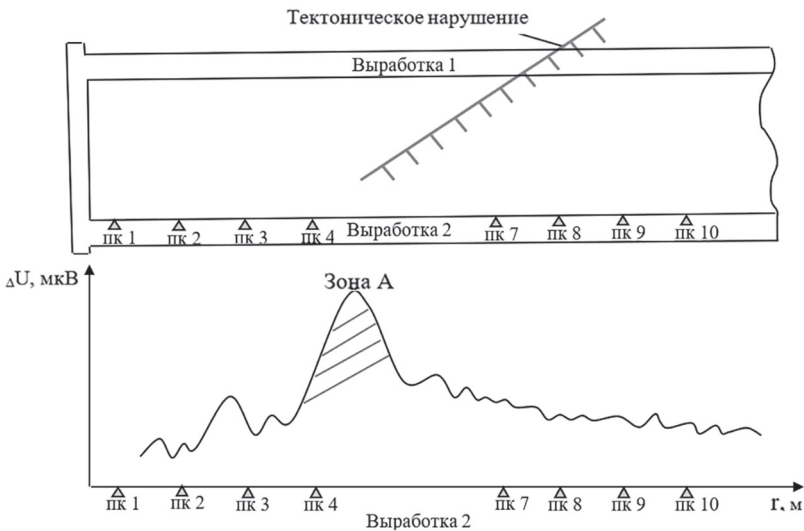


Рис. 6. Результаты измерений

Fig. 6. Measurement results

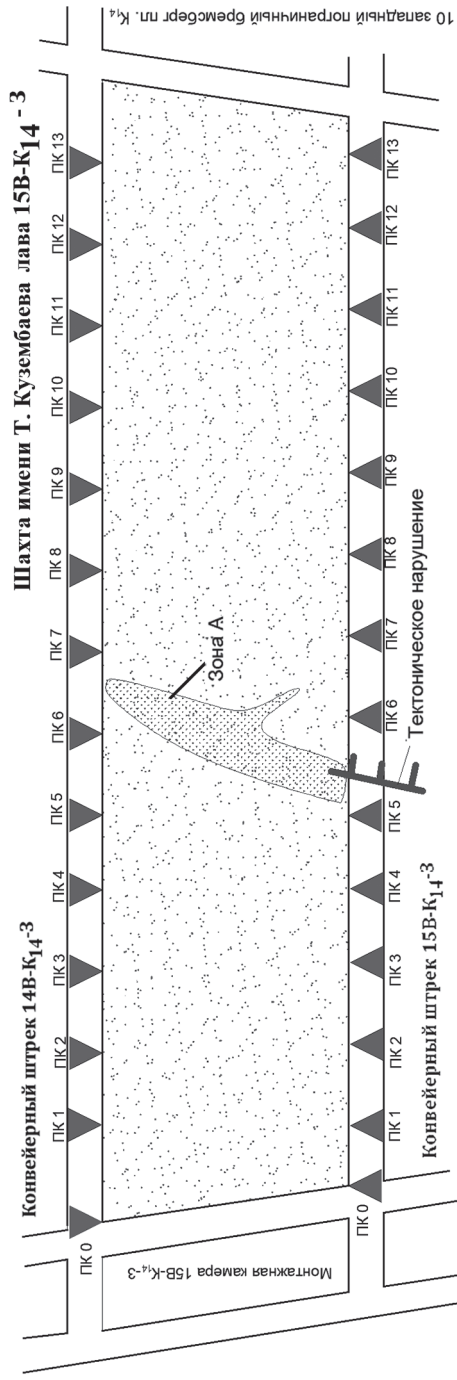


Рис. 7. Результаты измерений волнового поля каналовых волн
 Fig. 7. Measurement results of the wave field of channel waves

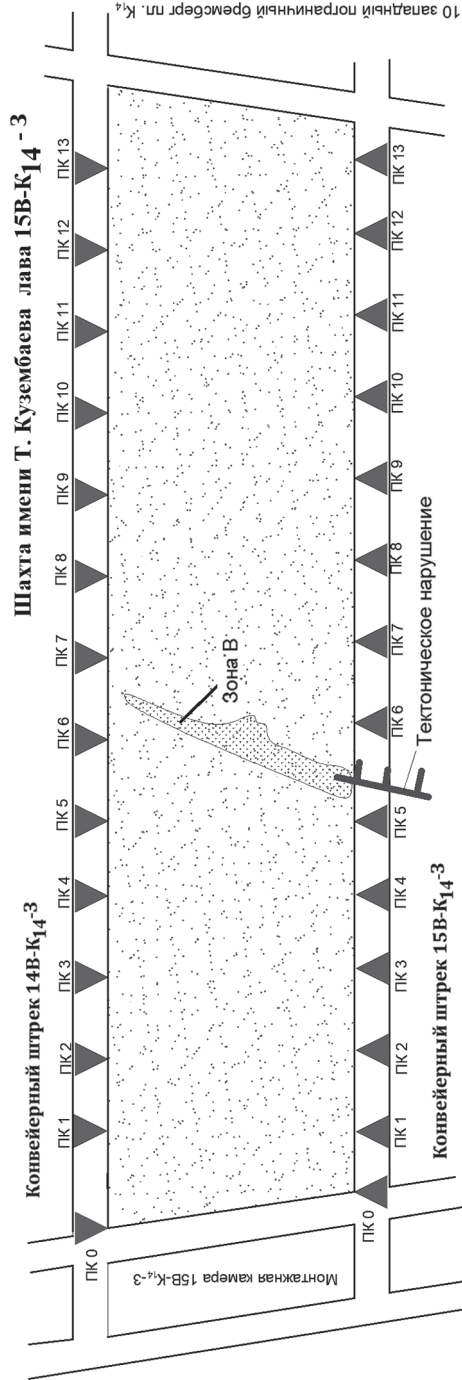


Рис. 8. Результаты измерений волнового поля граничных волн
 Fig. 8. Measurement results of the wave field of boundary waves

полученных при применении метода сейсмического просвечивания, были выявлены аномальные зоны с пониженными скоростями сейсмических волн, что указывает на наличие тектонических нарушений.

Проведя анализ волновой картины каналовых и граничных волн (рис. 7, 8), можно сделать заключение о мощности тектонического нарушения, связанного с зоной А.

Авторами был проведен анализ результатов измерений граничных и каналовых волн. Исходя из сравнения результатов, представленных на рис. 7 и 8, можно сделать вывод, что тектоническое нарушение, выявленное в угольном пласте, — зона А — распространяется во вмещающие породы, о чем свидетельствует зона В.

Анализ томографических изображений подтвердил соответствие выявленных зон фактическим геологическим разломам, что впоследствии было подтверждено при отработке лавы. В частности, в шахте им. Т. Кузембаева в лаве 15В-К₁₄-З было выявлено тектоническое нарушение, которое было подтверждено после проведения горных работ.

Опыт использования методов шахтной сейсморазведки и электроразведки в Карагандинском угольном бассейне доказал их высокую эффективность при изучении тектонических нарушений. Метод параллельно-дипольного электропросвечивания продемонстрировал наибольшую точность при трассировании малоамплитудных нарушений. Использование электроразведочной аппаратуры ШЭРС-4 обеспечило детальное изучение электрических свойств угольных пластов и прилегающих пород, что позволило успешно выделить аномальные зоны. Таким образом, результаты исследования доказывают, что комплексное применение методов сейсмической томографии и электроразведки обеспе-

чивает более точное моделирование геологических структур и позволяет снизить риски при ведении горных работ.

Обсуждение результатов

Выявленная зона А указывает на участки с ослабленными физико-механическими свойствами горных пород, что подтверждается снижением скоростей сейсмических волн.

Подобные изменения обычно связаны с тектоническими нарушениями, зонами повышенной трещиноватости или разуплотнения массива. Полученные данные согласуются с геологоразведочными и горнотехническими наблюдениями, что подтверждает эффективность метода сейсмической томографии в прогнозировании зон ослабления.

При сравнении результатов измерений данных каналовых и граничных волн выявлено, что мощность нарушения в зоне А больше мощности пласта, что в дальнейшем было подтверждено горными работами.

Кроме того, анализ данных демонстрирует возможность раннего выявления потенциально опасных участков, что позволяет оперативно корректировать технологии ведения горных работ и повышать безопасность обычных операций. Методика также показывает перспективность интеграции сейсмических исследований с другими геофизическими методами для повышения точности прогноза состояния горного массива.

Заключение

Как указывалось выше, электроразведка уступает в детальности сейсморазведке, поэтому лучше применять эти методы в комплексе. Преимущество на поисковом этапе для обнаружения нарушенных участков лучше отдавать электроразведке, а на этапе детализационных работ можно также применить сейсморазведку. Это объясняется тем, что ско-

рость производства электроразведочных работ намного выше и они менее затратны. А для лав с большими размерами и сложным геологическим строением результаты сейсморазведочных работ будут дополняться электроразведочными работами. В заключение можно сделать вывод, что теоретические основы метода сейсмической томографии и регистрации просвеченных волн и практическая реализация этого метода и методики измерения доказывает преимущество данного метода перед методом отраженных

волн для определения точного местоположения и амплитуды геологического нарушения.

В создании статьи принимала участие Н.В. Боголюбова, которой авторы выражают признательность за ценный вклад в проведение исследований в области электроразведки. Ее профессиональные знания и участие способствовали углубленному анализу полученных данных и развитию методологии исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов Ф. С. Изучение состояния пород переходных зон в условиях их естественного залегания методами шахтной сейсморазведки при комбинированной разработке кимберлитовых трубок // Инженерная физика. — 2021. — С. 49–56. DOI: 10.25791/infizik.1.2021.1187.

2. Ярославцев А. Г., Клецов И. М. Особенности обработки данных шахтной сейсморазведки с целью разделения Р и S волн // Горное эхо. — 2020. — № 3. — С. 101–106. DOI: 10.7242/echo.2020.3.20.

3. Канарейкин Б. А., Сальников А. С., Напреев Д. В., Мосягин Е. В., Гошко Е. Ю. Первый опыт изучения складчатой структуры угольных пластов в Горловском антрацитовом бассейне методом сейсморазведки // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — № 2. — С. 99–107. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-99-107.

4. Новгородцева Л. А., Туманов В. В., Шаповалов О. Л., Бородин Д. С., Ялпута Е. А. Изучение предпосылок применения микросейсмических методов для выявления газонасыщенных структур в условиях шахтного поля ш. «Калиновская-Восточная» // Журнал теоретической и прикладной механики. — 2023. — № 4. — С. 89–105. DOI: 10.24412/0136-4545-2023-4-89-101.

5. Мельник В. В., Замятин А. Л. Оценка точности и информативности геофизических методов для решения задач картирования структурных неоднородностей в шахте // Проблемы недропользования. — 2024. — № 1. — С. 90–101. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.090.

6. Далатказин Т. Ш., Ведерников А. С., Григорьев Д. В., Замятин А. Л., Зуев П. И. Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива // Горная промышленность. — 2022. — № 1. — С. 105–110. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110.

7. Eiichi Arai State-of-the-art geophysics for metal exploration // Resource Geology. 2021, vol. 71, no. 4, pp. 470–491. DOI: 10.1111/rge.12271.

8. Анциферов А. В., Туманов В. В., Новгородцева Л. А., Анциферов В. А., Бородин Д. С. Возможности обнаружения трещиноватых газонасыщенных зон на шахтных полях с использованием микросейсм // Труды РАНМИИ. — 2023. — Т. 20-21. — С. 101–111.

9. Соловьев А. В. Количественные оценки скоростей тектонических процессов: методология и результаты / Современные проблемы наук о Земле. Тезисы Всероссийской научной конференции. — М., 2022. — С. 64–66.

10. Акматов Д. Ж. Методика численного моделирования полей напряжений в районе размещения угольных шахт // Горная промышленность. — 2023. — № 1. — С. 39–44.

11. Батугин А. С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках земной коры с предельно напряженным состоянием // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 22–27. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.04.

12. Новгородцева Л. А., Ялпута Е. А., Шалованов О. Л., Бородин Д. С. Предпосылки применения микросейсмических наблюдений для изучения опасных скоплений метана в прираз-

ломных зонах // Журнал теоретической и прикладной механики. — 2022. — № 4. — С. 86–95. DOI: 10.24412/0136-4545-2022-4-86-96.

13. Тарасов С. А. Уточнение скоростного разреза осадочной толщи методом Накамуры на новых сейсмических станциях ИДГ РАН // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2. — № 4. — С. 43–50.


14. Ali M. I., Dirawan G. D., Idkhan A. M., Hasim A. H. Identification of potential mineral in a mining area plan using geoelectrical investigation // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021, vol. 1, no. 4, pp. 433–441.

15. Chunlin Liu, Guoxun Li, Chuantao Yu Methods for the geophysical exploration and sustainable utilisation of coalbed methane resources in abandoned mines of Shanxi, China // Sustainability. 2024, vol. 16, no. 7, article 2677. DOI: 10.3390/su16072677.

16. Gong Yu-Fei, Zhu Chen-Yang, Zhu Guo-Wei Analysis of physical parameters of materials similar to coal and rock mass based on geophysical model construction of mines // Applied Geophysics. 2023, vol. 1, pp. 116–120. DOI: 10.1007/s11770-022-0957-z.

17. Садчиков А. В., Желаяева Н. В., Токушева Ж. Т., Пономарёва М. В. Применение методов сейсмотомографии для решения различных задач в горно-геологическом направлении // Вестник Киевского национального университета им. Тараса Шевченко. — 2021. — С. 50–54. DOI: 10.17721/1728-2713.92.07.

18. Yue Niu, Enyuan Wang, Zhonghui Li, Feng Gao, Zhizhen Zhang, Baolin Li, Xin Zhang Identification of zones dangerous for coal and gas emissions by inversion of electric potential in the process of developing deep coal seams // Mining Mechanics and Rock Mining. 2022, vol. 55, pp. 3439–3450. DOI: 10.1007/s00603-022-02804-z.

19. Hinojosa H. R., Kirmizakis P., Soupios P. Historic underground silver mine workings detection using 2D electrical resistivity imaging (Durango, Mexico) // MDPI Minerals. 2022, vol. 12, article 491. DOI: 10.3390/min12040491. 

REFERENCES

1. Belousov F. S. Study of the state of rocks of transition zones in conditions of their natural occurrence by methods of mine seismic exploration in the combined development of kimberlite pipes. *The engineering physics*. 2021, pp. 49–56. [In Russ]. DOI: 10.25791/infizik.1.2021.1187.

2. Yaroslavtsev A. G., Klestov I. M. Features of mine seismic data processing for the purpose of separating p and s waves. *Gornoe ekho*. 2020, no. 3, pp. 101–106. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2020.3.20.

3. Kanarekin B. A., Salnikov A. S., Napreev D. V., Mosyagin E. V., Goshko E. Y. The first experience of studying the folded structure of coal seams in the Gorlovka anthracite basin by seismic exploration. *Interexpo Geo-Siberia*. 2022, no. 2, pp. 99–107. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-99-107.

4. Novgorodtseva L. A., Tumanov V. V., Shalovanov O. L., Borodin D. S., Yalputa E. A. Studying the prerequisites for the use of microseismic methods to identify gas-bearing structures in the conditions of the mine field «Kalinovskaya-Vostochnaya». *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2023, no. 4, pp. 89–105. [In Russ]. DOI: 10.24412/0136-4545-2023-4-89-101.

5. Melnik V. V., Zamyatin A. L. Evaluation of the accuracy and informativeness of geophysical methods for solving problems of mapping structural heterogeneities in a mine. *Problems of Subsoil Use*. 2024, no. 1, pp. 90–101. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.090.

6. Dalatkazin T. Sh., Vedernikov A. S., Grigoriev D. V., Zamyatin A. L., Zuev P. I. The experience of using geophysical methods in the complex of geodynamic diagnostics of a mountain range. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 1, pp. 105–110. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110.

7. Eiichi Arai State-of-the-art geophysics for metal exploration. *Resource Geology*. 2021, vol. 71, no. 4, pp. 470–491. DOI: 10.1111/rge.12271.

8. Antsiferov A. V., Tumanov V. V., Novgorodtseva L. A., Antsiferov V. A., Borodin D. S. Possibilities of detecting fractured gas-saturated zones in mine fields using microseisms. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2023, vol. 20-21, pp. 101–111. [In Russ].

9. Solovyov A. V. Quantitative estimates of the rates of tectonic processes: methodology and results. *Sovremennye problemy nauk o Zemle. Tezisy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Modern problems of Earth sciences. Abstracts of the All-Russian Scientific Conference], Moscow, 2022, pp. 64–66. [In Russ].

10. Akmatov D. J. Methods of numerical modeling of stress fields in the area of coal mines. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 1, pp. 39–44. [In Russ].
11. Batugin A. S. General patterns of manifestation of strong mountain impacts and induced earthquakes in areas of the Earth's crust with an extremely stressed state. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 22–27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.04.
12. Novgorotseva L. A., Yalputa E. A., Shalovanov O. L., Borodin D. S. Prerequisites for the use of microseismic observations to study dangerous methane accumulations in fault zones. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2022, no. 4, pp. 86–95. [In Russ]. DOI: 10.24412/0136-4545-2022-4-86-96.
13. Tarasov S. A. Refinement of the high-speed section of sedimentary strata by the Nakamura method at new seismic stations of IDG RAS. *Russian Journal of Seismology*. 2020, vol. 2, no. 4, pp. 43–50. [In Russ].
14. Ali M. I., Dirawan G. D., Idkhan A. M., Hasim A. H. Identification of potential mineral in a mining area plan using geoelectrical investigation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021, vol. 1, no. 4, pp. 433–441.
15. Chunlin Liu, Guoxun Li, Chuantao Yu Methods for the geophysical exploration and sustainable utilisation of coalbed methane resources in abandoned mines of Shanxi, China. *Sustainability*. 2024, vol. 16, no. 7, article 2677. DOI: 10.3390/su16072677.
16. Gong Yu-Fei, Zhu Chen-Yang, Zhu Guo-Wei Analysis of physical parameters of materials similar to coal and rock mass based on geophysical model construction of mines. *Applied Geophysics*. 2023, vol. 1, pp. 116–120. DOI: 10.1007/s11770-022-0957-z.
17. Sadchikov A. V., Zhelaeva N. V., Tokusheva Zh. T., Ponomareva M. V. Application of seismotomography methods to solve various problems in the mining and geological field. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv*. 2021, pp. 50–54. [In Russ]. DOI: 10.17721/1728-2713.92.07.
18. Yue Niu, Enyuan Wang, Zhonghui Li, Feng Gao, Zhizhen Zhang, Baolin Li, Xin Zhang Identification of zones dangerous for coal and gas emissions by inversion of electric potential in the process of developing deep coal seams. *Mining Mechanics and Rock Mining*. 2022, vol. 55, pp. 3439–3450. DOI: 10.1007/s00603-022-02804-z.
19. Hinojosa H. R., Kirmizakis P., Soupios P. Historic underground silver mine workings detection using 2D electrical resistivity imaging (Durango, Mexico). *MDPI Minerals*. 2022, vol. 12, article 491. DOI: 10.3390/min12040491.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Садчиков Александр Викторович¹ — канд. техн. наук,
старший преподаватель, e-mail: a.sadchikov@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0002-6022-2073,

Замалиев Наиль Мансурович¹ — доктор PhD,
и.о. доцента, e-mail: nailzamaliev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0628-2654,

Ахматнуров Денис Рамильевич¹ — доктор PhD,
руководитель лаборатории,
e-mail: d.akhmatnurov@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-9485-3669,

Мусин Равиль Альтавович¹ — доктор PhD,
e-mail: R.A.Mussin@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1206-6889,

Ганюков Никита Юрьевич¹ — магистр,
научный сотрудник, e-mail: nikitagd99@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0008-9716-9473,

¹ Карагандинский технический университет
имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан.

Для контактов: Замалиев Н.М., e-mail: nailzamaliev@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.V. Sadchikov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Senior Lecturer, e-mail: a.sadchikov@kstu.kz,
ORCID ID: 0000-0002-6022-2073,
*N.M. Zamaliyev*¹, PhD, Acting Associate Professor,
e-mail: nailzamaliev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0628-2654,
*D.R. Akhmatnurov*¹, PhD, Head of Laboratory,
e-mail: d.akhmatnurov@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-9485-3669,
*R.A. Mussin*¹, PhD, e-mail: R.A.Mussin@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1206-6889,
*N.Yu. Ganyukov*¹, Master of Technical Sciences,
Researcher, e-mail: nikitagd99@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0008-9716-9473,

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
100027, Karaganda, Kazakhstan.

Corresponding author: N.M. Zamaliyev, e-mail: nailzamaliev@mail.ru.

Получена редакцией 13.11.2023; получена после рецензии 18.03.2025; принята к печати 10.05.2025.
Received by the editors 13.11.2023; received after the review 18.03.2025; accepted for printing 10.05.2025.

