

3. Степанов Ю.И., Кузнецов И.Л., Зубрикова Е.С., Тайницкий А.А. Теоретические и практические вопросы применения метода естественного поля на калийно-магниевого рудниках // Горное эхо. – 2023. – № 4 (93). – С. 72-79. – DOI: 10.7242/echo.2023.4.11.
4. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
5. Христенко Л.А. Результаты комплексной интерпретации данных электрометрических наблюдений // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 90-97. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.15.
6. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Интерпретация профильных электрометрических наблюдений, выполненных в пределах Верхнекамского месторождения солей / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы конф. / Ин-т геофизики УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2013. – С. 327-328. – (Седьмые науч. чтения памяти Ю.П. Булашевича).
7. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2024.1.12

## СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВПЕРЕДИ ЗАБОЯ

А.Г. Ярославцев<sup>1</sup>, И.Л. Кузнецов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН, г. Пермь  
<sup>2</sup> ПАО «Уралкалий», г. Березники

**Аннотация:** На специальном полигоне в пределах соляного рудника проведены работы по исследованию околозабойной зоны сейсмическими методами на предмет обнаружения в ней контрастных протяженных границ. По результатам полноволнового моделирования выбраны параметры возбуждения и обработки полученных сигналов. Результаты обработки волновых полей удовлетворительно соотносятся с существующей геометрией шахтного поля. Выделенные волновые формы соответствуют известным границам выработок впереди забоя и в стороне от его направления. Показано применение процедуры поворота оси просвечивания на заданный угол и выделения отражений от центральной зоны конуса просвечивания.

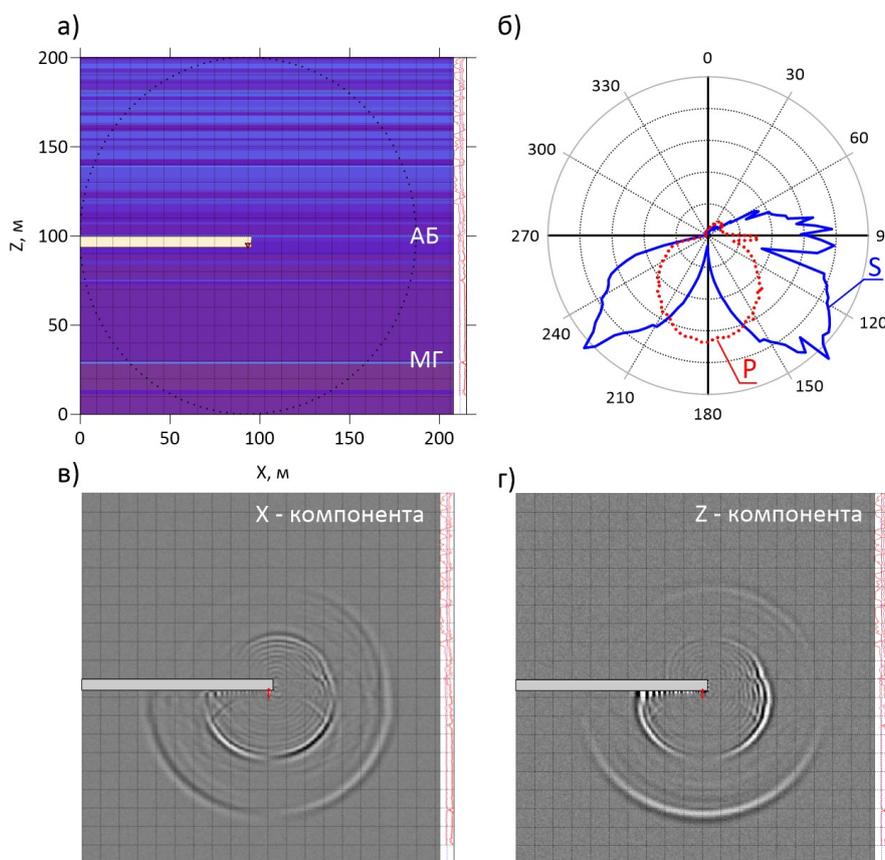
**Ключевые слова:** шахтная сейсморазведка, сейсмическая локация, прогноз, забой, сейсмомоделирование, поперечные волны, горные выработки.

Основной объем шахтных сейсморазведочных исследований в калийных рудниках Верхнекамского месторождения солей проводится с целью прогноза состояния водо-защитной толщи [1, 2]. При этом разрабатываемые пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений и интерпретационные заключения в основном базируются на регистрации и анализе разнотипных отраженных волн, прошедших из целевого верхнего полупространства [3]. Идеи картирования массива впереди забоя до настоящего времени активного развития не получали, тогда как задачи опережающего прогноза потенциально-опасных элементов строения разрабатываемого пласта достаточно актуальны.

Технологии сейсмической локации для обзора массива горных пород в горизонтальной плоскости из забоя выработок давно и успешно развиваются на угольных месторождениях. При этом в качестве носителей информации предлагается использовать разные классы волн: каналовые, отраженные, дифрагированные [4-8].

Известны также зарубежные промышленные технологии, ориентированные на обнаружении субвертикальных сейсмических отражающих объектов различной природы впереди забоя при строительстве тоннелей. Все они основаны на идеях метода отражен-

ных волн [9, 10] с заявленной дальностью обзора 50-200 м, однако имеют ряд различий и недостатков. В частности, такие системы активной сейсмической локации нельзя применять в опасных по газу шахтах, т.к. они не предполагают наличие необходимых средств взрывозащиты. В России известна адаптированная для шахт технология сейсмоакустического прогноза впередишабойного массива, основанная на аппаратно-программном комплексе МИКОН-ГЕО (<https://eng.mikon-geo.ru/>). Однако на наш взгляд данная система остается «вещью в себе», т.к. из описания на официальном сайте или в отдельных публикациях [11] не удастся понять, какие принципы заложены в решение основных проблем, возникающих при возбуждении колебаний во внутренних точках среды. Как производится селекция отражений, пришедших из разных областей массива, как учитывается направленность источника колебаний, как происходит разделение волн по типам при обработке и какой принцип построения детальной скоростной модели среды.



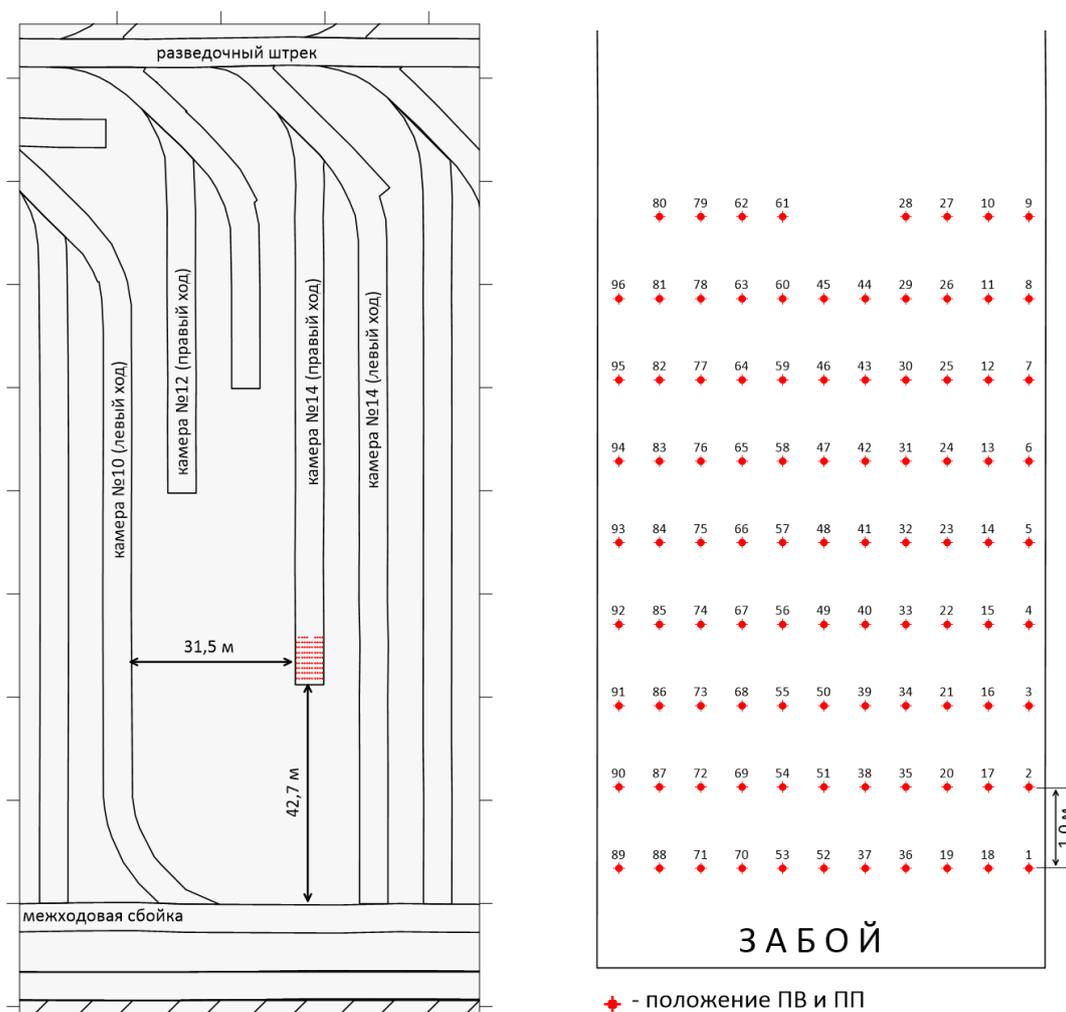
**Рис. 1.** Результаты математического моделирования волнового поля при воздействии вертикальной сосредоточенной силы на почве выработки в 1 м от груди забоя:  
 а) – тонкослойная модель соляного разреза; б) – характеристика направленности источника;  
 в, г) – одномоментные снимки компонент смещений частиц среды

Несомненно, что в горных выработках соляных рудников решение задачи локации сейсмически контрастных объектов впереди забоя необходимо искать на основе применения сейсмоакустических методов. Выбор методики наблюдений и типа изучаемых волн должен базироваться на всестороннем изучении поведения компонент волнового поля, генерируемого точечными ударными источниками колебаний. Моделирование направленности источников колебаний в зависимости от точки приложения силы на контуре выработки приведены нами в работе [12]. В случае оценки массива впереди забоя, наиболее оптимальным представляется использовать поперечные волны вертикальной поляризации. Как видно из рис. 1, при возбуждении колебаний вертикально в

почву выработки возле забоя, значительная часть энергии поперечных волн распространяется горизонтально – вдоль пласта, а основные лепестки Р- и S-волн направлены в нижнее нецелевое полупространство. Этот факт открывает перспективы для формирования пространственных систем наблюдений, позволяющих за счет направленного суммирования по способу общей глубинной точки производить селекцию отражений, пришедших из различных областей призабойного пространства.

Для отработки методики сейсмоакустического прогноза околозабойной зоны выбран специальный полигон с наличием известных горнотехнических объектов в разных азимутальных направлениях от забоя очистной камеры (рис. 2). Контролирующими целевыми объектами здесь выступали горные выработки, расположенные на одноименном уровне в пласте АБ.

Для формирования сейсмозаписей в идеологии методики многократных перекрытий реализована следующая система регистрации. Вертикальные сеймоприёмники (GS-20DX) были установлены в почву в камере № 14 (правый ход), возбуждение колебаний осуществлялось в непосредственной близости возле каждого пункта приема (16 накоплений). Расстояние от груди забоя до первого ряда – 1,2 метра, расстояние между рядами – 1,0 метр, расстояние между линиями вдоль выработки – 0,5 метра. Регистрация производилась сейсмоакустической станцией IS-128 (Россия) с шагом квантования 100 мкс и количеством активных каналов для каждого пункта возбуждения – 96.



**Рис. 2.** Схема сейсморазведочных наблюдений в пределах экспериментального полигона (БКРУ-4, 2-3 ЮЗП, 6 восточный блок, пласт АБ, камера № 14 правый ход)

Анализ первичных сейсмограмм (рис. 3а) показал, что в волновых полях отражаются практически все целевые элементы массива, окружающего выработку. Для примера, на выборке трасс ОПВ1 для первого ряда ПП уверенно прослеживаются годографы целевых волн, по которым можно определить как эффективную скорость S-волны, так и положение отражателя относительно оси выработки. Скорость по годографу 1 составляет 2250 м/с и близка к скорости прямой волны, определяемой по годографу 0. Соответственно, отражающий элемент находится со стороны ПП, имеющего наименьшее время регистрации отраженной волны, и перпендикулярен линии пунктов приема, участвующих в данной выборке трасс. Если годограф (2) имеет практически бесконечную скорость, то отражающий объект находится строго впереди забоя, а его отражающая плоскость параллельна груди забоя. Годограф 3 имеет промежуточный наклон, а значит отражающая поверхность находится под некоторым углом к оси выработки.

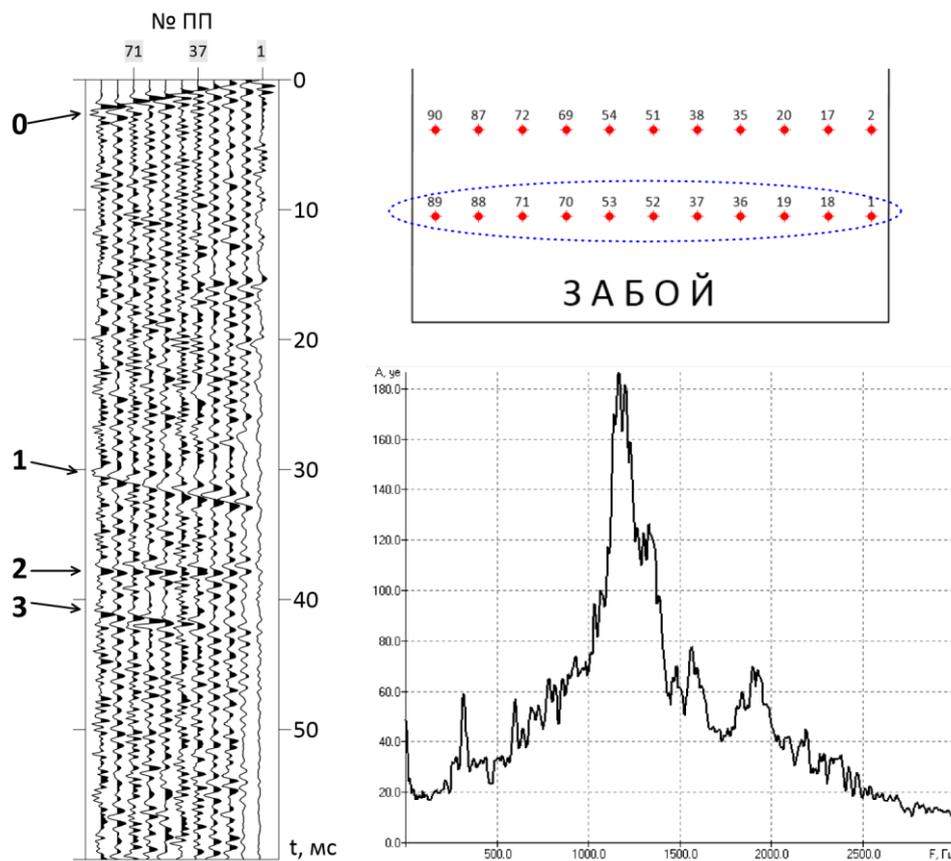
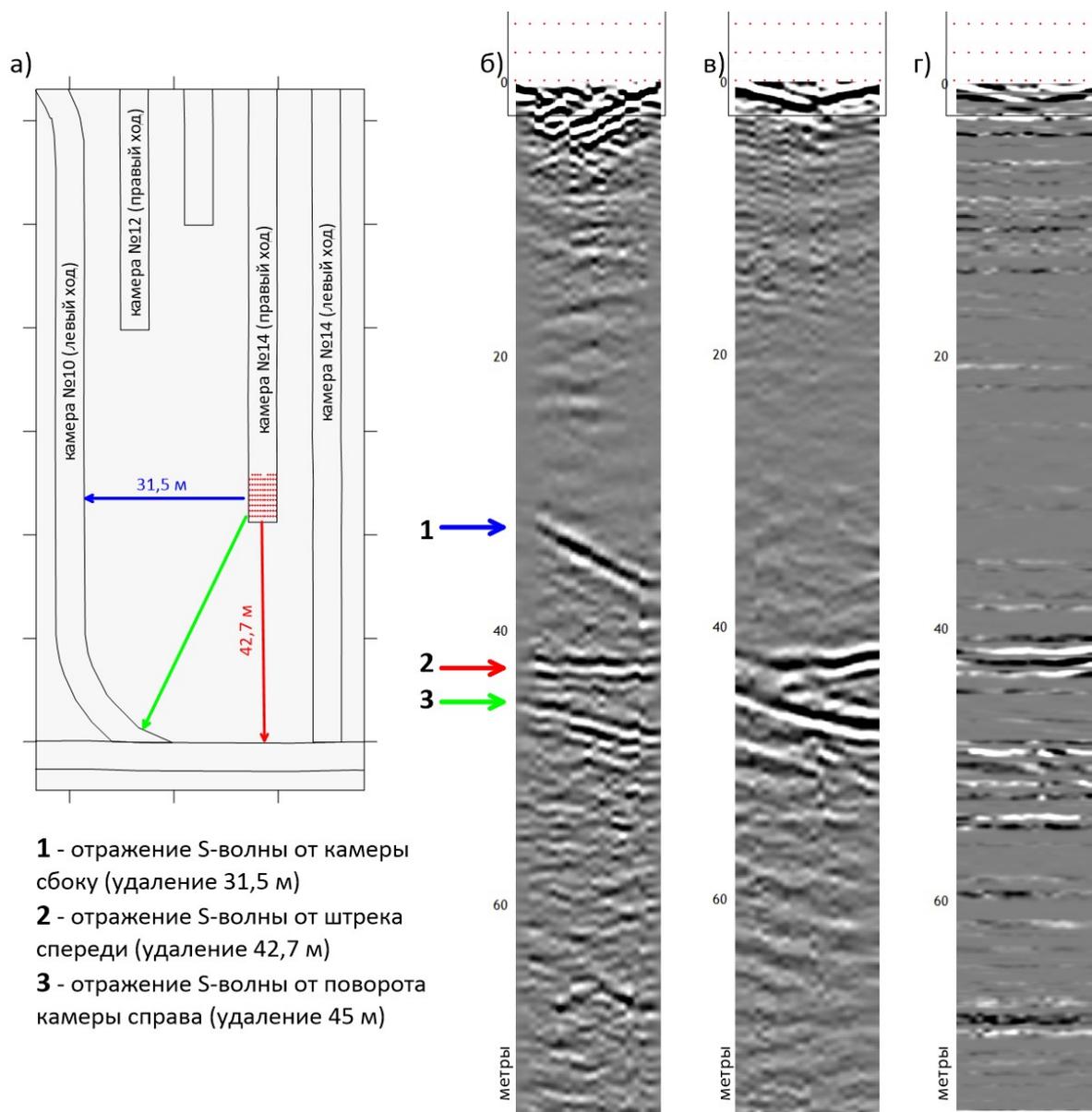


Рис. 3. Первичная полевая сейсмограмма ОПВ 1 (выборка трасс только первого ряда ПП) и амплитудный спектр целевого интервала (10-50 мс)

Суммирование выборок трасс по общей глубинной точке с установленным скоростным законом для S-волн (2250 м/с) позволяет усилить целевые отражения и подавить волны помехи нецелевых типов и классов. Даже при использовании небольшого количества трасс, например только для первого ряда ПП и ПВ (всего 121 трасса), в суммарном волновом поле удастся получить четкие коррелируемые отражения от удаленных контрольных объектов (рис. 4б). Исключение составляет самая ближайшая выработка (камера № 14, левый ход), которая в волновом поле практически не отображается, возможно, за счет деструктивной интерференции с отражениями из нижнего полупространства.

С учетом известной геометрии сейсмической расстановки существует возможность ввода соответствующих статических временных поправок во все (9216) зарегистрированные трассы с целью их приведения к единой линии наблюдений (в нашем случае линия первого от забоя ряда ПП). Это способствует не только большему накоплению целевого отраженного спереди сигнала в суммарном волновом поле (рис. 4в), но и подавлению волн, отраженных от не представляющих интереса областей околзабойного пространства (снизу, сбоку, сзади). Не подавленной остается ось синфазности от границы (поворот камеры № 10), расположенной под небольшим углом к оси выработки.

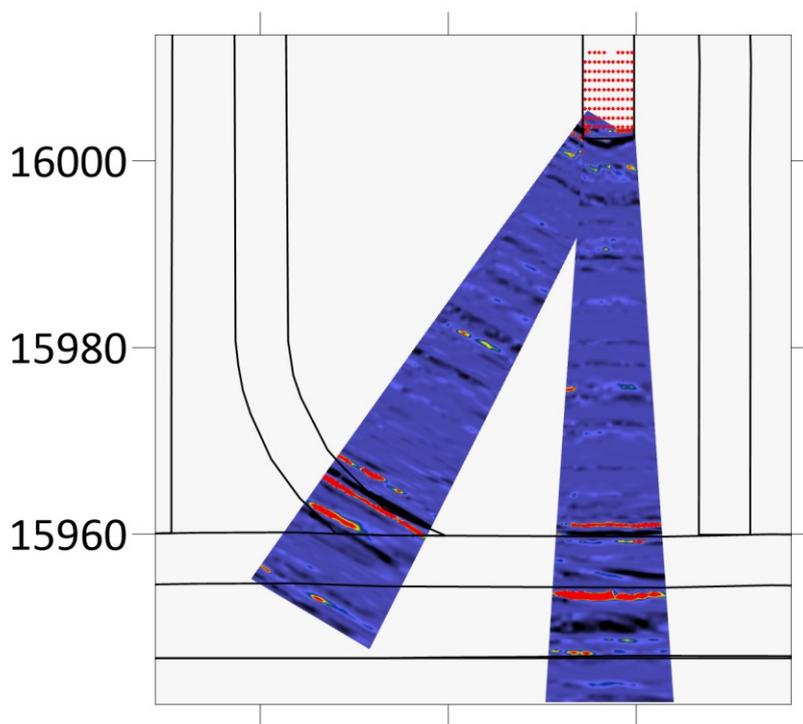


**Рис. 4.** Результаты обработки сейсмоакустических данных с выделением отражений от контролирующих объектов: а) отражатели на схеме наблюдений; б), в), г) результаты обработки

Данная проблема может быть решена с помощью применения процедуры когерентного усиления по суммарному временному разрезу. За счет умножения амплитуд сигнала на коэффициент когерентности, рассчитанный для всей совокупности трасс в скользящем временном окне постоянной ширины, происходит значительное подавление

ние негоризонтальных осей синфазности. В итоговом волновом поле (рис. 4г) остаются только горизонтальные оси синфазности, соответствующие отражениям от объектов, находящихся строго в конусе распространения волн вперед забоя. Такая же процедура может быть применена к волновым полям после пространственной трансформации для получения различных азимутов оси конуса обзора. В результате в волновых картинах будут проявлены только волны, однократно отраженные от плоскостей, расположенных нормально к оси конуса подсветки (рис. 5).

Представленные результаты позволяют сделать следующие основные выводы. Методика сейсмоакустической локация объектов вокруг забоя выработки базируется на использовании отраженных поперечных волн вертикальной поляризации. При возбуждении колебаний ударными источниками в почву выработки возле забоя значительная часть энергии поперечных волн сосредоточена в горизонтальном направлении и распространяется вдоль обрабатываемого пласта. Подавление нецелевых отражений от невертикальных отражателей обеспечивается за счет направленного суммирования трасс, зарегистрированных в рамках площадной расстановки по методике перекрывающихся наблюдений. Конус подсветки в конкретном азимутальном направлении будет определяться размерами зоны Френеля, зависящей от несущей частоты зарегистрированных колебаний и упругих характеристик окружающего массива.



**Рис. 5.** Пространственное сопоставление горнотехнической обстановки впереди забоя и итоговых представлений волновых полей отраженных S-волн для разных азимутов

Основные перспективы развития предлагаемой методики связаны с разработкой программных алгоритмов на базе процедуры пространственной миграции Кирхгофа для всех возможных комбинаций «источник–приемник», позволяющей с минимальными временными затратами локализовать целевые объекты в любом направлении, находясь непосредственно в забое выработки.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ и Пермского края  
в рамках научного проекта № 20-45-596030*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бабкин А.И. Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16: защищена 21.11.01 / Бабкин Андрей Иванович. – Пермь, 2001. – 20 с.
2. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г. Комплексные методические решения в шахтной сейсмоакустике // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 10-15.
3. Бабкин А.И. Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2010. – № 1. – С. 261-267.
4. Трифонов А.С., Тиркель М.Г., Туманов В.В., Архипенко А.И. Методические аспекты и технические особенности сейсмоакустической локации из забоя подготовительной выработки // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2008. – № 1. – С. 157-160.
5. 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.
6. Способ впередизабойной локации: Авт. св-во СССР 1824605: МПК G 01V 1/00. (2000.01) / Мясников Ю.Г., Трифонов А.С., Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Тиркель М.Г.; патентообладатель Укр. фил. ВНИИ горн. Геомеханики и маркшейдерского дела. – № 5005940. заявл. 02.07.1991; опубл. 30.06.1993.
7. Анциферов А.В., Глухов А.А., Анциферов В.А. Шахтный сейсмический прогноз тектонических нарушений по отраженным волнам методом локации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 6. – С. 131-139.
8. Анциферов А.В., Глухов А.А., Туманов В.В. О методе прогноза дизъюнктивов угольных пластов и приуроченных к ним зон скопления метана // Горное эхо. – 2023. – № 2 (91). – С. 35-42. – DOI: 10.7242/echo.2023.2.7.
9. Kneib G., Leykam A. Finite-difference modelling for tunnel seismology // Near Surface Geophysics. – 2004. – V. 2, 2. – P. 71-93. – DOI: 10.3997/1873-0604.2004005.
10. Otto R., Button E., Bretterebner H., Schwab P. The Application of TRT – True Reflection Tomography – at the Unterwald Tunnel // FELSBAU. – 2002. – V. 20, № 2. – P. 51-56.
11. Писецкий В.Б., Лапин С.Э., Зудилин А.Э., Патрушев Ю.В., Шнайдер И.В. Методика и результаты промышленного применения системы сейсмического контроля состояния горного массива «Микон-ГЕО» в процессе подземной разработки рудных и угольных месторождений // Проблемы недропользования. – 2016. – № 2. – С. 58-64.
12. Ярославцев А.Г., Тарантин М.В., Жикин А.А. Учет направленности источников сейсмических колебаний при решении горно-геологических задач // Горный журнал. – 2023 – № 11. – С. 37-42. – DOI: 10.17580/gzh.2023.11.06.