

После проведения анализа характеристик отрицательных гравитационных аномалий – амплитуд, глубин локализации, горизонтальных размеров и интервалов проявления – были выделены наиболее проблемные при проведении горных работ участки. Это районы аномалий первой группы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-45-590011р_а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Гравиметрические исследования Верхнекамского месторождения калийных солей / С.Г. Бычков, Г.В. Простолупов, Г.П. Щербинина // Геофизика. – 2014. – №5. – С. 46-51.
2. Щербинина Г.П. Высокоточная гравиметрия при обеспечении безопасной отработки Верхнекамского месторождения калийных солей / Г.П. Щербинина, Г.В. Простолупов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 3. – С. 219-226.
3. Новоселицкий В.М., Чадаев М.С., Погадаев С.В. Векторное сканирование потенциальных полей – инструмент глубинных исследований // Горные науки на рубеже XXI века (Мельниковские чтения): тез. докл. Междунар. конф. / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 1997. – С. 147-148.
4. Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Щербинина Г.П. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе Vector // Физика Земли. – 2006. – № 6 – С. 90-96.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2021.1.19

ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ РАЗНОТИПНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

А.Г. Ярославцев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. На основе конечно-разностного полноволнового моделирования показано влияние выработанного пространства на характеристики направленности разнотипных волн для различных точек приложения сосредоточенной силы к свободной поверхности. Результаты дают возможность более корректно обосновать выбор технологии шахтной сейсморазведки для изучения различных целевых областей вмещающего выработку соляного массива. Выполнен подбор оптимальных характеристик выработанного пространства для получения его реалистичных отображений при 2D моделировании.

Ключевые слова: шахтная сейсморазведка, отраженные волны, полноволновое моделирование, поперечные волны, продольные волны.

Согласно ряду исследований [1-6] при проведении сейсморазведочных работ в условиях шахт и тоннелей на формируемое волновое поле значительное влияние оказывает сама горная выработка, в которой производится возбуждение упругих колебаний. Это связано с тем, что характеристики направленности применяемых точечных источников зависят как от их положения относительно поперечного профиля выработки, так и от направления сосредоточенной силы относительно изучаемой целевой плоскости. Кроме этого, при сейсморазведке во внутренних точках среды следует принимать во внимание, что регистрируемый сигнал является результатом интерференции волн, приходящих из разных областей пространства.

Анализ компонент волнового поля, генерируемого в выработке, и обоснование выбора оптимальной технологии шахтной сейсморазведки при изучении водозащитной толщи на рудниках Верхнекамского месторождения возможны за счет применения сейсмического моделирования, выполняемого в программе Tesseral Engineering (Tesseral Technologies Inc, Канада, www.tesseral-geo.com). Программа позволяет выполнять полноволновое конечно-разностное моделирование распространения колебаний в рамках упругой 2D-2.5D среды. В режиме 2.5D Elastic программа может учитывать анизотропию и трещиноватость, произвольно ориентированные в трехмерном пространстве, а также рассчитывает истинное геометрическое расхождение. Также возможно моделирование источников, ориентированных поперек профиля наблюдений (вдоль оси Y) и вычисление Y-компоненты трехкомпонентной записи, что является важным с точки зрения технологий шахтной сеймики, где возможно возбуждение колебаний в любой точке поверхности выработки.

Так как реализация сейсморазведочных наблюдений в шахте целесообразна и, по сути, возможна только в 2D постановке, расчет синтетических волновых полей выполнен для двух сагиттальных плоскостей пространства ZX (вдоль выработки) и ZY (поперек выработки).

Моделирование в плоскости ZY

При моделировании в плоскости ZY за основу взята упрощенная трехпластовая модель соляного разреза (рис. 1). Выработка помещена в изотропное пространство, имеющее свойства каменной соли ($V_p=4500$ м/с, $V_s=2700$ м/с). Поперечный профиль выработки задавался максимально близким к реальному. В процессе моделирования использован импульс Риккера с пиковой частотой 900 Гц. Для наглядности результирующих картин при моделировании подавлена генерация поверхностных волн и добавлен белый шум.

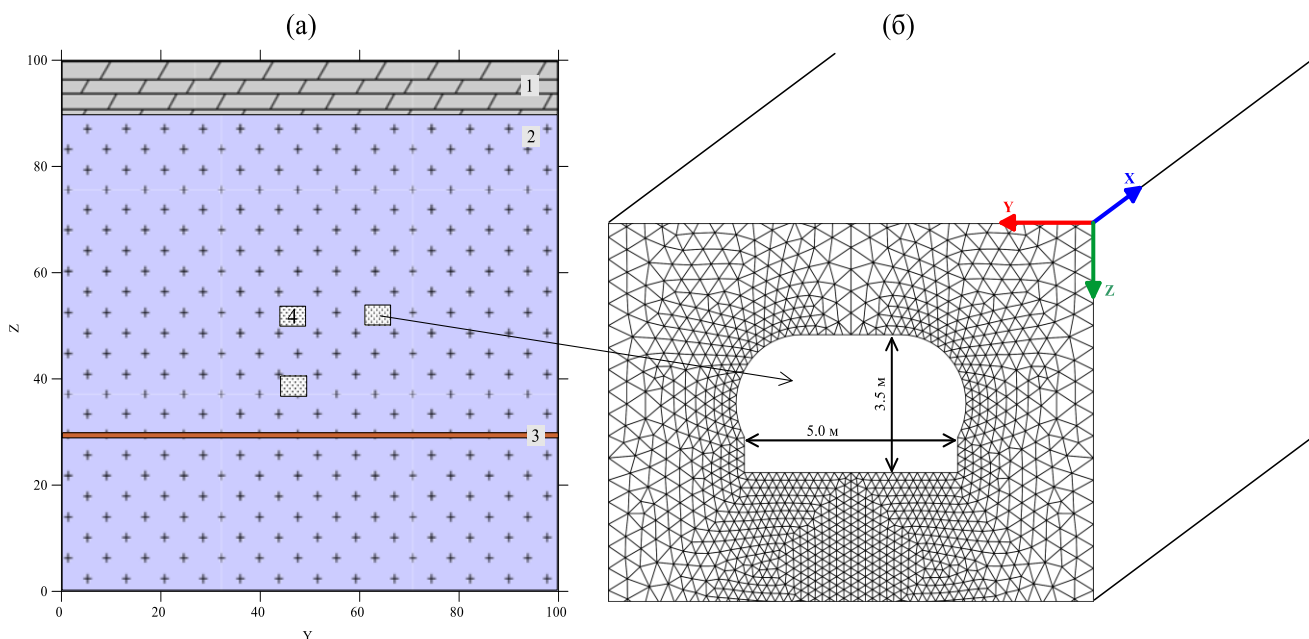


Рис. 1. Модель выработанного пространства в плоскости ZY:

а) положение выработки в массиве (1 – СМТ, 2 – каменная соль, 3 – маркирующая глина, 4 – горные выработки), б) заданное в модели сечение выработки

Длина свободной поверхности вдоль профиля выработки составляет порядка 17 м, что значительно больше длины генерируемых волн ($\lambda > 5$ м), следовательно, можно предположить, что выработка будет являться контрастной неоднородностью и влиять на характеристики направленности источников колебаний.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования – срезы X- и Y-компонент теоретического волнового поля на одинаковом удалении с момента возбуждения, полученные для разнонаправленных источников. В общем виде они характеризуют направленность продольных (P) и поперечных волн (Sv и Sh), возбуждаемых на границе выработанного пространства.

По анализу теоретических волновых картин можно сделать следующие выводы.

При возбуждении колебаний в кровлю выработки (рис. 2а, рис. 2б) наиболее адекватным вариантом является схема Z-Z. Т.е. когда приемники, имеющие ось чувствительности Z, будут расположены в той же выработке. При размещении приемников в параллельной выработке имеет смысл менять ось чувствительности сейсмоприемников на Y, и регистрировать горизонтальную составляющую поперечных волн. Теоретически она будет превосходить по динамике любые другие компоненты поля.

Также можно отметить, что при ударах в кровлю выработка оказывает экранирующее воздействие и значительно снижает интенсивность волн, проникающих в нижнее полупространство.

При возбуждении колебаний в стенку выработки (рис. 2в, рис. 2г) максимум направленности поперечных волн Sh отклоняется от нормали на угол до 30° . Кроме этого, при таком варианте генерации колебаний волны Sh распространяются с одинаковой интенсивностью как в нижнее, так и в верхнее полупространство. Это создает объективные предпосылки для возникновения интерференции отраженных волн и их спутников из верхнего и нижнего полупространства, а также повышает интенсивность нецелевых волн, переотраженных на параллельных и нижележащих выработках.

Оптимальным способом изучения верхнего полупространства представляется вариант возбуждения поперечных SH- волны на кровле выработки (рис. 2д, рис. 2е). В этом случае удалось бы в целевом направлении получить практически идеальную поперечную волну горизонтальной поляризации с минимумом конкурирующих волн. Однако в реальных условиях данный вариант источников практически не реализуем с технологических позиций, т.к. требует надежного крепления в кровле выработки на каждом пункте возбуждения специального бруса, по которому производились бы удары.

Моделирование в плоскости ZX

Моделирование теоретического волнового поля в плоскости ZX выполнено с целью анализа отражений, получаемых от параллельных вышележащих или нижележащих выработок. Такая задача возникает в связи с тем, что в имеющейся версии программы моделирования нельзя задать полноценную объемную 3D модель выработки для варианта 2D-2.5D расчетов, поэтому скорость и мощность слоя, имитирующего выработку, необходимо подбирать экспериментально, чтобы получить близкое к реальному отражение от нее.

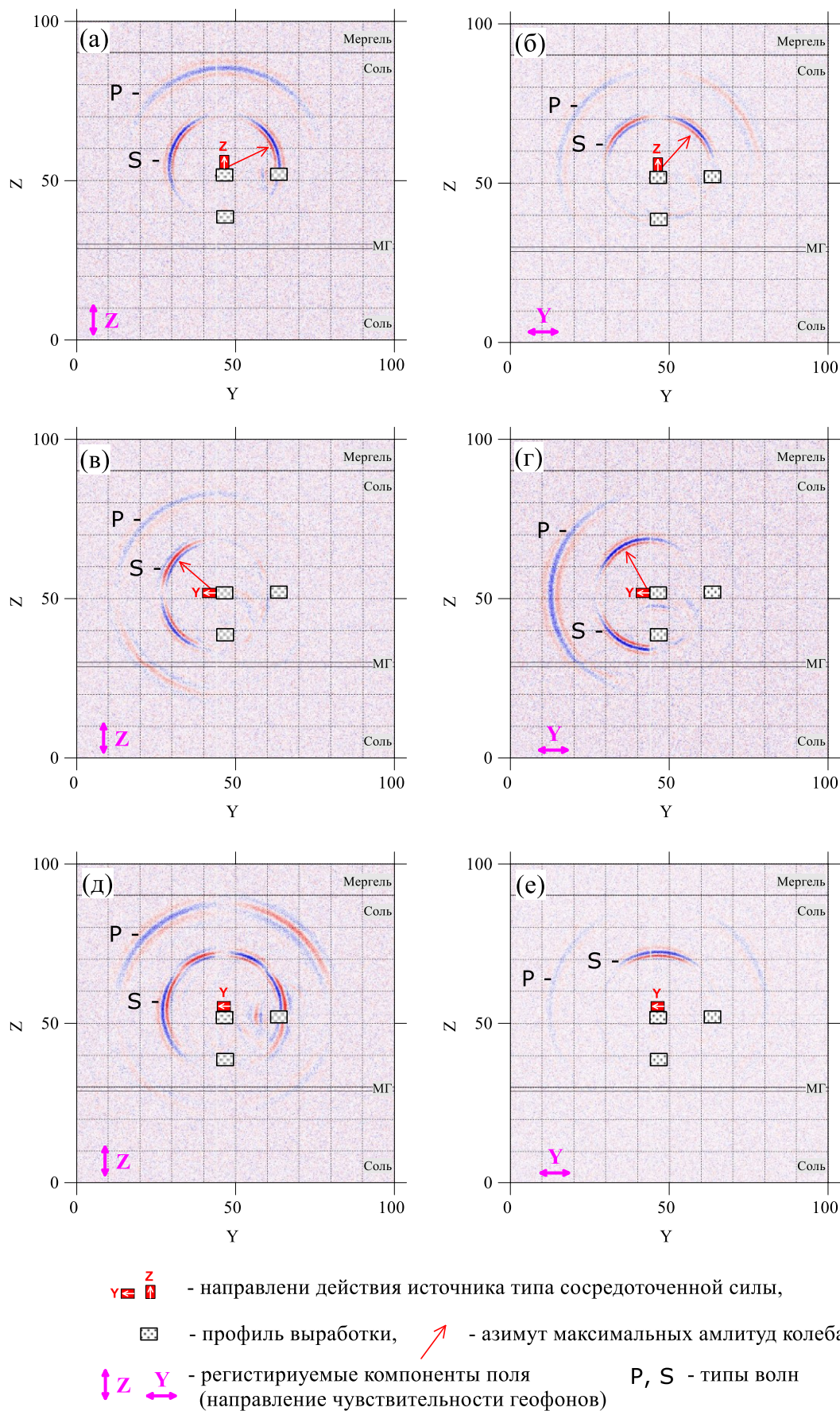


Рис. 2. Снимки амплитуд различных компонент волнового поля для различных вариантов возбуждения колебаний

Как правило, в реальных волновых полях отражение от параллельной выработки по интенсивности и по форме сравнимо с отражением от условной литологической границы [7], но само наличие выработки на пути волн практически не оказывает влияния на времена регистрации последующих отражающих горизонтов. Это обусловлено тем, что удаленная от точки возбуждения выработка не является для падающих волн непрерывной по горизонтали неоднородностью (как любая литологическая граница), а локализована в пространстве по осям Z и Y .

Расчеты теоретического волнового поля в плоскости ZX выполнены для упрощенной двухслойной модели, включающей две выработки с разными характеристикам (рис. 3). Использовался минимальный фазовый импульс с частотой 700 Гц. Регистрировалась только Z -компонента волнового поля при имитации возбуждения колебаний как вертикально приложенной единичной силы (vertical monopole).

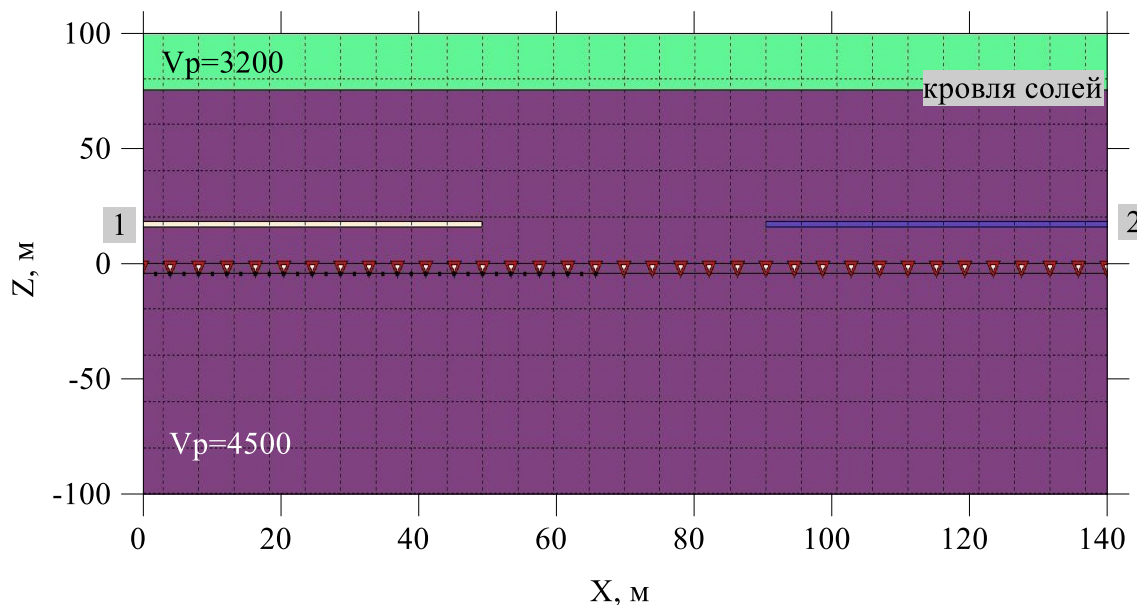


Рис. 3. Модель, принятая в расчет для плоскости ZX

Очевидно, что, если при 2D моделировании представить выработку слоем со скоростью $V_p=330$ м/с (воздух) мы не получим никаких значимых отражений дальше ее подошвы. Поэтому каждая новая итерация расчетов подразумевала изменение мощности и скорости в полигонах, имитирующих выработки, от максимально возможных значений в сторону уменьшения. Результаты моделирования (2D Elastic) для некоторых вариантов характеристик выработанного пространства представлены на рисунке 4.

Анализ полученных волновых полей показал, что наиболее близко реальному отражению от горной выработки при 2D моделировании соответствует имитационный слой мощностью 0.25 м и скоростью продольных волн 1500 м/с (рис. 4г). При таких параметрах удастся получить отчетливое одиночное отражение от выработанного пространства без эффектов реверберации и без увеличения времен регистрации вышележащих отражающих горизонтов.

Полученные результаты необходимо учитывать при 2D моделировании сейсмических волновых полей, генерируемых из внутренних точек среды. Обязательным условием получения качественного результата является добавление в модель добротности среды (Q -factor), позволяющего учитывать потери энергии сигнала аналогично реальным средам.

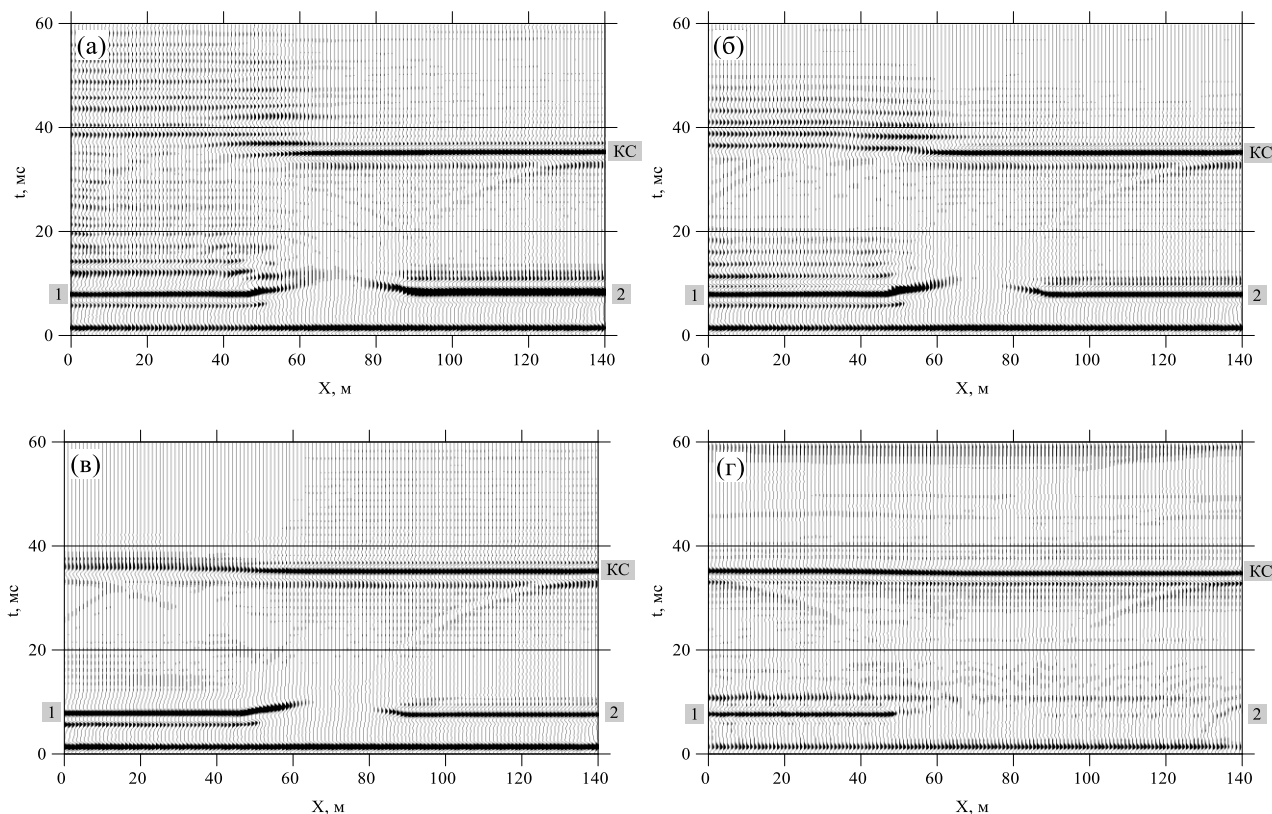


Рис. 4. Синтетические временные разрезы для разных характеристик слоя, имитирующего выработку:
 а) выработка 1: мощность 3 м, скорость 1500 м/с; выработка 2: - мощность 3 м, скорость 4000 м/с;
 б) выработка 1: - мощность 1 м, скорость 1500 м/с; выработка 2: - мощность 1 м, скорость 4000 м/с;
 в) выработка 1: - мощность 0.25 м, скорость 1500 м/с; выработка 2: - мощность 0.25 м, скорость 4000 м/с;
 г) выработка 1: - мощность 0.25 м, скорость 1500 м/с; добротность (Q) во всех слоях 20;
 выработка 2: - мощность 0.25 м, скорость 4000 м/с, добротность (Q) во всех слоях 20

*Работа выполнена при поддержке РФФИ
 (грант № 20-45-596030 р_НОЦ_Пермский край)*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабкин А.И. Изучение закономерностей формирования и распространения объёмных сейсмических волн в породном массиве по данным трехкомпонентной записи в горных выработках // Горное эхо. – 2020. – № 4 (81). – С. 57-63. DOI: 10.7242/echo.2020.4.12.
2. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г. О перспективах изучения поперечных волн в горных выработках соляных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 7. – С. 45-63. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-45-63.
3. Пузырев Н.Н., Бобров Б.А., Гик Л.Д., Тригубов А.В. Исследование направленности источников поперечных сейсмических волн средствами физического моделирования // Геология и геофизика. – 1985. – Т. 26, № 5. – С. 66-75.
4. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 176 с.: ил.
5. Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Яценко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород / под ред. А.М. Епинатьевой. — Москва: Недра, 1969. – 239 с.: ил.
6. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / ВНИИ гидрогеологии и инж. геологии; Под ред. Н. Н. Горяинова. – Москва: Недра, 1992. – 259 с.: ил.
7. Ярославцев А.Г., Фаткин К.Б. Шахтные сейсмоакустические исследования при контроле предохранительных целиков в калийных рудниках // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф. и выставка, 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051043.