

- ния: тез. докл. XIX Междунар. форум-конкурса студентов и молодых ученых / Санкт-Петерб. Горный ун-т. – СПб., 2023. – Т. 1. – С. 195-197.
9. Мешбей В.И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. – М.: Недра, 1985. – 264 с.: ил.
10. Савич Р.П., Коптев В.И. Изучение напряжённого состояния массивов скальных пород сейсмическими методами в связи со строительством подземных гидротехнических сооружений // Актуальные проблемы изысканий проектирования и строительства гидротехнических туннелей большой протяженности. – М., 1981. – С. 42-65. – (Сб. науч. тр. Гидропроекта: Вып. 78).
11. Санфиров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
12. Санфиров И.А., Бабкин А.И. Методические особенности шахтных сейсмоакустических исследований на Верхнекамском калийном месторождении солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 11. – С. 145-154.

УДК 550.34.013.2

DOI:10.7242/echo.2025.2.2

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ МЕТОДОВ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НАДСОЛЯНОЙ ТОЛЩИ

С.Д. Калабин

Горный институт УРО РАН, г. Пермь

Аннотация: Проведен анализ информативности методов инженерной сейсморазведки для изучения надсоляной толщи: метод преломленных волн, метод отраженных волн по технологии общей глубинной точки и многоканальный анализ поверхностных волн. Рассмотрены физические основы, аппаратное обеспечение, разрешающая способность и условия применения. Произведен сравнительный анализ по ключевым критериям и рассмотрена эффективность комплексирования методов.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, надсоляная толща, метод преломленных волн, методика общей глубинной точки, многоканальный анализ поверхностных волн, разрешающая способность, скоростные параметры, комплексирование методов, деформация грунтов, геофизический мониторинг.

Актуальность

Проседания и деформации грунта в районах разработки месторождений является традиционной проблемой. Исследования устойчивости верхней части разреза в таких условиях имеют большое значение для обеспечения безопасности жизнедеятельности в пределах подработанных территорий.

Сейсмические исследования позволяют прогнозировать динамику движения, смещения пород и выявлять зоны повышенной трещиноватости и зоны разуплотнения пород. Благодаря этим данным возможно определять безопасные параметры ведения работ для сохранения разрабатываемой толщи и зданий, сооружений, находящихся на поверхности.

Несмотря на высокую точность современных геофизических исследований они остаются зависимыми от множества факторов. Выбор системы наблюдения и метода исследования зависит от решаемой задачи: интервала исследования и структурно-физических параметров объекта исследования.

Аппаратурное обеспечение

Для изучения надсоляной толщи возможно применение преломлённых, отраженных и поверхностных волн (рис. 1).

При решении инженерных задач применяются поверхностные и заглублённые источники. К поверхностным источникам относятся: кувалда, падающий груз и другие. К заглубленным источникам относятся взрывные источники малой мощности или электроискровой источник (рис. 2).

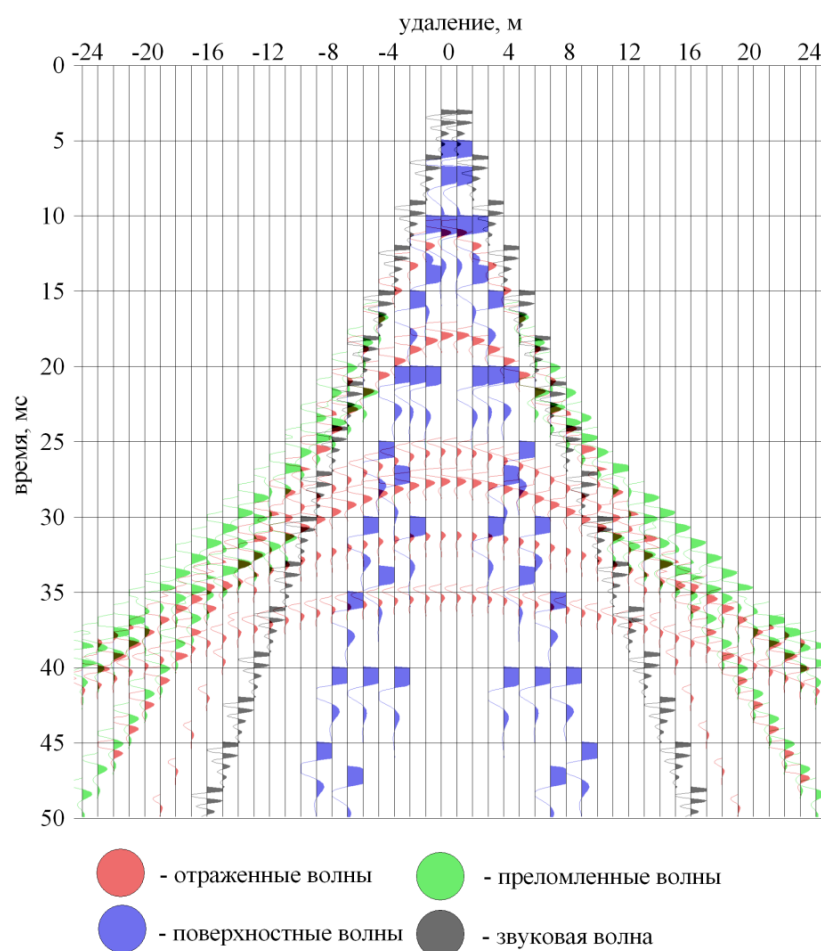


Рис. 1. Синтетическая сейсмограмма с основными классами волн [9]

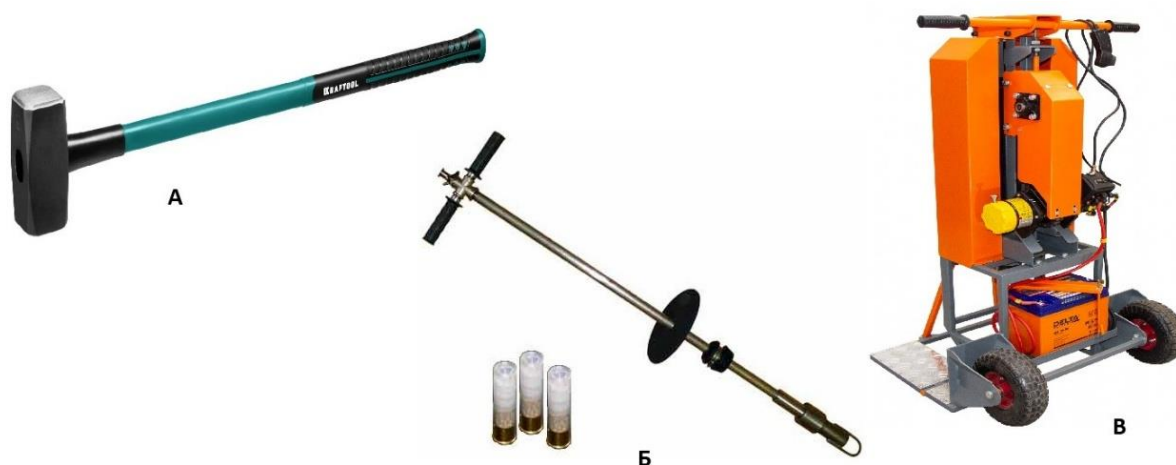


Рис. 2. Источники упругих колебаний:

А – кувалда; Б – импульсный пороховой источник; В – механизированный молот

Выбор приемной системы в сейсморазведке зависит от конкретных задач и условий проведения работ и планируемых к регистрации волн. Для решения инженерных задач используются системы от 24 до 196 каналов. На каждом канале зафиксирован геофон или группа геофонов. Существует множество сеймостанций, выбор которых определяется их характеристиками, так наиболее универсальные: телеметрическая система «Телсс-3», SGD-SEL и IS128 (рис. 3).

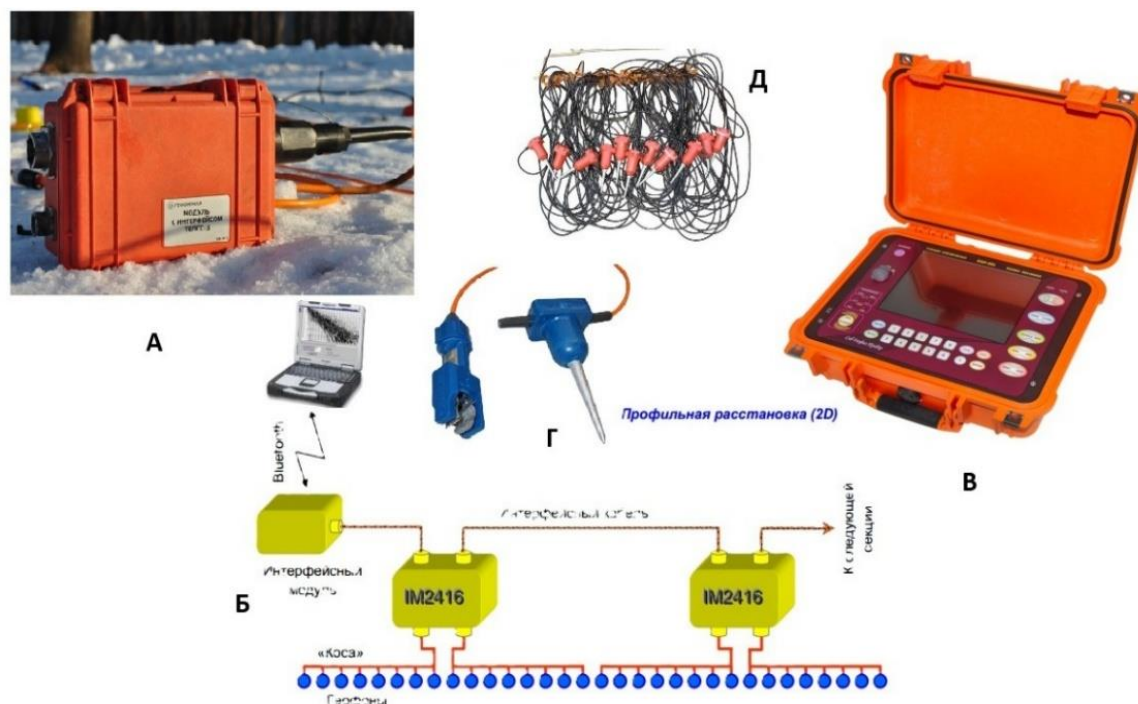


Рис. 3. Системы регистрации сейсмических сигналов:
А – Телес-3; Б – IS-128; В – SGD-SEL; Г – геофон; Д – группа геофонов

Оценка разрешающей способности

Оценка разрешающей способности заключается в возможности разделения наиболее близких точек среды для изучения геометрических параметров и формы геологических объектов.

Выделяют горизонтальную (латеральную) и вертикальную разрешающую способности (далее РС). Определение типов основано на ширине спектральной полосы, так вертикальную РС можно определить по преобладающей длине волны, горизонтальную – по зоне Френеля, по размеру отражающей площадки, который зависит от глубины отражающей поверхности.

Вертикальная РС преобладающей длины сейсмической волны определяется уравнением: $\lambda = v/f$, где v – скорость, а f – преобладающая частота. Зависимость скорости и преобладающей частоты изменяется с глубиной: скорость увеличивается, а частота уменьшается. Приемлемой пороговой величиной РС является четверть от преобладающей длины волны.

Горизонтальная РС выражается зоной Френеля ® и имеет взаимосвязь с вертикальной РС от длины волны и частотного спектра. Например, при высокочастотном сигнале распространяющимся вдоль волнового фронта, зона Френеля будет сравнительно узкой с более различимыми точками отражения. Уравнение меры латеральной разрешающей способности можно записать, как: $r = \sqrt{2\lambda h}$, где λ – длина волны, h – глубина. Поскольку зона Френеля в общем случае увеличивается с глубиной, пространственная разрешающая способность ухудшается с возрастанием глубины [3].

Условиями для достижения лучшей разрешающей способности является сохранение высокочастотного сигнала. На состав горных пород и их физические свойства мы не можем влиять, но можем влиять на параметры регистрации и этапы обработки, при которых необходимо стремиться к сохранению высокочастотного сигнала и подавлению помех.

Основные сейсмоакустические методы исследования надсоляной толщи

Метод преломленных волн

Метод впервые был запатентован в Германии ученым Люгером Минтропом в 1919 году [14]. Однако в патенте не была раскрыта теория образования преломлённых волн, что было сделано в 1926 году советским геофизиком А.И. Заборовским в статье «К теории кривых времен пробега» [4].

Возникновение преломленных волн возможно при увеличении скорости распространения упругих колебаний в слое, ниже лежащем, чем предыдущий. При достижении границы раздела двух слоев часть энергии отражается, а часть преломляется. Преломлённая волна возвращается к поверхности только в том случае, когда угол падения волны на границу раздела превышает критический угол, определённый законом Снеллиуса. Метод преломлённых волн работает лучше с низкочастотными датчиками, так как они обеспечивают глубокое распространение волн в среде. Средний диапазон используемых частот до 30 Гц.

Преимущества и ограничения метода

Преимущества:

- метод доступен и прост в производстве полевых работ, а также обработке данных;
- эффективен в выделении резко-латеральных границ (рис. 4).

Ограничения:

- метод менее точен при изучении криволинейных границ, в сравнении с методом, основанным на регистрации отраженных волн;
- у метода ограниченная разрешающая способность в определении тонкослоистых сред и малых неоднородностей в среде, в особенности прослеживается с глубиной исследования;
- при обработке данных МПВ может появляться проблема «скрытого» слоя, когда количество годографов меньше, чем наблюдаемые слои и малый контраст скоростей (ошибка в определении глубины может достигать 60%) [13].

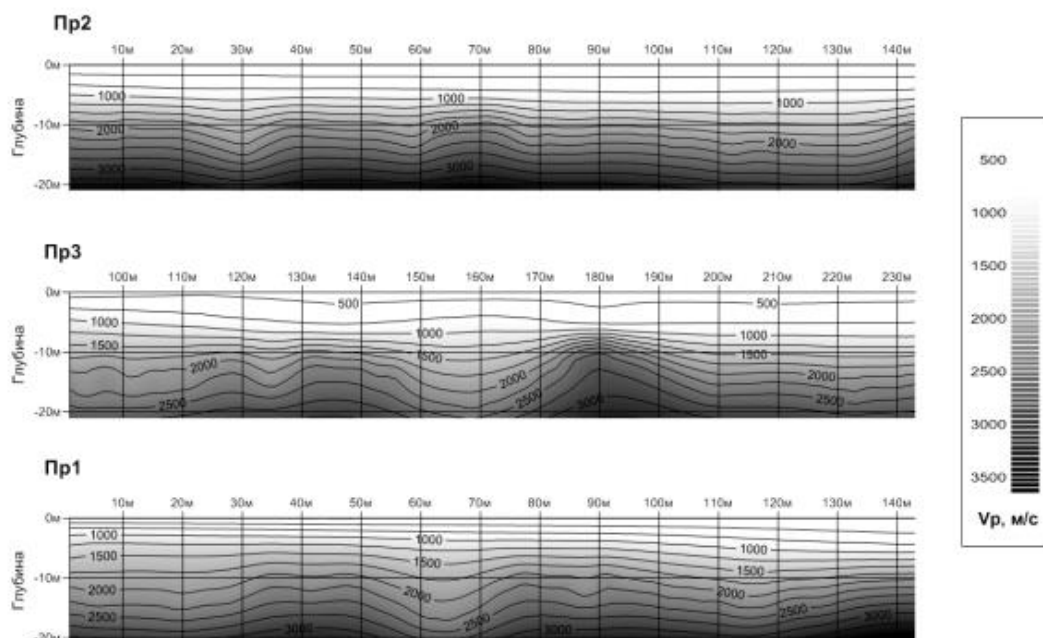


Рис. 4. Скоростные разрезы по данным МПВ [10]

По скоростному разрезу можно оценить положение преломляющих границ в разрезе. На рис. 4 хорошо прослеживается граница в диапазоне 1900-2100 м/с.

Методика общей глубинной точки

Методика общей глубинной точки (МОГТ), предложенная американским ученым в 1950 году как эффективное средство подавления многократных отраженных волн [5]. Основана на многократной регистрации и накоплении сейсмических сигналов в одной точке, что позволяет увеличить соотношение показателя сигнал/шум. МОГТ традиционно ассоциируется с нефтегазовой сейсморазведкой, но также имеет большое распространение при решении инженерно-геологических задач.

Преимущества и ограничения метода

Преимущества:

- высокая точность данных за счет многократного перекрытия, позволяющего минимизировать влияние различных помех;
- изучение сложных геологических структур (рис. 5).

Ограничения:

- снижение частоты регистрации из-за погрешностей во временах при суммировании;
- сложность в обработке и интерпретации данных, необходимо использование сложных алгоритмов и высоких вычислительных мощностей;
- повышенные финансовые и временные затраты на проведение исследований.

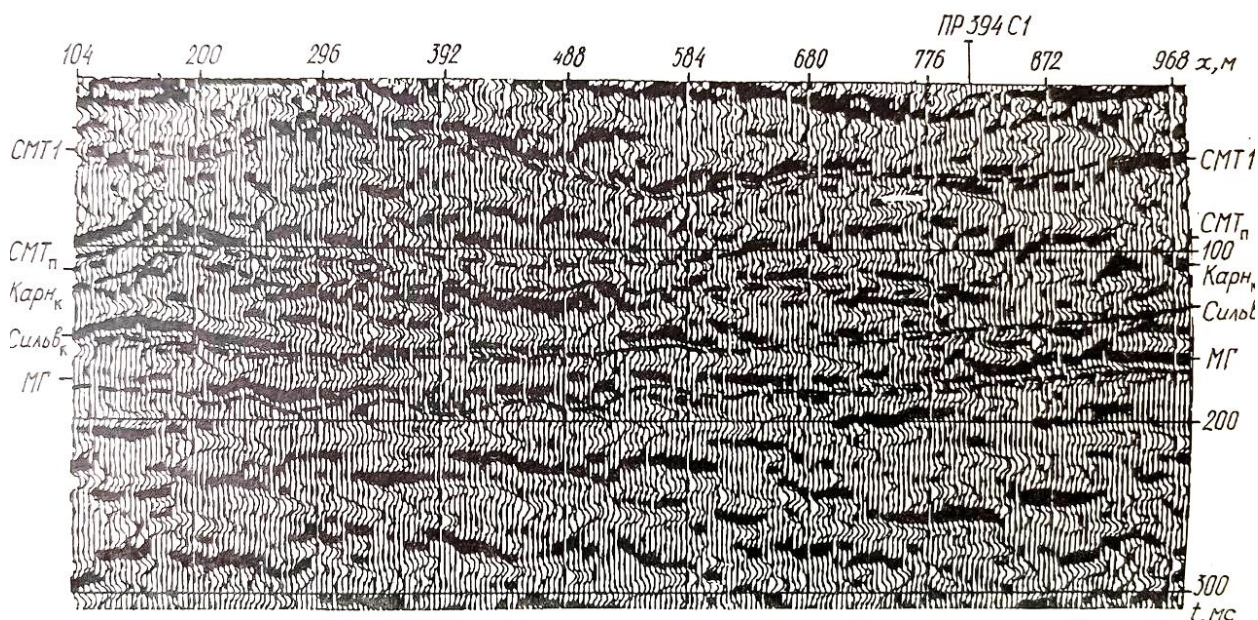


Рис. 5. Временной разрез по данным МОГТ на участке исследования калийной залежи [8]

Многоканальный анализ поверхностных волн

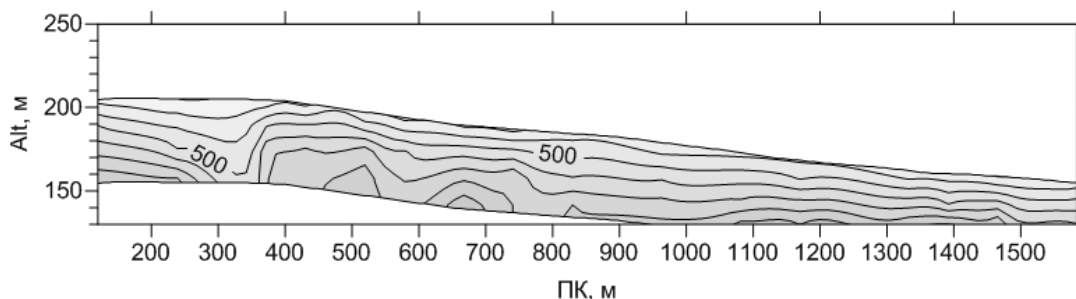
Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW) – молодой геофизический метод, впервые рассматривался в начале 1990 годов, а само понятие было введено в публикации 1999 года [15]. MASW применяется в изучении верхней части разреза (ВЧР) на основе оценки дисперсионных характеристик, преимущественно волн Релея. Метод позволяет восстановить распределение скоростей поперечных волн. В MASW частотный диапазон достигает 100 Гц, но в основном используется до 30 Гц для оценки разреза до 30-50 метров в глубину (рис. 6).

Преимущества метода:

- простота получения полевых данных;
- эффективность в условиях городской среды за счет хорошего соотношения сигнал/шум у поверхностных волн;
- простая процедура обработки данных.

Ограничения:

- проблема учета рельефа при повышении его уровня на около 10% от длины расстановки;
- неэффективность в поиске локальных неоднородностей;
- глубинность метода не превышает 50 метров, а в основном находится в интервале 20-30 метров.

**Рис. 6.** Скоростной разрез по данным MASW [12]**Выводы**

Каждый из методов имеет свои особенности, определяющие их применение в различных инженерно-геологических задачах (табл. 1).

Таблица 1

Анализ сейсмоакустических методов исследования надсоляной толщи

Критерий	МПВ	МОГТ	MASW
Исследуемые волны	Преломленные	Отраженные волны	Поверхностные волны
Оценка точности выделения границ	Высокоточное определение положения резких границ, в отличие от криволинейных	Высокоточное определение положения, как резких, так и криволинейных границ	Средняя точность в определении границ в разрезе
Результат обработки	Статические поправки, скоростной разрез, реже качественная интерпретация разреза	Временной разрез, глубинный разрез, карты отражающих горизонтов и атрибутивные карты	Разрез распределения скоростей поперечных волн
Вертикальная разрешающая способность	Зачастую рассматривают количественные характеристики. Однако, не менее заданного в расстановке шага между ПП. Составляет около 1/4-1/2 длины волны	В зависимости от параметров системы наблюдения. Теоретически можно выделять слои мощностью 1/8-1/4 длины волны	Зачастую рассматривают количественные характеристики, так как точность дисперсионного анализа не постоянна. Можно считать, что минимальная мощность слоя 1/2 длины волны при скоростях выше 200 м/с. В более рыхлых отложениях разрешение хуже.
Горизонтальная разрешающая способность	Ограниченная РС за счет усреднения скоростных характеристик	Наилучшая РС в сравнении с другими методами за счет многократных перекрытий и густой сети наблюдения	Ограниченная РС за счет усреднения скоростных характеристик
Чувствительность к помехам	При использовании низкочастотных датчиков, более эффективен. Общая чувствительность умеренная	Низкая чувствительность к помехам за счет многократного перекрытия	Низкая чувствительность, метод устойчив к техногенным шумам
Условия обработки данных	Простые	Сложные	Средние
Скорость производства работ	Высокая	Низкая	Высокая
Основные критерия применения методов	Применим для оценки изменения физических свойств ВЧР с положительным скоростным градиентом	Применим для разного рода инженерно-геологических задач и высокоэффективен в условиях тонкослоистой среды	Применим для оценки состояния приповерхностной части разреза

Рекомендации к выбору метода для решения инженерно-геологических задач:

МПВ применим: в изучении ВЧР для выявления резких латеральных изменений скоростных свойств; при необходимости получения оперативного результата (оползневые и карстовые процессы). Малоэффективен в условиях тонкослоистого разреза с криволинейными границами.

МОГТ применима: в изучении ВЧР со сложным геологическим строением.

MASW применим: для оценки скоростных свойств приповерхностной части разреза.

Комплексирование МОГТ+MASW позволяет объединить их сильные стороны: высокую разрешающую способность для решения инженерных задач и возможность оценки скоростных свойств приповерхностной части разреза. При мониторинге свойств ВЧР на участках деформаций земной поверхности возможно сочетание МПВ и MASW. Сочетание МОГТ и МПВ эффективно при изучении интервала малых глубин до 500 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геофизика: учеб. пособие. [электронное издание сетевого распространения] / под ред. В.К. Хмелевского. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2018.
2. Бондарев В.И. Сейсморазведка МОГТ: Курс лекций для бакалавров. Ч. III. Основы теории, методики полевых работ и обработки результатов сейсмических наблюдений методом общей глубинной точки / УГГА. – Екатеринбург, 1996. – 240 с.
3. Вилмаз О. Обработка сейсмических данных. Т. 3. – 1986. – 213 с.
4. Гайнанов А.Г., Облогина Т.И., Хмелевской В.К. А.И. Заборовский – выдающийся ученый и педагог (К столетию со дня рождения) // Вестн. Московск. Ун-та: Сер. Геология. – 1994. – № 2. – С. 86-87.
5. Мешбей В.И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. – М.: Недра, 1985. – 264 с.: ил.
6. Телегин А.Н. Новый подход к обработке сейсмических материалов метода преломленных волн // Записки Горного института. – 2001. – Т. 147. – С. 24-29.
7. Семерикова И.И. Возможности методики распознавания зон трещиноватости по сейсмическим параметрам для изучения техногенных изменений состояния пород // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2011. – № 2. – С. 330-337.
8. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
9. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Жикин А.А., Никифорова А.И., Байбакова Т.В. Особенности цифровой обработки в инженерной сейсморазведке МОГТ // Геофизика. – 2012. – №5. – С. 35-41. = Особенности цифровой обработки в инженерной сейсморазведке МОГТ / И.А. Санфиоров, А.Г. Ярославцев, А.А. Жикин, А.И. Никифорова, Т.В. Байбакова // Геофизика. – 2012. – № 5. – С. 35-41.
10. Сенин Л.Н., Сенин Т.Е., Воскресенский М.Н., Парыгин Г.И. Комплексные сейсмические исследования верхней части геологического разреза // Уральский геофизич. вестн. – 2018. – № 4 (34). – С. 41-49.
11. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка: В 2-х т. Т. 1. История и теория получения данных / Пер. с англ. Е.А. Ефимовой; под ред. А.В. Калинина – М.: Мир, 1987. – 447 с., ил.
12. Чугаев А.В. Изучение строения приконтурной части породного массива по особенностям распространения поверхностных волн, регистрируемых в рамках методики многократных перекрытий: автореф. дис. ... к.т.н. 25.00.16: защищена 24.06.11 / Чугаев Александр Валентинович. – Пермь, 2011. – 22 с.
13. Ярославцев А.Г. Сейсморазведочные технологии оценки воздействия горных работ на верхнюю часть разреза: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16: защищена 28.11.03 / Ярославцев Александр Геннадьевич. – Пермь, 2003. – 21 с. Ярославцев А.Г., Сейсморазведочные технологии оценки воздействия горных работ на верхнюю часть разреза. Автореферат диссертации на получение ученой степени кандидата технических наук, Пермь, 2003 г, 152 с.
14. Sweet G.E. The history of geophysical prospecting. – Neville Spearman, 1978. – 440 с.
15. Park B., Miller D. Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2008. – V.13, № 1. – P. 1-11.