

УДК 550.834

И.И. Семерикова**ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДИКИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЗОН
ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
СОСТОЯНИЯ ПОРОД**

Установлены поисковые признаки в динамических параметрах отраженных волн для техногенных изменений напряжено-деформированного состояния пород на основе физического моделирования. Выполнен анализ их информативности, устойчивости, статистической значимости.

Ключевые слова: физическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, трещиноватость, динамические характеристики отраженных продольных волн.

Изучение отдельных трещин, систем трещин, а также техногенных объектов типа скважин, горных выработок связано с оценкой изменения естественного поля напряжений вблизи зон разрывных нарушений. Локальные изменения поля напряжений в окрестностях нарушений определяют повышенную трещиноватость породного массива [3]. Возможность изучения напряженно-деформированного состояния массива в натурных условиях на различных масштабных уровнях, что исключительно важно в геомеханике, – главное преимущество геофизических методов [5, 6]. Из всего многообразия геофизических методов наиболее точную информацию о напряженно-деформированном состоянии дают сейсмические методы. В существующих сейсмических методах по оценке напряженно-деформированного состояния в подавляющем большинстве используются кинематические параметры, как наиболее устойчивые к условиям возбуждения-приема и обработки сигнала. В тоже время они обладают меньшей реакцией на тонкие, локальные изменения свойств изучаемого объекта. Гораздо более чувстви-

тельными к изменениям геологической среды считаются динамические характеристики. Однако попытки использования динамических параметров немногочисленны. Эти параметры часто рассматривают как формальные атрибуты, ссылаясь на большое число факторов влияющих на их величины, обладание сложной зависимостью от упругих свойств горных пород на пути пробега регистрируемых волн, их неустойчивость и большой разброс получаемых значений от эксперимента к эксперименту. В работе [1, 2] решалась задача анализа интерпретационных возможностей сейсморазведки по определению процессов деформирования и разрушения пород под нагрузкой на основе сравнения интегральных оценок сейсмических параметров. Вообще в сейсморазведке интегральные характеристики используют для привязки наиболее значимых изменений тех или иных свойств среды к толсто-слоистой модели геологического пространства. Однако чувствительность интегральных сейсмических характеристик оказывается не достаточной для изучения локальных особенностей строения среды. Например, наложе-

ние геологического фактора (неоднородности) нарушает картину классического (расчетного) распределения изменений напряженно-деформированного состояния для конкретных объектов. Поэтому, в продолжение данного направления в настоящей работе следует детальный поиск наиболее информативных и устойчивых динамических параметров из всего их многообразия.

Исследования проведены путем физического моделирования, когда на образце пород (на верхней грани) воспроизведена полевая расстановка сейсморазведки МОГТ [1, 6]. В эксперименте [1] на верхнюю грань образца – параллелепипеда 30*16*11 см подавалась одноосная вертикальная нагрузка в 3, 6, 12 и 19 МПа. На рис.1 представлены соответствующие временные разрезы МОГТ. Как видно они ничем не примечательны. Так как предполагается, что основным фактором, определяющим изменение скоростей под давлением в породах, является изменение под давлением трещиноватости пород, то полученные временные разрезы были трансформированы в набор сейсмических дифференциальных параметров по методике распознавания трещинных зон по внутренней структуре.

Данная методика [10, 11] выявления зон развития трещин и их разбраковки по внутренней структуре (протяженные, короткие) построена на расчете параметров-признаков по сейсмическому разрезу. Поисковые признаки для подобных зон в параметрах сейсмических волн установлены на основе моделирования (теоретического [9, 10], физического [1, 9, 10, 11, 12]) отклика волновых полей на присутствие трещинных объектов. Установленные признаки зон развития трещин выражаются в следующих динамических характеристиках: средние амплитуды A_{cp} , частотная координата центра f_c , градиенты сред-

них амплитуд по X и по t – $grad.A_{cp}(X)$ и $grad.A_{cp}(t)$, разность амплитудных спектров в интервалах с аномальными значениями параметров $\Delta A(f)$. Из множества динамических параметров в качестве поисковых признаков признавались лишь те, аномалии которых явились устойчивыми и статистически значимыми. Поисковые признаки сгруппированы по типам: универсальные – характеризующие все типы трещинных зон; уникальные – присущие только длинным (соизмеримые и более длины волны сигнала) или только совокупности мелких (короткие – менее длины волны сигнала) трещин.

Эффективность применения методики базируется на объективных предпосылках: появление определенного вида аномалий амплитудных и спектральных параметров, вызванное наличием трещин различного типа, превышение уровня аномалий над уровнем помех и погрешностей, оставшихся после компенсации остальных факторов, влияющих на данные параметры, а также проявление закономерной согласованности в поведении аномалий параметров. Другими словами, критериями статистической значимости аномалий явились: для численной значимости аномалии – среднеквадратическое отклонение значений параметра Δ , для горизонтальной значимости – $1/6$ диаметра первой зоны Френеля. Методика реализует подход в виде двухшаговой схемы: одна из ветвей схемы выводит на зоны мелких разноориентированных трещин, другая – на протяженные (больше длины волны сигнала) трещины. На выходном этапе оцениваются вероятности наличия аномалий поисковых параметров и преобразуются в общий параметр вероятности наличия трещинного объекта того или иного типа. Назовем этот параметр «эффективный параметр».

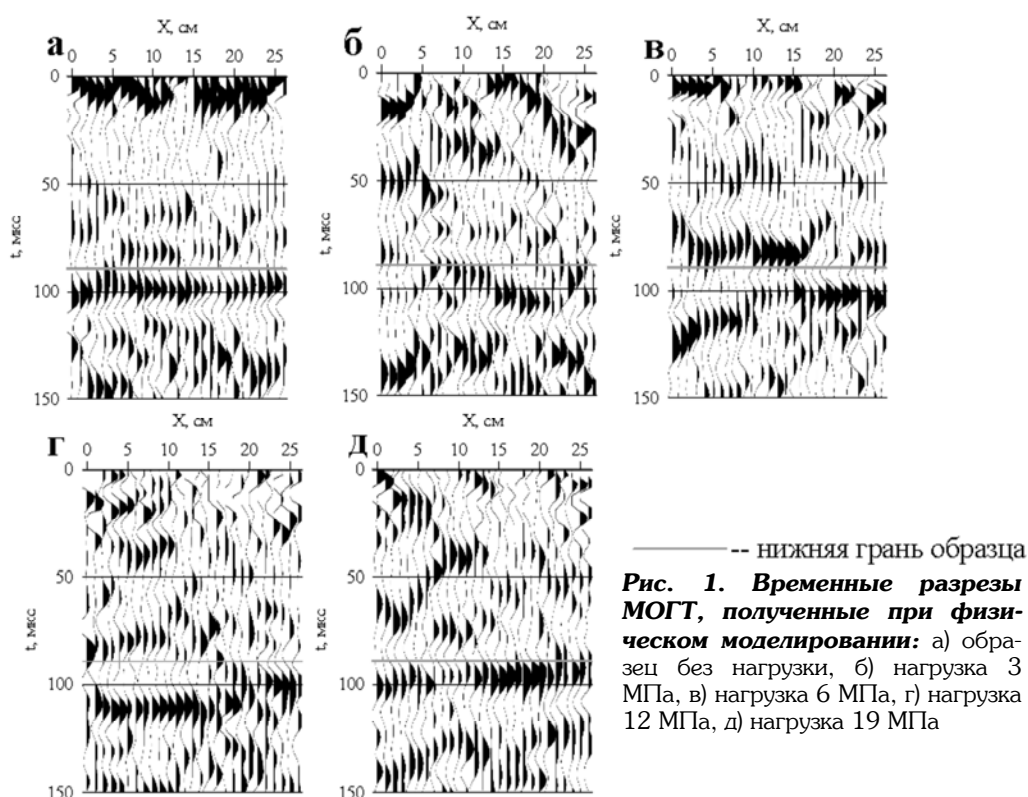


Рис. 1. Временные разрезы МОГТ, полученные при физическом моделировании: а) образец без нагрузки, б) нагрузка 3 МПа, в) нагрузка 6 МПа, г) нагрузка 12 МПа, д) нагрузка 19 МПа

В результате применения данного алгоритма в нашем эксперименте полученные наборы полей данных параметров при различной степени нагружения позволили наблюдать картины изменения напряженно-деформированного состояния в данных сейсмических параметрах. И наоборот – картины изменения дифференциальных динамических параметров под воздействием изменения напряженно-деформированного состояния. Временные разрезы МОГТ, полученные для каждого этапа нагружения образца, нельзя назвать информативными, волновые картины не различаются между собой (рис. 1). На разрезах абсолютных средних амплитуд и частотной координаты центроида без нагрузки проявляется явная слоистость

(рис. 2). Затем слоистость, по мере увеличения нагрузки, смещается, «размываясь». Считаем, это связано с перераспределением в пространстве акустически контрастных границ, изменение (ослабление или усиление) акустической контрастности отражающих границ. При этом сочетание аномалий параметров соответствует мелкой трещиноватости согласно исследованиям [9, 11, 12], что понятно, так как реальные геологические слои состоят из различных пород, обладающих разной степенью естественной трещиноватости

На разрезах эффективного параметра вероятного наличия зон мелкой трещиноватости (рис.3), происходит их пространственное перераспределение.

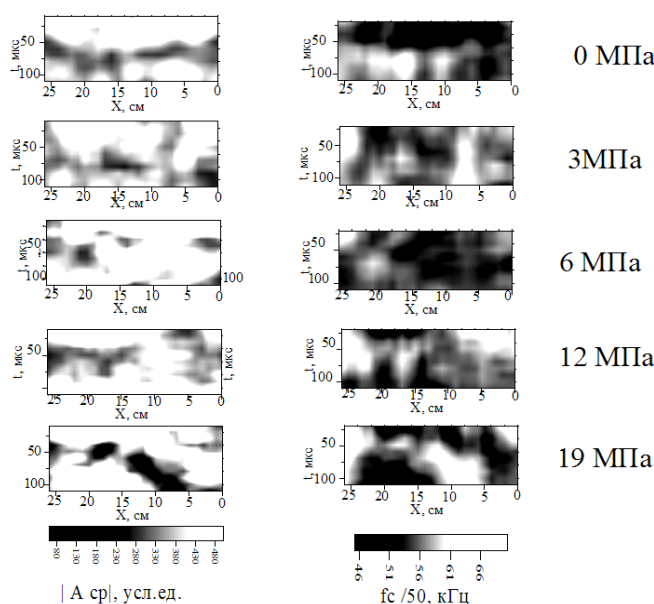


Рис. 2. Сопоставление амплитудных и спектральных характеристик при различных нагрузках образца

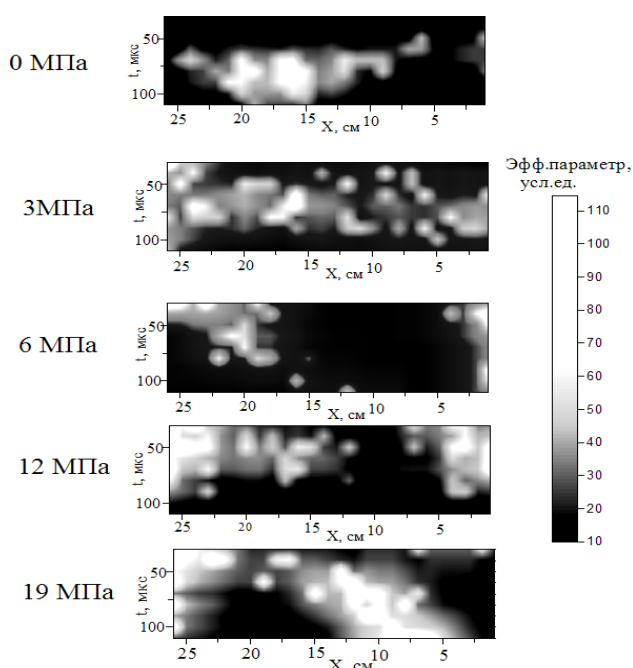


Рис. 3. Разрезы эффективного параметра, отражающего вероятность наличия зон мелкой трещиноватости при различных нагрузках образца

Предполагается, что основным фактором, определяющим изменение скоростей под давлением в породах, является изменение под давлением трещиноватости пород [5, 6]. По мере деформации при сжатии происходит уменьшение величины трещинной пустотности – закрытие пор и микротрещин. В результате этого уплотняется порода и увеличивается модуль Юнга. При дальнейшем увеличении давления, когда закрытие пор уменьшается, изменение скорости упругих волн замедляется. В данном эксперименте наибольшее уплотнение достигается при давлении в 6 МПа, так как в этот момент достигается наибольшее значение скорости упругих волн, определенных в [1] (рис. 4) На разрезах динамических параметров при этом давлении слоистость исчезает, образец выглядит более монолитным.

При дальнейшем нагружении образца происходит нарушение его сплошности, о чем свидетельствует и ниспадающая ветвь графика «скорость-давление» (12, 19 МПа) [1] (рис.4), на этом этапе нагружения идет процесс трещинообразования [2, 4, 5,]. Однако график скоростей характеризует лишь эффективные упругие показатели, определяющие общую деформацию при заданном масштабе воздействия.

Проявление же разной степени этого процесса в разнородных слоях отражается на разрезах амплитуд и спектрального состава при давлениях свыше 6 МПа. На разрезах эффективного параметра для нагрузки в 19 МПа четко проявляются вновь сформированные новые зоны мелких трещин (рис.3).

Таким образом, дифференциальные параметры позволяют увидеть «прямое» изображение изменения физико-механических свойств под воздействием изменения напряженно-деформированного состояния.

На разрезах спектров мощностей отчетливо наблюдается смещение усиления энергии сигнала при увеличении нагружения в область более высоких частот. Кинематические параметры справедливо считаются наиболее устойчивыми параметрами по сравнению с динамическими. В тоже время, эти параметры менее чувствительны к изменениям среды. Так изменение скорости на графике зависимости «скорость – давление» [1] (рис. 4) от атмосферного давления до нагрузки в 6 МПа – точки напряжения, после перехода через которую началось разрушение блока-

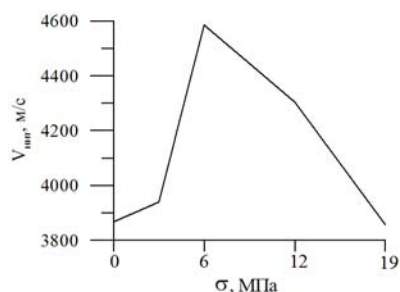


Рис. 4. Изменение интервальной скорости в образце галогенных пород под нагрузкой (Бабкин А. И. 2005 г.)

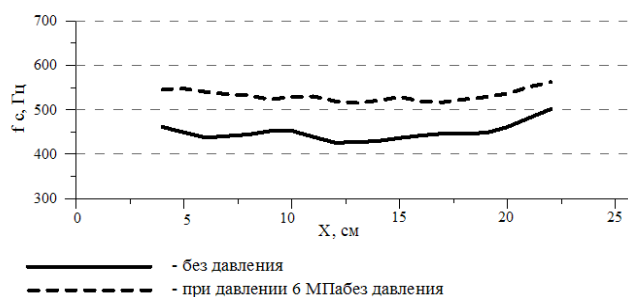


Рис. 5. Сопоставление спектральных характеристик при различных нагрузках на образец породы

образца (т.к. началась ниспадающая ветвь зависимости «скорость – давление»), составило 7,5%. Спектральная же характеристика в этом диапазоне давления претерпела рост значений почти на 17%, что превышает среднеквадратическую ошибку определения данного параметра в два раза (рис. 5).

К имитации условий проведения

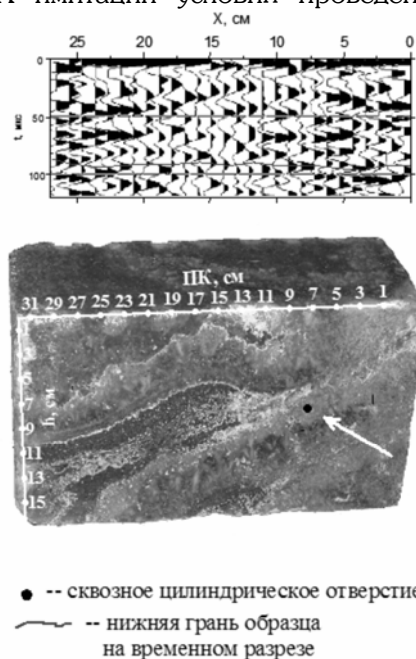


Рис. 6. Образец силвинитовой породы для физического моделирования и соответствующий ему временной разрез МОГТ

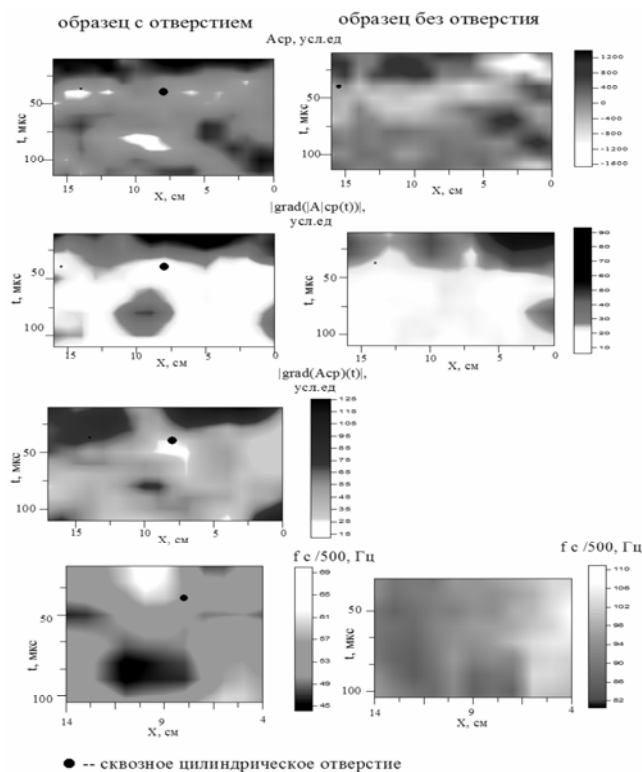


Рис. 7. Статистически значимые аномалии динамических параметров, обусловленных отверстием

малоглубинной сейсморазведки на Верхнекамских шахтных полях над

одиночными выработками можно отнести следующий эксперимент. В образце пород в виде параллелепипеда 34*16*11 см просверлено цилиндрическое отверстие через всю его толщину вкрест простирания профиля, проходящего на длинной верхней грани параллелепипеда (рис. 6). Диаметр отверстия составляет 1/10 длины волны и меньше радиуса первой зоны Френеля на глубине отверстия от поверхности возбуждения-приема в 7 раз. Такое соотношение размеров отверстия и параметров разрешенности сейсмозаписи выходит за теоретические пределы линейных размеров объектов, которые возможно выделить на временном разрезе, так как

это отверстие вызывает временную задержку меньшую, чем ошибка в определении времен вступления волн (время регистрации t_0).

Другими словами, при таком соотношении размеров объекта и параметров исследуемого сигнала данный объект не различим по кинематическому признаку, а также визуально на временном разрезе. Однако, как показали результаты эксперимента, данный объект определяет ряд статистически значимых аномалий динамических параметров [11, 12]. Часть этих аномалий обусловлена явлением дифракции, например: нулевые значения абсолютных значений градиентов средних амплитуд $|grad(Acp)(t)|$ в области отверстия и максимальные под этой областью на расстоянии двойного времени пробега волны

от поверхности возбуждения-приема (рис. 7), там же под областью отверстия резкое падение спектрального состава f_c (рис. 7).

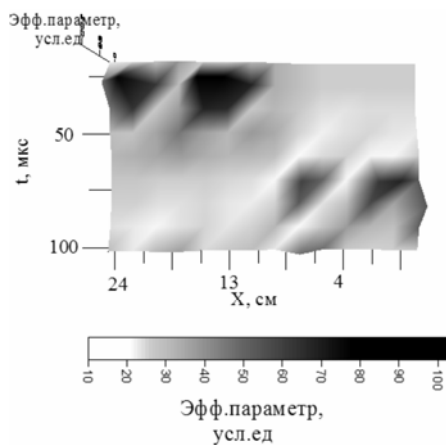


Рис. 8. Разрез эффективного параметра, отображающего вероятность образования трещинных зон, вызванных цилиндрическим отверстием

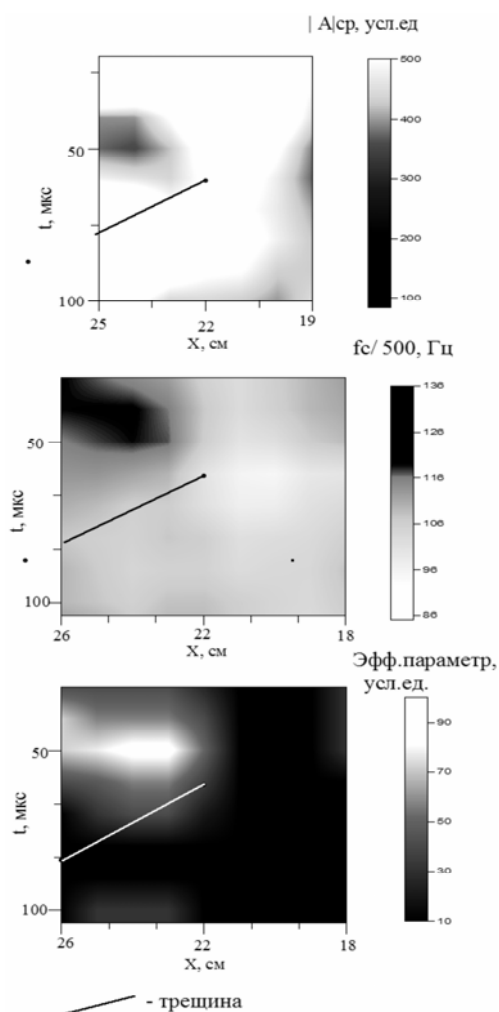


Рис. 9. Отображение в динамических параметрах изменения состояния пород вблизи трещины

Другая часть – изменением напряженно-деформированного состояния, например: резкое повышение значений спектральной характеристики f_c в несколько раз выше отверстия (рис. 7). О чем свидетельствует и формирование зоны трещиноватости (рис. 8). Вообще говоря, зоны влияния одиночной выработки по классическим данным геомеханических исследований представляют

концентрические области измененных напряжений диаметров 5-6 раз и более диаметра выработки. [4, 5]. И данные результаты ярко демонстрируют отклонение, нарушение классической картины распределения техногенных изменений напряжений вследствие неоднородного строения и литологического состава, имеющих определяющее влияние на механические показатели пород [3, 4, 7].

Другим примером оценки изменения напряженно-деформированного состояния являются результаты эксперимента, когда в образце пород осуществлено (пропилено) разрывное нарушение – протяженная трещина, длина которого превышает длину сигнала в два раза. Такое разрывное нарушение является потенциальным источником локального возмущения естественного поля напряжений. В результате использования методики выявления трещинных зон такие возмущения выразились в

формировании зон повышенной мелкой трещиноватости в местах максимальной концентрации напряжений – на конце протяженной трещины (рис.9). Картина нарушения пород вблизи трещины согласуется лишь частично с классической в однородном массиве [7]. Ее асимметрия обусловлена изменчивостью прочностных свойств пород образца, состава и структуры разнородных прослоев в пределах образца [3, 4, 11].

Данные исследования показали возможности изучения при отсутствии прямых физико-механических определений механизма разрушения, специфических особенностей деформации, интенсивности развития микродефектов соляных пород с использованием методов динамического анализа сейсмических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин А. И. Физическое моделирование сейсморазведочного мониторинга изменчивости напряженно-деформированного состояния массива//Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005.. - С. 129-132.
2. Бабкин А. И. Согласование натурных и лабораторных сейсморазведочных оценок напряженно-деформированного состояния// Горный аналитический бюллетень. №6. 2006 г.. Москва, МГУ. С.-72-77Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005.. - С. 129-132.
3. Барях А. А. Деформирование и разрушение соляных пород и массивов. Дисс. на соискание уч. ст. д.т.н. Пермь, 1993.
4. Барях А. А., Еремина Н.А., Грачева Е. А. Оценка условий развития трещин в подработанном соляном массиве// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.-1994.-N 5.
5. Применение сейсмоакустических методов в гидрологии и инженерной геологии.// Мин-во геол. СССР; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеол. и инж геол./ Под ред Н. Н. Горяинова.-М.: Недра, 1992.-264 с.
6. Савич А. И. и др., 1990, Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений./ Под ред. А. И. Савича и Б. Д. Куюнджича. –М.: Недра. 463 с.
7. Салганик Р. Л., Афанасенко Г. В., Иофис И. М. Горное давление: Учеб.для вузов.-М.: Недра, 1992. 208 с.
8. Санфиоров И. А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. Екатеринбург: УрО РАН, 1999.
9. Семерикова И.И. Динамические характеристики сейсмических волн при решении геологических задач в трещиноватых средах.// Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005.. - С. 138-142.
10. Семерикова И. И. Методика распознавания трещинных сред в сейсмических

волновых полях. // Тезисы докладов VII-ой Международной научно-практической конференции «Геомодель – 2005». Геленджик, 13-19 сентября 2005 года. - С. 97.

11. *Семерикова И.И.* Аспекты методики распознавания трещинных сред при анализе сложных волновых полей. // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы науч. сессии Горного ин-та УрО РАН., г. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2006. С.

261-263.

12. *Семерикова И.И.* Расширение спектра задач методики распознавания трещинных сред как следствие развития анализа динамических характеристик сейсмических волн. // Тезисы докладов VIII-й Международной научно-практической конференции «ГЕОМОДЕЛЬ-2006». Геленджик, 2006 г.

Коротко об авторе

Семерикова И.И. – научный сотрудник Горного института Уральского отделения Российской академии наук, кандидат технических наук. Пермь.
E-mail: irina.semerikova@gmail.com

