

## **ПРИМЕНЕНИЕ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА В РЕШЕНИИ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПЛАСТОВ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)**

© 2019 г. *И.Б. Петров, М.В. Муратов*

Московский физико-технический институт (государственный университет)  
max.muratov@gmail.com petrov@mipt.ru

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №14-11-00263 на базе МФТИ.

DOI: 10.1134/S0234087919040038

В настоящей обзорной статье рассматриваются работы, посвященные методикам решения прямых задач сейсморазведки трещиноватых пластов. Трещиноватые слои, как известно, являются потенциальными углеводородосодержащими коллекторами, которые активно изучаются в настоящий момент. В силу высокой стоимости полевых разведочных работ, численное моделирование является важной частью в подобных исследованиях, позволяющей существенно снизить финансовые и временные затраты. Рассматриваются работы, посвященные традиционным распространенным на практике методикам моделирования с применением эффективных моделей. Также значительная часть статьи посвящена работам, в которых применяются методики, разработанные авторами для решения поставленного круга задач. Эти методики основаны на использовании сеточно-характеристического численного метода с интерполяцией на неструктурированных треугольных (в двумерном случае) и тетраэдральных (в трехмерном случае) сетках. Сеточно-характеристический метод наиболее точно описывает динамические процессы в задачах сейсморазведки, так как учитывает природу волновых явлений. Используемый подход позволяет строить корректные вычислительные алгоритмы на границах и контактных границах области интегрирования. Важная часть данной статьи посвящена различным используемым моделям трещиноватости. Также рассмотрены приведенные в работах авторов результаты математического моделирования с использованием разработанной методики. Представлены важные практические выводы, полученные в рассматриваемых работах.

Ключевые слова: обзорная статья, численное моделирование, сеточно-характеристический метод, неструктурированные сетки, сейсморазведка, трещиноватые среды.

### **THE APPLICATION OF GRID-CHARACTERISTIC METHOD IN SOLUTION OF FRACTURED FORMATIONS EXPLORATION SEISMOLOGY DIRECT PROBLEMS (REVIEW ARTICLE)**

*I.B. Petrov, M.V. Muratov*

Moscow Institute of Physics and Technology

In the review article the papers with methods of fractured formations exploration seismology direct problems solution are considered. The fractured formations are the potential carbonate-containing collectors, which are studied actively at present time. Because of high cost of field exploration works the numerical simulation is the important part of such researches leading to decrease of financial and temporary spends. The papers of traditional modeling methods based on effective models are considered. Also, the significant part of article is about works with use of methods developed by authors to solve considered range of problems. These methods are based on use of grid-characteristic method on unstructured triangle (in 2D-case) and tetrahedral (in 3D-case) meshes. The grid-characteristic numerical method describes the dynamical processes in exploration seismology problems the most exactly, because it takes into consideration the nature of wave processes. The used approach lets to make the correct computational algorithms on boundaries and contact boundaries of integration area. The important part of this article is about different fracture models used in practice. Result of numerical simulation with use of developed methods from papers of the authors are also represented in the article, as the important practical conclusions based on them.

Keywords: review article, numerical simulation, grid-characteristic method, unstructured meshes, exploration seismology, fractured media.

## **Введение**

В настоящее время все большая доля разведки при поиске нефти и газа приходится на плотные карбонатные породы и глубоко залегающие песчаники. Углеводородосодержащие пласты таких пород обычно пронизаны системами субвертикальных однородно-ориентированных трещин разного масштаба, насыщенных жидкостью [1,2]. Они определяют фильтрационно-емкостные характеристики резервуаров, являясь основой для построения моделей месторождений для обоснования режимов их разработки.

Изучению трещиноватости в последнее время посвящено множество работ. Один из первых подходов, рассматривающий трещиносодержащие среды как эквивалентные однородные анизотропные среды [2-6], основан на теории эффективных сред. Среди этих моделей следует отметить теорию осредненных трещиноватых сред Шоенберга [7], получившую достаточно широкое распространение в решении задач разведочной сейсмологии. В этой области также был проведен круг исследований [8-10], широкое распространение из которых получили эффективные параметры слабой анизотропии Томсена.

На основе данного подхода была разработана технология определения азимутальной анизотропии среды, нашедшая широкое применение при определении параметров систем трещин. Однако результаты подобных иссле-

дований не всегда подтверждаются последующими гидродинамическими исследованиями. Недостаточной также оказывается и детальность результатов.

В последние годы также активно развивалось направление обнаружения и изучения зон трещиноватости с использованием технологий, основанных на рассеянной компоненте волнового отклика [11-14].

В данной статье описываются результаты, полученные с применением сеточно-характеристического метода [15-17] на неструктурированных сетках в 2D и 3D задачах. Метод позволяет учитывать характеристические свойства динамических систем уравнений гиперболического типа, что дает возможность строить наиболее корректные алгоритмы на границах области интегрирования, поверхностях раздела сред и на трещинах.

Помимо сеточно-характеристического метода для численного решения рассматриваемого круга задач используются лучевой метод [18-20], метод акустического приближения, осредненные модели [21-24], метод конечных элементов [25], спектральные и псевдоспектральные методы [26, 27], конечно-разностные методы, разрывный метод Галеркина [28] и другие.

### Математическая модель и численное решение

Определяющая система уравнений линейно-упругой среды может быть представлена в виде [29]:

$$\begin{aligned} \rho \partial V_i / \partial t &= \partial \sigma_{ji} / \partial x_j, \\ \partial \sigma_{ij} / \partial t &= \lambda \left( \sum_k \partial V_k / \partial x_k \right) I_{ij} + \mu (\partial V_i / \partial x_j + \partial V_j / \partial x_i). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V_i$  – компонента скорости,  $\sigma_{ij}$  – компонента тензора напряжений,  $\rho$  – плотность среды,  $\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты Ламе,  $I_{ij}$  – компонента единичного тензора. Введя вектор переменных  $\mathbf{u} = \{V_x, V_y, V_z, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}\}$ , систему (1) приводим к виду:

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + \sum_{i=1,2,3} \mathbf{A}_i \partial \mathbf{u} / \partial \xi_i = 0. \quad (2)$$

Численное решение находится с применением сеточно-характеристического метода [15]. Проводим по координатное расщепление и заменой переменных сводим систему к системе независимых скалярных уравнений переноса в инвариантах Римана.

$$\partial \mathbf{w} / \partial t + \mathbf{\Omega}_i \partial \mathbf{w} / \partial \xi'_i = 0. \quad (3)$$

Для каждого уравнения переноса (3) производится обход всех узлов расчетной сетки, и для каждого узла опускаются характеристики. С временного слоя  $n$  соответствующая компонента вектора  $\mathbf{w}$  переносится на временной слой  $n+1$  по формуле

$$w_k^{n+1}(\xi'_i) = w_k^n(\xi'_i - \omega_k \tau), \quad (4)$$

где  $\tau$  – шаг по времени. После того как все значения перенесены, идет обратный переход к вектору искомым значений  $\mathbf{u}$ .

Рассмотрена интерполяция на сетках: неструктурированных треугольных – в двумерном случае и тетраэдральных – в трехмерном случае. Значения в каждой точке находятся с использованием значений в опорных точках сетки  $\mathbf{w}(\mathbf{r}_{ijkl})$  и весов этих точек  $p_{ijkl}(\mathbf{r})$  по формуле:

$$\mathbf{w}(\mathbf{r}) = \sum_{i,j,k,l} p_{ijkl}(\mathbf{r}) \mathbf{w}(\mathbf{r}_{ijkl}). \quad (5)$$

Сеточно-характеристический метод позволяет применять наиболее корректные алгоритмы на границах и контактных границах области интегрирования [16,17, 30,31].

Граничное условие можно записать в общем виде как:

$$D\mathbf{u}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \mathbf{d}, \quad (6)$$

где  $D$  – некоторая матрица размера  $9 \times 3$  для трехмерного случая ( $5 \times 2$  – для двумерного),  $\mathbf{d}$  – вектор,  $\mathbf{u}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau)$  – значение искомым значений скорости и компонент тензора напряжений в граничной точке на следующем временном шаге.

### Модели трещин

В реальных задачах сейсморазведки приходится сталкиваться с неоднородностью характера взаимодействия упругих волн с поверхностью трещины при прохождении через нее. Трещина представляет собой сложную неоднородную структуру [2, 32]. Местами створки трещины находятся на некотором отдалении и разделены насыщающим флюидом или пустотой [32], местами наблюдается слипание, когда под действием сил давления стенки вплотную прилегают друг к другу [33]. Кроме того, трещины можно классифицировать по характеру насыщения: флюид или газ [32,33]. Очевидно, что для столь большого разнообразия в структуре трещин нельзя придумать одну, удовлетворяющую всем случаям модель.

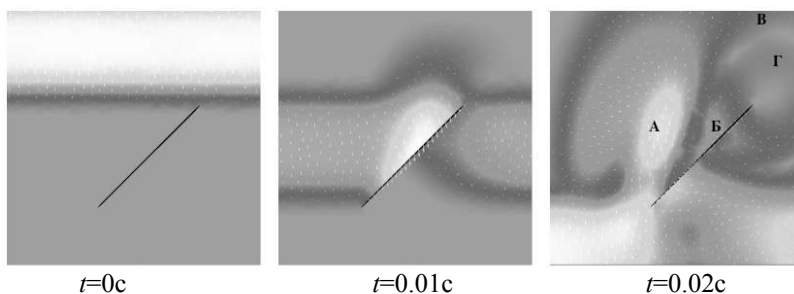
Для различных задач используются дискретные модели различной степени приближения: задание флюида в трещине с применением модели вязкой жидкости [34], модели идеальной жидкости [33, 35], задание соответствующих флюиду упругих характеристик и др. Для случая наблюдения откликов в макромасштабе всего сейсморазведочного эксперимента, без существенного увеличения машинных ресурсов, оптимальным является задание трещин в виде контактных условий – модель бесконечно тонкой трещины. Применимость модели показана в [30-33, 36-41].

Наиболее часто встречаемыми на практике являются случаи газонасыщения, флюидонасыщения и слипания трещины. Для этих случаев, а также для их комбинаций был разработан ряд моделей [33].

**а) Газонасыщенная трещина.** Модель газонасыщенной трещины хорошо моделирует поведение трещин, заполненных воздухом или газом на небольшой глубине до 100-150м [33]. При больших глубинах под действием давления трещины с воздухом закрываются, а газ приобретает свойства жидкости. Трещина задается в виде граничного условия свободного отражения на створках:

$$\mathbf{Tn} = 0.$$

На рис.1 представлены волновые картины полей скоростей при прохождении через нее плоской продольной волны. Высота трещины 100м, длина волны 150м. Скорость распространения продольных волн в среде 3500 м/с, поперечных – 1742 м/с. Плотность среды равнялась 2400 кг/м<sup>3</sup>. На рисунке обозначены следующие типы волн: А – продольная отраженная, Б – поперечная отраженная, В – продольная дифрагированная (рассеянная) и Г – поперечная дифрагированная (рассеянная). Волны А и Б образуются на створках трещины, В и Г – на ее конце.



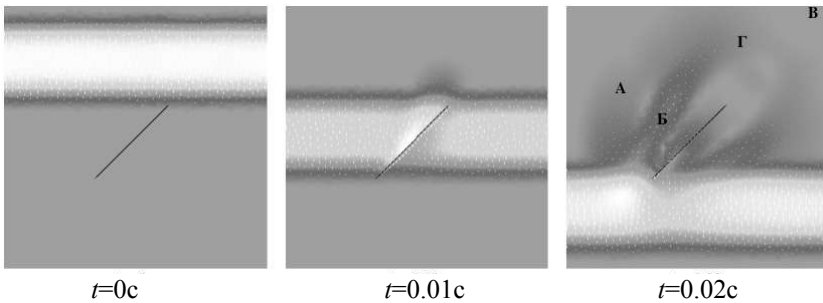
**Рис.1.** Прохождение плоского продольного волнового фронта через газонасыщенную (пустую) трещину.

**Флюидонасыщенная трещина.** В большинстве решаемых на практике задач трещины заполнены флюидом: водой, нефтью, сжиженным газом и т.д. [32,33,39] Поэтому целесообразным было разработать модель, позволяющую описывать такую ситуацию. Флюидонасыщенная трещина задается как контактная граница с условием свободного скольжения [40,41]:

$$v_a \cdot \mathbf{n} = v_b \cdot \mathbf{n}, \quad \mathbf{f}_n^a = -\mathbf{f}_n^b, \quad \mathbf{f}_\tau^a = \mathbf{f}_\tau^b = 0.$$

Такая контактная граница полностью пропускает продольные колебания без отражения и полностью отражает поперечные волны. Эта картина соответствует реальной ситуации: значения скоростей распространения продольных волн в жидкостях и плотностей сопоставимы со значениями скоростей и плотностей геологических сред; в то время как скорости поперечных колебаний в жидкостях близки к нулю.

Аналогично рис.1 для флюидонасыщенных трещин результаты представлены на рис.2.



**Рис.2.** Прохождение плоского продольного волнового фронта через флюидонасыщенную трещину.

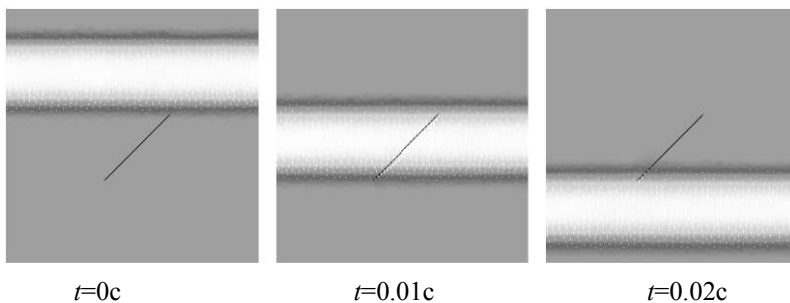
Видно полное прохождение продольной компоненты волны (невидимые компоненты отклика А и В). Образование же интенсивных компонент обменных волн Б и Г свидетельствует о полном отражении поперечных колебаний.

**б) Слипшаяся трещина.** На большой глубине под действием давления бывает, что створки трещин соприкасаются так, что упругие волны почти полностью проходят сквозь трещину. В таком случае оптимально будет использовать контактное условие полного слипания [40]:

$$\mathbf{v}_a = \mathbf{v}_b, \quad \mathbf{f}_a = -\mathbf{f}_b,$$

где  $\mathbf{v}$  – скорости соприкасающихся граничных точек,  $\mathbf{f}$  – действующая на границу сила,  $a$  – первая,  $b$  – вторая створка трещины. При задании такого

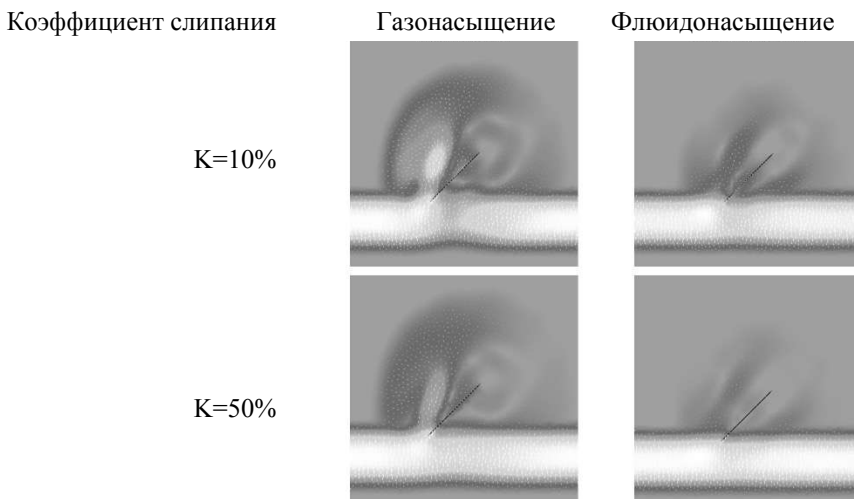
контактного условия на трещине упругие волны полностью проходят через нее (рис.3).



**Рис.3.** Полное прохождение волнового фронта через слипшуюся трещину.

**в) Частично-слипшаяся трещина.** В реальной сейсморазведке имеют место быть частично слипшиеся трещины [33], в которых часть поверхности створок является слипшейся, а часть разделена флюидом или газом. Такие трещины показывают частичное пропускание фронта упругих волн, что сказывается на амплитудах волн отклика на сейсмограммах.

Была разработана модель трещины, где в разных точках створок случайным образом задавались условия газонасыщения (флюидонасыщения) и полного слипания. Количество тех или иных точек регулировалось весовым коэффициентом – коэффициентом слипания. Такая модель позволила задать газонасыщенные и флюидонасыщенные трещины с процентом слипшихся точек от 0 до 100%.



**Рис.4.** Влияние частичного слипания на отклик газонасыщенной и флюидонасыщенной трещин.

Так как в одних точках трещина отражает волновой фронт, а в других пропускает, то суперпозиция рассеянных волн, образовавшихся при взаимодействии со всеми точками, представляет собой отклик газонасыщенной (флюидонасыщенной) трещины с меньшей амплитудой.

На рис.4 приведены волновые картины полей скоростей откликов от одиночных газонасыщенных и флюидонасыщенных трещин с коэффициентами слипания 10 и 50%. Видно уменьшение амплитуд отраженных и рассеянных волн при увеличении коэффициента слипания.

### Трещина с условием динамического трения

Добиться частичного отражения продольного волнового фронта от флюидонасыщенной трещины можно также путем задания сил динамического трения [42].

Расчет проводился по следующему алгоритму:

– Расчет полного слипания: в результате на створках получаем значения силы  $\mathbf{f}^*$ . Если  $|\mathbf{f}_\tau^*| > k|\mathbf{f}_p^*|$ , считается трение:

$$f_p = \frac{\rho_{AC_{A,1}}\rho_{BC_{B,1}}((\mathbf{v}^{B,in} p) - (\mathbf{v}^{A,in} p)) + \rho_{AC_{A,1}}(\sigma^{B,in} \div \mathbf{N}_{00}) + \rho_{BC_{B,1}}(\sigma^{A,in} \div \mathbf{N}_{00})}{\rho_{AC_{A,1}} + \rho_{BC_{B,1}}},$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{v}^{B,in} - (\mathbf{v}^{B,in} p)\mathbf{c}p - \mathbf{v}^{A,in} + (\mathbf{v}^{A,in} p)\mathbf{c}p + \\ + \frac{1}{\rho_{BC_{B,2}}}((\sigma^{B,in} p) - (\sigma^{B,in} \div \mathbf{N}_{00})p) + \frac{1}{\rho_{AC_{A,2}}}((\sigma^{A,in} p) - (\sigma^{A,in} \div \mathbf{N}_{00})p),$$

$$\mathbf{f}_\tau = kf_p \mathbf{R} / \|\mathbf{R}\|, \quad \mathbf{f} = f_p \mathbf{p} + \mathbf{f}_\tau.$$

Далее для одной створки трещины применяется граничное условие с заданной внешней силой  $\mathbf{f}$ , а для другой –  $-\mathbf{f}$ . Коэффициент трения  $k$  принимает значения от нуля до бесконечности. Ноль соответствует свободному скольжению, а бесконечность – полному слипанию. Из-за бесконечности интервала возникает неудобство при нормировании для задания определенной доли пропускания волнового фронта [33, 39].

### Волновой отклик от одиночной макротрещины

Были проведены расчеты для одиночной субвертикальной трещины высотой 40м и 200м [32]. Глубина залегания 2000м. Использовались параметры среды, близкие к карбонатным породам. Скорости  $V_p = 4500$  м/с,  $V_s = 2500$  м/с и плотность  $\rho = 2.5$  г/см. Начальный импульс задавался плоской волной. Результаты расчета в виде синтетических сейсмограмм представлены на рис.5.



На рис.5А – сейсмограммы для случая модели пустой трещины. Слева направо представлены сейсмограммы: X-компонента скорости для трещины высотой 40м, Z-компонента для трещины высотой 40м, X-компонента скорости для трещины высотой 200м, Z-компонента для трещины высотой 200м. Аналогичные результаты для флюидонасыщенной трещины – на рис.5Б.

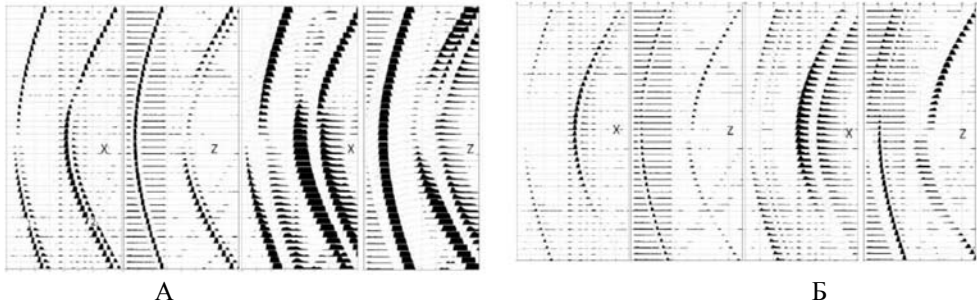


Рис.5. Сейсмограммы отклика одиночной трещины.

Отклик от одиночной макротрещины состоит из дифрагированных волн – продольных и обменных. Они генерируются верхним и нижним концами трещины. При высоте макротрещины порядка длины сейсмической волны и более фиксируется их отдельная регистрация. При уменьшении высоты трещины одноименные волны сближаются и формируют единую волну. Влияние заполнения субвертикальной макротрещины газом или флюидом на характер ее отклика весьма значительно. При насыщении ее газом интенсивность волн отклика в несколько раз выше, чем при заполнении жидкостью [32, 36]. Также существенно отличие в характере фазового прослеживания (смены фаз) одноименных дифрагированных волн.

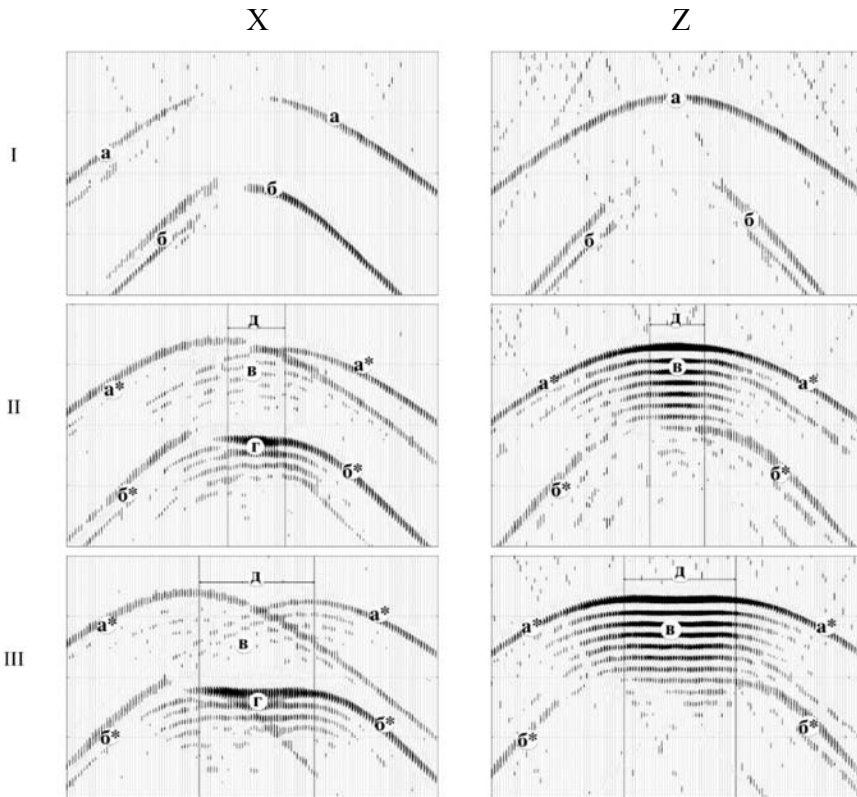
При заполнении макротрещины жидкостью наилучшие условия ее выделения (интенсивность и отсутствие смены фаз) обеспечиваются регистрацией обменной дифрагированной волны при записи горизонтальной (X) компоненты. При заполнении газом наилучшие условия для выделения макротрещины обеспечиваются на вертикальной (Z) компоненте для продольной дифрагированной волны. Остальные волны осложнены сменой полярности или обширной зоной ослабления.

### Отклик от кластера (системы) субвертикальных макротрещин

Изучался отклик от кластера (системы) субвертикальных параллельных макротрещин [30, 36]. Вмещающая среда для исследуемых моделей была принята близкой карбонатным породам со скоростью продольных волн  $V_p=4500\text{м/с}$ , поперечных волн –  $V_s=2500\text{м/с}$  и плотностью  $\rho=2.5\text{г/см}^3$ . Рассчитываемая область интегрирования прямоугольной формы имела фи-

зические размеры в ширину до 7000 м и в глубину 4000 м. Макротрещины (их центры) располагались на глубине 2000 м, их базовая высота  $h = 100$  м.

Возбуждение осуществлялось на дневной поверхности. Профиль сигнала задавался прямоугольным импульсом с частотой 30 Гц. Использовалось возбуждение колебаний: типа «горизонтальный плоский фронт – ПФ» (при современной обработке ввод кинематических поправок приводит отражения к форме, близкой к получаемой при ПФ) Толщины (раскрытость) макротрещин (в реальных условиях от долей до первых миллиметров) задавалась условием контакта, т.е. толщина была минимальна.



**Рис.6.** Сейсмограммы, характеризующие волновой отклик систем газонасыщенных трещин в однослойной среде.

Результаты представлялись в виде серии волновых картин для фиксированных моментов времени и в виде сейсмограмм – записи сигналов на дневной поверхности. Параметры системы (кластера) макротрещин: их число ( $N$ ); интервал между макротрещинами ( $d$ ); высота макротрещины ( $h$ ); заполнение (газ/жидкость) и ширина кластера ( $L$ ) были переменными.

На рис.6 представлены сейсмограммы регистрации вертикальной ( $Z$ ) и заполненной горизонтальной ( $X$ ) компоненты записи на дневной поверхно-

сти от одиночной макротрещины (I) и кластеров макротрещин шириной ( $L$ ) 1000м и 2000м (II и III) при их заполнении газом.

На рис.7 представлен аналогичный набор сейсмограмм, но для макротрещин с жидкостью. Их рассмотрение позволяет отметить [36]:

а) На сейсмограммах с регистрацией вертикальной  $Z$  компоненты записи отмечается высокий уровень волн-помех, связанных с шумами вычислений, и слабые полезные сигналы – отклики от кластера, которые лишь незначительно интенсивнее дифрагированных волн от одиночной макротрещины. Это, по-видимому, связано со сменой фаз в середине гиперболических годографов и у продольной, и у обменной дифрагированной волны на этой компоненте, что приводит к взаимному гашению сигналов при их суммировании.

б) На сейсмограммах с регистрацией горизонтальной  $X$  компоненты уровень вычислительных шумов заметно ниже. На времени продольной дифрагированной волны ( $Dpp$ ) наблюдается интерференция двух почти прямолинейных фронтов волн. Интенсивность этих волн близка к значениям их аналогов от одиночных макротрещин. Их пересечение совпадает с серединой кластера.

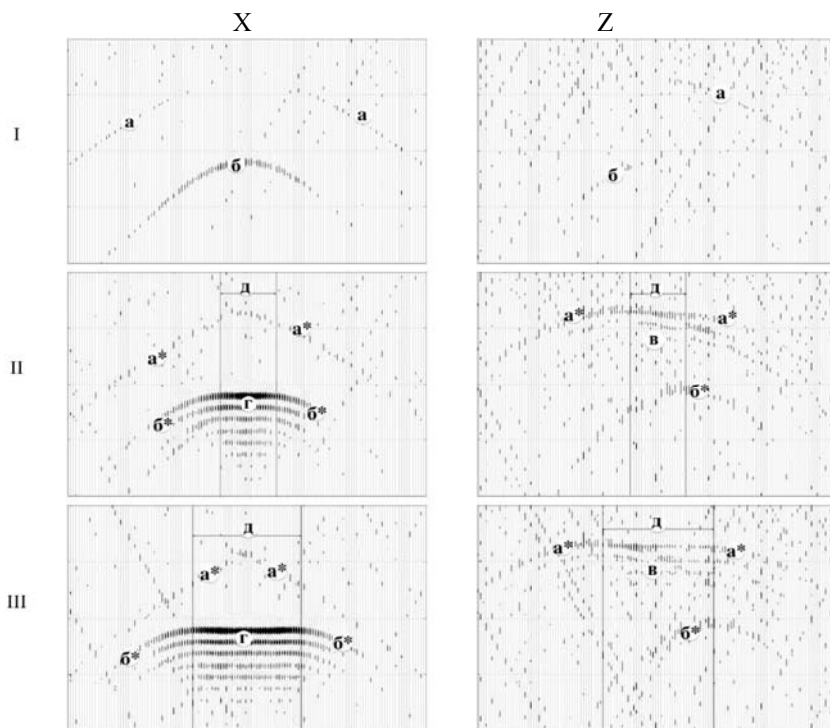
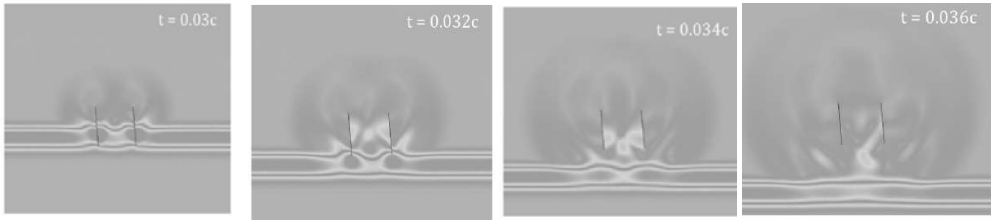


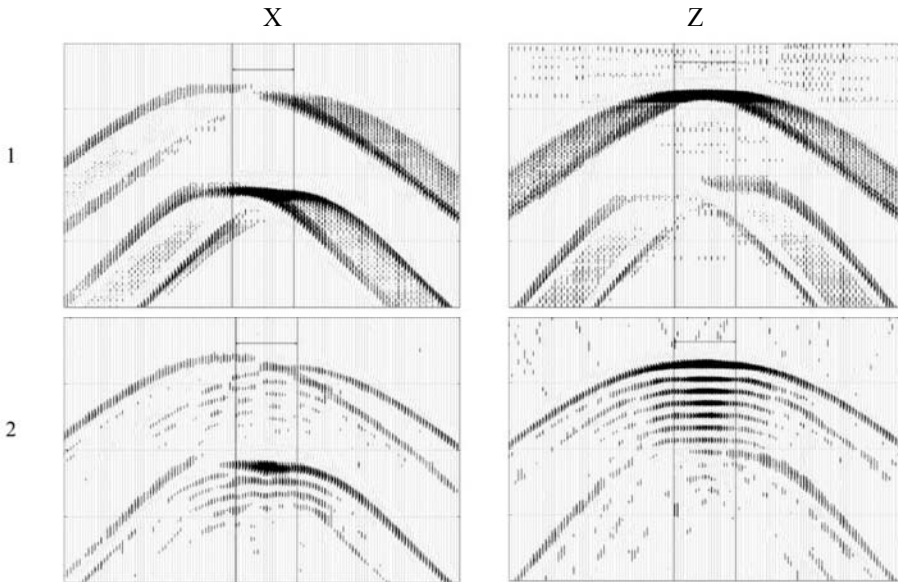
Рис.7. Сейсмограммы, характеризующие волновой отклик систем газонасыщенных трещин в однослойной среде.

На времени прихода обменных дифрагированных волн ( $Dps$ ) непосредственно под кластером наблюдается 4-5-фазный волновой отклик. Первая фаза наиболее интенсивна, последующие фазы быстро ослабевают. Горизонтальные участки первых фаз примерно соответствуют местоположению и протяженности кластера. За пределами границ кластера происходит ослабление сигналов. Амплитуды многофазного фронта на порядок превышают амплитуды всех других волн на сейсмограмме.

Причины как самой многофазности, так и ее изменения с детальностью расчетов потребовали специальных экспериментов. Для выяснения характера формирования отклика при прохождении падающего фронта через фрагмент кластера из двух макротрещин получены несколько последовательных по времени ( $t$ ) волновых картин (рис.8). Они показали, помимо известных элементов отклика от трещин, образование межтрещинных отражений [36].



**Рис.8.** Волновые картины, иллюстрирующие образование межтрещинных отражений, подпитывающих колебательную энергию отклика в момент времени  $t$ .



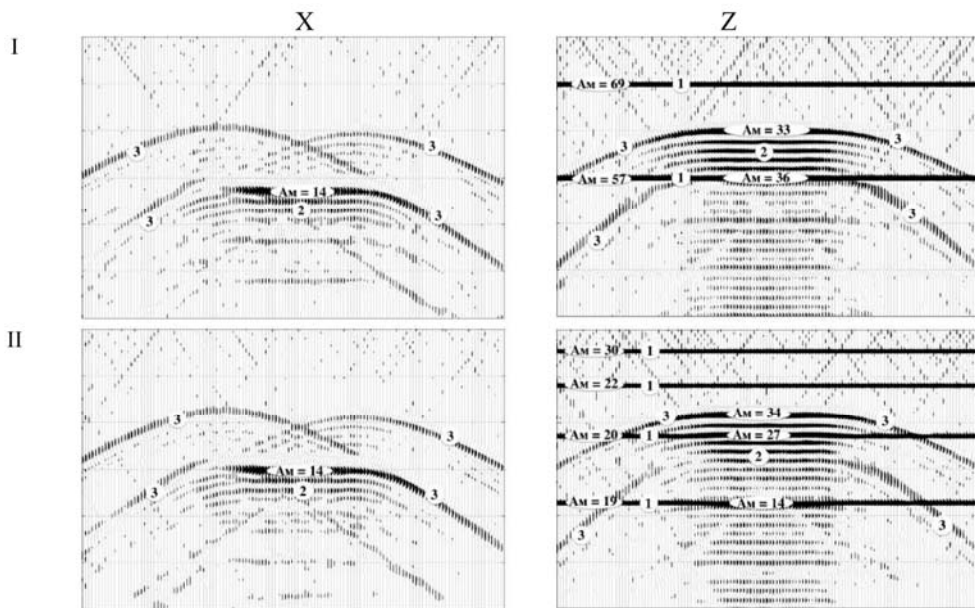
**Рис.9.** Сравнение сейсмограмм: суммы 11-ти единичных откликов от 11 макротрещин кластера (1) и обычного отклика от всего кластера из 11 макротрещин.

Для подтверждения предположения о влиянии межтрещенных отражений на многофазность отклика была получена сумма волновых полей 11-ти откликов от 11 единичных макротрещин кластера (рис.9-1). В этом случае, в отличие от обычного отклика, от этого кластера (рис.9-2) многофазность отсутствует. Таким образом, показано, что многофазность является характерным свойством фронта рассеянных волн от системы (кластера) субпараллельных макротрещин.

### Многослойная геологическая среда

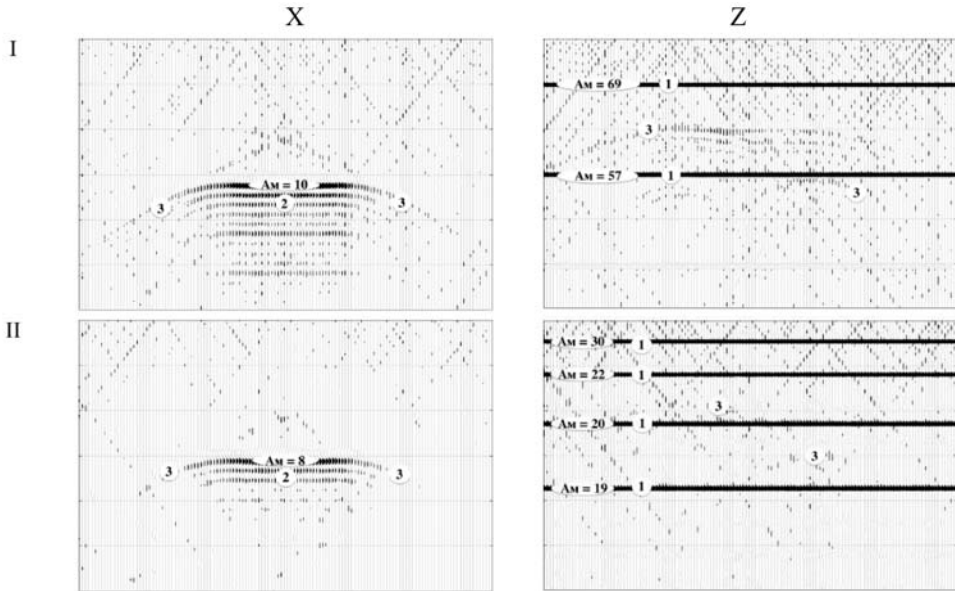
Расчеты выполнены для трех- и пятислойной модели среды, имитирующей карбонатный разрез с постепенно увеличивающейся акустической жесткостью слоев с глубиной [36]. Их толщины превышают 5 длин сейсмической волны. Кластеры макротрещин расположены соответственно во втором и в третьем слое (рис.10, 11).

При газонасыщении макротрещин и регистрации вертикальной ( $Z$ ) компоненты фронт продольных рассеянных волн проявляет себя как многофазная (5-6 фаз) последовательность горизонтальных осей синфазности. Интенсивность фронта рассеянных волн в 2 раза меньше интенсивности отражений от границ с коэффициентами отражения ( $K_{omp}$ ) порядка 18% (рис.10-I) и превышает по интенсивности отражения от нерезких границ с  $K_{omp}$  порядка 10% (рис.10-II).



**Рис.10.** Сейсмограммы отклика трещинного газонасыщенного кластера в многослойных средах.

На сейсмограмме с регистрацией горизонтальной ( $X$ ) компоненты многофазность фронта рассеянных обменных волн от кластера существенно меньше (2-3 фазы). При этом фронт регистрируется при отсутствии отражений от горизонтальных границ. Мешающий фон для его выделения создают гиперболические фрагменты дифрагированных продольных и обменных волн от концов кластера, но их интенсивность в 5 раз меньше, чем у фронта рассеянных обменных волн.



**Рис.11.** Сейсмограммы отклика трещинного флюидонасыщенного кластера в многослойных средах.

При заполнении макротрещин кластера жидкостью (рис.11) на сейсмограммах регистрации вертикальной ( $Z$ ) компоненты фронт продольных рассеянных волн сопоставим с вычислительными шумами и едва просматривается (в 10-20 раз меньше) по сравнению с отражениями от горизонтальных границ.

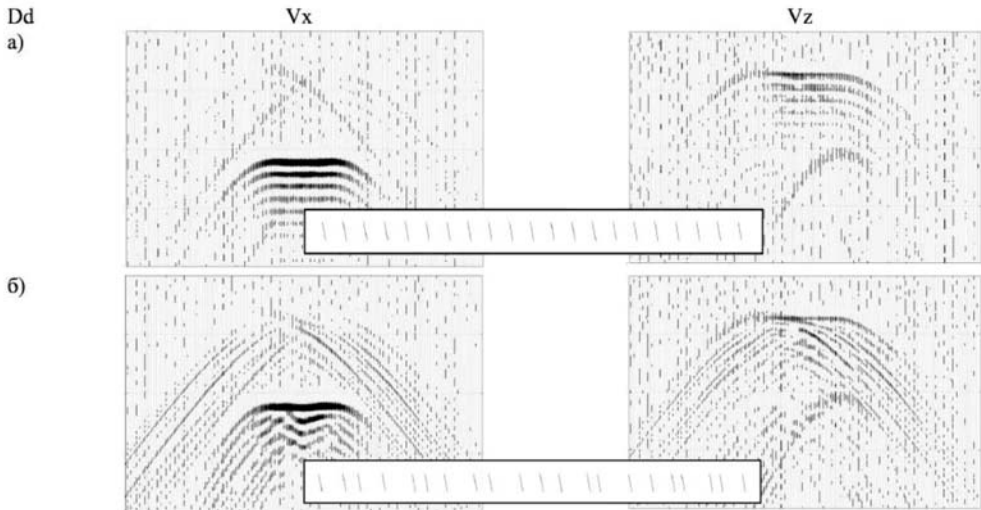
На сейсмограммах с регистрацией горизонтальной ( $X$ ) компоненты наблюдается достаточно интенсивный (с трехкратным и более превышением над фоном) фронт рассеянных обменных волн (2-3 фазы) при полном отсутствии горизонтальных отражений и других мешающих волн – ситуация для выделения кластера оптимальная (рис.11-I, II).

### **Исследование устойчивости образования фронта рассеянных обменных волн от системы макротрещин**

Для исследования этого вопроса [37] использовались модели кластеров

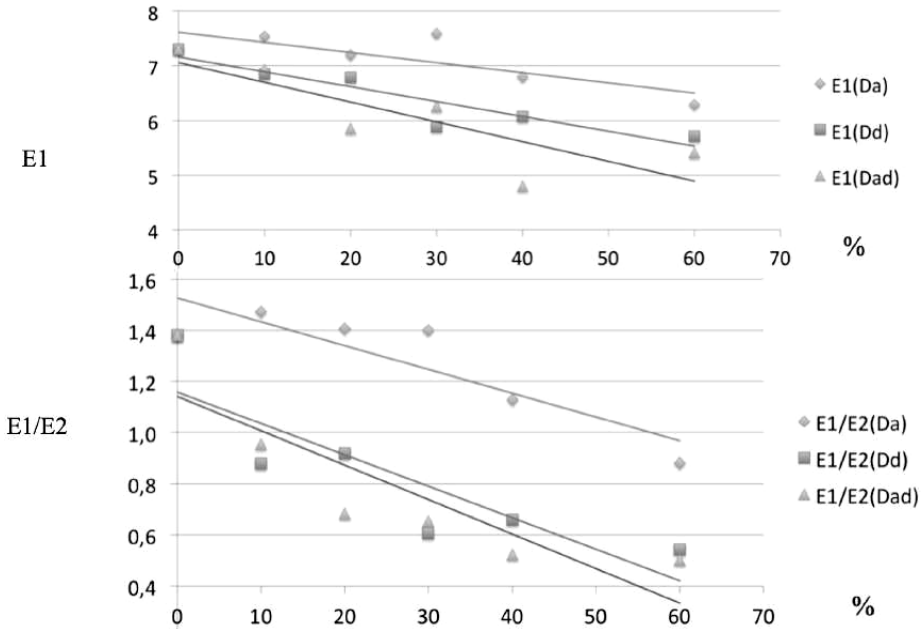
шириной 2000м из 21 макротрещины при среднем расстоянии между ними ( $d$ ) 100м, с высотой макротрещин 100м и наклоном в среднем, равным  $10^\circ$ . Вмещающая среда соответствовала карбонатной породе с параметрами:  $V_p=4500\text{м/с}$ ,  $V_s=2500\text{м/с}$  и  $\rho=2500\text{кг/м}$ . Макротрещины заполнены жидкостью или газом.

Методика анализа предусматривала расчет волновых полей с получением сейсмограмм на  $X$  и  $Z$  компонентах для кластеров с постоянными и с изменяемыми параметрами, а также сейсмограмм их разностей. По ним рассчитывались оценки энергии фронта рассеянных обменных волн (три первых четко выраженных фазы, по протяженности близкие к размеру кластера) –  $E1$ , а также остальной части волнового поля –  $E2$ .



**Рис.12.** Сейсмограммы отклика от кластера трещин в идеальном случае (а) и при дисперсии расстояний между трещинами 40% (б).

Для оценки влияния дисперсии расстояния между трещинами численное моделирование было выполнено для модификаций базовой модели, охарактеризованной выше, со случайным отклонением интервалов в среднем равным 10%, 20%, 30%, 40% и 60% от номинала ( $d$ ), равного 100м. На рис.12 представлены сейсмограммы волновых откликов от кластера макротрещин с уровнем изменчивости интервалов 40% в сопоставлении с идеальным кластером ( $d=\text{const}$ ). Видно, что фронт рассеянных обменных волн, особенно его первая фаза, слабо меняется с ростом изменчивости интервалов ( $d$ ), тогда как уровень волн – помех (дифрагированных продольных волн от краевых макротрещин кластера) возрастает ощутимо. Эти наблюдения подтверждаются и количественными оценками энергии волновых компонент, графики которых приведены на рис.13.



**Рис.13.** Графики зависимости значений энергетических характеристик отклика от кластера трещин от значения дисперсий угла и расстояния между трещинами.

С целью анализа влияния изменчивости угла наклона трещин на структура волнового отклика представлялось целесообразным рассмотреть два диапазона изменений угла наклона макротрещин в их кластере. Первый соответствует условию однонаправленности с незначительными отклонениями, измеряемыми единицами градусов, что отвечает диапазону от 0% до 100% базового значения угла (в нашем случае 10°). Второй соответствует существенно большему разбросу наклонов макротрещин, что может быть обусловлено несколькими циклами образования трещин или другими причинами. Рассматривался диапазон от 0% до 40% максимальной величины наклона (90°). Соответственно, в нем отклонения измерялись десятками градусов.

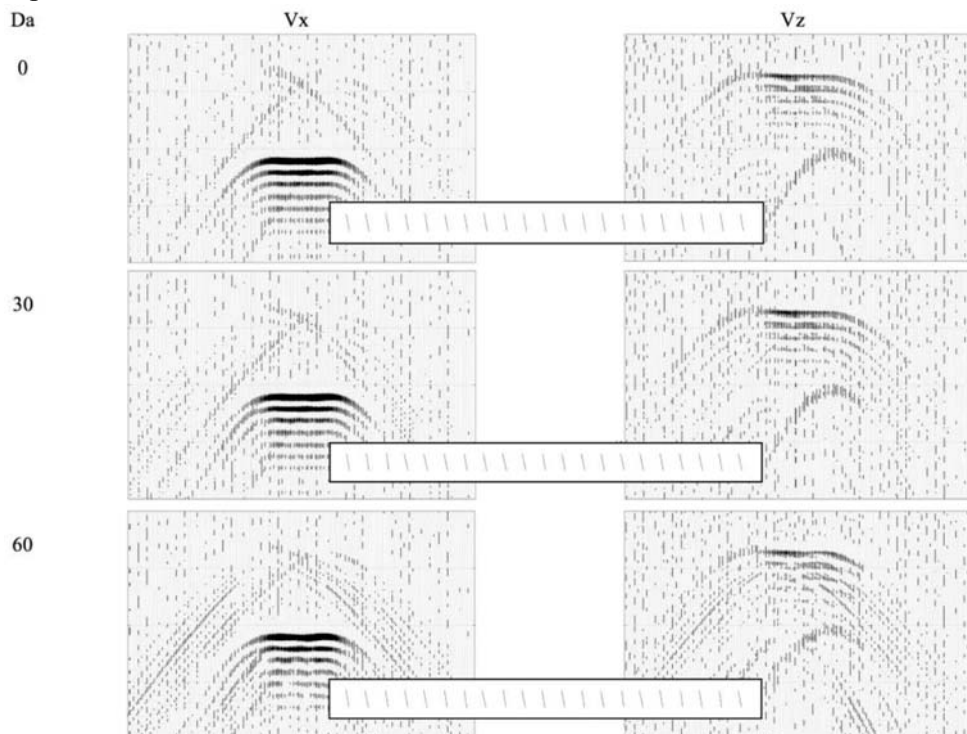
Разброс наклонов для каждого уровня задавался датчиком случайных чисел при обеспечении в среднем предусмотренного процентного уровня.

На рис.14 приведены сейсмограммы регистрации  $X$  и  $Z$  компонент записи в рамках первого диапазона, иллюстрирующие характер фронта рассеянных обменных волн от кластера макротрещин со слабой изменчивостью их наклонов. Из их рассмотрения следует вывод о практической неизменности волновой картины при среднем отклонении углов до 30%.

Графическое представление этих зависимостей приведено на рис.13. Количественная оценка подтверждает выводы визуального анализа. В рас-



смотренном диапазоне средних значений углов отклонения ( $\alpha$ ) от базового наклона макротрещин (0% – 60%) энергия обменного рассеянного фронта уменьшается на 14%, а соотношение сигнал/помеха сокращается до 64%. При этом отклонения до 30% вообще не вызывают заметных изменений энергии.

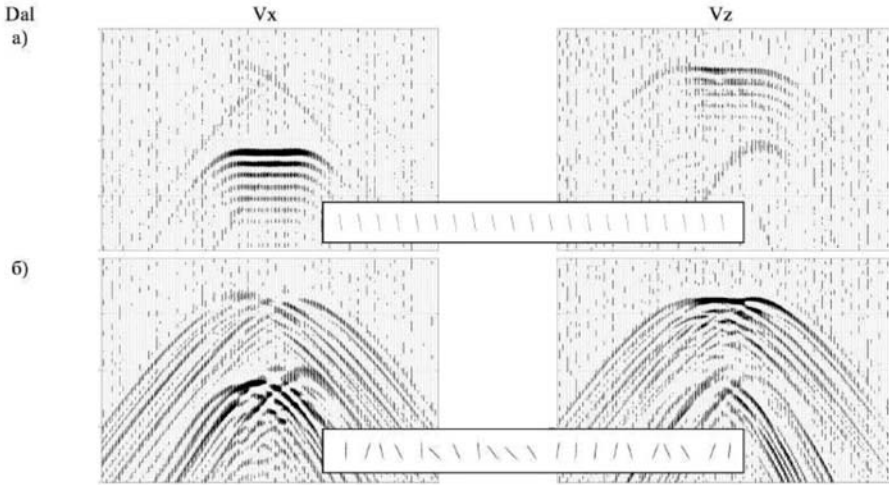


**Рис.14.** Сейсмограммы отклика от кластера трещин в идеальном случае и при дисперсии угла наклона трещин в малом интервале 30% и 60%.

Результаты расчетов для второго диапазона отклонений от базового угла, измеряемого десятками градусов, приведены на рис. 15.

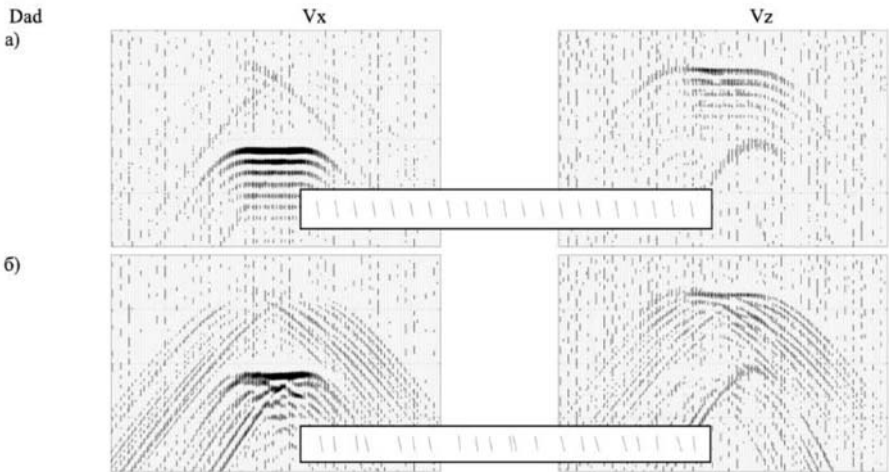
Сопоставление сейсмограмм от кластера макротрещин с одинаковым наклоном и с изменчивостью наклонов в кластере в 10% сразу выявляет резкое увеличение интенсивности волн-помех с крутыми фронтами. Это вероятно связано с генерацией дополнительных дифрагированных волн от концов макротрещин резко отличающихся по наклону от большинства макротрещин в кластере.

При больших значениях разброса 20% и 40% относительная интенсивность помех еще значительнее. Трехфазный фронт рассеянных обменных волн при 20% разбросе претерпевает ряд разрывов, а при 40%-м – полностью разрушается.



**Рис.15.** Сейсмограммы отклика от кластера трещин в идеальном случае (а) и при дисперсии угла наклона трещин в большом интервале 40% (б).

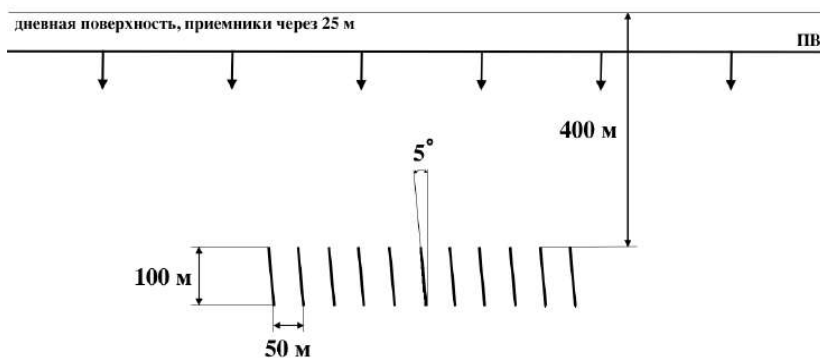
В реальных условиях в системах однонаправленных макротрещин скорее всего будет иметь место некоторый разброс (дисперсия) обоих параметров. Оценка совместного влияния обоих факторов выполнена для равного в процентах уровня их разброса в каждом отдельном расчете.



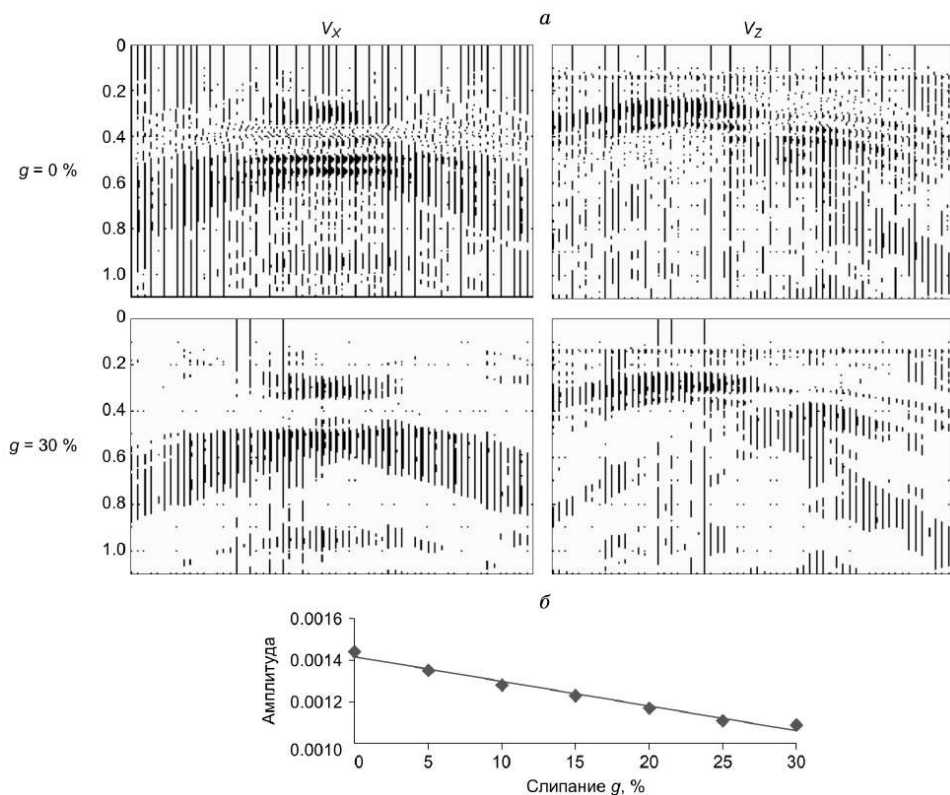
**Рис.16.** Сейсмограммы отклика от кластера трещин в идеальном случае (а) и при совместной дисперсии угла наклона трещин и расстояния между ними 60% (б).

На рис.16 представлены сейсмограммы для следующих значений совместного разброса 60%. На рис.13 изображены графические зависимости этих величин и их отношений от уровня изменчивости параметров (разброса значений  $a$  и  $d$ ).

В целом можно считать, что фронты рассеянных обменных волн от систем однонаправленных макротрещин достаточно устойчивы к умеренным уровням изменчивости параметров (наклонов макротрещин и интервалов между ними) [37].



**Рис.17.** Схема численного эксперимента для исследования откликов от трещин, заданных различными моделями.

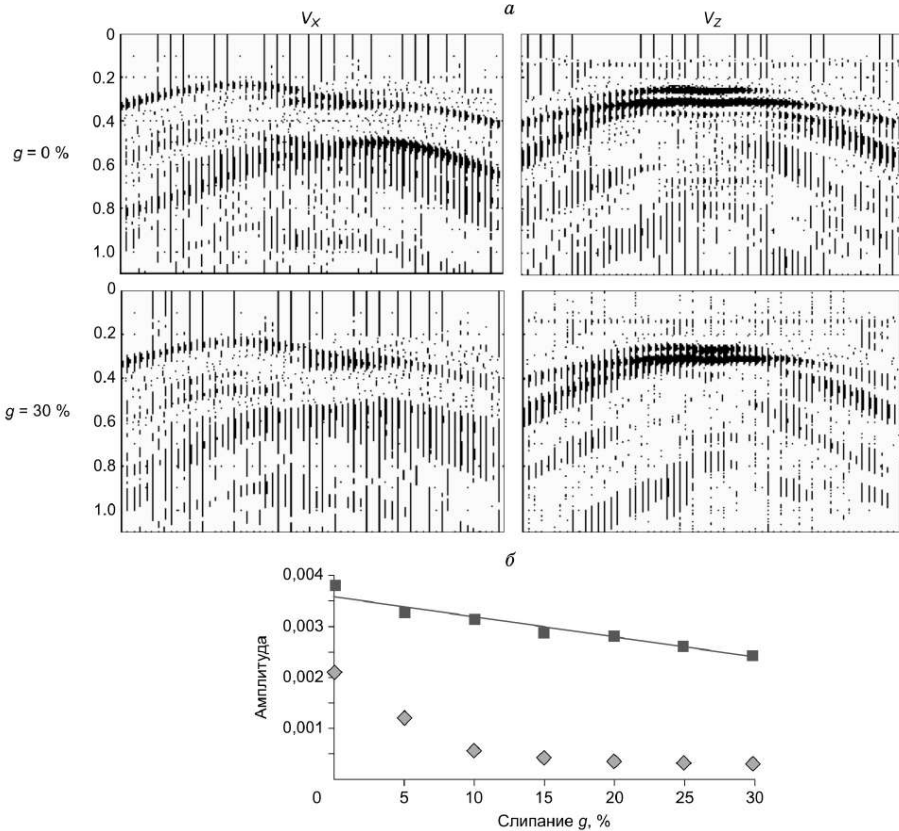


**Рис.18.** Сейсмограммы отклика от кластера частично слипшихся флюидонасыщенных трещин при слипании 0% и 30% (а), график зависимости амплитуды отклика от коэффициента слипания (б).

### Исследование откликов от различных моделей трещин

Было проведено исследование различий в структуре откликов от различных моделей трещин [33, 39]. Физические параметры вмещающей среды:  $V_p = 2300$  м/с,  $V_s = 1300$  м/с,  $\rho = 1200$  кг/м<sup>3</sup>. 11 трещин на глубине 400 м, высота трещин 100 м, наклон  $\alpha = 5$  градусов, расстояние между ними 50 м. Размер расчетной области  $6 \times 0.7$  км. Начальный импульс представлял собой плоский продольный волновой фронт (ПВ). Отклики регистрировались на поверхности наблюдения сейсмоприемниками, расположенными через 25 м. Схема расчетного эксперимента представлена на рис.17.

Сначала рассмотрим полученные результаты для частично слипшихся флюидонасыщенных (рис.18) и пустых (газонасыщенных) (рис.19) трещин.



**Рис.19.** Сейсмограммы отклика от кластера частично слипшихся газонасыщенных трещин при слипании 0% и 30% (а), график зависимости амплитуды отклика от коэффициента слипания (б).

Для флюидонасыщенных трещин была выявлена линейная зависимость амплитуды  $D_{ps}$ -волны в отклике от коэффициента слипания. Ее значение равномерно убывает при увеличении доли слипшихся поверхностей.

При этом отмечается примерное соответствие доли снижения интенсивности целевой обменной Dps-волны доле слипшейся поверхности трещины. В случае пустых трещин рассматривались зависимости как Dpp, так и Dps волн в отклике от нашего коэффициента  $g$ .

Амплитуды волн Dpp также линейно убывают. Линейность для Dps-волны нарушается при слипании более 10%, так как в этом случае амплитуда отклика становится сопоставимой с погрешностью расчета.

В заключение следует отметить, что при умеренных (до 30%) значениях доли площади слипания контактирующих поверхностей флюидонасыщенных трещин обменная дифрагированная волна на X-компоненте ослабляется примерно на такой показатель, как и площадь слипания, и сохраняет способность нести информацию о трещине.

При слипании газонасыщенных трещин аналогичный умеренный уровень ослабления, соответствующий доле слипшихся поверхностей трещин, испытывает продольная дифрагированная волна, регистрируемая на Z-компоненте.

Рассмотренная методика численного моделирования была верифицирована методами физического моделирования [43]. Результаты сопоставления представлены в [38].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорофеева Е.В.* Тектоническая трещиноватость горных пород и условия формирования трещинных коллекторов нефти и газа. – М.: Недра, 1986, 231 с.  
*Dorofeeva E.V.* Tektonicheskaja treshcinovatost' gornykh porod i usloviia formirovaniia treshchinnykh kollektorov nefi i gaza. – М.: Nedra, 1986, 231 s.
2. *Козлов Е.А.* Модели среды в разведочной сейсмологии. – Тверь: ГЕРС, 2006, 480 с.  
*Kozlov E.A.* Modeli sredy v razvedochnoj sejsmologii. – Tver': GERS, 2006, 480 s.
3. *Hadson J.A.* Effective-medium theories for fluid-saturated materials with aligned cracks // *Geophysical Prospecting*, 2001, v.49, No 5, p.509-522.
4. *Coates R.T., Schoenberg M.* Finite-difference modeling of faults and fractures // *Geophysics*, 1995, v.60, p.1514–1523.
5. *Grechka V., Kochanov M.* Effective elasticity of fractured rocks: A snapshot of progress // *Geophysics*, 2006, v.71, No 6, p. 45-58.
6. *Xu Y., Chapman M., Li X.Y., Main I.G.* Effects of Fracture Spacing on Seismic Wave Propagation: A 3D Numerical Simulation Study on Discrete Fracture Models // 72 EAGE Conference, 2010, 108 p.
7. *Schoenberg M.* Elastic wave behavior across linear slip interfaces // *J. Acoust. Soc.*, 1980, p. 1516-1521.
8. *Tomsen L.* Weak elastic anisotropy // *Geophysics*, 1986. Vol. 51. P. 1954-1966.
9. *Bakulin A., Grechka V., Karaev N., Anisimov A., Kozlov E.* Physical modeling and theoretical studies of seismic reflections from a fault zone // *SEG*, 2004, p.1674-1677.
10. *Nakagawa S., Nihei K.T., Myer L.R.* Numerical modeling of 3D elastic wave scattering off a layer containing parallel periodic fractures // *SEG*, 2002, p.1967–1970.

11. *Масюков А.В., Масюков В.В., Шленкин В.И.* Проверка значимости корреляционных связей в геолого-геофизическом прогнозировании // Технологии сейсморазведки, 2007, №1, с. 80-86.  
*Masyukov A.V., Masyukov V.V., Shlenkin V.I.* Proverka znachimosti korrelyatsionnykh svyazei v geologo-geofizicheskom prognozirovanii // Seismic Technologies, 2007, N 1, p.80-86.
12. *Козлов Е.А., Баранский Н.Л., Семенцов В.Ф., Аксенова Н.А.* Раздельное изображение зеркальных и рассеивающих геологических объектов по данным 3D-сейсморазведки // Технологии сейсморазведки, 2004, №2, с.4-16.  
*Kozlov E.A., Baranskij N.L., Sementsov V.F., Aksenova N.A.* Razdelnoe izobrazhenie zerkalnykh i rasseivaiushchikh geologicheskikh ob'ektov po dannym 3D-sejsmorazvedki // Tekhnologii sejsmorazvedki, 2004, №2, s. 4-16.
13. *Кремлев А.Н., Ерохин Г.Н., Стариков Л.Е., Зверев М.А.* Прогноз коллекторов трещинно-кавернозного типа по рассеянным сейсмическим волнам // Технологии сейсморазведки, 2008, №3.  
*Kremlev A.N., Erokhin G.N., Starikov L.E., Zverev M.A.* Forecast of crack and cavernous reservoirs in carbonate, clay and magmatic rocks based on scattered seismic waves // EAGE, 2008, p.1-5.
14. *Кузнецов О.Л., Курьянов Ю.А., Чиркин И.А., Шленкин С.И.* Сейсмический локатор бокового обзора // Геофизика, спецвыпуск: 40 лет Тюменьнефтегеофизике, 2004, с.17-22.  
*Kuznetsov O.L., Kurianov Iu.A., Chirkin I.A., Shlenkin S.I.* Sejsmicheskij lokator bokovogo obzora // Geofizika, spetsvypusk: 40 let Tiumenneftegeofizike, 2004, s.17-22.
15. *Магомедов К.М., Холодов А.С.* Сеточно-характеристические численные методы. – М.: Наука, 1988, 288 с.  
*Magomedov K.M., Kholodov A.S.* Setochno-kharakteristicheskie chislennye metody. – М.: Nauka, 1988, 288 s.
16. *Петров И.Б., Холодов А.С.* Численное исследование некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // ЖВМиМФ, 1984, т.24, № 5, с. 722-739.  
*Petrov I.B., Kholodov A.S.* Numerical study of some dynamic problems of the mechanics of a deformable rigid body by the mesh-characteristic method // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1984, v.24, Issue 3, p.61-73.
17. *Петров И.Б., Тормасов А.Г., Холодов А.С.* Об использовании гибридных сеточно-характеристических схем для численного решения трехмерных задач динамики деформируемого твердого тела // ЖВМиМФ, 1990, т.30, № 8, с.1237-1244.  
*Petrov I.B., Tormasov A.G., Kholodov A.S.* On the use of hybrid grid-characteristic schemes for the numerical solution of three-dimensional problems in the dynamics of a deformable solid // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1990, v. 30, Issue 4, p.191-196.
18. *Гольдин С.В.* Введение в геометрическую сейсмику. – Новосибирск: Новосибирский Государственный Университет, 2005, 264 с.
19. *Шевченко А.А.* Сейсмические исследования в скважинах. – М.: МГУ, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, 2007. – 136 с.
20. *Алексеев А.С., Гельчинский Б.Я.* О лучевом методе вычисления полей волн в случае неоднородных сред с криволинейными границами разреза // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1959, № 3, с.107-116.  
*Alekseev A.S., Gelchinskij B.Ia.* O luchevom metode vychisleniia polej voln v sluchae

- neodnorodnykh sred s krivolinejnymi granitsami razreza // *Voprosy dinamicheskoy teorii rasprostraneniia sejsmicheskikh voln.* - L.: Izd-vo LGU, 1959, №3, s. 107-116.
21. *Gassmann F.* Elastic waves through a packing of spheres // *Geophysics*, 1951, v.16, № 4, p.673-685.
  22. *Raymer L.L.* An improved sonic transit time-to-porosity transform // *SPWLA 21<sup>st</sup> Ann. Logging Symp.*, 1980, p. 1-12.
  23. *Gardner G.H.F., Canning A.* AVA analysis after velocity-independent DMO and imaging // *Geophysics*. 1998, v.63, No 20, p. 686-691.
  24. *Ursenbach C.P.* Generalized Gardner relations // *72<sup>nd</sup> Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts*, 2002, p.1885-1888.
  25. *Frenher M., Schmalholz S.M.* Finite-element simulation of Stoneley guided-wave reflection and scattering at the tips of fluid-filled fractures // *Geophysics*, 2010, v.5, No 2, p.T23-T36.
  26. *Kosloff D., Baysal E.* Forward modeling by a Fourier method // *Geophysics*, 1982, v.47 (10), p.1402-1412.
  27. *Priolo E., Carcione J.M., Seriani G.* Numerical simulation of interface waves by high-order spectral modeling techniques // *J. Acoust. Soc. Am.*, 1994, v.95, p.681-693.
  28. *Hesthaven J.S., Warburton T.* Nodal discontinuous Galerkin methods: algoths, analysis, and applications // *Texts in Applied Mathematics*. Springer. 2008, v.54.
  29. *Новацкий В.К.* Теория упругости. – М.: Мир, 1975, 872 с.  
*Novatskij V.K.* Teoriia uprugosti. – М.: Mir, 1975, 872 s.
  30. *Муратов М.В., Петров И.Б.* Расчет волновых откликов от систем субвертикальных макротрещин с использованием сеточно-характеристического метода // *Математическое моделирование*, 2013, т.25, №3, с 89-104.  
*Muratov M.V., Petrov I.B.* Estimation of wave responses from subvertical macrofracture systems using a grid characteristic method // *MM&CS*, 2013, v.5, Iss. 5, p.479-491.
  31. *Бирюков В.А., Муратов М.В., Петров И.Б., Санников А.В., Фаворская А.В.* Применение сеточно-характеристического метода на неструктурированных тетраэдральных сетках в решении прямых задач сейсморазведки трещиноватых пластов // *ЖВМиМФ*, 2015, т.55, №10, с. 130-140.  
*Biryukov V.A., Muratov M.V., Petrov I.B., Sannikov A.V., Favorskaya A.V.* Application of the grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes to the solution of direct problems in seismic exploration of fractured layers // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2015, v.55, Iss.10, p.1733-1742.
  32. *Левянт В.Б., Петров И.Б., Квасов И.Е.* Численное моделирование волнового отклика от субвертикальных макротрещин, вероятных флюидопроводящих каналов // *Технологии сейсморазведки*, 2011, № 4, с.41-61.  
*Leviant V.B., Petrov I.B., Kvasov I.E.* Numerical modeling of seismic response from subvertical macrofractures as possible fluid conduits // *Seismic Technol.*, 2011, № 4, p.41-61.
  33. *Левянт В.Б., Миряха В.А., Муратов М.В., Петров И.Б.* Оценка влияния на сейсмический отклик степени раскрытости трещины и доли площади локальных контактов к ее поверхности // *Технологии сейсморазведки*, 2015, №3, с. 16-30.  
*Leviant V.B., Miriakha V.A., Muratov M.V., Petrov I.B.* Seismic responses of vertical fractures depending on their thickness // *Seismic Technologies*, 2015, № 3, p.16-30.
  34. *Korneev V.* Low-frequency fluid waves in fractures and pipes // *Geophysics*, 2010, v.75, No 6, p. N97-N107.
  35. *Лисица В.В., Поздняков В.А., Решетова Г.В., Хайдуков В.Г., Чеверда В.А., Шиликов В.В.* Рассеянные волны: численное моделирование и построение изображений. Ч.1. Двумерные среды // *Технологии сейсморазведки*, 2013, №1, с. 46-58.

- Lisitsa V.V., Pozdniakov V.A., Reshetova G.V., Khajdukov V.G., Cheverda V.A., Shilikov V.V.* Scattered seismic responses: simulation and imaging. P. 1. Two-dimensional media // *Seismic Technologies*, 2013, № 1, p. 46-58.
36. *Левянт В.Б., Петров И.Б., Муратов М.В.* Численное моделирование волновых откликов от системы (кластера) субвертикальных макротрещин // *Технологии сейсморазведки*, 2012, № 1, с. 5-21.  
*Leviant V.B., Petrov I.B., Muratov M.V.* Numerical simulation of wave responses from subvertical macrofractures system // *Seismic Technologies*, 2012, № 1, p. 5-21.
37. *Левянт В.Б., Петров И.Б., Муратов М.В., Быко С.А.* Исследование устойчивости образования фронта рассеянных обменных волн от зоны макротрещин // *Технологии сейсморазведки*. 2013, № 1, с.32-45.  
*Leviant V.B., Petrov I.B., Muratov M.V., Byko S.A.* Stability of P-to-S scattering off a system of fractures // *Seismic Technologies*, 2013, № 1, p. 32-45.
38. *Караев Н.А., Левянт В.Б., Петров И.Б., Караев Г.Н., Муратов М.В.* Оценка методами математического и физического моделирования возможности использования обменных рассеянных волн для прямого обнаружения и характеристики систем макротрещин // *Технологии сейсморазведки*, 2015, №1, с. 22-36.  
*Karaev N.A., Leviant V.B., Petrov I.B., Karaev G.N., Muratov M.V.* Detection and characterization of fracture system's from P-to-S scattering: potentiality checks by physical modelling and simulations // *Seismic Technologies*, 2015, № 1, p.22-36.
39. *Муратов М.В., Петров И.Б., Квасов И.Е.* Численное решение задач сейсморазведки в зонах трещиноватых резервуаров // *Мат. моделирование*, 2016, т.28, №7, с.31-44.  
*Muratov M.V., Petrov I.B., Kvasov I.E.* Numerical solution of exploration seismology problems in areas of fractures reservoirs // *Matem. Mod.*, 2016, t.28, s. 31-44.
40. *Левянт В.Б., Петров И.Б., Челноков Ф.Б.* Природа рассеянного сейсмического отклика от зон диффузионной кавернозности и трещиноватости в массивных породах // *Геофизика*, 2005, № 6, с. 5-19.  
*Leviant V.B., Petrov I.B., Chelnokov F.B.* Nature of the scattered seismic response from zones of random clusters of cavities and fractures in a massive rock // *Geophysical Prospecting*, 2007, v.55, Iss. 4, p. 507-524.
41. *Левянт В.Б., Петров И.Б., Панкратов С.А.* Исследование характеристик продольных и обменных волн отклика обратного рассеяния от зон трещиноватого коллектора // *Технологии сейсморазведки*, 2009, №2.  
*Leviant V.B., Petrov I.B., Pankratov S.A.* Issledovanie kharakteristik prodol'nykh i obmennykh voln otklika obratnogo rasseianiia ot zon treshchinovatogo kollektora // *Tekhnologii sejsmorazvedki*, 2009, №2.
42. *Фаворская А.В., Беклемышева К.А., Петров И.Б.* Численное моделирование процессов в твердых деформируемых средах при наличии динамических контактов с помощью сеточно-характеристического метода // *Тр. МФТИ*, 2013, т.5, №3 (19), с.3-10.  
*Favorskaia A.V., Beklemysheva K.A., Petrov I.B.* Chislennoe modelirovanie protsessov v tverdykh deformiruemykh sredakh pri nalichii dinamicheskikh kontaktov s pomoshchiu setochno-kharakteristicheskogo metoda // *Trudy MFTI*, 2013, t. 5, № 3 (19), s. 3-10.
43. *Караев Н.А., Лукашин Ю.П., Прокоптор О.М., Семенов В.П.* Физическое моделирование трещиноватых сред // *Технологии сейсморазведки*, 2008, №2, с. 64-73.  
*Karaev N.A., Lukashin Yu.P., Prokator O.M., Semenov V.P.* Fizicheskoe modelirovanie treshchinovatykh sred // *Tekhnologii sejsmorazvedki*, 2008, №2, s. 64-73.

Поступила в редакцию 29.11.17

После доработки 25.06.18

Принята к публикации 10.09.18