УДК: 519.63

Численное моделирование прямых трехмерных задач сейсморазведки с применением сеточно-характеристического метода на неструктурированных тетраэдральных сетках

И. Б. Петров^а, М. В. Муратов^б, А. В. Фаворская^в,
В. А. Бирюков^г, А. В. Санников^д

Московский физико-технический институт, кафедра информатики,
Россия, 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

E-mail: ^аpetrov@mipt.ru, ^бmax.muratov@gmail.com, ^вaleanera@yandex.ru,
^гbiryukov.vova@gmail.com, ^дdonxenapo@gmail.com

Получено 6 ноября 2014 г.,
после доработки 22 июня 2015 г.

В статье приводятся результаты трехмерного моделирования сейсмических откликов от трещиноватых геологических пластов с использованием сеточно-характеристического метода на неструктурированных тетраэдральных сетках с применением высокопроизводительных вычислительных систем. Используемый метод лучше всего подходит для моделирования задач сейсморазведки в областях с большим числом неоднородностей (трещин). Применение неструктурированных тетраэдральных сеток позволяет задавать трещины произвольной геометрии и пространственной ориентации, что дает возможность решать задачи в постановке, наиболее приближенной к реальности.

Ключевые слова: численное моделирование, сеточно-характеристический метод, неструктурированные тетраэдральные сетки, высокопроизводительные вычислительные системы, сейсморазведка, трещиноватые среды

Numerical modeling of straight 3D exploration seismology problems with use of grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes

I. B. Petrov, M. V. Muratov, A. V. Favorskaya, V. A. Biryukov, A. V. Sannikov

*Moscow Institute of Physics and Technology, Computer Science Department,
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia*

Abstract. — The article contains results of 3D modeling of seismic responses from fractured geological formations with use of grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes with use of high-performance computation systems. The method being used is the most suitable for modeling of heterogenic domains exploration seismology problems. The use of unstructured tetrahedral meshes allows modeling of different geometry and space orientation fractures. That gives us possibility to solve the problems in the most real set.

Keywords: numerical modeling, grid-characteristic method, unstructured tetrahedral meshes, high-performance computations, exploration seismology, fractured media

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 875–887 (Russian).

Результаты получены в рамках работы по гранту РФФИ №14-11-00263 с использованием вычислительных ресурсов МВК НИЦ «Курчатовский институт» (<http://computing.kiae.ru/>).

Введение

Сейсморазведка — один из наиболее распространенных способов исследования пород перед непосредственным глубоким бурением скважин [Шерифф, Гелдарт, 1987]. Проводимые исследования направлены на определение структуры геологических пластов и возможного расположения месторождений углеводородов. Численное моделирование способно существенно оптимизировать процесс интерпретации сейсмических данных, способствуя уменьшению затрат при добыче нефти.

Численные эксперименты для таких задач подразумевают расчеты распространения сейсмических волн в сложных геологических средах с большим числом неоднородностей различной структуры и не имеющих каких-либо строгих закономерностей. Для наиболее точного описания такой сложной гетерогенной среды наиболее оптимальным является использование неструктурированных тетраэдральных сеток.

Сплошная линейно-упругая среда описывается гиперболической системой уравнений [Новацкий, 1975], поэтому целесообразным является применение сеточно-характеристического метода [Магомедов, Холодов, 1988; Куликовский и др., 2001; Холодов, 2008] с использованием интерполяции высоких порядков [Петров, Лобанов, 2006], что позволяет добиться наибольшей точности расчета волновых процессов.

Расчет трехмерных задач сейсморазведки является достаточно ресурсоемким процессом. Поэтому необходимо применение высокопроизводительных вычислительных систем. В работе использовался вычислительный кластер с распределенной памятью, на который были распараллелены вычислительные алгоритмы.

Стоит отметить непосредственное задание неоднородностей в области интегрирования. В этом состоит выгодное отличие подхода от распространенных моделей эффективных сред [Hsu, Schoenberg, 1993; Willis et al., 2006]. Он дает более детальные картины волнового отклика, позволяющие изучить качественно новые эффекты.

В статье описаны результаты моделирования откликов от систем однонаправленных трещин, высота которых сопоставима с длиной падающего волнового фронта. Изучение такой задачи является важным направлением современной сейсморазведки.

Постановка задачи

Рассматривалась модель геологической среды с геометрическими и физическими характеристиками, максимально приближенными к реальности.

Рассматривалась расчетная область — параллелепипед с размерами $10 \text{ км} \times 10 \text{ км} \times 3 \text{ км}$ с трещинами, расположенными на глубине 2 км. Параметры среды были приняты близкими к карбонатным породам: скорость продольных волн $V_p = 4500 \text{ м/с}$; скорость поперечных волн $V_s = 2250 \text{ м/с}$; плотность $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$.

Цель работы — изучить отклики субвертикальных трещин высотой порядка 100 м. Рассматривались три модели: 1) одиночные трещины, 2) системы (кластеры) однонаправленных трещин (рис. 1 и 3) системы перекрестных трещин (рис. 2).

В качестве начального возмущения задавался плоский волновой импульс — ступенька — с длиной волны 150 м.

Результаты расчетов фиксировались в виде волновых картин полей скоростей во всей области интегрирования и в виде синтетических сейсмограмм с приемников, расположенных на поверхности земли (дневной поверхности).

Рис. 1

Рис. 2

Математическая модель

Согласно [Новацкий В.К., 1975], состояние линейно-упругой среды описывается следующими уравнениями:

$$\rho \partial_t \bar{v} = (\nabla \cdot \sigma)^T, \quad (1)$$

$$\partial_t \sigma = \lambda (\nabla \cdot \bar{v}) \mathbf{I} + \mu (\nabla \otimes \bar{v} + (\nabla \otimes \bar{v})^T). \quad (2)$$

Уравнение (1) является локальным уравнением движения. Здесь ρ — плотность материала, $\bar{v}$ — скорость движения, σ — тензор напряжений Коши, являющийся симметричным в силу закона парности касательных напряжений. Уравнение (2) получается из закона Гука путем дифференцирования по времени. λ , μ — параметры Ляме, определяющие свойства материала.

В данной работе применяются следующие математические обозначения:

$$\partial_t a \equiv \frac{\partial a}{\partial t} \text{ — частная производная поля } a \text{ по } t;$$

$\bar{a} \otimes \bar{b}$ — тензорное произведение векторов $\bar{a}$ и $\bar{b}$, $(\bar{a} \otimes \bar{b})^{ij} = a^i b^j$;

$\mathbf{I}$ — единичный тензор второго ранга.

Численный метод

Для численного решения системы (1), (2) используется сеточно-характеристический метод на неструктурированных тетраэдральных сетках, подробно описанный в работе [Петров и др., 2006] и позволяющий строить корректные численные алгоритмы для расчета граничных точек и точек, лежащих на поверхностях раздела двух сред с разными параметрами Ляме и (или) плотностями.

На каждом шаге интегрирования по времени выбираются три произвольных направления, образующие базис, что обеспечивает независимость метода от направления, и вводится новая система координат (ξ_1, ξ_2, ξ_3) . В ней систему (1), (2) можно представить в следующем виде

$$\partial_t \bar{q} + \mathbf{A}_1 \partial_{\xi_1} \bar{q} + \mathbf{A}_2 \partial_{\xi_2} \bar{q} + \mathbf{A}_3 \partial_{\xi_3} \bar{q} = 0. \quad (3)$$

В (3) под вектором $\bar{q}$ понимается вектор, составленный из трех компонент скорости и шести компонент симметричного тензора напряжений,

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} \bar{v} \\ \boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix} = \{v_1, v_2, v_3, \sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12}\}^T,$$

а действие на вектор $\bar{q}$ матрицы, к примеру, $\mathbf{A}_1$ запишется следующим образом:

$$\mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} \bar{v} \\ \boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho} (\boldsymbol{\sigma} \cdot \bar{n}) \\ \lambda (\bar{n} \cdot \bar{v}) \mathbf{I} + \mu (\bar{n} \otimes \bar{v} + \bar{v} \otimes \bar{n}) \end{bmatrix}.$$

Здесь и далее за $\bar{n}$ обозначен единичный вектор вдоль направления ξ_1 для матрицы $\mathbf{A}_1$ соответственно.

Для каждой из трех систем вида

$$\partial_t \bar{q} + \mathbf{A}_1 \partial_{\xi_1} \bar{q} = 0 \quad (4)$$

справедливо следующее точное выражение

$$\bar{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \sum_{i=1}^I \mathbf{X}_i \bar{q}(\xi_1 - c_i \tau, \xi_2, \xi_3, t), \quad (5)$$

где c_i — собственные числа матрицы $\mathbf{A}_1$, τ — шаг интегрирования по времени, а результат действия матриц $\mathbf{X}_i$ на вектор неизвестных $\bar{q}$ можно записать следующим образом:

$$\mathbf{X}_{1,2} \begin{bmatrix} \bar{v} \\ \boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\bar{n} \cdot \bar{v}) \bar{n} \mp \frac{1}{c_1 \rho} (\mathbf{N}_{00} \div \boldsymbol{\sigma}) \bar{n} \\ \mp \rho (\bar{n} \cdot \bar{v}) ((c_1 - c_3) \mathbf{N}_{00} + c_3 \mathbf{I}) + \frac{1}{\lambda + 2\mu} (\mathbf{N}_{00} \div \boldsymbol{\sigma}) (2\mu \mathbf{N}_{00} + \lambda \mathbf{I}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_{3,4} \begin{bmatrix} \bar{v} \\ \boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix} = \mathbf{X}_{5,6} \begin{bmatrix} \bar{v} \\ \boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{2} \left[\bar{v} - (\bar{n} \cdot \bar{v}) \bar{n} \mp \frac{1}{c_2 \rho} (\boldsymbol{\sigma} \cdot \bar{n} - (\mathbf{N}_{00} \div \boldsymbol{\sigma}) \bar{n}) \right. \\ \left. \mp c_2 \rho (\bar{n} \otimes \bar{v} + \bar{v} \otimes \bar{n} - 2(\bar{n} \cdot \bar{v}) \mathbf{N}_{00}) + \bar{n} \otimes (\boldsymbol{\sigma} \cdot \bar{n}) + (\boldsymbol{\sigma} \cdot \bar{n}) \otimes \bar{n} - 2(\boldsymbol{\sigma} \div \mathbf{N}_{00}) \mathbf{N}_{00} \right]. \quad (7)$$

Для матриц $\mathbf{X}_i$ справедливо равенство

$$\sum_{c_i=0} \mathbf{X}_i = \mathbf{I} - \sum_{c_i \neq 0} \mathbf{X}_i.$$

В (6), (7):

$$\mathbf{N}_{00} = \bar{n} \otimes \bar{n}, \\ \mathbf{A} \div \mathbf{B} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{ij} B_{ij}.$$

Собственные значения всех трех матриц $\mathbf{A}_i$ выражаются через плотность и коэффициенты Ляме следующим образом:

$$c_i \in \left\{ \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}, -\left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}, \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}, -\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}, \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}, -\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}, 0, 0, 0 \right\}. \quad (8)$$

Используя в (5) интерполяцию высокого порядка и последовательно применяя для каждого из направлений ξ_1, ξ_2, ξ_3 формулы, аналогичные (5) и соответствующие системе, аналогичной (4), получаем способ нахождения решения на следующем временном слое. Было доказано, что используемый алгоритм аппроксимирует систему (3) по координатам с порядком, соответствующим порядку интерполяции. В программном комплексе предусмотрено использование интерполяции [Петров, Лобанов, 2006] от первого порядка до пятого включительно, что позволяет получать высокую точность численного интегрирования решения по пространству. Также применение матриц $\mathbf{X}_i$ реализовано с помощью двух операторов, что позволяет сократить количество интерполяций для каждой точки и каждого направления с девяти до шести.

Граничные и контактные условия

Используемый метод позволяет строить корректные вычислительные алгоритмы на границах и контактных границах области интегрирования.

Пусть в матричном виде граничное условие записывается следующим образом:

$$\mathbf{D} \bar{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \bar{d}, \quad (9)$$

где $\bar{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau)$ — значения компонент скорости и тензора напряжений на следующем шаге интегрирования в граничной точке.

Согласно (8) для каждой матрицы $\mathbf{A}_j$ имеется три нулевых собственных значения, три положительных и три отрицательных. Пусть для определенности вдоль направления ξ_1 характеристики, соответствующие отрицательным собственным значениям матрицы $\mathbf{A}_1$, выходят за пределы области интегрирования.

Тогда на этапе расчета внутренних точек в соответствии с (5) будет вычислено

$$\bar{q}^{\text{in}}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = \sum_{c_i \geq 0} \mathbf{X}_i \bar{q}(\xi_1 - c_i \tau, \xi_2, \xi_3, t).$$

Матрица $\Omega^{*,out}$ составляется из правых собственных векторов матрицы A_1 , соответствующих отрицательным собственным значениям.

Действие корректора в граничной точке совершается по следующей формуле

$$\bar{q}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) = F\bar{q}^{\text{in}}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, t + \tau) + \Phi\bar{d}, \quad (10)$$

при этом условие (7) выполняется с таким же порядком, как и порядок интерполяции.

В формуле (8) матрица $(D\Omega^{*,out})^{-1}$ находится так, чтобы

$$(D\Omega^{*,out})^{-1} D\Omega^{*,out} = I,$$

а матрицы Φ и F вычисляются по следующим формулам

$$\Phi = \Omega^{*,out} (D\Omega^{*,out})^{-1}, \\ F = I - \Phi D.$$

Для решения различных задач используются граничные условия заданной внешней силы, заданной скорости границы, смешанные граничные условия и неотражающие граничные условия, для которых (7) примет следующий вид

$$\Omega_k^{out,lr} \bar{q}(t + \tau, \bar{r}_{cp}) = \bar{0}.$$

Задание условий на трещине

Оказалось оптимальным с точки зрения производительности и приближенности расчета к реальным неоднородностям [Козлов, 2006] задавать трещины в виде контактных или граничных условий. Были разработаны несколько моделей трещин, задаваемых различными условиями. Трещина считается бесконечно тонкой, между створками трещины находится флюид (нефть, сжиженный газ или вода).

Сначала рассмотрим два предельных случая трещины. 1. Трещина с разведенными створками, между которыми находится флюид. 2. Полностью слипшаяся трещина, флюид отсутствует.

Для первого случая использовалось контактное условие скольжения. Это смешанное контактное условие:

$$V_p = \frac{(\rho_a c_{a1} \bar{v}_a^{\text{in}} + \rho_b c_{b1} \bar{v}_b^{\text{in}} - (\sigma_a^{\text{in}} - \sigma_b^{\text{in}}) \cdot \bar{p}) \cdot \bar{p}}{\rho_a c_{a1} + \rho_b c_{b1}},$$

V_p и $\bar{f}_\tau = 0$ подставляется в контактные условия, для одной створки трещина с внешней нормалью $\bar{p}$, а $-V_p$ и $\bar{f}_\tau = 0$ — для другой.

Во втором случае применялось условие полного слипания:

$$\bar{V} = \frac{1}{\rho_a c_{2a} + \rho_b c_{2b}} \left(\rho_a \left((\bar{p} \cdot \bar{v}^{a,in}) (c_{1a} - c_{2a}) \bar{p} + c_{2a} \bar{v}^{a,in} \right) + \right. \\ \left. + \rho_b \left((\bar{p} \cdot \bar{v}^{b,in}) (c_{1b} - c_{2b}) \bar{p} + c_{2b} \bar{v}^{b,in} \right) - (\sigma^{a,in} - \sigma^{b,in}) \cdot \bar{p} - \right. \\ \left. - \frac{\rho_a (c_{1a} - c_{2a}) + \rho_b (c_{1b} - c_{2b})}{\rho_a c_{1a} + \rho_b c_{1b}} \left(\bar{p} \cdot \left((\rho_a c_{1a} \bar{v}^{a,in} + \rho_b c_{1b} \bar{v}^{b,in}) - (\sigma^{a,in} - \sigma^{b,in}) \cdot \bar{p} \right) \right) \bar{p} \right).$$

Далее для каждой из створок трещины используется граничное условие с заданной скоростью.

Реальные трещины являются комбинацией этих двух модельных трещин. В одних точках трещина является слипшейся, а в других раскрытой и содержащей флюид. Для моделирования такой ситуации была разработана модель трещины с динамическим трением. Расчет проводился по следующему алгоритму:

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

$$f_p = \frac{\rho_A c_{A,1} \rho_B c_{B,1} \left((\vec{v}^{B,in} \cdot \vec{p}) - (\vec{v}^{A,in} \cdot \vec{p}) \right) + \rho_A c_{A,1} \left(\sigma^{B,in} \div \mathbf{N}_{00} \right) + \rho_B c_{B,1} \left(\sigma^{A,in} \div \mathbf{N}_{00} \right)}{\rho_A c_{A,1} + \rho_B c_{B,1}},$$

$$\vec{R} = \vec{v}^{B,in} - (\vec{v}^{B,in} \cdot \vec{p}) \vec{p} - \vec{v}^{A,in} + (\vec{v}^{A,in} \cdot \vec{p}) \vec{p} +$$

$$+ \frac{1}{\rho_B c_{B,2}} \left((\sigma^{B,in} \cdot \vec{p}) - (\sigma^{B,in} \div \mathbf{N}_{00}) \vec{p} \right) + \frac{1}{\rho_A c_{A,2}} \left((\sigma^{A,in} \cdot \vec{p}) - (\sigma^{A,in} \div \mathbf{N}_{00}) \vec{p} \right),$$

$$\vec{f}_\tau = k f_p \frac{\vec{R}}{\|\vec{R}\|},$$

$$\vec{f} = f_p \vec{p} + \vec{f}_\tau.$$

Далее для одной створки трещины применяется граничное условие с заданной внешней силой $\vec{f}$, а для другой $-\vec{f}$.

Также проводились расчеты с заданием граничного условия свободной границы на трещине — приближение к пустой (газонасыщенной) трещине. В таком случае отклик наиболее интенсивный, и мы можем рассмотреть подробно его структуру.

Неструктурированные тетраэдральные сетки

Для задания сложной геометрии трещин в геологических пластах в работе использовались неструктурированные тетраэдральные сетки. Их построение выполнялось с использованием доработанной открытой библиотеки tetgen. Сначала задается область интегрирования с включениями — трещинами. Затем происходит равномерное заполнение области тетраэдрами с заданным заранее минимальным их объемом при соблюдении критерия Делоне. После выполнения тетраэдризации точки на границах области и трещин оптимизируются для последующих вычислений. Далее сетка разбивается на части для использования на вычислительных системах с распределенной памятью. Каждый блок сетки, состоящий из координат узлов, тетраэдров, треугольников и контактных пар треугольников с противоположных сторон трещин, сохраняется в бинарный файл и используется отдельным вычислительным узлом при работе расчетного модуля. Разделение расчетной области между узлами вычислительной системы на начальном этапе позволяет минимизировать объем пересылаемых данных в ходе расчета, что обеспечивает высокую производительность и хорошую масштабируемость.

Интерполяция в тетраэдре

Для определения полиномиального поля степени N , зависящего от x , y и z , требуется знать значения в $\frac{(N+1)(N+2)(N+3)}{6}$ опорных точках.

Предлагается следующий способ расстановки опорных точек. В тетраэдре $ABCD$ проводятся плоскости, параллельные его граням и делящие каждое из его ребер на N равных частей. Опорные точки нумеруются, как показано на рис. 3 на примере $N = 3$ для тетраэдра.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

проводится ось, разбивающая его на четыре тетраэдра, имеющих объемы, равные объемам других малых тетраэдров, но не являющихся подобными им. Далее определяется, в какой из этих четырех тетраэдров попадает точка.

3. Сравниваем $v_N(\bar{r})$ с минимумом m и максимумом M значений в вершинах этого тетраэдра.

3.1. Если $m \leq v_N(\bar{r}) \leq M$, то значение интерполянта в точке $\bar{r} : v_N(\bar{r})$.

3.2. Если $v_N(\bar{r}) < m$, то значение интерполянта в точке $\bar{r} : m$.

3.3. Если $v_N(\bar{r}) > M$, то значение интерполянта в точке $\bar{r} : M$.

Использование интерполяции с ограничителем позволяет устранять нефизичные осцилляции полиномов, возникающие при наличии разрывов в интерполируемых полиномиальных функциях.

Помимо данного ограничителя была реализована монотонная интерполяция, являющаяся гибридной между линейной и параболической. Данный способ интерполяции основан на свойстве полиномов второго порядка в тетраэдре. Если у них есть экстремумы, то они будут находиться на ребрах.

Назовем отрезком AB поочередно все отрезки, изображенные на рис. 4. v_M получается путем параболической интерполяции в середине отрезка AB . Пусть v_A, v_B — значения, соответственно, в опорных точках A и B . Если v_M не лежит между значениями v_A и v_B , то заменяется на $\frac{v_A + v_B}{2}$. Операция проводится для каждого из 31 отрезка. После производится кусочно-

параболическая интерполяция по реальным опорным точкам и дополнительным, v_M , взятым в серединах отрезков, значения в которых были вычислены по процедуре, описанной выше. Если для всех ребер малого тетраэдра v_M не лежит между значениями v_A и v_B , то в нем будет осуществлена кусочно-линейная интерполяция. В любом случае, полученная интерполирующая функция не будет иметь экстремумов за исключением, быть может, опорных точек.

Возможны два пути увеличения точности вычислений при фиксированном шаге по пространству. Первый — увеличивать порядок аппроксимации. Второй — дробить тетраэдр на более мелкие внутри интерполятора. Была реализована кусочно-параболическая интерполяция, позволяющая добиться большей точности при фиксированной мелкости исходной тетраэдральной сетки. Также данная интерполяция позволяет сократить расход ресурсов на построение и хранение сетки.

Результаты расчетов

Отклик одиночной трещины

Для обоснования результатов моделирования трещинных пластов сначала были получены картины отклика одиночной трещины. На рис. 5 представлены сейсмограммы отклика

Рис. 5

флюидонасыщенных трещин на датчиках, расположенных поперек плоскости трещин. А на рисунке 6 — аналогичные картины для случая пустых трещин. Во втором случае отклик более яркий, на нем видны все типы волн — продольные и поперечные волны, рассеянные на конце трещины. В случае флюидонасыщения трещины видны только отклики поперечных волн.

Рис. 6

Отклик системы трещин

Перейдем к описанию результатов моделирования откликов систем трещин. Рассматривались системы параллельных субвертикальных трещин. Для случая их флюидонасыщения сейсмограммы отклика представлены на рисунке 7, а при отсутствии заполнения — на рисунке 8. В случае пустых трещин видна яркая многофазная структура отклика, причиной которой являются межтрещинные отражения в пласте.

Рис. 7

Стоит отметить, что такой эффект можно наблюдать только при дискретном задании трещин в области интегрирования, при использовании эффективных моделей мы не будем видеть этого интересного эффекта. Полученные результаты дополняют аналогичное исследование для двумерного случая, проведенное ранее [Левянт и др., 2011; Левянт и др., 2012; Левянт и др., 2013].

Рис. 8

На рисунке 9 изображены двумерные волновые картины отклика системы флюидонасыщенных трещин в плоскости параллельной плоскости трещин и перпендикулярной ей.

Площадные картины отклика, полученные с датчиков на поверхности земли, образующих двумерную сетку, представлены на рисунке 10.

Моделирование перекрестных трещин

Кроме того, были получены картины отклика перекрестных трещин. Волновые картины отклика в момент после прохождения плоского волнового фронта через такую систему представлены на рис. 11. На рис. 11А представлен вид в одной из вертикальных плоскостей, в которой распространяется волновой фронт, а на рис. 11Б — картина в горизонтальной плоскости, непосредственно пересекающей трещины.

Рис. 9

Рис. 10

Рис. 11

Список литературы

- Козлов Е. А. Модели среды в разведочной сейсмологии. — Тверь : Изд. «Герс», 2006. — 478 с.
- Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 608 с.
- Левянт В. Б., Петров И. Б., Квасов И. Е. Численное моделирование волнового отклика от субвертикальных макротрещин, вероятных флюидопроводящих каналов // Технологии сейсморазведки. — 2011. — № 4. — С. 4–29.
- 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.
- 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.
- Магомедов К. М., Холодов А. С. Сеточно-характеристические численные методы. — М. : Наука, 1988.
- Новацкий В. К. Теория упругости. — М. : Мир, 1975. — 872 с.
- Петров И. Б., Лобанов А. И. Лекции по вычислительной математике. — М. : Интернет-Университет информационных технологий, 2006.
- Петров И. Б., Фаворская А. В., Санников А. В., Квасов И. Е. Сеточно-характеристический метод высокой точности на тетраэдральных иерархических сетках с кратным шагом по времени // Компьютерные исследования и моделирование. — 2012. — Т. 3, № 1. — С. 161–171.
- Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. — М. : Мир, 1987.
- Холодов А. С. Численные методы решения уравнений и систем гиперболического типа // Энциклопедия низкотемпературной плазмы (серия «Б»). — М. : Янус-к, 2008. — Т. VII-1. — Ч. 2. — С. 91–103.
- Hsu C. J., Schoenberg M. Elastic waves through a simulated fractured medium // Geophysics. — 1993. — Vol. 58, No. 7. — P. 964–977.
- Willis M. E. et al. Spatial orientation and distribution of reservoir fractures from scattered seismic energy // Geophysics. — 2006. — Vol. 71, No. 5. — P. 43–51.