

УДК: 519.63

Разработка математических моделей трещин для численного решения задач сейсморазведки с применением сеточно-характеристического метода

М. В. Муратов^{1,a}, И. Б. Петров^{1,b}, В. Б. Левянт^{2,c}

¹ Московский физико-технический институт, кафедра информатики и вычислительной математики,
Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

² Акционерное общество «Центральная геофизическая экспедиция»,
Россия, 123298, г. Москва, ул. Народного Ополчения, д. 38/3

E-mail: ^a max.muratov@gmail.com, ^b petrov@mipt.ru, ^c vbleviant@gmail.com

Получено 17.10.2016, после доработки — 12.11.2016.

Принято к публикации 24.11.2016.

Данная статья посвящена описанию разработанных математических моделей трещин, которые могут быть применены для численного решения задач сейсморазведки с использованием сеточно-характеристического метода на неструктурированных треугольных (в двумерном случае) и тетраэдральных (в трехмерном случае) сетках. Такой подход позволяет корректно обсчитывать динамические процессы в условиях неоднородностей в области интегрирования. В основе разработанных моделей неоднородностей лежит концепция бесконечно-тонкой трещины — трещина задается в виде контактной границы. Такой подход заметно сокращает потребление вычислительных ресурсов за счет отсутствия необходимости задания сетки внутри трещины. В то же время он позволяет задавать трещину дискретно в области интегрирования, что дает возможность наблюдать качественно новые эффекты, которые невозможно получить с применением эффективных моделей трещиноватости, активно используемых в вычислительной сейсмике.

Основной задачей при разработке моделей было получение максимального точного результата. Разрабатывались модели, позволяющие получить отклик, близкий к отклику реально существующей трещины в геологической среде. Рассматривались газонасыщенные, флюидонасыщенные трещины, слипшиеся трещины, частично слипшиеся трещины, а также трещины с заданием сил динамического трения. Поведение трещины определялось характером задаваемого условия на контактной границе.

Пустые трещины задавались условием свободной границы. Такое условие давало возможность полного отражения от трещины волнового фронта. Флюидонасыщенность обеспечивало условие свободного скольжения на контактной границе. При таком условии наблюдалось полное прохождение продольных волн через трещину и отражение поперечных. На слипшихся трещинах использовалось условие полного слипания. Для реальных трещин, в которых расстояние между створками не равномерное и местами происходит соприкосновение (слипание) створок, была предложена модель частично слипшейся трещины. На разных точках контактной границы трещины задавались разные условия: условия скольжения (при флюидонасыщении трещины) и слипания, свободной границы (при газонасыщении трещины) и слипания. Почти такой же эффект достигается использованием модели трещины с условием динамического трения. Однако ее существенным недостатком является невозможность задания доли слипшейся поверхности трещины в силу того, что коэффициент трения может принимать значения от нуля до бесконечности. Этого недостатка лишена модель частично слипшейся трещины.

Ключевые слова: численное моделирование, сеточно-характеристический метод, неструктурированные треугольные сетки, неструктурированные тетраэдральные сетки, сейсморазведка, трещиноватые среды, математические модели трещин

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №16-01-00629 А.

© 2016 Максим Викторович Муратов, Игорь Борисович Петров, Владимир Борисович Левянт

UDC: 519.63

The development of fracture mathematical models for numerical solution of exploration seismology problems with use of grid-characteristic method

M. V. Muratov^{1,a}, I. B. Petrov^{1,b}, V. B. Leviant^{2,c}

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Computer Science and Computational Mathematics Department,
9 Institutskii per., Dogolrudnyi, 141701, Russia

² CGE PLC, 38/3 Narodnogo Opolcheniya st., Moscow, 123298, Russia

E-mail: ^a max.muratov@gmail.com, ^b petrov@mipt.ru, ^c vbleviant@gmail.com

Received 17.10.2016, after completion — 12.11.2016.

Accepted for publication 24.11.2016.

The article contains the description of developed mathematical models of fractures which can be used for numerical solution of exploration seismology problems with use of grid-characteristic method on unstructured triangular and tetrahedral meshes. The base of developed models is the concept of infinitely thin fracture. This fracture is represented by contact boundary. Such approach significantly reduces the consumption of computer resources by the absence of the mesh definition inside of fracture necessity. By the other side it lets state the fracture discretely in integration domain, therefore one can observe qualitative new effects which are not available to observe by use of effective models of fractures, actively used in computational seismic.

The main target in the development of models have been getting the most accurate result. Developed models that can receive the response close to the actual response of the existing fracture in geological environment. We considered fluid-filled fractures, glued and partially glued fractures, and also fractures with dynamical friction force. Fracture behavior determined by the nature of condition on the border.

Empty fracture was represented as free boundary condition. This condition give us opportunity for total reflection of wave fronts from fracture. Fluid-filling provided the condition for sliding on the border. Under this condition, there was a passage of longitudinal and total reflection of converted waves. For the real fractures, which has unequal distance between the borders has been proposed the model of partially glued fracture. At different points of the fracture's boundary were set different conditions. Almost the same effect is achieved by using a fracture model of dynamic friction condition. But its disadvantage is the inability to specify the proportion of fracture's glued area due to the friction factor can take values from zero to infinity. The model of partially glued fracture is devoid of this disadvantage.

Keywords: numerical modeling, grid-characteristic method, unstructured triangular meshes, unstructured tetrahedral meshes, exploration seismology, fractured media, mathematical fracture model

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 6, pp. 911–925 (Russian).

The work was supported by RFBR, project no. 16-01-00629 A.

Введение

В настоящее время сейсморазведка является одним из наиболее надежных методов поиска залежей нефти и газа и подготовки породы перед непосредственным бурением скважин [Шерифф, 1987]. Проводимые исследования направлены на определение структуры геологических пластов, а также возможного расположения месторождения углеводородов. Численное моделирование способно существенно оптимизировать процесс интерпретации сейсмических данных.

В статье [Петров, 2015] была описана методика моделирования образования волновых откликов от систем трещин с применением сеточно-характеристического метода на неструктурированных тетраэдральных сетках, а также приведены результаты, полученные с помощью нее. В данной работе подробно рассмотрена концепция бесконечно тонкой трещины и механико-математические модели макротрещин на ее основе, позволяющие моделировать трещины различной природы.

В реальных задачах сейсморазведки трещина представляет собой сложную неоднородную структуру. Местами створки трещины находятся на некотором удалении и разделены насыщенным флюидом или пустотой, местами наблюдается слипание, когда под действием сил давления стенки вплотную прилегают друг к другу. Кроме того, трещины можно классифицировать по характеру насыщения: флюид или газ. Очевидно, что для столь большого разнообразия в структуре трещин нельзя придумать одну, удовлетворяющую всем случаям модель.

Согласно [Левянт, 2011] в геологии выделяют несколько категорий трещин в зависимости от размеров: микротрещины, с раскрытостью десятки микрон и протяженностью первые сантиметры; мезотрещины, с раскрытостью первые сотни микрон, с протяженностью до первых метров; макротрещины, с раскрытостью от долей до нескольких миллиметров и более, с протяженностью по высоте от первых десятков до сотен метров.

В то время как для описания микро- и мезотрещиноватости в масштабе реальных исследований толщи геологической среды оптимальным с точки зрения производительности будет использование популярных моделей эффективной среды [Willis, 2006; Coates, 1995; Hudson, 2001; Молотков, 2000], при моделировании макротрещин современные вычислительные мощности позволяют задавать области неоднородности дискретно, что существенно повышает возможности исследования.

Для различных задач используются дискретные модели различной степени приближения: задание флюида в трещине с применением модели вязкой жидкости, модели идеальной жидкости, задание соответствующих флюиду упругих характеристик и др. Для случая наблюдения откликов в макромасштабе всего сейсморазведочного эксперимента оптимальным является задание трещин в виде граничных и контактных условий — модель бесконечно тонкой трещины. Применимость модели показана в [Левянт, 2011; Левянт, 2012]. Подбору подходящих условий для различных случаев посвящена эта статья.

Математическая модель

Волновые процессы в упругой геологической среде описываются на основании определяющих уравнений теории линейно-упругой среды [Новацкий, 1975]. Состояние бесконечно малого объема среды, согласно данной модели, подчиняется системе двух уравнений: локальному уравнению движения и реологическому соотношению, связывающему напряжения и деформации в среде (закон Гука):

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

Численный метод

В данной работе для численного решения используется сеточно-характеристический метод [Магомедов, 1988; Куликовский, 2001; Холодов, 2008; Петров, 2006]. Трехмерная система определяющих уравнений линейно-упругой среды (1) может быть представлена в виде

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

где ξ_i принимает значения x , y и z , а символом \mathbf{u} обозначен вектор искомых значений, который имеет вид:

$$\mathbf{u} = \{V_x, V_y, V_z, T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}, T_{xy}, T_{xz}, T_{yz}\}.$$

Далее проводим покоординатное расщепление, в результате чего система (2) преобразуется в три одномерные системы уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}'_i \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \xi'_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Заменой переменных каждая из систем (3) может быть сведена к набору независимых скалярных уравнений переноса в инвариантах Римана:

$$\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \mathbf{\Omega}_i \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \xi'_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где $\mathbf{\Omega}_i$ — диагональная матрица собственных значений.

Для каждого уравнения переноса (4) 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

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

где τ — шаг по времени.

После того как все значения перенесены, идет обратный переход к вектору искомых значений \mathbf{u} .

Условия на границах и контактных границах

Сеточно-характеристический метод позволяет производить корректный обсчет точек на границах и контактных границах области интегрирования [Фаворская, 2011; Муратов, 2014].

Граничное условие можно записать в общем виде как

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

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

Задание условий на трещине

Оказалось оптимальным с точки зрения производительности и приближенности расчета к реальным неоднородностям [Козлов, 2006] задавать трещины в виде контактных или гранич-

ных условий. Были разработаны несколько моделей трещин, задаваемых различными условиями. Трещина считается бесконечно тонкой.

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

а) Газонасыщенная (пустая) трещина

Модель газонасыщенной (пустой) трещины хорошо моделирует поведение трещин, заполненных воздухом или газом, на небольшой глубине, до 100–150 м. 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 трещины:

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

Такая модель применима для описанной ситуации. Скорость распространения продольных упругих волн в геологической среде (1500–7000 м/с) значительно больше скорости в воздухе (330 м/с) или природном газе (430 м/с) при небольших давлениях. Скорость распространения поперечных волн в воздухе равна нулю. Аналогично с плотностями (1000–3000 кг/м³ против 1,2 кг/м³). Отсюда в силу (коэффициент отражения)

$$k_r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_2 + \rho_2 c_1} \sim 1.$$

Таким образом, трещину, наполненную газом под давлением, близким к нормальному, можно считать пустой и можно задавать граничным условие свободной границы, которая дает полное отражение падающей на нее волны.

На рис. 1 представлены волновые картины полей скоростей при прохождении через нее плоской продольной волны. Высота трещины — 100 м, длина волны — 150 м. Скорость распространения продольных волн в среде — 3500 м/с, поперечных — 1742 м/с. Плотность среды равнялась 2400 кг/м³.

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.

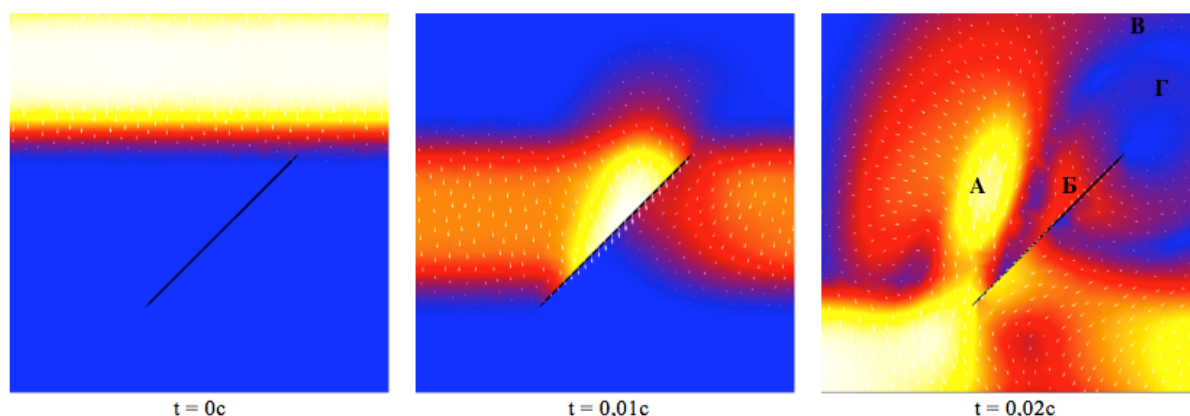


Рис. 1. Прохождение плоского продольного волнового фронта через газонасыщенную (пустую) трещину

Рассмотрим распространенный случай вертикальной ориентации газонасыщенной трещины. В таком случае в образовании отклика участвует только верхний конец трещины. Так как трещина задается граничным условием свободной границы, то нормальные и тангенциальные напряжения на этой границе равны нулю.

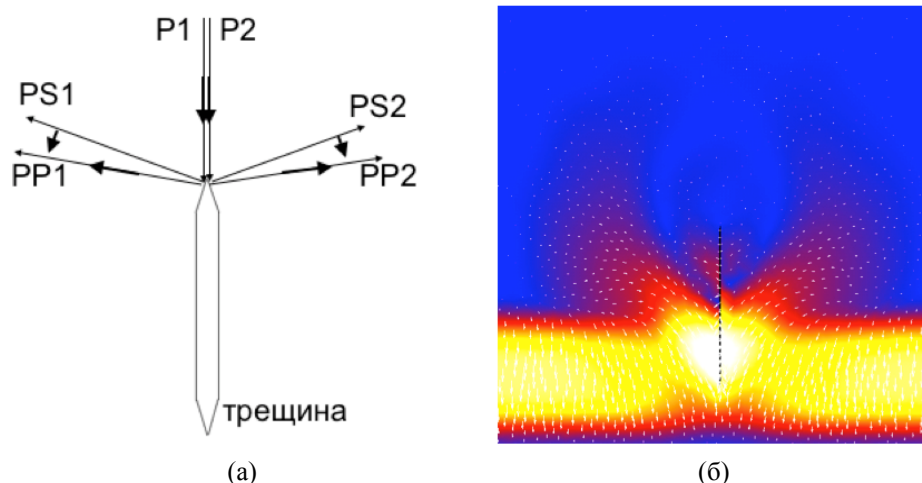


Рис. 2

В силу закона сохранения импульса волна должна полностью отразиться. При отражении возникают продольная и поперечная волны (рис. 2, а). Направления векторов колебаний в волнах зависят от ориентации поверхности отражения и для противоположных бортов трещины будут противоположными. Таким образом, фазы колебаний в отклике по разные стороны от трещины будут противоположными.

Сказанное выше подтверждается проведенным расчетом, результаты которого представлены на рис. 2, б. Видно, что векторы слева и справа от трещины имеют противоположные направления.

б) Флюидонасыщенная трещина

В большинстве решаемых на практике задач трещины заполнены флюидом: водой, нефтью, сжиженным газом и т. д. Поэтому целесообразным было разработать модель, позволяющую описывать такую ситуацию.

Флюидонасыщенная трещина задается как контактная граница с условием свободного скольжения:

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

Такая контактная граница полностью пропускает продольные колебания без отражения и полностью отражает поперечные волны. Такая 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. 3.

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.

Рассмотрим случай вертикальной ориентации флюидонасыщенной трещины. Контактное условие скольжения означает равенство нулю тангенциальных напряжений на границах контакта. Нормальные напряжения равны. Если трещина параллельна нормали фронта волны, то никакого отклика не образуется (рисунок 4).

Сказанное выше подтверждается расчетом, результаты которого изображены на рис. 5.

В случае некоторого наклона трещины (рис. 6) наблюдается образование отклика. На трещину падает продольная волна с импульсом \mathbf{P} , направление которого указано на рис. 6, а жир-

ной стрелкой. В точке падения a импульс направлен по нормали \mathbf{n} из точки a в b . В силу закона сохранения импульса

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_n + \mathbf{P}S_1,$$

где $\mathbf{P}S_1$ — импульс образующейся обменной волны. Вектор колебаний должен быть направлен вниз (при направлении колебаний в падающей волне вниз).

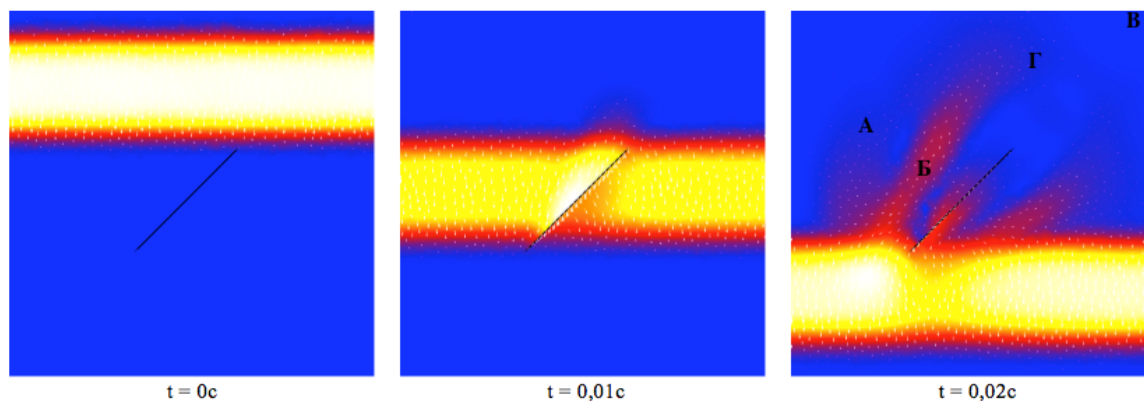


Рис. 3. Прохождение плоского продольного волнового фронта через флюидонасыщенную трещину

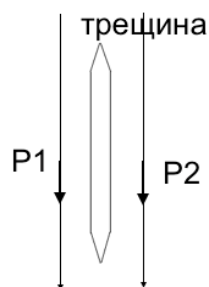


Рис. 4. Прохождение вертикально падающего плоского волнового фронта через вертикальную флюидонасыщенную трещину

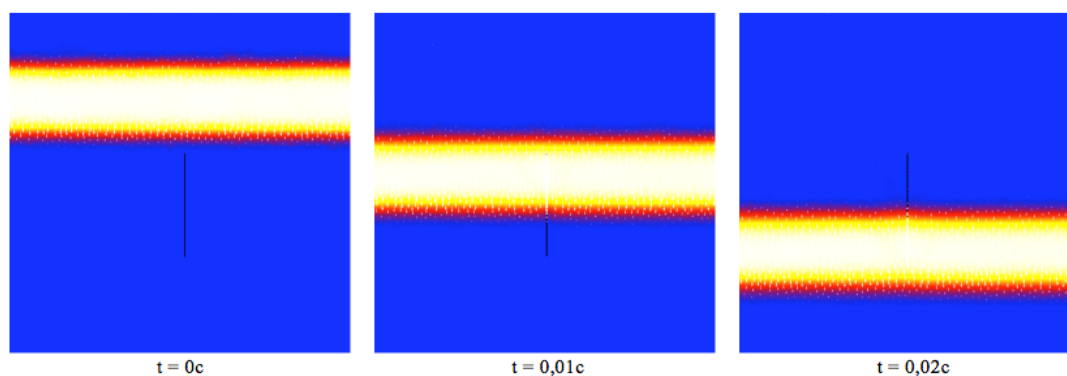


Рис. 5. Прохождение вертикально падающего продольного волнового фронта через вертикальную флюидонасыщенную трещину: результаты расчета

На другом борту трещины в точке b импульс направлен по нормали \mathbf{n} в том же направлении, что и импульс на борту падения. А проходящий фронт \mathbf{P} направлен вниз. Для сохранения импульса по тангенциальному направлению возникает обменная волна с вектором колебаний,

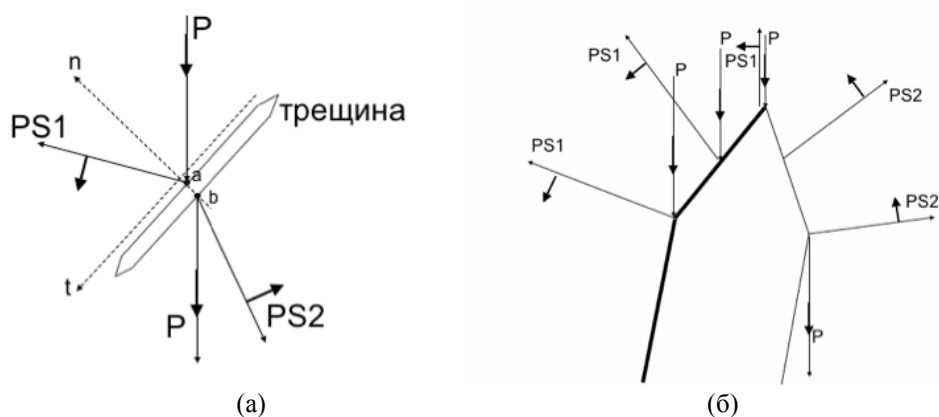


Рис. 6

противоположным другому борту. Такое «обменное» рассеяние происходит в каждой точке поверхности трещины. На рис. 6, б представлена схема рассеяния на конце трещины. Там образуется сферический полуфронт на «поверхности падения» (выделено жирным — левый борт). На правом борту — «поверхность преломления». Векторы в обменных волнах там имеют противоположное направление. Совокупность лучей из каждой точки образует второй полуфронт сферического фронта. Они замыкаются, и направление векторов оказывается одинаковым (см. рис. 6, б).

в) 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:

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

где \mathbf{v} — скорости соприкасающихся граничных точек, \mathbf{f} — действующая на границу сила, a — первая створка трещины, b — вторая створка трещины.

При задании такого контактного условия на трещине упругие волны полностью проходят через нее (рис. 7).

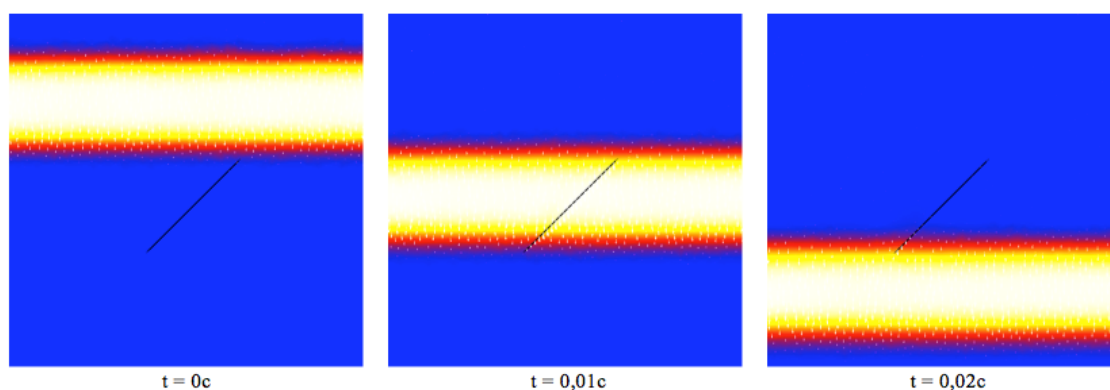


Рис. 7. Полное прохождение волнового фронта через слипшуюся трещину

г) Частично-слипшаяся трещина

В реальной сейсморазведке имеют место частично слипшиеся трещины, 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 %.

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.

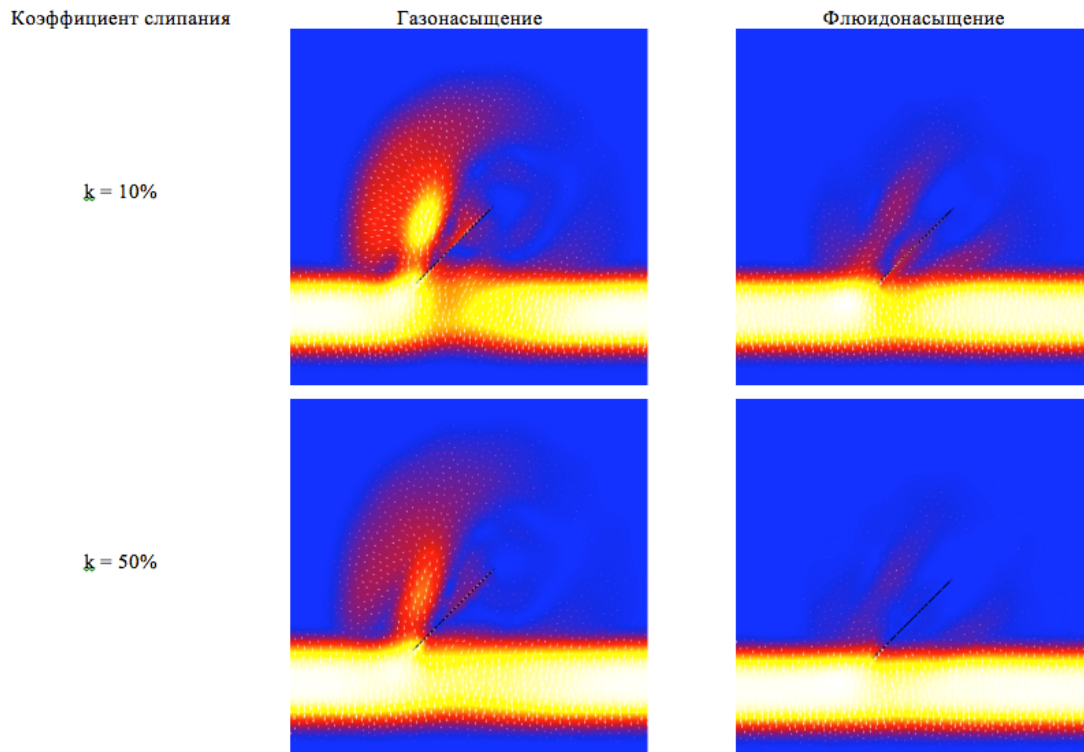


Рис. 8. Влияние частичного слипания на отклик газонасыщенной и флюидонасыщенной трещин

На рис. 8 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.

д) Трещины с заданием условия динамического трения

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

Расчет проводился по следующему алгоритму:

- 1) расчет полного слипания, в результате на створках получаем значения силы \mathbf{f}^* ;
- 2) если $|\mathbf{f}^*| > k|\mathbf{f}_p^*|$, считается трение:

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

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

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

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

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

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.

Результаты моделирования

Постановка задачи

В этом разделе представлены результаты расчетов реальных трещиноватых пластов с геометрией, аналогичной геометрии из предыдущих исследований, и проведено сравнение этих моделей.

В расчетах использовалась схема второго порядка на неструктурированной треугольной сетке, состоящей из 191 760 ячеек и 97 275 узлов, где на длину каждой трещины приходится 24 пары расчетных точек.

При использовании модели частично слипшейся трещины для флюидонасыщенных и пустых трещин коэффициент слипания g , показывающий долю слипшейся части трещин во всей совокупной площади их поверхностей, варьировался от 0 до 30 % с шагом 5 %.

При использовании модели с динамическим трением коэффициент трения варьировался от 0 до 0.2, что, как будет показано ниже, соответствует по структуре отклика флюидонасыщенной трещине с долей слипания от 0 до 30 %.

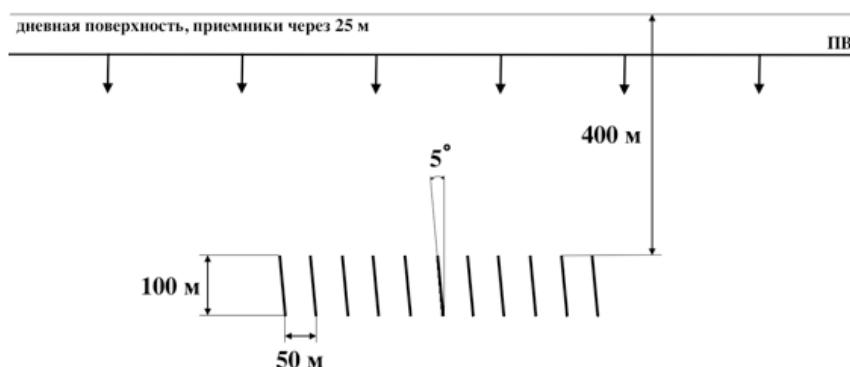


Рис. 9. Схема численного эксперимента по изучению моделей трещин

Физические параметры вмещающей среды: $V_p = 2300$ м/с, $V_s = 1300$ м/с, $\rho = 1200$ кг/м³. 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. 9.

Результаты моделирования частично слипшихся трещин

Сначала рассмотрим полученные результаты для частично слипшихся флюидонасыщенных (рис. 10) и пустых (газонасыщенных) (рис. 11) трещин.

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

В случае пустых трещин рассматривались зависимости как Dpp-, так и Dps-волн в отклике от коэффициента слипания 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.

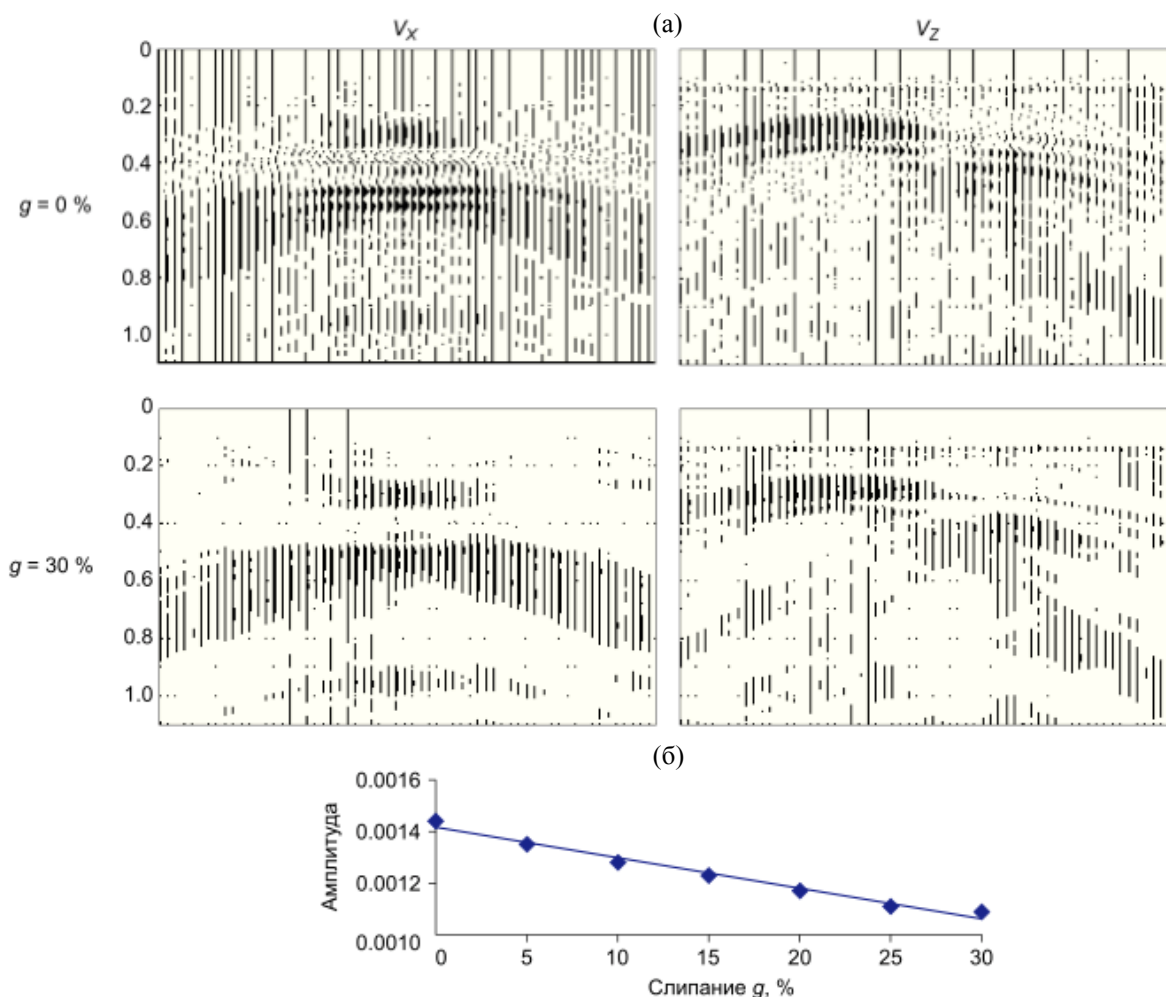


Рис. 10. Влияние на отклик площади слипания поверхности флюидонасыщенных трещин: сейсмограммы (а), график зависимости амплитуды от доли (g) слипшейся поверхности (б)

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 же 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.

Результаты моделирования трещин с условием динамического трения

Также были выполнены расчеты с трещинами, задающимися контактной границей с условием динамического трения. Результаты в виде сейсмограмм приведены на рис. 12.

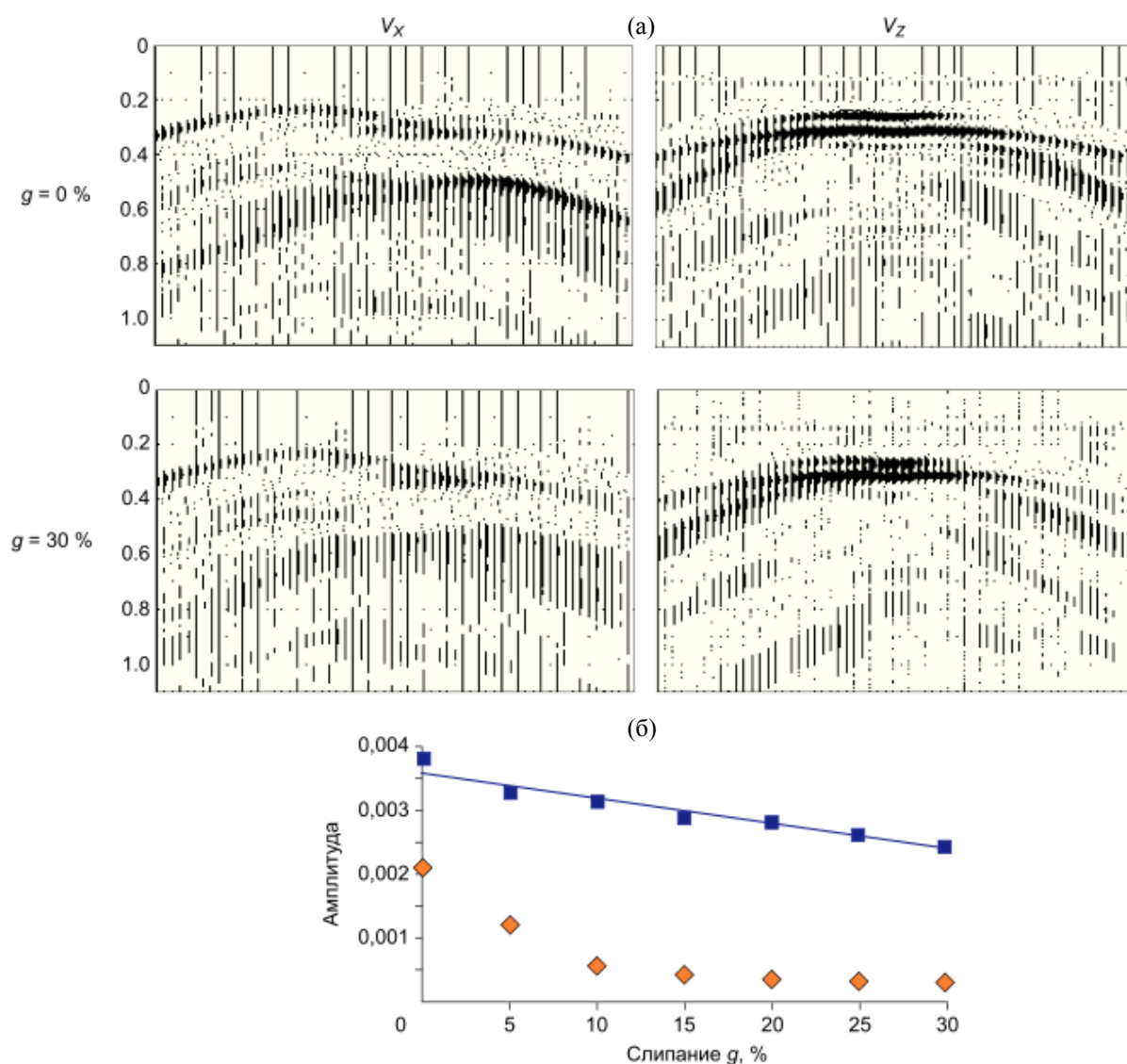


Рис. 11. Влияние на отклик доли площади сцепления поверхностей газонасыщенных трещин: сейсмограммы (а), график зависимости амплитуды от доли g слипшейся поверхности (б)

Качественно такое контактное условие дает картины, похожие на случай частично слипшихся флюидонасыщенных трещин. Однако, так как диапазон изменения реального коэффициента трения проходит от нуля до бесконечности (при нуле трение ведет себя как условие свободного скольжения, а при бесконечности — как полное сцепление), возникают проблемы с нормировкой, вследствие чего мы видим отсутствие линейности в зависимости амплитуды Dps-волны от коэффициента трения. В связи с этим использование модели частично слипшихся трещин является более удобным при моделировании частичного прохождения поперечных волн через трещины.

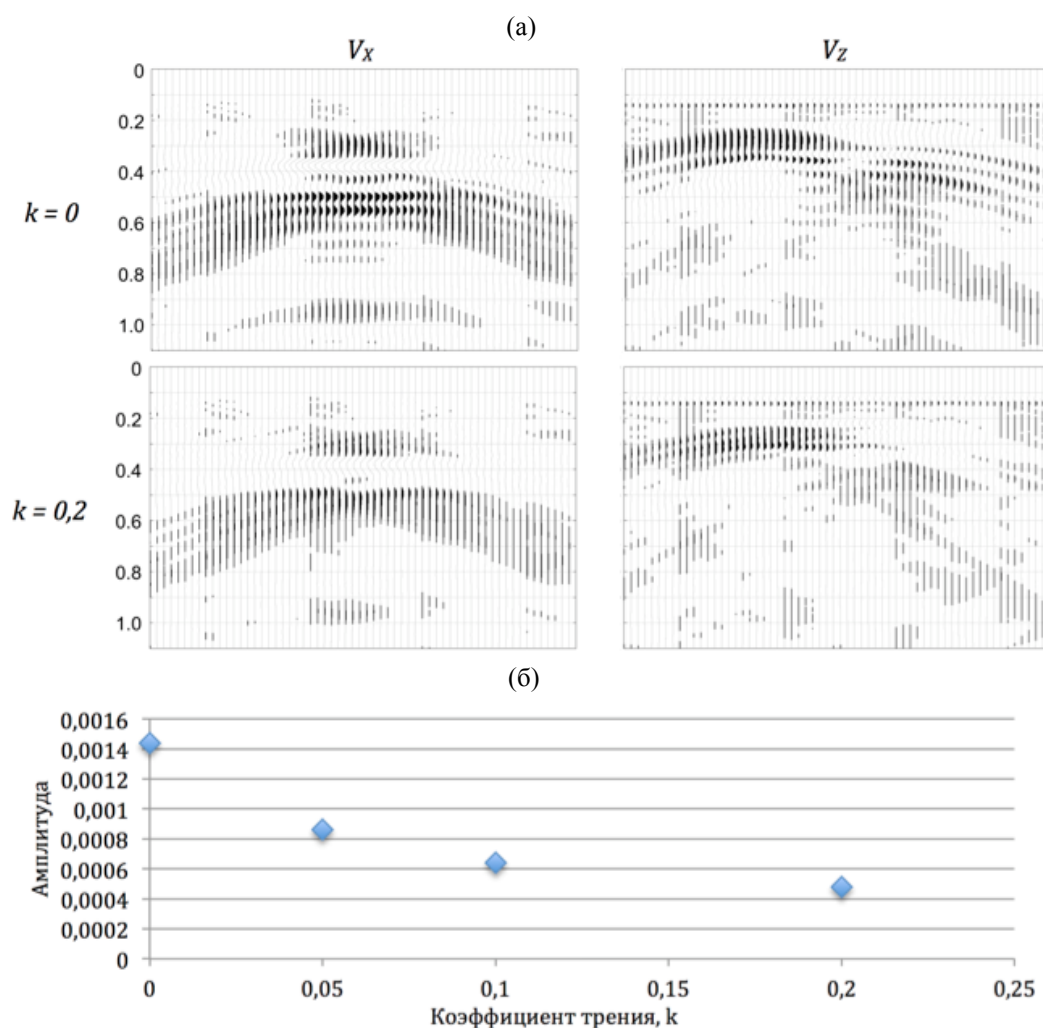


Рис. 12. Влияние на отклик коэффициента трения: сейсмограммы (а), график зависимости амплитуды от коэффициента трения (б)

Список литературы (References)

- Козлов Е. А. Модели среды в разведочной сейсмологии. — Тверь: ГЕРС, 2006. — 478 с.
Kozlov E. A. Modeli sredy v razvedochnoi seismologii [Medium models in exploration seismology]. — Tver: Gers, 2006. — 478 p. (in Russian).
- Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. — М.: Физматлит, 2001. — 608 с.
Kulikovskii A. G., Pogorelov N. V., Semenov A. Yu. Matematicheskie voprosy chislennogo resheniya giperbolicheskikh sistem uravnenii [Mathematical aspects of hyperbolic equation systems numerical solution]. — M.: Fizmatlit, 2001. — 608 p. (in Russian).
- 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.
Levant V. B., Petrov I. B., Kvasov I. E. Numerical modeling of seismic response from subvertical macrofractures as possible fluid conduits // Seismic technologies. — 2011. — No. 4. — P. 4–29. (Original Russian paper: Levant V. B., Petrov I. B., Kvasov I. E. Chislennoe modelirovanie volnovoogo otklika ot subvertikalnykh makrotreschin, veroyatnykh fluidoprovodyashikh kanalov // Tekhnologii seismorazvedki. — 2011. — No. 4. — P. 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.
Leviant V. B., Petrov I. B., Muratov M. V. Numerical simulation of wave responses from subvertical macrofractures system // Seismic technologies. — 2012. — No. 1. — P. 5–21. (Original Russian paper: *Leviant V. B., Petrov I. B., Muratov M. V.* Chislennoe modelirovanie volnovykh otklikov ot sistemy (klastera) subvertikalnykh makrotreschin // Tekhnologii seismorazvedki. — 2012. — No. 1. — P. 5–21.)
- 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 [Grid-characteristic numerical methods]. — M.: Nauka, 1988. — 288 p. (in Russian).
- Молотков Л. А., Бакулин А. В. Эффективная модель слоистой упруго-пористой среды // Доклады Академии наук. — 2000. — Т. 372, № 1. — С. 108–112.
Molotkov L. A., Bakulin A. V. An Effective Model of the Layered Elastic-Porous Medium // Dokl. Earth Sci. — 2000. — V. 372, No. 4. — P. 690–694. (Original Russian Paper: *Molotkov L. A., Bakulin A. V.* Effektivnaya model sloistoi uprugoporistoi sredy // Doklady Akademii Nauk. — 2000. — Vol. 372, No. 1. — P. 108–112.)
- Муратов М. В., Петров И. Б., Санников А. В., Фаворская А. В. Сеточно-характеристический метод на неструктурированных тетраэдральных сетках // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2014. — Т. 54, № 5. — С. 821–832.
Muratov M. V., Petrov I. B., Sannikov A. V., Favorskaya A. V. Grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2014. — V. 54, No. 5. — P. 837–847. (Original Russian Paper: *Muratov M. V., Petrov I. B., Sannikov A. V., Favorskaya A. V.* Setochno-kharakteristicheskii metod na nestrukturirovannykh tetraedralnykh setkakh // Zhurnal vychislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki. — 2014. — Vol. 54, No. 5. — P. 821–832.)
- Новацкий В. К. Теория упругости. — М.: Мир, 1975. — 872 с.
Novatskii V. K. Teoriya uprugosti [Elasticity theory]. — M.: Mir, 1975. — 872 p. (in Russian).
- Петров И. Б., Лобанов А. И. Лекции по вычислительной математике. — М.: Интернет-университет информационных технологий, 2006. — 523 с.
Petrov I. B., Lobanov A. I. Lektsii po vychislitelnoi matematike [Computational mathematics lectures]. — M.: Internet-University of Informational Technologies, 2006. — 523 p. (in Russian).
- Петров И. Б., Муратов М. В., Фаворская А. В., Бирюков В. А., Санников А. В. Численное моделирование прямых трехмерных задач сейсморазведки с применением сеточно-характеристического метода на неструктурированных тетраэдральных сетках // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7, № 4. — С. 875–887.
Petrov I. B., Muratov M. V., Favorskaya A. V., Biryukov V. A., Sannikov A. V. Chislennoe modelirovanie pryamykh trekhmernykh zadach seismorazvedki s primeneniem setochno-kharakteristicheskogo metoda na nestrukturirovannykh tetraedralnykh setkakh [Numerical modeling of straight 3D exploration seismology problems with use of grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes] // Computer Research and Modeling. — 2015. — Vol. 7, No. 4. — P. 875–887 (in Russian).
- Фаворская А. В., Петров И. Б., Санников А. В., Квасов И. Е. Компьютерное моделирование пространственных динамических процессов сеточно-характеристическим методом на неструктурированных тетраэдральных сетках // Информационные технологии. — 2011. — № 9. — С. 28–30.
Favorskaya A. V., Petrov I. B., Sannikov A. V., Kvasov I. E. Komputernoe modelirovanie prostranstvennykh dinamicheskikh protsessov setochno-kharakteristicheskim metodom na nestrukturirovannykh tetraedralnykh setkakh [Computer modeling of spatial dynamical processes by grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes] // Informational technologies. — 2011. — No. 9. — P. 28–30 (in Russian).
- 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.
Kholodov A. S. Chislennye metody resheniya uravnenii i sistem giperbolicheskogo tipa [Numerical methods of hyperbolic equations and equations solution] // Enciklopedia nizkotemperaturnoi plazmy (seria «B»). — M.: Yanus-k, 2008. — Vol. VII-1, Part. 2. — P. 91–103 (in Russian).
- Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка — М.: Мир, 1987. — 448 с.
Sheriff R., Geldart L. Seismorazvedka [Exploration Seismology]. — M.: Mir, 1987. — 448 p. (in Russian).

- Coates R. T., Shoenberg M.* Finite-difference modeling of faults and fractures // *Geophysics*. — 1995. — Vol. 60, No. 5. — P. 1514–1523.
- Hsu C. J., Schoenberg M.* Elastic waves through a simulated fractured medium. *Geophysics*. — 1993. — Vol. 58, No. 7. — P. 964–977.
- Hudson J. A., Pointer T., Liu E.* Effective-medium theories for fluid-saturated materials with aligned cracks // *Geophysical Prospecting* — 2001 — Vol. 49, No. 5 — P. 509–522.
- Willis M. E., Burns D. R., Rao R., Minsley B., Toksöz M. N., Vetri L.* Spatial orientation and distribution of reservoir fractures from scattered seismic energy // *Geophysics*. — 2006. — Vol. 71, No. 5 — P. 43–51.