

В. И. Голубев, И. Б. Петров

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ТРЕЩИНОВАТЫХ СРЕДАХ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ**

139

С помощью сеточно-характеристического метода на параллелепипедных структурных сетках моделируется сейсмический отклик от кластера вертикальных трещин. Проводится построение синтетических сейсмограмм и волновых полей. Исследуется структура волнового отклика, в том числе его зависимость от вида насыщения трещин (газ, флюид). Экспериментально получен эффект генерации высокочастотных «шлейфовых» волн от трехмерных периодических структур.

Seismic response from the cluster of vertical oriented cracks is simulated using grid-characteristic method on parallelepiped structured meshes. Synthetic seismograms and wave fields are calculated. The structure of the response including dependency on type of saturator (gas, fluid) is analyzed. Numerical experiments showed the effect of high-frequency daisy-chain wave's generation from 3D periodic structures.

Ключевые слова: сеточно-характеристический метод, механика деформируемого твердого тела, сейсморазведка, трещиноватые среды.

Key words: grid-characteristic method, the mechanics of deformable solids, seismic survey, fractured media.

В связи со значительным истощением запасов традиционных месторождений нефти и газа в мире активно исследуется вопрос о возможности эффективного извлечения тяжелых (трудно извлекаемых) залежей нефти [1]. Отличительные их особенности – большие глубины залегания, сложная трещиноватая структура, высокий уровень шумов, обусловленный существенной гетерогенностью геологического массива. Стоит отметить, что современные методы обработки результатов полевой сейсмической разведки в данном случае не обеспечивают необходимую точность и достоверность. Таким образом, задача их усовершенствования является одной из наиболее приоритетных задач, стоящих перед научным и инженерным сообществом.

Одним из перспективных подходов к описанной проблеме служит проведение прямого численного моделирования распространения сейсмических волн в геологических средах. С помощью него могут быть получены все характеристики откликов при жестко заданной геометрии среды (слои, трещины, карстовые включения). Перед исследователями открываются возможности по оценке влияния каждого из параметров (вида заполнителя трещины, мощностей геологических слоев, плотность трещиноватых кластеров и др.) на характеристики регистри-



руемых на поверхности сигналов (состава отклика, периодов и амплитуд отдельных его компонент).

Наиболее распространенным подходом в данном направлении выступает использование анизотропных осредненных (эквивалентных или эффективных) моделей трещиноватых сред [2; 3]. Основное его преимущество — низкая вычислительная сложность задачи, позволяющая выполнять расчеты на персональном компьютере. Хотя указанный подход и позволяет получить отклик от границ трещиноватого кластера, он полностью лишен учета межтрещинного взаимодействия, вносящего существенный вклад в сейсмический отклик и зависящего от внутренней структуры кластера.

140

В последние годы активно развивается новый подход, основанный на явном выделении всех разномасштабных неоднородностей среды [4; 5]. Поскольку определяющая система, описывающая динамическое поведение упругой среды, является гиперболической, наиболее корректные численные алгоритмы для ее решения строятся с использованием сеточно-характеристического метода, учитывающего ее характеристические свойства [6]. В данном подходе происходит учет межтрещинного взаимодействия, что позволяет с высокой степенью точности воспроизвести все реальные волновые процессы, происходящие в геологической среде.

1. Численный метод

Для описания динамических процессов в геологической трещиноватой среде используется модель упругого твердого тела с реологическими соотношениями, соответствующими линейной связи напряжений и деформаций в виде закона Гука для изотропных тел. Для решения системы дифференциальных уравнений гиперболического типа в частных производных 2-го порядка используется сеточно-характеристический численный метод [7], позволяющий корректно описать бесконечно тонкие газонасыщенные и флюидонасыщенные геологические трещины.

Моделирование выполнялось в полной трехмерной постановке на параллелепипедных расчетных сетках [8]. Шаг сетки составлял 5 м вдоль оси OZ и 10 м вдоль осей OX и OY, и она содержала 600 млн узлов. Запуск программы производился на вычислительной системе с 30 расчетными ядрами. Поскольку при таком объеме вычислений, несмотря на параллельность алгоритма, одно выполнение программы занимало примерно сутки, было решено задавать заглубленное начальное возмущение на расстоянии 1700 м от дневной поверхности (над кластером). Отметим, что физически данное приближение корректно, так как задача распространения продольной волны в однородной среде имеет точное аналитическое решение. При этом на синтетических сейсмограммах [9], приведенных далее в статье, можно ввести поправку за сдвиг начального условия величиной +0,38 с при необходимости пикирования различных фаз отклика в абсолютном времени.



2. Постановка задачи

В работе рассматривалось распространение сейсмических волн в геологической среде при наличии глубоко залегающего кластера вертикальных трещин. В качестве источника возмущения использовалась продольная упругая волна, распространяющаяся от дневной поверхности под углом 5° к вертикали в плоскости OXZ . Вмещающий массив представлял собой параллелепипед ($10 \times 10 \times 3$ км) с заданными упругими характеристиками, близкими к карбонатным породам. Скорость продольных волн составляет 4500 м/с, поперечных — 2250 м/с, плотность среды — 2500 кг/м^3 . В его центральной части на глубине 2000 м располагался кластер из 31 параллельной вертикальной трещины, протяженностью 3000 м и высотой 100 м. Расстояние между соседними трещинами — 100 м, а нормаль к их поверхностям совпадает с осью OX (рис. 1). В ходе численного расчета находим полный вектор скорости и тензор напряжения в последовательные моменты времени в каждом узле расчетной сетки, что позволяет визуализировать волновую картину вдоль произвольного сечения области. Необходимо отметить, однако, что при проведении полевых измерений имеется возможность регистрации лишь колебаний дневной поверхности. В ходе расчета на верхней границе параллелепипеда производилась запись полного вектора скорости в местах расстановки сейсмоприемников. Расстановка представляла собой площадное покрытие в виде квадратной сетки с шагом 50 м и осями, параллельными OX и OY .

141

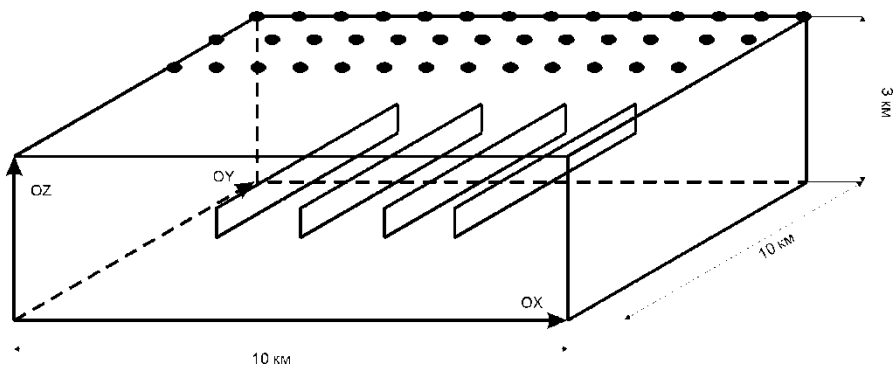


Рис. 1. Модель геологической среды, содержащей кластер вертикальных трещин

3. Результаты расчетов

На рисунке 2 приведены сейсмограммы, построенные по профилю вдоль оси OX , для всех компонент регистрируемого вектора скорости и обоих типов заполнителя (газ и флюид). Черным цветом произведена заливка положительных значений.

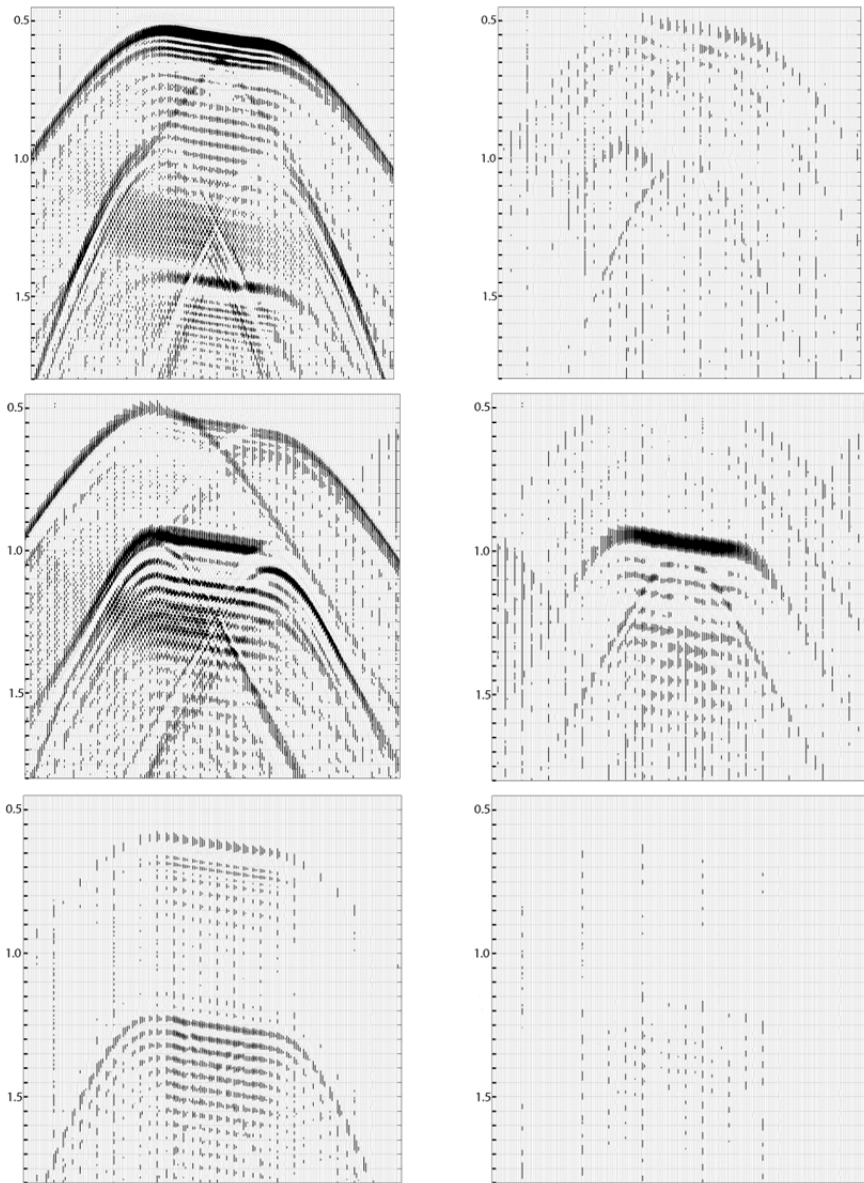


Рис. 2. Сейсмограммы V_z , V_x , V_y (сверху вниз)
вдоль профиля ОХ (перпендикулярно плоскости трещин)
для газонасыщенных (слева) и флюидонасыщенных (справа) трещин

Численные расчеты показывают, что сейсмический отклик состоит из набора упругих волн, среди которых выделим: быстрые продольные (время прихода $\sim 0,5$ с) и медленные поперечные (время прихода ~ 1 с) компоненты. Разница во времени прихода в два раза соответствует отношению скорости распространения продольных волн к скорости распространения поперечных волн в среде. Оба этих фронта имеют как



плоскую компоненту, совпадающую по протяженности с протяженностью трещиноватого кластера, так и два боковых изгиба, образованные отражением от краевых трещин. Наклон регистрируемого отклика обусловлен тем фактом, что при падении наклонной волны возбуждения на кластер трещин с начала с ней взаимодействуют трещины левой части кластера, а потом правой. Интересной особенностью является наличие более высокочастотных «шлейфов», сопровождающих каждую из компонент отклика. Они обусловлены генерацией сигнала от трещиноватой структуры и напрямую свидетельствуют о наличии интенсивного межтрещинного взаимодействия, когда отдельные отражения от бортов трещин интерферируют и образуют периодическую структуру сигнала.

На рисунке 3 приведены сейсмограммы, построенные по профилю вдоль оси OY , для всех компонент регистрируемого вектора скорости и обоих типов заполнителя (газ и флюид). Черным цветом произведена заливка положительных значений. Поскольку в плоскости OYZ продольная падающая волна не имела наклона, на сейсмограммах также отсутствует отклонение отклика от горизонтали. При этом так как в жидкости не распространяются поперечные волны и свободно распространяются продольные, на графиках практически отсутствует продольная часть сейсмического отклика. Интересной особенностью служит тот факт, что в случае газонасыщенной трещины происходит генерация довольно сильных волн от ее краев (как продольных, так и поперечных), тогда как для случая флюидонасыщенной трещины данный эффект не наблюдается. Эффект «шлейфа» также прослеживается в обоих случаях, хотя для газонасыщенной трещины он намного сильнее. При регистрации как вдоль профиля OX , так и вдоль профиля OY на всех компонентах амплитуда сигнала выше для газонасыщенных трещин, чем для флюидонасыщенных.

Одно из преимуществ численного моделирования перед натурным экспериментом — возможность анализа полного тензора напряжений и вектора скорости в каждом узле расчетной сетки в последовательные моменты времени. Так, например, могут быть построены волновые картины (зависимость модуля скорости от координат в градациях серого цвета) в главных сечениях расчетной области. Исследование их в последовательные моменты времени позволяет однозначно идентифицировать направление распространения каждой компоненты сейсмического отклика в гетерогенной среде. Второй полезный вид отображения — отрисовка в каждом узле направления движения частиц среды в виде 3D-вектора в соответствующий момент времени.

На рисунке 4 два описанных вида представления волновых картин объединены в одно изображение, что позволяет существенно упростить интерпретацию результатов расчетов. Так, видно, что при прохождении через трещиноватую среду продольной волны образуется не только продольная проходящая волна, но и поперечная. При этом к дневной поверхности распространяется продольная волна, за которой следует более интенсивная поперечная. Ясно видны как плоские, так и боковые части компонент отклика, а также волновое межтрещинное взаимодействие, приводящее к образованию «шлейфовых» волн.

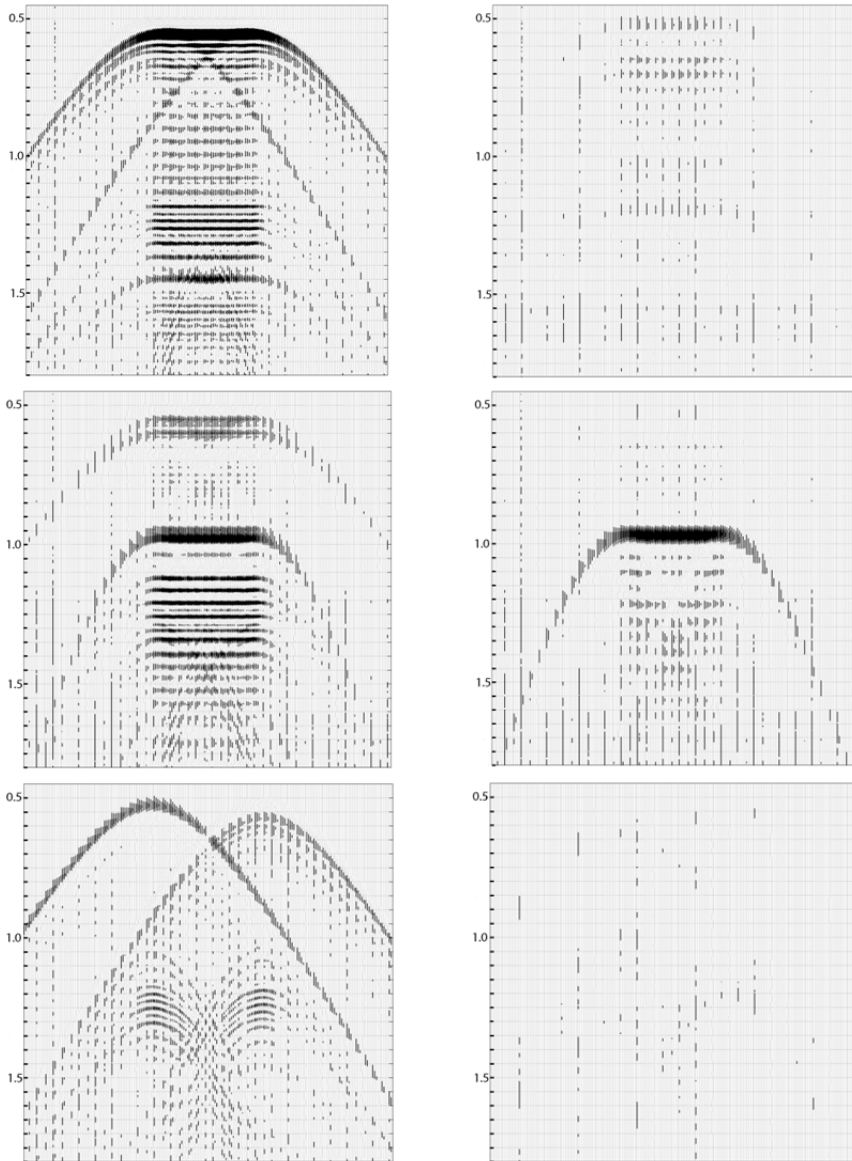


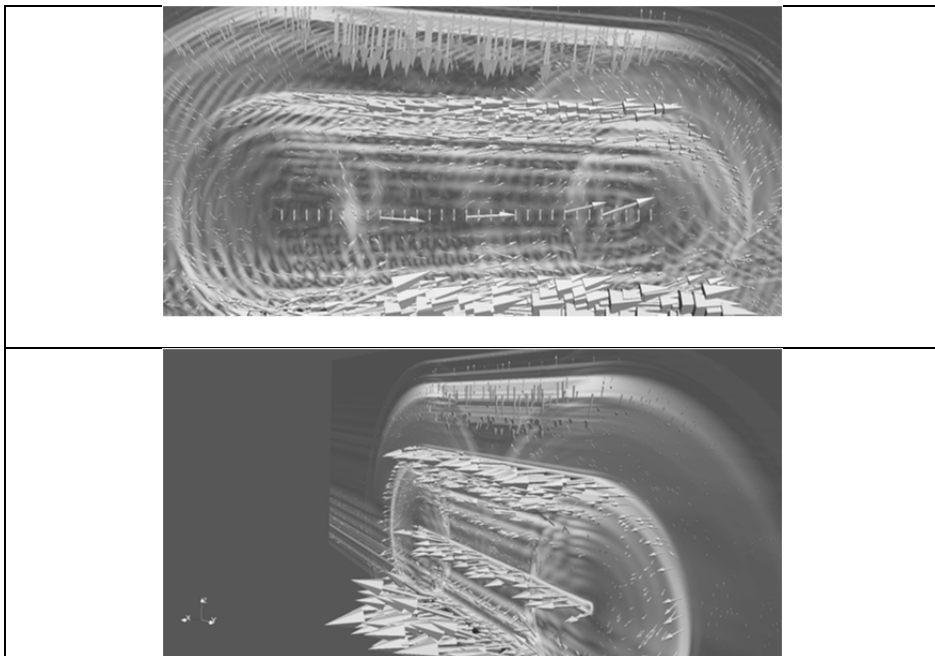
Рис. 3. Сейсмограммы V_z , V_x , V_y (сверху вниз) вдоль профиля OY (вдоль плоскости трещин) для газонасыщенных (слева) и флюидонасыщенных (справа) трещин

Заключение

В результате нашего исследования разработаны оригинальные методы численного моделирования сейсмических откликов от трещиноватых (газонасыщенных и флюидонасыщенных) геологических сред в полной трехмерной постановке на параллелепипедных сетках. Данные методы позволяют проводить моделирование процесса сейсмической



разведки месторождений полезных ископаемых и строить синтетические сейсмограммы с учетом межтрещинного взаимодействия, взаимодействия волновых фронтов, влияния внешних и внутренних границ, различия вида насыщения трещин.



145

Рис. 4. Сечения расчетной области плоскостью OXZ (сверху) и OYZ (снизу).

Насыщение трещин – газ. Градациями серого цвета отмечен модуль скорости среды, а стрелками – вектор скорости в данной точке.

К моменту измерения произошло формирование всех основных компонент сейсмического отклика

Разработанные методы реализованы в виде параллельного вычислительного комплекса, позволяющего выполнять моделирование, как на стандартном оборудовании, так и на современных высокопроизводительных вычислительных системах.

Выполнено исследование сейсмических откликов от кластера вертикальных трещин в однородном вмещающем массиве. Получены синтетические сейсмограммы при трехкомпонентной регистрации вдоль двух перпендикулярных профилей и волновые картины динамических процессов. Проведен детальный анализ результатов, включающий сравнение откликов для разных видов насыщения трещин (газонасыщенные и флюидонасыщенные). Экспериментально получен эффект генерации высокочастотных «шельфовых» волн от трехмерных периодических структур.

Результаты численного моделирования могут быть использованы для экспериментальной проверки существующих методов обработки данных поисковых сейсмических исследований, а также для их усовершенствования.



Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-31181 и стипендии Президента РФ СП-2548.2013.5.

Список литературы

1. Волож Ю. А., Дмитриевский А. Н., Леонов Ю. Г. и др. О стратегии очередного этапа нефтепоисковых работ в прикаспийской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, №4. С. 341 – 362.
2. Schoenberg M., Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks // Geophysical Prospecting. 1988. Vol. 36, Iss. 6. P. 571 – 590.
3. Berryman J. G. Modeling high-frequency acoustic velocities in patchy and partially saturated porous rock using differential effective medium theory // International Journal of Multiscale Computational Engineering. 2004. № 2. P. 115 – 131.
4. Петров И. Б., Квасов И. Е. Численное исследование анизотропии волновых откликов от трещиноватого пласта сеточно-характеристическим методом // Математическое моделирование. 2011. Т. 18, №8. С. 18 – 24.
5. Петров И. Б., Левянт В. Б., Муратов М. В. Численное моделирование волновых откликов от системы (кластера) субвертикальных макротрещин // Технологии сейсморазведки. 2012. №1. С. 5 – 21.
6. Петров И. Б., Холодов А. С. Численное исследование некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // Журнал выч. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, №5. С. 722 – 739.
7. Магомедов А. М., Холодов А. С. Сеточно-характеристические численные методы. М., 1988.
8. Голубев В. И., Петров И. Б., Хохлов Н. И. Численное моделирование сейсмической активности сеточно-характеристическим методом // Ж. выч. матем. и матем. физ. 2013. Т. 53, №10. С. 1709 – 1720.
9. Голубев В. И. Методика отображения и интерпретации результатов полно-волновых сейсмических расчетов // Труды МФТИ. 2014. Т. 6, № 1. С. 154 – 161.

Об авторах

Василий Иванович Голубев – асп., Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный.
E-mail: w.golubev@mail.ru

Игорь Борисович Петров – д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. РАН, Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный.
E-mail: petrov@mipt.ru

About the authors

Vasily Golubev – PhD student, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny.
E-mail: w.golubev@mail.ru

Prof. Igor Petrov – correspondence member of RAS, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny.
E-mail: petrov@mipt.ru