

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНОВАТЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОБЛОЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СЕТОК

Н. И. Хохлов

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2460-0137>, khokhlov.ni@mipt.ru

Аннотация: основной задачей, стоящей перед сейсмической разведкой, является восстановление структуры и свойств подповерхностного пространства на основе регистрации колебаний земной поверхности. Для этого необходимо решить обратную задачу, что, в свою очередь, требует решения серии прямых задач с последовательно изменяющейся моделью геологического массива. В связи с открытием нетрадиционных месторождений (например, Баженовская свита), актуальной становится задача интерпретации сейсмического сигнала, обусловленной неоднородной структурой трещиноватых пластов. В настоящей работе была построена трещиноватая модель, отражающая некоторые особенности нефтеносных геологических сред. Проведено численное моделирование распространения сейсмических волн и получены синтетические площадные сейсмограммы. Также был проведен анализ сейсмического отклика.

Ключевые слова: сеточно-характеристический метод, трещиноватые модели, сейсмическое моделирование.

Благодарности: автор выражает благодарность член.-корр. РАН И. Б. Петрову и к.т.н. В. Б. Левянту.

Для цитирования: Хохлов Н. И. Моделирование трещиноватых неоднородностей сеточно-характеристическим методом с использованием многоблочных структурных сеток. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):50–56. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-6.

SIMULATION OF FRACTURED ROCK HETEROGENEITY WITH THE GRID CHARACTERISTIC METHOD USING STRUCTURED MULTIBLOCK GRIDS

Nikolay I. Khokhlov

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2460-0137>, khokhlov.ni@mipt.ru

Abstract: the key objective of seismic exploration is the recreation of the subsoil structure and properties by registering the surface waves. To solve a reverse problem, several direct problems shall be solved as the rock model is gradually changed. As non-conventional deposits are discovered (like the Bazhenov suite), it becomes necessary to interpret the seismic response caused by the heterogeneous structure of the fractured rock. This study presents a fractured rock model that represents some features of oil-bearing geology. The seismic waves propagation was simulated, and composed wide-patch seismic records were produced. The seismic response was also analyzed.

Keywords: grid characteristic method, fractured rock models, seismic simulation.

Acknowledgements: I would like to express my gratitude to I.B. Petrov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, and V. B. Levyant, PhD (Engineering).

Cite this article: Khokhlov N. I. Simulation of Fractured Rock Heterogeneity with the Grid Characteristic Method Using Structured Multiblock Grids. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(3):50–56. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-6.

Введение

Нефть и газ, безусловно, остаются одними из основных ресурсов, составляющих энергетический комплекс Российской Федерации. Несмотря на бурное развитие альтернативных источников энергии, весь мир в значительной степени зависит от запасов разведанных месторождений. Ввиду их

существенного истощения актуальной является задача поиска и разведки новых залежей, для решения которой на практике используют гравиметрические, электромагнитные и сейсмические методы. Последние из них являются стандартом в силу высокой точности получаемых оценок, относительно невысокой стоимости и хорошо отработанных методик, разработанных в различных сервисных компаниях. Основной задачей, стоящей перед сейсмической разведкой, является восстановление структуры и свойств подповерхностного пространства на основе регистрации колебаний земной поверхности. Для этого необходимо решить обратную задачу, что, в свою очередь, требует решения серии прямых задач с последовательно изменяющейся моделью геологического массива. При этом точность их решения является решающей для корректного восстановления структуры среды. В связи с этим за последнее время было разработано множество различных численных методов, позволяющих с высокой точностью рассчитывать волновое поле в заданной среде с распределенными по пространству параметрами [1, 2]. Одним из ограничений данных методов является невозможность явного учета трещиноватых включений, характерных для нефтеносных пластов. Оно было преодолено, например, в работах [3–4] с использованием сеточно-характеристического метода [5] на структурных и неструктурных расчетных сетках.

В связи с открытием нетрадиционных месторождений (например, Баженовская свита), актуальной становится задача интерпретации сейсмического сигнала, обусловленная неоднородной структурой трещиноватых пластов.

В настоящей работе была построена трещиноватая модель, отражающая некоторые особенности нефтеносных геологических сред. Было проведено численное моделирование распространения сейсмических волн и получены синтетические площадные сейсмограммы. Был проведен анализ сейсмического отклика.

Математическая модель

В работе рассматривается модель распространения сейсмических волновых возмущений, основанная на линейной теории упругости. Рассматривается следующая система уравнений [6–7]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t))^T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t) = \left(\rho c_P^2 - 2\rho c_S^2 \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)) \mathbf{I} + \rho c_S^2 \left(\nabla \otimes \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) + (\nabla \otimes \mathbf{v}(\mathbf{r}, t))^T \right). \quad (2)$$

Здесь и далее $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ — векторное поле скорости (производная смещения по времени), $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, t)$ — тензорное поле симметричного тензора напряжений второго ранга Коши, ρ — плотность, c_P , c_S , c — скорости продольной (P-), поперечной (S-) волн в упругой среде и скорость звука в акустической среде, соответственно, $\mathbf{I}$ — единичный тензор второго ранга, $\otimes$ — знак тензорного произведения векторов, $(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})_{ij} = a_i b_j$.

При решении упругого волнового уравнения используется модель бесконечно тонких флюидонасыщенных трещин. В работе изучалась двубереговая модель трещин, узел каждой трещины рассматривается как два близлежащих узла, контактирующих между собой, с контактным условием свободного скольжения:

$$\mathbf{v}^L \cdot \mathbf{m} = \mathbf{v}^R \cdot \mathbf{m}, \quad (3)$$

$$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^L \cdot \mathbf{m} = \mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^R \cdot \mathbf{m}, \quad (4)$$

$$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^L \cdot \mathbf{m} - \boldsymbol{\sigma}^L \cdot \mathbf{m} = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{m} \cdot \boldsymbol{\sigma}^R \cdot \mathbf{m} - \boldsymbol{\sigma}^R \cdot \mathbf{m} = 0. \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{m}$ — внешняя нормаль к границе, когда речь идет о граничном условии, и внешняя нормаль к левому телу, когда речь идет о контактном условии.

Построение геологической модели

При построении двумерной модели исследовался такой трещиноватый объект, как «мегатрещина». Терминология используется из работы [8], мегатрещина представляет собой наиболее крупный элемент в четырехуровневой градации трещин в нефтегазовой геологии и геофизике [9]. Мегатрещины характеризуются размерами: по высоте — от первых десятков до первых сотен метров; по протяженности — от первых сотен метров до первых километров и толщиной, измеряемой метрами или первыми десятками метров с заполнением дробленой или растреснутой породой. Трещины и пустоты между

раздробленными кусками породы заполнены жидкостью или газом. Плотность макротрещин, с преобладающей раскрытостью 0,2 мм, обычно составляет 1–2 на метр толщины мегатрещины [8].

Модель среды, вмещающая мегатрещину, отображала многослойный карбонатный разрез с увеличивающийся с глубиной скоростью и плотностью пород. Параметры четырехслойной среды с мегатрещиной во втором слое приведены в таблице.

Таблица 1

Таблица. Параметры модели среды, вмещающей мегатрещину

Параметр	Значение
L	8000 м
H1 толщина слоя 1	2000 м
H2 толщина слоя 2	100 м
H3 толщина слоя 3	10 м
H4 толщина слоя 4	500 м
α , угол трещины	10°
Слой1, м/с, кг/м ³	$V_p = 4051, V_s = 2272, \rho = 2272$
Слой2 (с трещиной), м/с, кг/м ³	$V_p = 4500, V_s = 2500, \rho = 2500$
Слой3, м/с, кг/м ³	$V_p = 5000, V_s = 2750, \rho = 2750$
Слой4, м/с, кг/м ³	$V_p = 5601, V_s = 3111, \rho = 3000$

Мегатрещина высотой 200 м и толщиной 10 м расположена во 2-ом пласте. Ее верхний конец ниже его кровли на 100 м. Она наклонена на угол 10 градусов (от вертикали). Внутренняя структура мегатрещины представляет пучок 20-ти параллельных макротрещин [8]. Модель мегатрещины изображена на рис. 1.

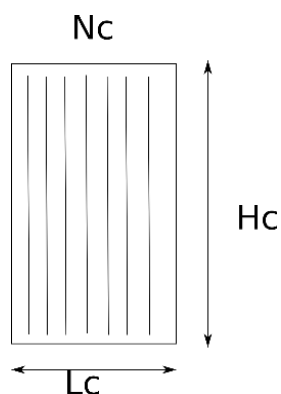


Рис. 1. Модель мегатрещины

Высота мегатрещины H_c , ширина L_c , количество трещин в мегатрещине N_c . Трещины заполнены флюидом. Параметры мегатрещины:

№	H_c , м	L_c , м	N_c
1	200	10	20

На рисунке 2 схематично изображена построенная геологическая модель.

Система наблюдения представляет собой базу приема — 4000 м, с шагом между приемниками 50 м. 40 источников с шагом 100 м расположены в середине расстановки от 2-го до 6-го километра. Профиль линии приема расположен по нормали к простиранию мегатрещины. Регистрация вертикальной (Z) и горизонтальной (X) компонент записи. Длина записи 2,5 с, шаг дискретизации 2 мс. Источник — импульс Риккера 30 Гц.

Для моделирования построенной модели использовался подход на блочных сетках. Мегатрещина была дискретизирована в виде структурной криволинейной сетки, окруженной блоками структурных прямоугольных сеток. Схематично структура сеток изображена на рисунке 3.

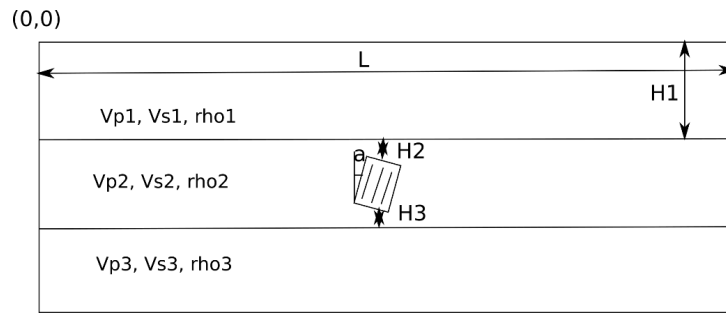


Рис. 2. Модель среды, вмещающая мегатрещину

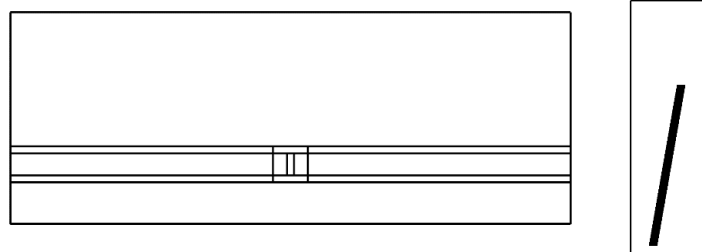


Рис. 3. Схематичное изображение многоблочной расчетной сетки для описания построенной модели. Слева отображены блоки структурных сеток, справа — расположение системы из 20 трещин в криволинейной сетке в центре системы сеток

Результаты моделирования

На рис. 4 и 5 приведены подборки сейсмограмм соответственно X и Z компонент с расположением пункта возбуждения в центре и по краям базы возбуждения. Такое представление материала преследовало цель максимально полного проявления волнового отклика от мегатрещины среди отраженных волн слоистого разреза.

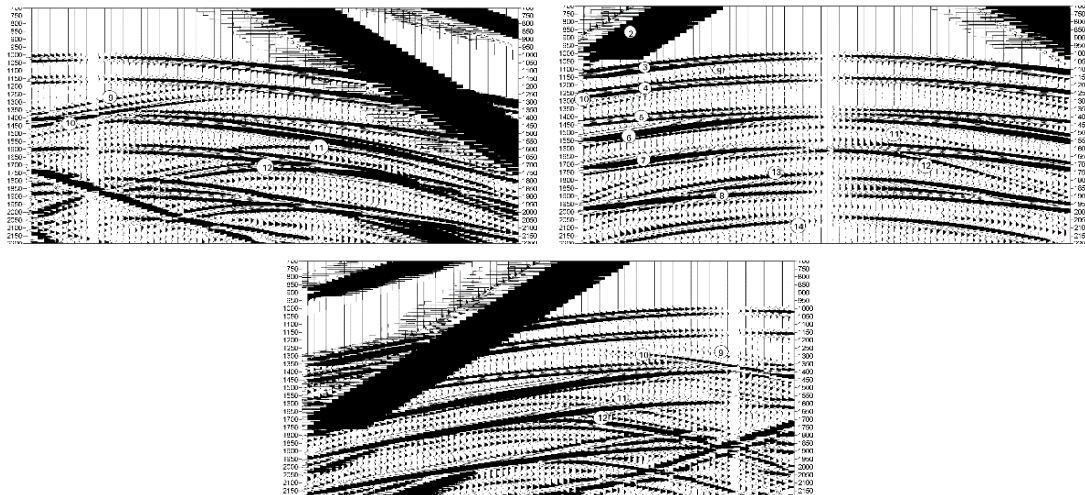


Рис. 4. Площадные сейсмограммы для компоненты X скорости среды

На приведенных сейсмограммах цифрами обозначены волны, расшифровка которых дается ниже: 1 — прямая волна от источника; 2 — волна Релея; 3 — продольное отражение от 1-ой границы (PP-1); 4 — продольное отражение от 2-ой границы (PP-2); 5 — продольное отражение от 3-ей границы (PP-3); 6 — обменное отражение от 1-ой границы (PS-1); 7 — обменное отражение от 2-ой границы (PS-2); 8 — обменное отражение от 3-ей границы (PS-3); 9 — дифрагированная продольная волна от верхнего конца мегатрещины (Dpp-в); 10 — дифрагированная продольная волна от нижнего конца мегатрещины (Dpp-н); 11 — дифрагированная обменная волна от верхнего конца мегатрещины (Dps-

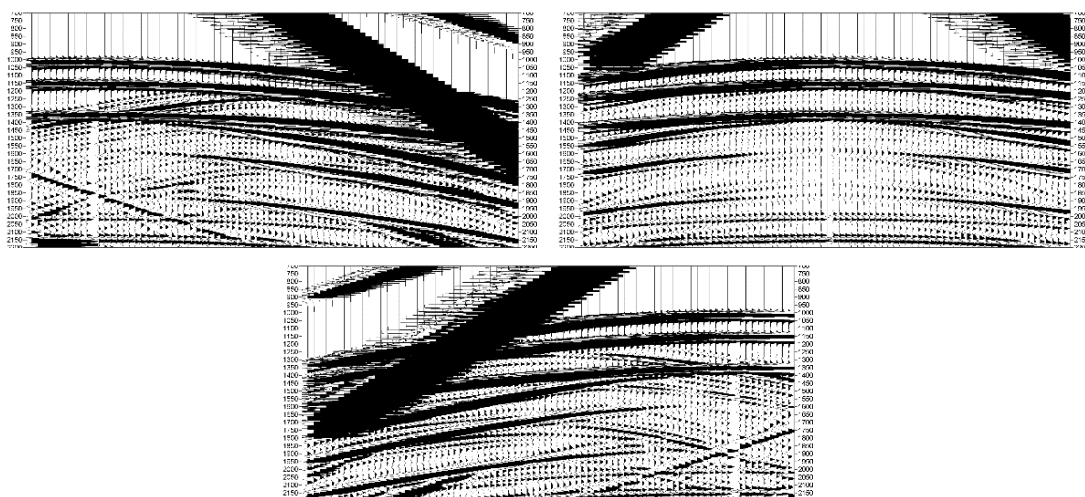


Рис. 5. Площадные сейсмограммы для компоненты Z скорости среды

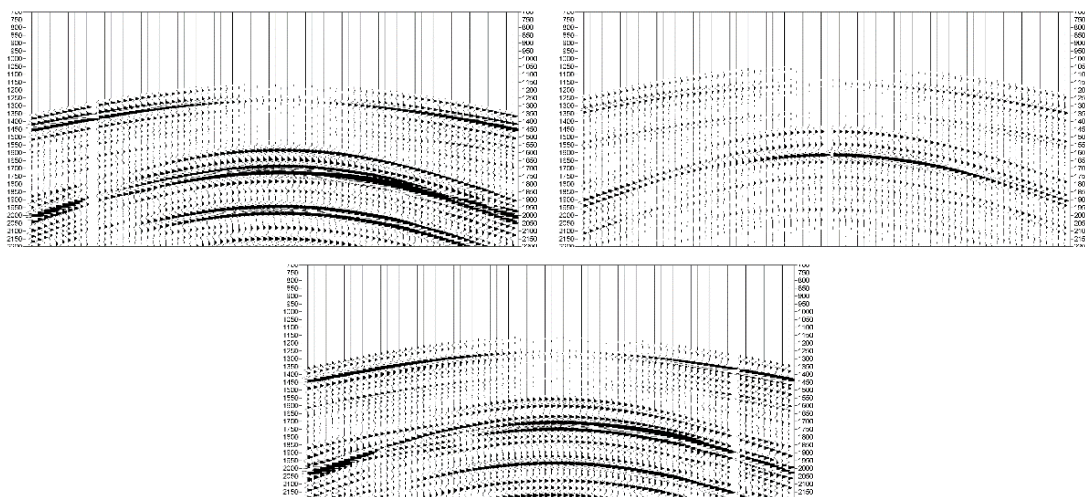


Рис. 6. Площадные сейсмограммы для компоненты X скорости среды. Полное поле с наличием, отсутствием трещины и аномальное поле

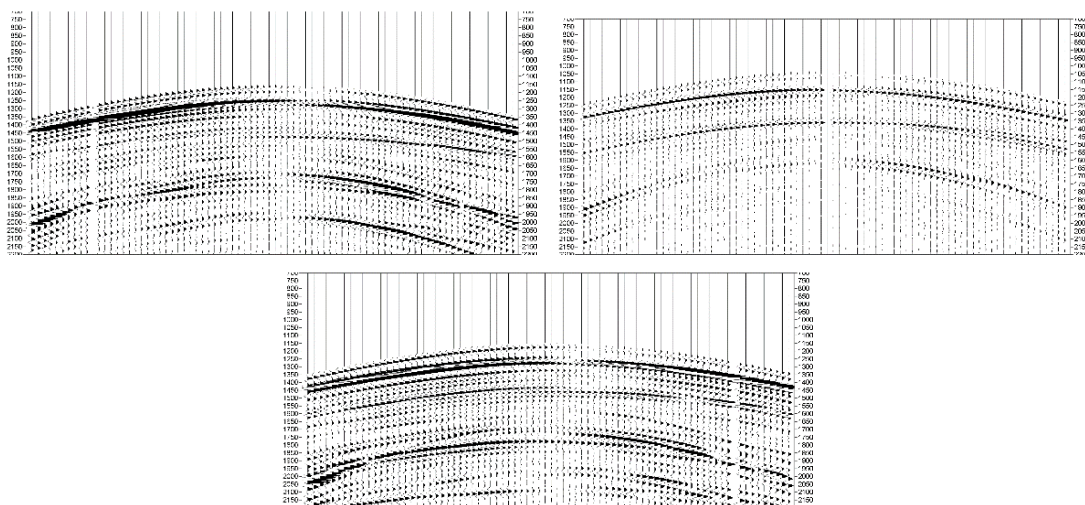


Рис. 7. Площадные сейсмограммы для компоненты Z скорости среды. Полное поле с наличием, отсутствием трещины и аномальное поле

в); 12 — дифрагированная обменная волна от нижнего конца мегатрещины (Dps-н); 13 — поперечная отраженная волна от 1-ой границы (SS-1); 14 — поперечная отраженная волна от 2-ой границы (SS-2).

В целях получения в «чистом виде» дифрагированных волн от мегатрещины, являющихся основным источником информации о ней, были получены разности сейсмограмм при наличии в разрезе мегатрещины и при ее отсутствии. Иллюстрирует этот прием рис. 6, на котором представлены для центрального ПВ 3 кадра записи X-компоненты при наличии в разрезе мегатрещины, при том же разрезе, но при ее отсутствии и разности сейсмограмм. Аналогичная компоновка записей на Z-компоненте представлена на рис. 7.

На рисунке 8 приведен сравнительный анализ волн для расчета с трещиной и без трещины.

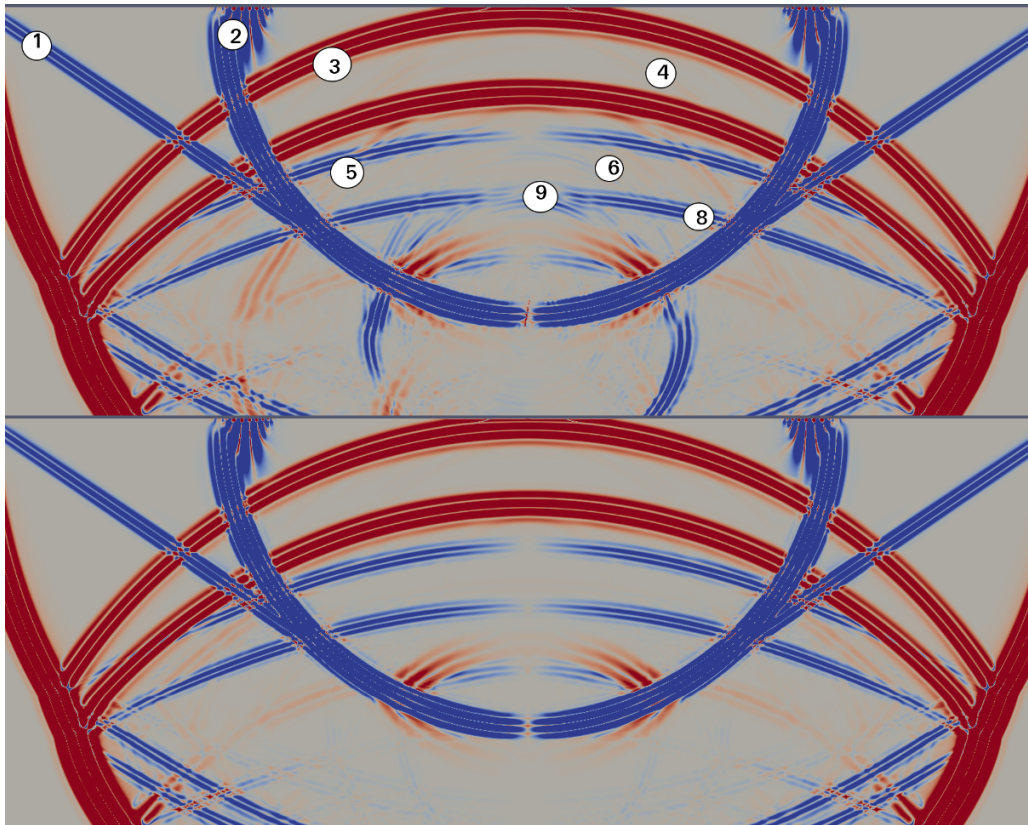


Рис. 8. Сравнительный анализ волн для расчета с трещиной (вверху) и без трещины. Красный цвет соответствует продольной составляющей, синий — поперечной. Волновая картина для времени 1с. 1 — продольная волна от источника; 2 — волна Релея от источника; 3 — продольная волна от первой границы; 4 — продольная волна от верхней границы трещины; 5 — поперечная волна от первой границы; 6 — поперечная волна от трещины; 8 — поперечная волна от нижней границы; 9 — поперечная волна от трещины

В целом, проведенный анализ показывает возможность обнаружений трещиноватого объекта типа мегатрещина на сейсмограммах. Это позволяет надеяться на возможность частичного ее восстановления в рамках акустической инверсии.

Заключение

В работе построена геологическая модель, содержащая объект типа «мегатрещина». Модель среды, вмещающая мегатрещину, отображала многослойный карбонатный разрез с увеличивающийся с глубиной скоростью и плотностью пород. Было проведено моделирование с использованием сеточно-характеристического метода на структурных сетках. Показана возможность расчета достаточно сложных геологических моделей с использованием многоблочных сеток. Был проведен анализ волновых откликов от системы типа мегатрещина и анализ площадных сейсмограмм. Проведенный анализ показывает возможность обнаружения такого рода объектов по сейсмограммам и возможность их обнаружения с применением современных методов инверсии.

REFERENCES

1. Carcione J. M., Herman G. C., Kroode P. E. Y2K Review Article: Seismic Modeling. *Review Literature and Arts of the Americas*. 2002;67(4):1304–1325.
2. Virieux J., Calandra H., Plessix R. E. A Review of the Spectral, Pseudo-Spectral, Finite-Difference and Finite-Element Modelling Techniques for Geophysical Imaging. *Geophys. Prospect*. 2011;59(5):794–813.
3. Golubev V. I., Petrov I. B., Khokhlov N. I., Shul'ts K. I. Numerical Computation of Wave Propagation in Fractured Media by Applying the Grid-Characteristic Method on Hexahedral Meshes. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015;55(3):509–518.
4. Kvasov I. E., Pankratov S. A., Petrov I. B. Numerical Study of Dynamic Processes in a Continuous Medium with a Crack Initiated by a Near-Surface Disturbance by Means of the Grid-Characteristic Method. *Math. Models. Comput. Simul.* 2011;3(3):399–409.
5. Petrov I. E., 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;24(3):61–73.
6. Favorskaya A. V., Zhdanov M. S., Khokhlov N. I., Petrov I. B. Modelling the Wave Phenomena in Acoustic and Elastic Media with Sharp Variations of Physical Properties Using the Grid-Characteristic Method. *Geophys. Prospect*. 2018;66(8):1485–1502. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12639>.
7. Favorskaya A. V., Petrov I. B. Numerical Modeling of Wave Processes in Rocks by the Grid-Characteristic Method. *Math. Model. Comput. Simulations*. 2018;10(5):639–647.
8. Leviant V. B., Biryukov V. A., Petrov I. B. Numerical Simulation/Modeling of Seismic Wave Responses from Megafractures – Fractured Corridors – Aimed at Identifying the Megafractures on Seismic Sections. *Russian Geophysics*. 2017;S:62–75. (In Russ.)
9. MacBeth C., Bischoff R., Bejaoui R. Integrated Modeling of the Mature Ashtart Field. *67th EAGE Conference*. Madrid, Spain, 2005. Extended Abstracts, SPE 94007.