

УДК 519.63

О ПОСТРОЕНИИ МИГРАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

© 2017 г. В. И. Голубев^{1,*}, О. Я. Войнов¹, академик РАН Ю. И. Журавлёв²

Поступило 11.05.2017 г.

Рассматривается задача численного моделирования распространения сейсмических волн в трещиноватых геологических средах. Для описания их динамического поведения используется определяющая система уравнений теории упругости с явным выделением всех границ трещиноватых неоднородностей (решается задача контактного разрыва). Предложен алгоритм, позволяющий построить миграционное изображение данной среды. Отличительной особенностью разработанного подхода является возможность использования трещиноватой фоновой модели среды. Для численного расчёта прямого и сопряжённого полей используется сеточно-характеристический метод на гексаэдральных расчётных сетках.

DOI: 10.7868/S0869565217260048

В настоящее время сейсмическая разведка является наиболее распространённым методом поиска и разведки месторождений нефти и газа. При этом по типу источника полевые исследования можно разделить на взрывную сейморазведку и вибрационную сейморазведку. В обеих модификациях производится регистрация слабых колебаний земной поверхности, вызванных сейсмическими волнами, отражёнными от глубоко залегающих геологических неоднородностей. Как правило, нефтяные и газовые залежи приурочены к местам расположения трещиноватых объектов (кластеров). Одной из задач сейморазведки, называемой задачей миграции [1, 2], является восстановление отражающих горизонтов по известной фоновой модели среды.

В настоящей работе рассматривается задача распространения упругих волн в трещиноватой среде. Математическая постановка задачи включает в себя систему уравнений теории линейной упругости [3] и дополнительные корректоры, описывающие динамическое поведение газонасыщенных и флюидонасыщенных сред [4]. Предложен алгоритм, позволяющий при построении миграционного изображения учитывать априорные данные о трещиноватых объектах, включая их в явном виде в фоновую модель среды.

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный Московской обл.

² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии наук, Москва

*E-mail: w.golubev@mail.ru

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Динамическое состояние линейной упругой среды описывается определяющей системой уравнений в частных производных вида

$$\rho \dot{v}_i = \nabla_j \sigma_{ij},$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = q_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}.$$

Здесь ρ – плотность среды, v_i – компоненты вектора скорости смещения, σ_{ij} и ε_{kl} – компоненты тензоров напряжений Коши и деформации, ∇_j – ковариантная производная по j -й координате. Вид компонент тензора 4-го порядка q_{ijkl} определяется реологией среды. Для линейного упругого изотропного случая они имеют вид

$$q_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}).$$

В этом соотношении, которое обобщает закон Гука, λ и μ – параметры Ламе, а δ_{ij} – символ Кронекера.

Задача построения миграционного изображения относится к классу обратных задач геофизики [5, 6]. В общем случае для её решения [7] может быть использовано условие визуализации с ядром плотности K_p , которое определяется из выражения

$$K_p(\mathbf{x}) = -\rho(\mathbf{x}) \int v^\dagger(\mathbf{x}, -t) v(\mathbf{x}, t) dt,$$

где v – скорость, v^\dagger – сопряжённая величина, и расчёт проводится для фоновой модели среды. Для получения сопряжённого поля скоростей используется сопряжённый источник – в правую

часть определяющей системы уравнений добавляется величина

$$f^\dagger(\mathbf{x}, t) = \sum_r [s(\mathbf{x}_r, -t) - d(\mathbf{x}, -t)]\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_r).$$

Здесь s и d – синтетическая и полевая сейсмограммы, суммирование ведётся по всем приёмникам.

Для численного решения используется сеточно-характеристический метод на гексаэдральных расчётных сетках [8–11]. Построение миграционного изображения производится в несколько этапов. Сначала для фоновой модели среды решается прямая задача с конфигурацией источников и приёмников, соответствующей произведённым наблюдениям. В результате этого получают синтетические поля и сейсмограммы. Последние вместе с полевыми сейсмограммами используются на втором этапе для моделирования сопряжённого поля. Наконец, синтетическое и сопряжённое поля используются для расчёта ядра плотности.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе рассматривались двумерные трещиноватые среды. Область интегрирования представляла собой прямоугольник со сторонами 8 и 2,9 км и следующими характеристиками: скорость распространения продольных волн 4051 м/с, скорость распространения поперечных волн 2272 м/с, плотность 2272 кг/м³. Источник имел временную зависимость в виде импульса Рикера с пиковой частотой 30 Гц. Рассматривались различные конфигурации трещиноватых включений:

1) две вертикальные газонасыщенные трещины на расстоянии 3 км протяжённостями 200 м левая и 300 м правая. Центр правой трещины смещён по вертикали относительно центра левой на 100 м вниз (модель 1);

2) одна отклонённая на 10° от вертикали флюидонасыщенная трещина протяжённостью 300 м (модель 2).

На рис. 1 представлено миграционное изображение, построенное для модели 1 с однородной

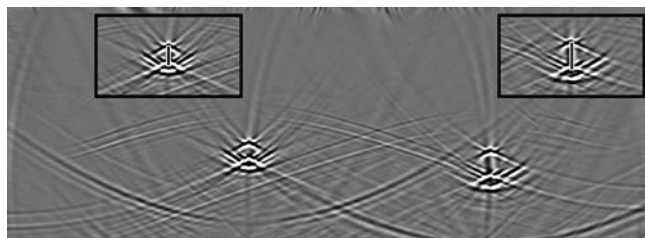


Рис. 1. Миграционное изображение. Две вертикальные газонасыщенные трещины. Однородная фоновая модель.

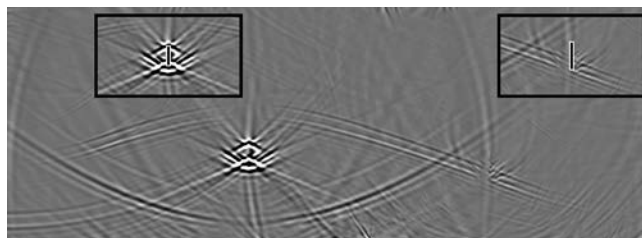


Рис. 2. Миграционное изображение. Две вертикальные газонасыщенные трещины. В фоновую модель включена правая трещина.

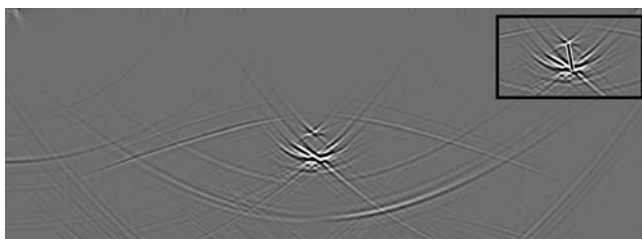


Рис. 3. Миграционное изображение. Субвертикальная флюидонасыщенная трещина. Однородная фоновая модель.

фоновой средой. Как видно, были корректно восстановлены оба геологических объекта. Для иллюстрации возможностей предложенного алгоритма правая трещина в дальнейшем была включена в фоновую модель. Результирующее изображение представлено на рис. 2. На нём всё так же корректно восстанавливается левая трещина. Отметим, что использование криволинейных сеток позволяет моделировать произвольно ориентированные трещины. Так, на рис. 3 представлено изображение, полученное для модели 2. Плоскость (ориентация в пространстве) трещины восстановилась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан численно-математический метод построения миграционных изображений трещиноватых геологических сред. Для численного расчёта прямого и сопряжённого полей в неоднородной, в том числе, возможно, трещиноватой фоновой модели используется сеточно-характеристический метод на гексаэдральных расчётных сетках. В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования для моделей, содержащих как газонасыщенные, так и флюидонасыщенные трещины.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Фонда поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых учёных “Национальное интеллектуальное развитие” в рамках научного проекта № 17–37–80004 “мол_эв_a”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Etgen J., Gray S., Zhang Y.* An Overview of Depth Imaging in Exploration Geophysics // *Geophysics*. 2009. V. 74. P. WCA5–WCA17.
2. *Voinov O. Ya., Golubev V.I., Petrov I.B.* Elastic Imaging Using Multiprocessor Computer Systems // *CEUR Workshop Proceedings*. 2016. V. 1787. P. 491–495.
3. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. 3-е изд. М.: Наука, 1976. Т. 1/2.
4. *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 // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2015. V. 55. № 3. P. 509–518.
5. *Zhdanov M.S.* Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems. N.Y.: Elsevier, 2002.
6. *Кабанихин С.И.* Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сиб. науч. изд-во, 2008.
7. *Luo Y., Tromp J., Denel B., Calandra H.* 3D Coupled Acoustic-Elastic Migration with Topography and Bathymetry Based on Spectral-Element and Adjoint Methods // *Geophysics*. 2013. V. 78. № 4. P. S193–S202.
8. *Фаворская А.В., Петров И.Б.* // *ДАН*. 2016. Т. 466. № 6. С. 722–725.
9. *Петров И.Б., Фаворская А.В., Муратов М.В., Бирюков В.А., Санников А.В.* // *ДАН*. 2014. Т. 459. № 4. С. 406–412.
10. *Петров И.Б., Фаворская А.В., Васюков А.В., Ермаков А.С., Беклемишева К.А., Казаков А.О., Новиков А.В.* // *ДАН*. 2014. Т. 459. № 3. С. 285–287.
11. *Golubev V.I., Petrov I.B., Khokhlov N.I.* Compact Grid-Characteristic Schemes of Higher Orders of Accuracy for a 3D Linear Transport Equation // *Math. Models and Computer Simulations*. 2016. V. 8. № 5. P. 577–584.