

М. И. Протасов^{1✉}

Модели трещиноватости и трёхмерное сверточное моделирование: возможности практического использования

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В рамках проведённого исследования созданы трёхмерные реалистичные разно-масштабные синтетические модели зон трещиноватости, описывающие практически значимые геологические модели трещин. С использованием трёхмерного свёрточного моделирования для всех созданных моделей были построены трёхмерные синтетические идеальные дифракционные изображения. При этом для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот. В итоге получилась обширная база данных изображений и моделей, которая позволяет провести исследование потенциальных возможностей характеристики трещиноватых коллекторов и их параметров по сейсмическим данным.

Ключевые слова: модели трещиноватости, дифракционные изображения, трёхмерное свёрточное моделирование

М. И. Protasov^{1✉}

Fracture models and 3D convolutional modeling: practical application capabilities

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Abstract. As part of the study, realistic, multi-scale synthetic 3D models of fracture zones are created, describing practically relevant geological fracture patterns. Using 3D convolutional modeling, 3D synthetic ideal diffraction images are constructed for all created models. For each model, images are generated for several significant seismic frequency ranges. The resulting database of images and models enable the exploration of potential characterization capabilities for fractured reservoirs and their parameters using seismic data.

Keywords: fracture models, diffraction images, 3D convolutional modeling

Введение

Общеизвестно, что трещины и разломы могут существенно влиять на фильтрационные процессы в коллекторах. Поэтому анализ их пространственной структуры и ее моделирование имеет большое значение при планировании разработки и эксплуатации нефтегазовых залежей. При этом по размерам выделяют малые и большие трещины. Абсолютная длина большинства трещин – метры и десятки метров, но она может колебаться от миллиметров до сотен метров [Епифацев, Плетенчук, 2008; Ольховатенко, Трофимова, Ожогина, 2015]. В связи с этим важно и необходимо иметь ответы на вопросы: какие трещины и какие их

параметры можно определить по дифракционным изображениям рассеянных волн.

Для этого в рамках проведённого исследования созданы реалистичные разномасштабные синтетические модели зон трещиноватости, описывающие практически значимые геологические модели трещин. Для всех созданных моделей были построены синтетические идеальные дифракционные изображения.

Для построения таких изображений использовалось трёхмерное свёрточное моделирование [Protasov et. al, 2019], которое позволяет создать изображения за разумное время счёта на достаточно мелких сетках, учитывающих мелкомасштабные особенности трещиноватых сред. Необходимо отметить, что построить такие изображения с использованием полноволнового моделирования с последующей обработкой сейсмических данных не представляется возможным за приемлемое время счёта на современном этапе развития вычислительных методов и вычислительной техники.

В итоге для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот. В итоге получилась обширная база данных изображений и моделей, которая позволяет провести исследование потенциальных возможностей характеристики трещиноватых коллекторов и их параметров по сейсмическим данным.

Моделирование трещиноватых сред

Для моделирования рассмотрены различные классификации трещин и различные горные породы, которые являются трещиноватыми коллекторами, и из них выбраны наиболее распространённые. Также были проанализированы реалистичные масштабы трещин, что привело к решению создать разномасштабные типичные модели трещиноватых коллекторов. В итоге всего создано 4 различных класса моделей, содержащих трещины, различные по масштабу, начиная от самых мелких, заканчивая самыми крупными. При этом в рамках этих классов было решено создавать типичный коллектор с реалистичными, но различными параметрами модели.

Далее было адаптировано статистическое моделирование дискретной сети трещин [Колюхин, Протасов, 2018] для каждого класса модели, и с его использованием были созданы наборы моделей дискретных сетей трещин для каждого класса. Для каждой дискретной сети трещин были созданы модели упругих параметров с использованием осреднения по Шонбергу, при этом значения матрицы породы выбирались исходя из типичных значений соответствующего типа коллектора, а сам коллектор моделировался в предположении, что он является нефте-насыщенным, газо-насыщенным или водо-насыщенным. Таким образом было получено достаточно широкое разнообразие реалистичных коллекторов, как по масштабу, так и физическим свойствам коллектора (Рисунок 1).

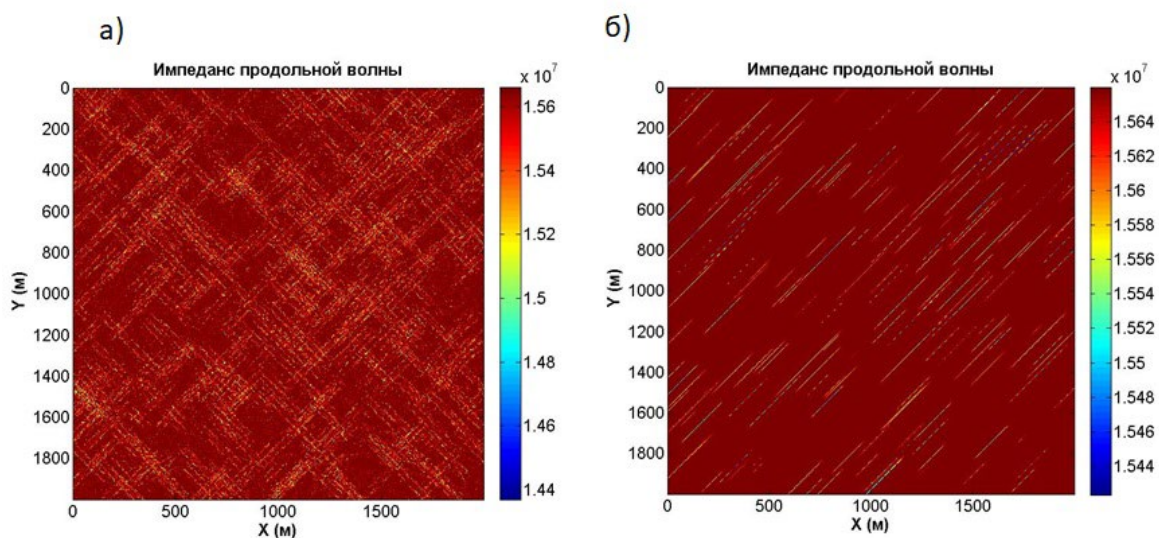


Рис. 1. а) Акустический импеданс продольной волны для модели трещин карбонатного нефте-насыщенного коллектора для участка месторождения, с размерами модели: 2000 м × 2000 м × 100 м. (размер ячейки: 2 метра), где содержатся три уровня трещин: магистральные трещины - крупные, сквозные, определяют фильтрационный каркас; зональные трещины - среднего размера, связаны с деформационными зонами вокруг магистральных трещин; фоновые трещины - мелкие, рассеянные по всему объему породы.
б) Акустический импеданс продольной волны для той же модели, но где она включает только одно семейство магистральных трещин.

Построение дифракционных изображений

Для построения дифракционных изображений любым из возможных алгоритмов необходимо использовать сейсмическую миграцию: «частичную» или «полную», например, на основе условия визуализации в структурных углах [Protasov et al, 2019]. При этом наиболее качественные дифракционные изображения получаются в том случае, когда используется «полная» миграция только рассеянной компоненты сейсмического волнового поля. При отсутствии других волн полученные таким образом дифракционные изображения полностью соответствуют результатам двухмерного/трёхмерного свёрточного моделирования, которое и предлагается использовать. И именно таким образом для всех созданных моделей трещиноватости были построены синтетические идеальные дифракционные изображения. При этом для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот (пример на Рисунке 2). Длины трещин в этом примере лежат в интервале от 100 м до 500 м. Доминирующая длина волны на изображениях на Рисунках 2а, 2б, 2в, 2г равна 580 м, 193 м, 97 м и 64 м соответственно. Даже на основе качественной оценки можно сделать вывод, что частичное извлечение отдельных трещин возможно, когда средняя длина семейства трещин больше длины волны. Извлечение большей части отдельных трещин возможно, когда длины всего семейства трещин больше длины волны.

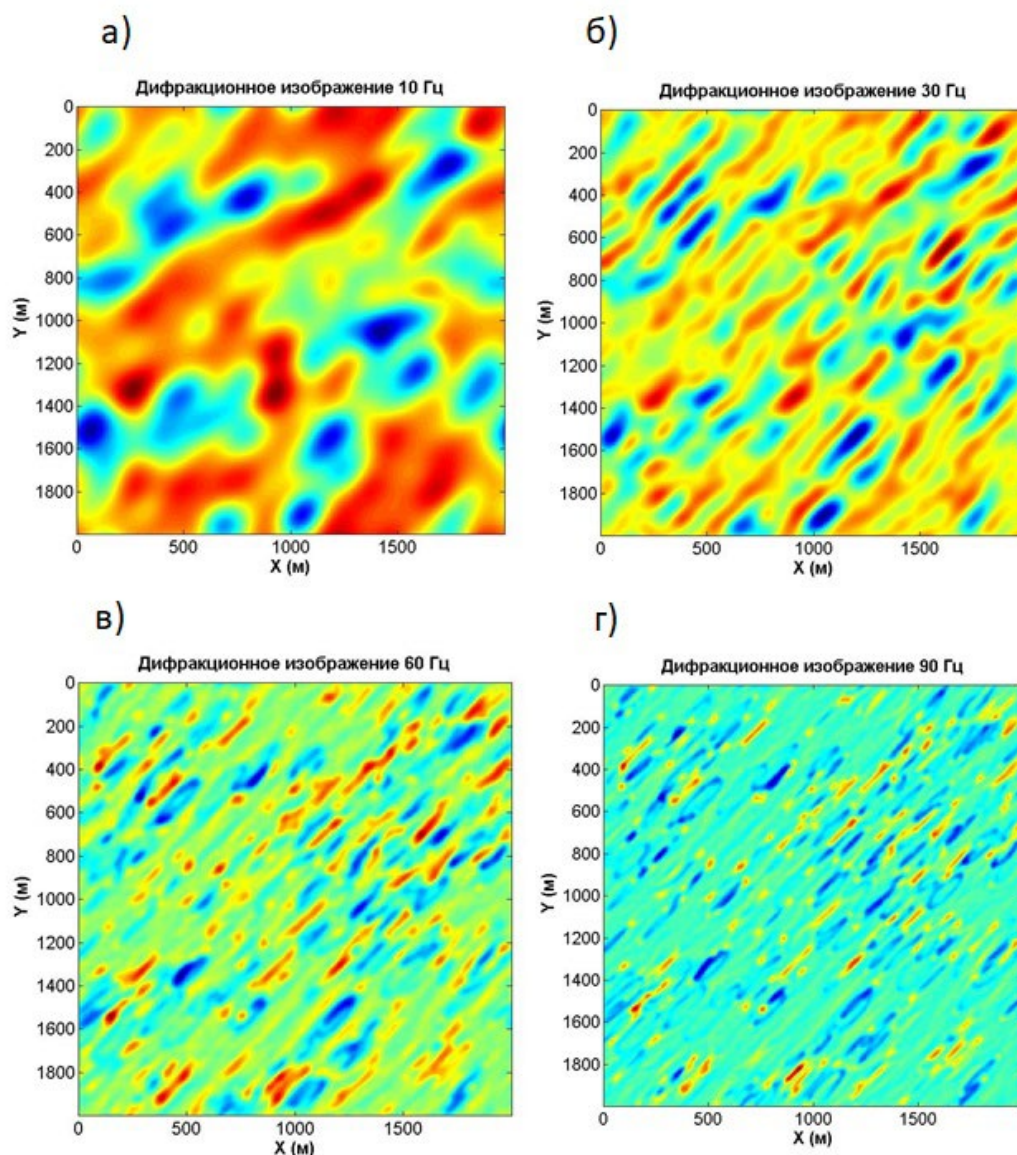


Рис. 2. Дифракционные изображения разных доминирующих частот: а) 10 Гц; б) 30 Гц; в) 60 Гц; г) 90 Гц; для модели трещиноватого коллектора (Рисунок 1б), содержащего только одно семейство магистральных трещин.

Обсуждение и заключение

В рамках данной работы созданы реалистичные разномасштабные синтетические модели зон трещиноватости, описывающие практически значимые геологические модели трещин. Созданы модели для 4 различных классов, содержащих трещины, различные по масштабу, начиная от самых мелких, заканчивая самыми крупными. При этом в рамках каждого из этих классов использовался типичный коллектор с реалистичными, но различными параметрами модели.

Для всех созданных моделей построены синтетические идеальные дифракционные изображения. При этом для каждой модели были построены изображения для нескольких значимых сейсмических диапазонов частот. В итоге получилась обширная база данных изображений и моделей, которая позволяет провести

исследование и получить ответы на вопросы: какие трещины и какие их параметры можно определить по дифракционным изображениям рассеянных волн.

В результаты качественной оценки построенных моделей и изображений сделаны определённые выводы. Извлечение отдельных трещин невозможно, когда максимальная длина семейства трещин меньше длины волны. Частичное извлечение отдельных трещин возможно, когда средняя длина семейства трещин больше длины волны. Извлечение большей части отдельных трещин возможно, когда длины всего семейства трещин больше длины волны.

Благодарности

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда грант №21-71-20002-П. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епифацев О.Г., Плетенчук Н.С. Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения: Новокузнецк: издательство СибГИУ. – 2008. – 41 с.
2. Колюхин Д.Р., Протасов М.И. Статистическое моделирование дискретной системы трещин в сейсмическом диапазоне частот: Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т. 19. – С. 270–281.
3. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И., Ожогина Т.В., Методы изучения трещиноватости горных пород: Томск: издательство ТГАСУ. – 2015. – 80 с.
4. Protasov M.I., Gadyshin K.G., Tcheverda V.A., Pravduhin A.P. 3D diffraction imaging of fault and fracture zones via image spectral decomposition of partial images: Geophysical Prospecting. – 2019. – V. 65(5). – P. 1256 – 1270.

© М. И. Протасов, 2026