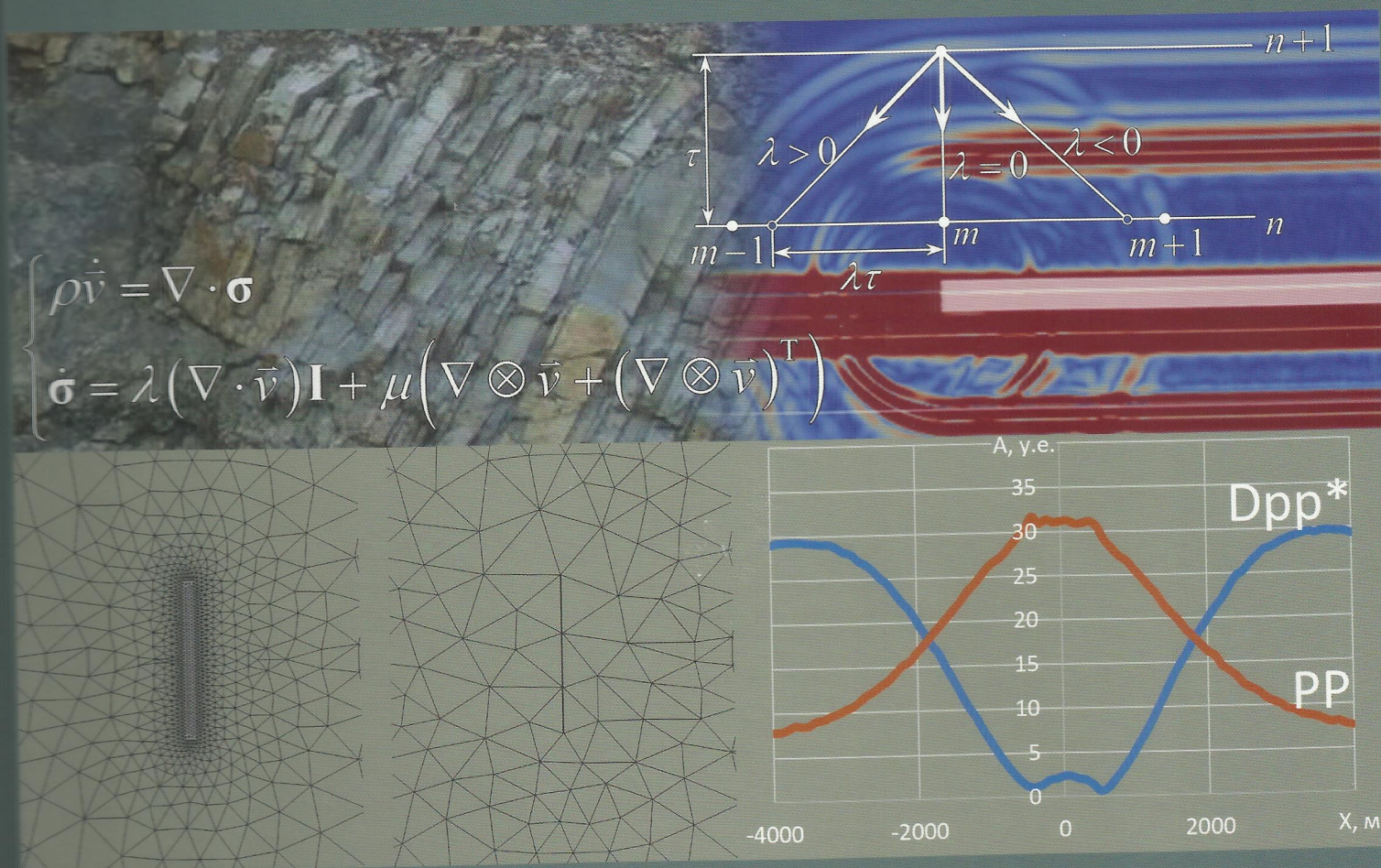


Численное моделирование сейсмических откликов от трещинных коллекторов сеточно-характеристическим методом

Квасов И.Е., Левянт В.Б., Петров И.Б.



$$\begin{cases} \rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \lambda (\nabla \cdot \dot{\mathbf{v}}) \mathbf{I} + \mu (\nabla \otimes \dot{\mathbf{v}} + (\nabla \otimes \dot{\mathbf{v}})^T) \end{cases}$$

EAGE

EUROPEAN
ASSOCIATION OF
GEOSCIENTISTS &
ENGINEERS

УДК 553.98
ББК 26.21
Ч67

Ч67 **Численное моделирование сейсмических откликов от трещинных коллекторов сеточно-характеристическим методом (с целью обоснования прямого обнаружения трещиноватых зон).**
И.Е. Квасов, В.Б. Левянт, И.Б. Петров. — М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2018. — 332 с.

ISBN 978-94-6282-241-2

В книге на основе численного моделирования рассеянных волн — откликов от трещиноватых пластов-коллекторов — обосновывается возможность их прямого обнаружения (картирования). Использованный авторами сеточно-характеристический метод моделирования в отличие от существующих аналогов обеспечил высокоточный расчёт волн с учётом основных свойств реальных трещиноватых пластов-коллекторов: дискретность трещин, их значительное количество в зоне интегрирования и отношение высоты к их толщине равно $10^3 - 10^5$. Проведённые исследования основных типов волн-откликов от трещиноватых резервуаров выявили важное свойство продольных рассеянных волн от флюидонасыщенных пластов-коллекторов. Их амплитудные кривые близки к нулю в районе источника и имеют значительный положительный градиент, что существенно отличает их от таких же кривых отражённых волн. На этом эффекте, а также на особых свойствах обменных рассеянных волн от этих объектов основаны предложенные способы обнаружения (идентификации) волн отклика от трещинного коллектора. В целом сделан первый шаг к прямому обнаружению трещинных коллекторов непосредственно по откликам от них — решению проблемы, несомненно, представляющий интерес для сейсмо-разведчиков.

Книга является вторым, существенно дополненным изданием ранее опубликованного труда авторов «Решение прямых задач сейморазведки в трещиноватых средах методом сеточно-характеристического моделирования с целью исследования возможности прямого обнаружения трещиноватых зон».

Научный редактор
главный геофизик TETRALE Group
Н.Я. Мармалевский

ISBN 978-94-6282-241-2

© ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2018
© Квасов И.Е., 2018
© Левянт В.Б., 2018
© Петров И.Б., 2018
Все права защищены

Содержание

Предисловие	7
Благодарности	8
От авторов	9
Введение	10
ЧАСТЬ I	
СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ	13
Постановка задачи	14
Глава 1. Численное решение уравнений теории линейной упругости.....	18
1.1. Математическая модель.....	20
1.2. Выбор системы координат	21
1.3. Обобщение записи дифференциальных уравнений.....	23
1.4. Спектральное исследование системы	39
1.5. Покоординатное расщепление.....	40
1.6. Сеточно-характеристические схемы.....	43
1.7. Расчет на границе области интегрирования.....	45
1.8. Контакт между двумя телами.....	46
1.9. Случай трансляционной симметрии по одной оси	46
Глава 2. Параллельная реализация численного метода на неструктурированных сетках	62
2.1. Сеточно-характеристический метод на неструктурированных сетках.....	62
2.2. Диаграмма работы параллельной вычислительной программы	63
2.3. Неструктурированные сетки.....	64
2.4. Разбиение сетки на домены	66
2.5. Дополнительные элементы домена	68
2.6. Проблема переиндексации элементов в доменах	72
2.7. Примеры разбиений.....	72
Глава 3. Сеточно-характеристический метод в 3D.....	74
3.1. Интерполяция в тетраэдре	74
3.2. Иерархические сетки с кратным шагом по времени	76
Литература.....	79
ЧАСТЬ II	
ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ ОТ ОДИНОЧНЫХ ТРЕЩИН РАЗНОГО МАСШТАБА И ИХ СИСТЕМ В ПОРОДАХ НЕФТЕГАЗОВЫХ РЕЗЕРВУАРОВ	81
Основные термины	82
Краткая характеристика предыдущих исследований откликов от трещин в горных породах численным моделированием	83
Глава 1. Общие свойства сейсмических откликов от трещин при задании граничных условий на их поверхностях	86
1.1. Характер сейсмического отклика от трещины в зависимости от ее длины, наклона и заполнения.....	86

1.2.	Оценка возможности использования модели бесконечно тонкой трещины при исследовании трещин конечной раскрытости
1.3.	Особенности откликов от вертикальных и субвертикальных флюидонасыщенных трещин
1.4.	Влияние шероховатости поверхности трещины на характер волнового отклика
1.5.	Оценка наличия анизотропии в флюидонасыщенной трещиноватой среде, моделируемой заданием бесконечно тонких трещин, и распространение в ней волн при газонасыщении трещин
Глава 2. Пластовые зоны мезотрещин. Исследование прямого волнового отклика от пластовой зоны субвертикальных однонаправленных мезотрещин	
2.1.	Исследование распространения и характера рассеянных волн от пластовой зоны мезотрещин при возбуждении типа «плоский фронт»
2.1.1.	Общая характеристика волнового отклика от зоны мезотрещин при возбуждении типа «плоский фронт»
2.1.2.	Исследование механизма распространения продольных и поперечных колебаний в мезотрещиноватом пласте
2.1.3.	Влияние на волновой отклик изменения параметров трещиноватого пласта
2.1.4.	Оценка влияния реальных факторов на выделение отклика от пластовых зон мезотрещин
2.2.	Особенности волновых откликов от пластов и зон мезотрещин при точечном возбуждении на протяженных базах приема МОГТ
2.2.1.	Общая характеристика волновых откликов при регистрации Z-компоненты
2.2.2.	Особенности волновых откликов при регистрации X-компоненты в «ближней зоне» систем наблюдения МОГТ
2.3.	Оценка возможности прямого обнаружения пластов и зон мезотрещинных коллекторов генерируемым ими рассеянными волнам
2.3.1.	Примеры применения способов распознавания продольных рассеянных волн от трещиноватых зон при регистрации Z-компоненты
2.3.2.	Примеры использования обменных рассеянных волн с целью обнаружения пластовых зон мезотрещин при регистрации записи X-компоненты
Глава 3. Макротрещины. 2D-моделирование	
3.1.	Характеристика сейсмических откликов от единичной субвертикальной макротрещины
3.1.1.	Состав и особенности волн, формирующих сейсмический отклик от субвертикальной макротрещины в полупространстве при точечном возбуждении и при «плоском фронте»
3.1.2.	Особенности волн, формирующих сейсмический отклик от субвертикальной макротрещины в многослойной среде
3.1.3.	Оценка влияния на сейсмический отклик от макротрещины основных параметров ее характеристики
3.2.	Сейсмический отклик от системы (кластера) близких к вертикали однородно-ориентированных макротрещин
3.2.1.	Состав волнового отклика от кластера макротрещин при возбуждении плоским фронтом
3.2.2.	Характер откликов от кластера макротрещин в слоистом разрезе при возбуждении типа «плоский фронт»
3.2.3.	Оценка влияния на отклик от кластера макротрещин его геометрических параметров и характера заполнения
3.3.	Оценка устойчивости образования фронта обменных рассеянных волн от системы макротрещин при учете реальных факторов

3.3.1. Оценка влияния ступенчатости реальных макротрещин на интенсивность обменного рассеянного фронта (ОРФ)	222
3.3.2. Оценка влияния изменчивости (дисперсии) интервалов d между макротрещинами кластера и углов их наклона α на относительную интенсивность ОРФ	225
3.3.3. Выделение фронта рассеянных обменных волн от кластера макротрещин на суммарных временных разрезах при точечном возбуждении. Признаки идентификации кластера макротрещин	230
3.4. Оценка возможности прямого обнаружения систем макротрещин при использовании МОГТ с протяженными базами приема	234
3.4.1. Особенности волновых откликов от систем макротрещин	234
3.4.2. Примеры выделения систем макротрещин на тестовых профилях	239
Глава 4. Макротрещины в трехмерном пространстве. Объемный (3D) отклик от системы субвертикальных ориентированных макротрещин	250
4.1. Особенности использованной методики трехмерного моделирования	250
4.2. 3D-модель системы макротрещин и расчет волнового куба	253
4.3. Сейсмограммы объемного (3D) отклика от одиночной макротрещины в трехмерном полупространстве	254
4.4. Характеристика объемного отклика от кластера макротрещин на волновых картинах в фиксированные моменты времени	257
4.5. Сейсмограммы объемного отклика от площадного кластера флюидонасыщенных макротрещин	262
4.6. Сейсмограммы объемного отклика от площадного кластера газонасыщенных макротрещин	265
4.7. Различие волнового состава откликов в сечениях вдоль и по нормали к плоскости трещин	269
4.8. Характер площадной амплитудной аномалии, вызванной кластером флюидонасыщенных макротрещин, при съемке 3D и регистрации 3C	269
Глава 5. Мегатрещины. Характеристика сейсмических откликов от мегатрещин – трещиноватых коридоров	272
5.1. Общая характеристика волнового отклика от мегатрещины	272
5.2. Сопоставление волновых откликов от мегатрещин с различным характером их заполнения	274
5.3. Влияние на характер волновых откликов внутренней структуры мегатрещин	276
5.4. Влияние на отклик от мегатрещины внешних факторов ее строения: толщины и высоты	279
5.5. Характер волнового отклика от мегатрещины в слоистом разрезе при наблюдении на протяженных базах приема и точечном возбуждении	281
5.6. Оценка возможности обнаружения мегатрещины на тестовом профиле МОГТ	290
Глава 6. Зоны скопления хаотических трещин и каверн. Анализ природы их откликов	293
6.1. Характеристика моделей со случайно-неравномерным распределением микронеоднородностей (трещин и каверн) в коллекторской макроне	293
6.2. Основные элементы волнового отклика при различных характеристиках внутренней структуры кавернозных зон	295
6.3. Особенности волнового поля при разных характеристиках зон развития трещиноватости	297
6.4. Влияние неравномерности концентрации микронеоднородностей на отклик рассеянной энергии	299
6.5. Количественная оценка неравномерности концентрации микронеоднородностей	301
6.6. Количественная оценка уровня энергии волнового отклика от зоны микронеоднородностей (Исследование энергии в области волнового отклика.)	302

6.7. Оценка связи энергии волнового отклика с уровнем неравномерности концентрации неоднородностей коллекторской зоны

Глава 7. Сопоставление результатов численного и физического моделирования и оценка адекватности метода численного исследования

7.1. Подтверждение физическим моделированием результатов математического моделирования волновых откликов от трещин, близких к вертикали, при наблюдениях во внутренних точках среды (на профилях ВСП)

7.2. Результаты физического моделирования отклика от кластера макротрещин при профильных наблюдениях

7.3. Сопоставление результатов численного и физического моделирования сейсмического отклика от кластеров макротрещин

7.4. Оценка адекватности результатов математического и физического моделирования

Литература

Заключение