

С.В. Гольдин

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ
В АНИЗОТРОПНЫХ
СРЕДАХ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ им. А.А. ТРОФИМУКА

С.В. Гольдин

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Ответственные редакторы
академик *А.Э. Конторович*
академик *М.И. Эпов*



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

2008

УДК 550.3
ББК 26.21
Г63



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 08-05-07020-д.

Гольдин, С.В.

Сейсмические волны в анизотропных средах/ С.В. Гольдин; отв. ред. А.Э. Конторович, М.И. Эпов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. — 375 с.

Монография посвящена теории распространения сейсмических волн в анизотропных средах, физическим свойствам анизотропных сред, природе анизотропии. Изложено современное состояние проблемы математического моделирования распространения упругих волн в анизотропных средах. В основу книги положен курс лекций, прочитанный автором студентам-геофизикам НГУ, обобщающий теоретические и экспериментальные результаты исследований в анизотропных средах. В первой части книги рассмотрены анизотропия математических и природных объектов, упругих сред, взаимосвязь симметрии среды и физических явлений, особенности распространения объемных и поверхностных волн в анизотропных слоистых средах, геометрия индикатрис волновых характеристик, особенности поведения волновых характеристик в сингулярных областях. Значительное внимание уделено постановке задач, описанию физических особенностей волнового процесса, физического эксперимента, выделению основных физических характеристик, которые наиболее полно описывают свойства упругой среды. Вторая часть книги описывает физические и эффективные модели анизотропных сред, влияние напряженного состояния на упругие свойства среды, анизотропию. Раскрыты подходы конструирования эффективных анизотропных сред различной симметрии с определением упругих модулей. Проведен анализ волновых характеристик, упругих модулей в кристаллах различной симметрии, слоистых, трещиноватых средах, в средах с регулярной упаковкой шаров.

Книга претендует на роль основного методического, учебного и справочного пособия по анизотропной тематике для студентов и специалистов в сейсмразведке и сейсмологии. Высокий математический уровень изложения и незагруженность текста узкоспециальной сейсмической терминологией делают книгу интересной и для специалистов в кристаллооптике, кристаллоакустике и механике сплошных сред.

Рецензенты:

чл.-кор. РАН *Б.Г. Михайленко*,
д-р физ.-мат. наук *Б.П. Сибиряков*,
д-р физ.-мат. наук *М.М. Немирович-Данченко*

Утверждено к печати

Ученым советом Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука

ISBN 978—5—7692—989—5

© ИНГГ СО РАН, 2008
© Оформление. Издательство СО РАН,
2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОТ РЕДАКТОРОВ	5

Часть I

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Глава 1. АНИЗОТРОПИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ...	7
§ 1.1. Анизотропия	—
§ 1.2. Тензоры напряжений и деформаций	11
§ 1.3. Элементы и классы симметрии	15
§ 1.4. Идентификация структур и элементов симметрии симметричных матриц	20
§ 1.5. Сейсмическая анизотропия геологических объектов	23
Глава 2. АНИЗОТРОПИЯ УПРУГИХ СРЕД	32
§ 2.1. Упругие тела. Основные уравнения для гуковских сред	—
§ 2.2. Идентификация тензора упругих модулей как задача линейной алгебры	40
§ 2.3. Идентификация структуры тензора упругих модулей на основе мысленных экспериментов	48
§ 2.4. Изотропная и трансверсально-изотропная среды	53
§ 2.5. Статистические характеристики анизотропных упругих тел	61
Глава 3. ВОЛНЫ В ОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ	75
§ 3.1. Волны в изотропных средах	—
§ 3.2. Уравнение Кристоффеля и индикатрисы	83
§ 3.3. Распространение волн вдоль особых направлений	90
§ 3.4. Перенос энергии	99
§ 3.5. Геометрия индикатрис	104
Глава 4. ПЛОСКИЕ ВОЛНЫ В ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ	117
§ 4.1. Уравнение Кристоффеля для TI -сред. Чистопоперечные волны	—
§ 4.2. Квазипродольная и квазипоперечная волны в TI -среде	123
§ 4.3. Слабоанизотропная TI -среда	136
Глава 5. ОТРАЖЕНИЕ-ПРЕЛОМЛЕНИЕ ПЛОСКИХ ВОЛН НА ПЛОСКИХ ГРАНИЦАХ	141
§ 5.1. Кинематические условия на границе	—
§ 5.2. Коэффициенты отражения-преломления	148
§ 5.3. Коэффициенты отражения-преломления на контакте соосных TI -сред	158
§ 5.4. Закрытые отражения-преломления	166
§ 5.5. Явления у свободной границы	173

Часть II

ФИЗИЧЕСКИЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ МОДЕЛИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

Глава 6. ВОЛНЫ В КРИСТАЛЛАХ	193
§ 6.1. Кристаллографические системы симметрии	—
§ 6.2. Плоские волны в кристаллах с прямоугольной симметрией — I	199
§ 6.3. Плоские волны в кристаллах с прямоугольной симметрией — II	203
§ 6.4. Системы с косоугольной симметрией	208
Глава 7. ПЛОСКИЕ ВОЛНЫ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ	216
§ 7.1. Квазианизотропия тонкослоистой среды с изотропными слоями	217
§ 7.2. Квазианизотропия тонкослоистой среды с анизотропными слоями	227
§ 7.3. Плоские волны в плоскопараллельной системе однородных слоев. (Общий случай)	239
§ 7.4. Плоские волны в системе параллельных слоев (плоскость падения совпадает с плоскостью симметрии)	245
§ 7.5. Интерференционные волны	254
§ 7.6. Длинноволновое приближение как предельный случай динамического описания	259
Глава 8. ТРЕЩИНОВАТЫЕ СРЕДЫ	264
§ 8.1. Среды с ориентированной трещиноватостью	—
§ 8.2. Системы пересекающихся трещин	282
§ 8.3. Гексагональная система трещин	290
§ 8.4. Системы конечных трещин	294
Глава 9. РЕГУЛЯРНЫЕ УПАКОВКИ ШАРОВ И АНИЗОТРОПИЯ НАПРЯЖЕННО- ГО СОСТОЯНИЯ	298
§ 9.1. Элементы теории упругих контактов	299
§ 9.2. Простая кубическая упаковка шаров	307
§ 9.3. Гранецентрированная кубическая упаковка	318
§ 9.4. Упаковки шаров и реальные среды	332
Глава 10. ПЛОСКИЕ ВОЛНЫ В НЕИДЕАЛЬНЫХ СРЕДАХ	343
§ 10.1. Напряженное состояние и анизотропия среды	—
§ 10.2. Плоские волны в линейных неидеально-упругих средах	354
ПРИЛОЖЕНИЕ. Упругое равновесие гуковской изотропной среды	362
ЛИТЕРАТУРА	369