



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л. В. КИРЕНСКОГО

**К. С. АЛЕКСАНДРОВ, Г. Т. ПРОДАЙВОДА**

**АНИЗОТРОПИЯ  
УПРУГИХ СВОЙСТВ  
МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД**

Ответственный редактор  
доктор физико-математических наук  
Е. М. Чесноков

НОВОСИБИРСК  
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК


2000

УДК 550.311

ББК 26.325

А 46

*Издание осуществлено при поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований по грантам 99-05-78067, 00-15-96790*

Р  И

**Александров К. С., Продайвода Г. Т.** Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. — 354 с.

Монография посвящена изучению упругих свойств минералов и горных пород из различных районов СНГ. Излагаются теоретические основы описания тензорных акустических и упругих свойств анизотропных твердых тел и теория распространения плоских упругих волн в анизотропных средах. Приводится сводка данных об упругих свойствах кристаллов минералов и их зависимостях от температуры и давления. При ультразвуковых измерениях упругих свойств используется оригинальная операция сглаживания результатов измерений при учете свойств акустического тензора второго ранга. Исследуются упругие свойства и параметры анизотропии горных пород различного генезиса: осадочных, вулканических, гранитоидов, метаморфических пород, а также архейских гнейсов и амфиболитов Кольской сверхглубокой скважины. Большое внимание уделяется вопросам моделирования исследуемых свойств пород. Методом условных моментов исследуется влияние на анизотропию пород кристаллографической ориентации и формы кристаллов, структуры трещинно-порового пространства. Обсуждаются итоги и возможности использования проведенных исследований при интерпретации сейсмических данных и для решения других задач геофизики земной коры.

Монография предназначена для специалистов, занимающихся изучением свойств горных пород, вопросами сейсмических исследований и вопросами геотектоники.

#### Рецензенты

д-р физ.-мат. наук Б. П. Сорокин  
д-р геол.-мин. наук В. Н. Курганский

Утверждено к печати Ученым советом Института физики  
им. Л. В. Киренского СО РАН

ISBN 5-7692-0347-1

© Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, 2000  
© Киевский госуниверситет им. Т. Шевченко, 2000  
© К. С. Александров, Г. Т. Продайвода, 2000  
© Оригинал-макет. Издательство СО РАН, 2000

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Основы теории упругости анизотропных сред</b> .....	6
1.1. Однородные и квазиоднородные анизотропные среды .....	–
1.2. Элементы тензорного анализа .....	7
1.3. Фундаментальный закон Гука .....	16
1.4. Закон Гука для изотропной среды .....	26
1.5. Анизотропия модулей Юнга, сдвига и коэффициента Пуассона для анизотропной среды .....	27
<b>Глава 2. Распространение упругих волн в неограниченных анизотропных средах</b> .....	31
2.1. Волновое движение и фазовая скорость .....	–
2.2. Уравнение Грина – Кристоффеля .....	33
2.3. Акустический тензор .....	36
2.4. Лучевая скорость упругой волны .....	39
2.5. Групповая скорость .....	43
2.6. Особенные направления .....	44
2.7. Упругие волны в квазиоднородных средах .....	46
2.8. Мера анизотропии упругих и акустических свойств .....	49
<b>Глава 3. Прямая и обратная задачи акустики анизотропных сред</b> .....	59
3.1. Методы решения прямой задачи .....	60
3.2. Методы решения обратной задачи .....	66
3.2.1. Метод особенных направлений .....	–
3.2.2. Итерационный метод .....	71
3.2.3. Метод возмущений .....	72
3.2.4. Инвариантно-поляризационный метод .....	73
3.3. Параметры анизотропии упругих волн .....	81
3.4. Определение функции распределения ориентации минералов и микротрещин горных пород .....	82
3.5. Инверсия азимутальной зависимости акустического тензора .....	84
<b>Глава 4. Упругие свойства минералов</b> .....	93
4.1. Упругие свойства кристаллов минералов при нормальных температурах и давлении .....	–
4.2. Влияние температуры и давления на упругие свойства кристаллов .....	121
4.3. Взаимосвязь упругих свойств минералов и их структуры .....	126
4.4. Анизотропия упругих свойств минералов и их структуры .....	131
4.4.1. Анизотропия линейной сжимаемости .....	–
4.4.2. Анизотропия упругих свойств минералов .....	133
4.4.3. Параметры анизотропии объемных упругих волн в минералах .....	135
4.4.4. Акустическая анизотропия и аналогия между акустическими и оптическими явлениями в минералах .....	144

<b>Глава 5. Математическое моделирование анизотропии акустических и упругих свойств горных пород</b> . . . . .	148
5.1. Обзор методов расчетов упругих свойств . . . . .	149
5.2. Теория метода условных моментов . . . . .	152
5.3. Численные результаты моделирования . . . . .	158
5.3.1. Влияние кристаллографической ориентации . . . . .	–
5.3.2. Влияние трещинно-порового пространства . . . . .	171
5.3.3. Влияние насыщения . . . . .	180
<b>Глава 6. Экспериментальные методы исследования упругих свойств твердых тел</b> . . . . .	184
6.1. Статические методы . . . . .	186
6.2. Динамические методы . . . . .	187
6.2.1. Резонансный метод . . . . .	–
6.2.2. Метод клина . . . . .	190
6.2.3. Импульсные методы . . . . .	191
6.2.4. Оптические методы . . . . .	194
6.3. Области применения различных методов измерений . . . . .	198
6.4. Методика и аппаратура ультразвуковых измерений фазовых скоростей упругих волн горных пород . . . . .	199
6.4.1. Выбор стандартной акустической системы координат . . . . .	200
6.4.2. Выбор оптимального числа направлений измерений . . . . .	203
6.4.3. Выбор размера образца . . . . .	205
6.4.4. Ультразвуковая аппаратура измерения фазовых скоростей упругих волн . . . . .	206
<b>Глава 7. Экспериментальные исследования анизотропии акустических и упругих свойств горных пород</b> . . . . .	216
7.1. Осадочные породы . . . . .	–
7.2. Вулканогенные породы . . . . .	231
7.2.1. Вулканыты Карпат . . . . .	243
7.3. Гранитоиды . . . . .	250
7.4. Метаморфические горные породы . . . . .	283
7.5. Архейские гнейсы и амфиболиты Кольской сверхглубокой скважины . . . . .	308
7.6. Влияние давления на параметры акустической и упругой анизотропии горных пород . . . . .	320
<b>Заключение</b> . . . . .	331
<b>Литература</b> . . . . .	337