

В. Ю. БУРМИН

**Некоторые
обратные
кинематические
задачи
сейсмологии**



НАУКА

В. Ю. БУРМИН

**Некоторые
обратные
кинематические
задачи
сейсмологии**

Теория, эксперименты, результаты

УДК 550.3
ББК 26.21
Б90



*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований по проекту № 19-15-00025,
не подлежит продаже*

Бурмин В.Ю.

Некоторые обратные кинематические задачи сейсмологии : Теория, эксперименты, результаты / В.Ю. Бурмин. — М. : Наука, 2019. — 276 с. — ISBN 978-5-02-040238-6

В монографии рассмотрены три блока задач. Первый блок связан с выводом формул обращения разрывных годографов рефрагированных сейсмических волн (общий случай), распространяющихся в вертикально-неоднородных упругих изотропных средах. Рассмотрено численное решение многомерной обратной кинематической задачи сеймики (задачи сейсмической томографии). Во втором блоке рассмотрены задачи, связанные с определением координат гипоцентров близких и далеких землетрясений. Предложен новый устойчивый подход к решению этих задач, основанный на минимизации мажорантной оценки функционала невязки времен. Третий блок посвящен рассмотрению задач оптимизации сетей сейсмологических и акустических наблюдений как на поверхности Земли, так и на объектах цилиндрической формы. Задача оптимизации рассмотрена в рамках нестатистического подхода, на основе критерия S -оптимальности. Критерий S -оптимальности позволяет решать линейные задачи планирования эксперимента, независимо от характера погрешностей в исходных данных и матрицы плана, случайных или систематических.

Для студентов, аспирантов и научных сотрудников геофизических специальностей.

ISBN 978-5-02-040238-6

© Бурмин В.Ю., 2019
© ФГУП Издательство «Наука»,
редакционно-издательское
оформление, 2019

Оглавление

Часть 1

Обратные кинематические задачи сейсмоки	7
Введение	7
Глава 1	
Годографы сейсмических волн, распространяющихся в неоднородных упругих изотропных средах	
1.1. Уравнение Эйлера для функционала Ферма	13
1.2. Годографы сейсмических волн для различных скоростных функций одной переменной	15
Глава 2	
Обращение годографов сейсмических волн	26
2.1. Обращение годографа сейсмической волны, распространяющейся вверх от глубинного источника	26
2.2. Обращение годографа отраженной волны	31
2.3. Формулы обращения непрерывного годографа рефрагированной волны, распространяющейся вниз от источника	32
2.4. Формулы обращения годографа сейсмической волны, распространяющейся в вертикально-неоднородной среде с положительными скачками скорости ..	34
2.5. Определение скорости распространения сейсмической волны в слое пониженной скорости по годографу рефрагированной волны	36
2.6. Обращение разрывного годографа рефрагированной волны. Общий случай	39
2.7. Погрешности в определении глубин проникновения сейсмических лучей и параметров слоев с постоянной скоростью по годографу рефрагированной волны	43
2.8. Обращение годографа общей точки отражения (ОТО) для вертикально-неоднородной среды с криволинейной границей	44
2.9. Обращение разности годографов продольной волны и обменной поперечной волны	47
2.10. Обращения вертикального годографа	51
Глава 3	
Численное решение обратных кинематических задач сейсмоки	53
3.1. Свойства годографов рефрагированных и отраженных сейсмических волн...	53
3.2. Годографы сейсмических волн и кубические сплайны	54
3.3. Построение сглаживающего выпуклого кубического сплайна	55
3.4. Определение элементов обратной матрицы μ_{ij}	56
3.5. Краевые условия для сглаживающего сплайна	57
3.6. Минимизация функционала $S(T'')$	60
3.7. Сглаживание фрагментов годографов логарифмическими кривыми	62
3.8. Определение скоростной кривой по экспериментальному годографу рефрагированной волны	63
3.9. Аппроксимация скоростных функций кусочно-гладкими функциями	65
3.10. Численное обращение разрывного годографа рефрагированной волны.....	71
3.11. Совместная интерпретация годографов рефрагированных и головных волн	72
3.12. Оценка погрешностей в определении глубины максимального проникновения лучей	77

3.13. Численное решение обратной многомерной кинематической задачи сейсмики (сейсмотомографии)	78
--	----

Часть 2

Строение Земли и Луны по сейсмическим данным

Глава 4

Строение Земли	83
Введение	83
4.1. Исходные данные	90
4.2. Решение прямой кинематической задачи сейсмики для сферически-симметричной Земли	90
4.3. Анализ скоростной модели IASPEI91	92
4.4. Скорость распространения продольных сейсмических волн в мантии Земли	94
4.5. Скорость распространения сейсмических волн в земном ядре	97
4.6. О природе волн-«предвестников» от далеких землетрясений	100
4.7. Распределение плотности и упругих параметров в Земле	101
4.8. Численное решение прямой задачи для неоднородного гравитирующего шара	104
4.9. Численное решение обратной задачи для реальной Земли	107
4.10. Результаты определения распределения плотности и упругих модулей в Земле	109
4.11. Оценка вязкости земного ядра	113
Выводы	116
Приложение 4.1	120

Глава 5

Строение Луны по сейсмическим данным	128
Введение	128
5.1. Исходные данные	131
5.2. Результаты определения скорости сейсмических волн в мантии и ядре Луны. Радиус ядра Луны	135
Выводы	140
Приложение 5.1	141

Часть 3

Определение координат гипоцентров землетрясений

Глава 6

Определение координат гипоцентров близких землетрясений	144
Введение	144
6.1. Системы линейных уравнений, связывающие координаты гипоцентров близких землетрясений и сейсмических станций при различных исходных данных	146
6.2. Определение координат гипоцентров близких землетрясений по заданным временам пробега сейсмических волн	148
6.3. Определение времени пробега сейсмических волн по графику Вадати	153
6.4. Определение координат гипоцентров близких землетрясений и времени в очаге	154
6.5. Определение координат гипоцентров близких землетрясений и скорости распространения сейсмических волн в слое	155

6.6. Переход от значений средних скоростей и средних градиентов скоростей к истинному распределению скорости.....	158
6.7. Сглаживание облака экспериментальных точек ортогональными полиномами. Выбор степени полинома. Регуляризация задачи сглаживания скоростной кривой	159
Глава 7	
Определение координат гипоцентров далеких землетрясений	161
7.1. Уравнения, связывающие координаты гипоцентров землетрясений и координаты сейсмических станций на эллипсоиде	161
7.2. Оценки погрешностей в определении координат гипоцентров далеких землетрясений	163
7.3. Определение координат гипоцентров далеких землетрясений по заданным временам пробега сейсмических волн	165
7.4. Определение координат гипоцентров и времени возникновения землетрясений	167
Часть 4	
Пространственное распределение гипоцентров землетрясений региона Крым—Черное море—Кавказ	
Глава 8	
Пространственное распределение гипоцентров землетрясений Крымско-Черноморского региона	168
Введение	168
8.1. Исходные данные	168
8.2. Результаты определения гипоцентров землетрясений	169
Выводы	170
Глава 9	
Пространственное распределение гипоцентров землетрясений на Кавказе	172
Введение	172
9.1. Исходные данные	172
9.2. Распределение гипоцентров территории Кавказа	173
Часть 5	
Оптимальные планы сейсмологических и акустических сетей.	
Нестатистический подход	175
Глава 10	
Оценки погрешностей решений систем линейных алгебраических уравнений, оптимальные линейные планы, критерий С-оптимальности.....	175
10.1. Системы линейных алгебраических уравнений, оценки погрешностей решений и число обусловленности.....	175
10.2. Основные статистические критерии оптимальности планов.....	180
10.3. Корректность систем линейных алгебраических уравнений и число обусловленности.....	184
10.4. Оптимальная матрица плана. Критерий С-оптимальности.....	186
10.5. Связь между критерием С-оптимальности и другими критериями оптимальности планов	187

Глава 11

Оптимальное расположение точек наблюдений при регистрации близких землетрясений	193
11.1. Мажорантные оценки погрешностей в определении координат гипоцентров близких землетрясений и их свойства	193
11.2. Оценки погрешностей в определении глубины гипоцентра	195
11.3. Дисперсии погрешностей в определении координат гипоцентров близких землетрясений	196
11.4. Учет погрешностей в задании скоростной модели среды	197
11.5. Оптимальная система сейсмологических наблюдений при регистрации близких землетрясений	198
11.6. Определение оптимального гипоцентра	199
11.7. Оптимальная геометрия сети сейсмических станций при определении координат гипоцентров близких землетрясений	201
11.8. Оптимальная геометрия точек наблюдений при определении координат гипоцентров землетрясений и скорости распространения сейсмических волн	206
11.9. Оптимальная геометрия точек наблюдений при определении координат гипоцентров землетрясений и времени в очаге	208
11.10. Об оптимальной геометрии сети наблюдений при определении координат гипоцентров землетрясений, времени в очаге и скорости распространения сейсмических волн	208
11.11. Оценка эффективности систем сейсмологических наблюдений	209
11.12. Учет дальности регистрации сейсмических станций при оценке эффективности сети наблюдений	210
11.13. Численные алгоритмы построения дискретных оптимальных планов	212
11.14. Алгоритм MINCOND построения C-оптимального плана. Блок-схема алгоритма	215
11.15. Результаты численного моделирования	217

Глава 12

Оптимальное расположение точек наблюдений на сфере и на цилиндре	222
12.1. Устойчивость определения координат гипоцентров далеких землетрясений и оптимальная геометрия телсейсмической сети	222
12.2. Численное решение задачи оптимального расположения сейсмологических станций на поверхности земного шара	227
12.3. Оптимальная геометрия систем наблюдений при регистрации сейсмических и акустических сигналов на объектах цилиндрической формы	232

Глава 13

Эффективность региональных сейсмологических сетей и планирование оптимальных сетей	235
13.1. Оптимальная сеть сейсмологических наблюдений на территории России	235
13.2. Оценка эффективности новой сети сейсмологических наблюдений на территории Вьетнама	237
13.3. Оценка эффективности сети сейсмологических наблюдений на Кавказе	247
13.4. Оптимальная геометрия сети сейсмологических наблюдений на Кавказе	252
Литература	258