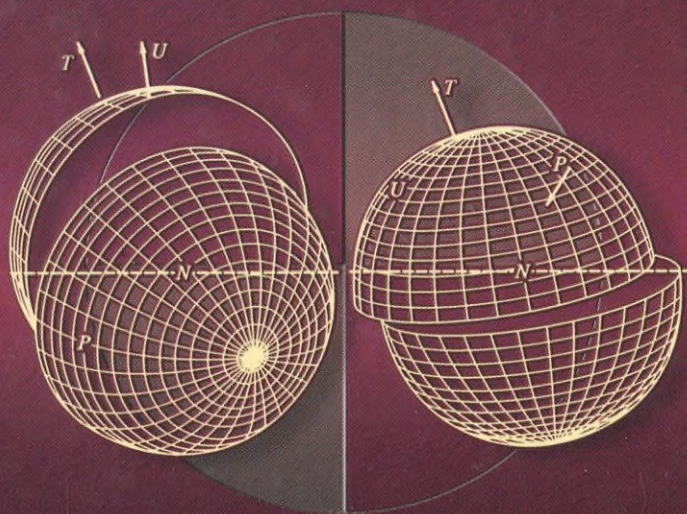




Д.В. МАЛИЦЬКИЙ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОЛОГІЇ



НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ
ім. С. І. СУББОТІНА
КАРПАТСЬКЕ ВІДДІЛЕННЯ

NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES OF UKRAINE

CARPATHIAN BRANCH
OF S. I. SUBBOTIN INSTITUTE
OF GEOPHYSICS

D.V. MALYTSKYI

**MATHEMATICAL
MODELING
IN THE PROBLEMS
OF SEISMOLOGY**

*«SCIENTIFIC BOOK»
PROJECT*

KYIV NAUKOVA DUMKA 2016

Д. В. МАЛИЦЬКИЙ

**МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ
В ЗАДАЧАХ
СЕЙСМОЛОГІЇ**

*ПРОЕКТ
«НАУКОВА КНИГА»*

КИЇВ НАУКОВА ДУМКА 2016

Монографія присвячена математичному моделюванню поширення сейсмічних хвиль у неоднорідних середовищах. На підставі матричного методу та його модифікацій розроблено підходи до визначення поля переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору для близької і далекої зон, коли джерелом сейсмічних хвиль є довільно орієнтована сила і тензор сейсмічного моменту. За допомогою задачі на власні вектори і власні значення запропоновано аналітично-числові підходи для визначення компонент тензора сейсмічного моменту, суть яких зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь. Показано, що з визначення сейсмічного тензора як функції часу дає змогу оцінювати час, протягом якого відбувалася сейсмічна подія. В результаті програмної реалізації розглянутих підходів проведено обчислювальні експерименти для прямих й обернених динамічних задач сейсмології на тестових прикладах та реальних записах за сейсмічними даними однієї і більшої кількості станцій, які можуть бути використані для визначення механізмів вогнища землетрусу.

Для спеціалістів, студентів, аспірантів у сфері теоретичної сейсмології.

Monograph is devoted the mathematical modeling of seismic waves in the inhomogeneous media. The approaches have been developed, based on matrix method and its modifications, for determining the far and near field displacements on the surface of layered medium when the source of seismic waves is represented by the arbitrarily oriented force and the tensor of seismic moment. Analytic-numeric approaches to determining the tensor of seismic moment have been formulated with application of eigenvector analysis reducing the problem to system of linear equations. It has been demonstrated that determining the moment tensor as a function of time enables to estimate a source duration of seismic event. The suggested approaches have been implemented in a program package and numerical experiments have been conducted to determine a solution of direct and inverse dynamical problems of seismology using the synthetic data and the real records by one or more stations enabling to determine the source mechanism of the earthquake.

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук М. В. КУТНІВ,
доктор фізико-математичних наук, професор В. Ю. МАКСИМЧУК

*Рекомендовано до друку вченою радою Карпатського відділення
Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України
(протокол № 8 від 16 грудня 2013 р.)*

***Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми
«Створення та розвиток науково-видавничого комплексу НАН України»***

Науково-видавничий відділ медико-біологічної,
хімічної та геологічної літератури

Редактор О. І. Калашиникова

© Д. В. Малицький, 2016

© НВП «Видавництво "Наукова думка"
НАН України», дизайн, 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
Р О З Д І Л 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ: СТАН І ПРИКЛАДНІ МОЖЛИВОСТІ	7
1.1. Теоретичні сейсмограми для неоднорідних середовищ	7
1.2. Рефлексивний метод	8
1.3. Аналіз сейсмічних полів, одержаних променевим методом	11
1.4. Аналіз використання сейсмічних методів для моделювання хвильових полів	14
1.5. Перспективи розвитку методів обчислення теоретичних сейсмограм	16
Р О З Д І Л 2. МАТРИЧНИЙ ТА РЕКУРЕНТНИЙ МЕТОДИ У ДИНАМІЧНИХ ЗАДАЧАХ СЕЙСМОЛОГІЇ	18
2.1. Основи матричного методу.....	18
2.2. Поширення сейсмічних хвиль в шаруватому півпросторі (<i>SH</i> -задача)	22
2.3. Основні принципи розв’язання динамічних задач сейсмології на основі матричного підходу та його модифікацій	25
2.3.1. Матричні рівняння для <i>P—SV</i> -задачі	25
2.3.2. Рекурентний метод та його перспективи для задач сейсмології.....	31
Р О З Д І Л 3. ОГЛЯД СЕЙСМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ	36
3.1. Механіка вогнища землетрусу	36
3.2. Визначення вогнища землетрусу.....	40
3.3. Математичне зображення внутрішніх сейсмічних джерел	41
3.4. Аналіз розривів переміщень—напружень для моделювання хвильових процесів у шаруватому півпросторі	43
3.5. Ефективно-точкова дислокація як силовий еквівалент для довільно орієнтованого розриву переміщень—напружень	45
3.6. Вибір джерела у вигляді зсувної дислокації як найоптимальнішої для математичного моделювання хвильових процесів у шаруватому півпросторі	49
3.7. Принцип побудови механізму вогнища землетрусу графічним методом	51

3.8. Апробація методу визначення механізму вогнища з використанням логарифма відношення амплітуд для землетрусів Карпатського регіону України	57
3.9. Динамічні параметри вогнищ землетрусів	69
Р О З Д І Л 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПОЛІВ, ЗБУДЖЕНИХ ДОВІЛЬНО ОРІЄНТОВАНОЮ СИЛОЮ У ВЕРТИКАЛЬНО-НЕОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	73
4.1. Постановка задачі та перехід від розподіленого до точкового джерела	73
4.2. Побудова матричних рівнянь і запільний розв’язок	76
4.3. Первинне поле	87
4.4. Хвильове поле від довільно орієнтованої сили	91
Р О З Д І Л 5. ПРЯМА ДИНАМІЧНА ЗАДАЧА СЕЙСМОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТИВНО-ТОЧКОВОЇ ДИСЛОКАЦІЇ.....	101
5.1. Постановка задачі та первинне поле	102
5.2. Аналітичні співвідношення для поля переміщень і напружень та інтерпретація сейсмічних хвиль від силового еквівалента довільно орієнтованого розриву	114
5.3. Математичне моделювання хвильових процесів у шаруватому півпросторі з використанням матриць шостого порядку.....	134
5.3.1. Постановка задачі	134
5.3.2. Чисельні розрахунки хвильового поля	137
Р О З Д І Л 6. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОБЕРНЕНОЇ ДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ СЕЙСМОЛОГІЇ	140
6.1. Використання задачі на власні вектори і власні значення для задач сейсмології	140
6.1.1. Моделювання хвильових полів в однорідному півпросторі з використанням задачі на власні вектори і власні значення	140
6.1.2. Визначення поля переміщень у шаруватому півпросторі з використанням задачі на власні вектори і власні значення	153
6.2. Аналітично-числові підходи для визначення компонент тензора сейсмічного моменту.....	164
6.3. Аналіз та ефективність застосування запропонованої методики для визначення параметрів вогнища землетрусу	178
6.3.1. Інтерпретації отриманих результатів моделювання та ефективність методу	178
6.3.2. Сингулярний розклад	180
Р О З Д І Л 7. АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ	181
7.1. Алгоритми і програми розв’язання прямої динамічної задачі сейсмології	184
7.2. Алгоритми і програми для аналітично-числових підходів до визначення компонент тензора сейсмічного моменту	184

7.3. Аналітично-числові підходи для обчислення часової залежності компонент тензора сейсмічного моменту. Апробація результатів математичного моделювання	185
--	-----

Р О З Д І Л 8. ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ В АНІЗОТРОПНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	202
--	------------

8.1. Однорідне анізотропне середовище	203
---	-----

8.2. Шарувате анізотропне середовище	205
--	-----

8.3. Тестові приклади	208
-----------------------------	-----

8.4. Про деякі випадки математичного моделювання хвильових полів у шаруватих середовищах із додатковими напруженнями	210
--	-----

8.4.1. Розрахунок впливу гідростатичного тиску	211
--	-----

ВИСНОВКИ	215
----------------	-----

SUMMARY	217
---------------	-----

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	219
-------------------------	-----

CONTENTS

INTRODUCTION	5
C H A P T E R 1. MATHEMATICAL MODELLING OF WAVE PROCESSES IN THE INHOMOGENEOUS MEDIA. CURRENT STATE AND THE APPLICATION PROSPECTS	7
1.1. Theoretical seismograms for the inhomogeneous media	7
1.2. Reflectivity method	8
1.3. Analysis of seismic fields calculated with the use of the ray method.....	11
1.4. Analysis of seismic methods used in the modeling of wave fields	14
1.5. Prospects for the development of methods for calculation of theoretical seismograms	16
C H A P T E R 2. MATRIX AND RECURSIVE METHODS IN THE DYNAMIC PROBLEMS OF SEISMOLOGY	18
2.1. Fundamentals of matrix method	18
2.2. Propagation of seismic waves in the layered half-space (<i>SH</i> -problem)	22
2.3. Basic principles of solving the dynamic problems of seismology using the matrix method and its modifications	25
2.3.1. Matrix equations for the <i>P-SV</i> problem.....	25
2.3.2. Recursive method and its prospects in the problems of seismology	31
C H A P T E R 3. MODELS OF SEISMIC SOURCES. THE COMPARATIVE ANALYSIS	36
3.1. The mechanics of seismic source	36
3.2. Determination of earthquake source	40
3.3. Mathematical representation of internal seismic sources	41
3.4. Analysis of discontinuities in the displacements-stresses for the modeling of wave processes in the layered half-space	43
3.5. Effectively-point dislocation as a force equivalent of arbitrarily oriented discontinuity in the displacements and stresses	45
3.6. Selection of shear dislocation as the optimal source in mathematical modeling of wave processes in the layered half-space	49
3.7. Principles of determination of earthquake source mechanism by graphic method.....	51

Contents

3.8. Testing the method for determination of earthquake source mechanism with accounting for logarithm of amplitude ratio of earthquakes from the Carpathian region of Ukraine	57
3.9. Dynamic parameters of earthquake sources	69
C H A P T E R 4. MATHEMATICAL MODELLING OF WAVE FIELDS EXCITED BY THE ARBITRARILY ORIENTED FORCE IN THE VERTICALLY INHOMOGENEOUS MEDIUM	73
4.1. Problem statement and reduction of the extended source to the point one	73
4.2. Formation of matrix equations and general solution	76
4.3. Primary field	87
4.4. Wave field from the arbitrarily oriented force	91
C H A P T E R 5. DIRECT DYNAMIC PROBLEM OF SEISMOLOGY USING THE EFFECTIVELY-POINT DISLOCATION	101
5.1. Problem statement and primary field	102
5.2. Analytical expressions for the fields of displacements and stresses and interpretation of seismic waves from the force equivalent of arbitrarily oriented dislocation.....	114
5.3. Mathematical modeling of wave processes in the layered half-space using the matrices of sixth order.....	134
5.3.1. Problem statement.....	134
5.3.2. Numerical calculations of the wave field	137
C H A P T E R 6. MATHEMATICAL MODELLING FOR THE INVERSE DYNAMIC PROBLEM OF SEISMOLOGY	140
6.1. Use of the eigen vector and eigen value analysis in the problems of seismology	140
6.1.1. Modeling of wave fields in homogeneous half-space using the eigen vector and eigen value analysis	140
6.1.2. Determining of the wave field in the layered half-space using the eigen vector and eigen value analysis	153
6.2. Analytical-numerical approaches to determination of seismic moment tensor components	164
6.3. Analysis and efficiency of the method developed for the determination of earthquake source parameters	178
6.3.1. Interpretation of the modeling results and the method efficiency	178
6.3.2. Singular decomposition	180
C H A P T E R 7. APPROBATION OF THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELLING IN THE INHOMOGENEOUS MEDIA.....	181
7.1. Algorithms and programs for the direct dynamic problem of seismology	181
7.2. Algorithms and programs for the analytical-numerical approaches to determination of seismic moment tensor components.....	184

Contents

7.3. Analytical-numerical approaches to calculation of time dependence of seismic moment tensor components. Approbation of the results of mathematical modeling	185
C H A P T E R 8. WAVE PROPAGATION IN THE ANISOTROPIC MEDIUM.....	202
8.1. Uniform anisotropic medium.....	203
8.2. Layered anisotropic medium	205
8.3. Testing models	208
8.4. On some instances of mathematical modeling of wave fields in the prestressed layered media	210
8.4.1. Estimation of the hydrostatic pressure effect	211
CONCLUSIONS	215
SUMMARY	217
REFERENCES	219