

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ім. С.І. СУББОТІНА**

---

*На правах рукопису*

УДК 550.34:550.38

**СТАРОДУБ**  
**Юрій Петрович**

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ  
ЗАДАЧ СЕЙСМІКИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ БУДОВИ ЗЕМНОЇ  
КОРИ**

**Спеціальність 01.04.12 - Геофізика**

**Автореферат**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**доктора фізико-математичних наук**

**Київ - 1997 р.**

Дисертація є рукописом  
Робота виконана в Карпатському відділенні Інституту геофізики  
ім.С.І.Субботіна Національної Академії Наук України

**Офіційні опоненти:**

- доктор фізико-математичних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України **Я.Й. Бурак**
- доктор фізико-математичних наук, професор **Л.А. Молотков**
- доктор фізико-математичних наук **В.М. Пялипенко**

**Провідна установа:** Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН  
України

Захист дисертації відбудеться " 20 " червня 1997 р. о 13 год. на  
засіданні спеціалізованої ради Д 01.95.01 при Інституті геофізики  
ім.С.І.Субботіна НАН України за адресою:  
252680, м.Київ-142, пр.Палладіна 32  
Факс: (044) 450-25-20

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту геофізики  
ім.С.І.Субботіна НАН України

Автореферат розісланий " 19 " травня 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор фізико-математичних наук

  
В.С.Гейко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00752689 (.)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Дисертаційна робота присвячена розробці методу моделювання, аналізу і вивченню хвильових полів, напружено-деформованого стану і внутрішньої будови земної кори з використанням математичного моделювання полів переміщень, деформацій і напружень; хвильових полів переміщень, швидкостей, прискорень та вирішенню на цій основі оберненої динамічної задачі сейсмології. Пропонувана робота є важливою насамперед тому, що дає новий потужний метод вивчення літосфери Землі, яка характеризується складною геологічною будовою. Тут зосереджені сейсмічні джерела, що призводять до катастрофічних руйнівних землетрусів. Земна кора, лише верхні горизонти якої доступні для прямого вивчення, містить необхідні корисні копалини. Особливо актуальні - дослідження родовищ нафти і газу, які потребують що-раз детальнішого оконтурення і буріння для видобутку вуглеводнів на більших глибинах. Дослідження напружено-деформованого стану дозволяє оцінити його характер у блоках земної кори, штольнях, шахтах, рудних тілах. Інформація від штучних і природних сейсмічних джерел, що характеризує стан та будову земної кори і мантії, реєструється деформографами та сейсмографами на геофізичних станціях та в польовому експерименті, являє собою велику природну базу даних, важко доступних для вивчення розробленими на даний час сейсмічними методами, що занадто спрощено описують будову земної кори. При цьому сейсмічні записи зберігають докладну інформацію про джерела коливань, будову середовища на шляху поширення хвиль і вплив приймачів. Зважаючи на те, що існуючі методи розрахунку і обертання хвильових полів розвинуті для моделей шаруватих середовищ, які можуть містити обмежені включення, в даній роботі розроблений докладний метод синтезу і аналізу хвильових полів для широкого класу неоднорідностей у шаруватих структурах. Це допомагає розв'язувати питання вивчення будови земної кори, пошуків корисних копалин, оцінки

сейсмічної небезпеки. Визначивши вплив середовища в околі сейсмічних станцій на сейсмограми, можемо детальніше вивчати будову літосфери та джерела коливань.

Розв'язання названих вище проблем є неможливим без застосування математичних методів моделювання напружено-деформованого стану і хвильових процесів з використанням сучасних комп'ютерів. Тому розробка і апробація ефективного математичного обчислювального методу, який дає би можливість моделювати напружено-деформований стан земної кори, поширення сейсмічних хвиль і аналізувати сейсмічні коливання з великою часовою протяжністю і просторовими розмірами у складнобудованих середовищах, розв'язувати обернену динамічну задачу сейсмології з метою вивчення внутрішньої будови кори і мантії Землі є актуальним завданням сучасних сейсмічних досліджень.

Мета роботи - наступна. Розробка методу вивчення напружено-деформованого стану і сейсмічних хвильових полів, що поширюються в неоднорідному неідеально-пружному півпросторі, в якому виділяються шаруваті із незначними відхиленнями пачки. При тому забезпечення можливості аналізувати хвильові поля шляхом виділення на сейсмограмах коливань заданих типів (однорідних, неоднорідних, подовжних і поперечних хвиль), кратних відбиттів-заломлень у шарах та вивчення зв'язку між параметрами різних типів хвиль і сейсмогеологічними характеристиками середовищ. Вирішення оберненої динамічної задачі сейсмології. На цій основі дослідження хвильових полів та будови земної кори в околі сейсмостанцій Карпатського регіону з використанням математичного комп'ютерного моделювання.

У відповідності до поставленої мети вирішуються наступні основні завдання:

- застосування методу скінчених елементів для розрахунку переміщень, їх швидкостей і прискорень до статичних задач - вивчення напружено-деформованого стану та динамічних задач сейсмології і сейсморовідки;
- формулювання комплексного матрично-скінченоелементного методу

- розв'язку динамічних задач для сейсміки, який дає можливість моделювати і аналізувати хвильові поля в неідеально-пружному неоднорідному півпросторі і виділяти на сейсмограмах дифраговані, розсіяні і кратні хвилі;
- розробка теорії розрахунку поля переміщень на вільній границі горизонтально-шаруватого неідеально-пружного півпростору для комплексу матричного і скінчено-елементного методів з можливістю виділення відбиттів-заломлень і розсіянь заданих кратностей, а також монотипних, обмінних, однорідних і неоднорідних хвиль;
  - розвиток методу отримання статистично-оптимальних моделей земної кори до розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології та уточнення будови земної кори під сейсмостанціями Карпатського регіону, опис способів виключення впливу джерела на сейсмограми і кількісної оцінки добротності загасання сейсмічних хвиль внаслідок врахування неідеальної пружності в моделі середовища;
  - проведення математичного моделювання напружено-деформованого стану гірничих об'єктів і хвильових полів у земній корі (на прикладі нафтогазових родовищ і перетинів земної кори Карпатського регіону);
  - дослідження структури земної кори в околі сейсмостанцій, уточнення моделей земної кори, оцінка їх статистичних характеристик для сейсмостанцій "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" Карпатського регіону;
  - створення сейсмологічного банку даних з наповненням його натурними сейсмограмами Карпатського регіону, зареєстрованими сейсмічними станціями;
  - створення алгоритмів і програм для ПЕОМ з моделювання напружено-деформованого стану і хвильових полів у середовищах типу земної кори, здійснення тестових оцінок запропонованих алгоритмів;
  - реалізація максимально швидкодійних оптимізаційних алгоритмів і програм розв'язку оберненої динамічної задачі сейсмології на основі сформульованого критерію збіжності істинної і шуканої моделей із запам'ятовуванням матричних виразів на ПЕОМ при розрахунках пере-

міщень та їх похідних.

### Наукова новизна та теоретична цінність:

- розроблений матрично-скінченоелементний метод для сейсміки, який дає можливість моделювати і аналізувати хвильові поля в неідеально-пружному неоднорідному півпросторі з можливістю виділення на сейсмограмах хвиль дифрагованих і розсіяних на неоднорідних структурах, кратних хвиль: заломлень-відбиттів заданих типів у виділених у півпросторі горизонтально-шаруватих пачках при дії складних за фізичною і геометричною природою джерел коливань у виді сил або переміщень;
- запропоновано підхід до вивчення напружено-деформованого стану земної кори, що дає можливість моделювати вплив зовнішніх статичних переміщень і напружень на складні інженерно-геологічні об'єкти та ділянки земної кори;
- на основі вирішення прямої задачі розроблений підхід до розв'язання оберненої динамічної задачі сейсміки, який базується на стохастичному методі теорії поширення сейсмічних хвиль, дозволяє виключити вплив джерела при уточненні шуканих параметрів середовища під сеймостанцією, оцінювати похибку і роздільну здатність отриманих моделей;
- побудовані оптимальні по швидкодії та використанню машинної пам'яті алгоритми, на основі яких створені комп'ютерні програми, що дають можливість вивчати напружено-деформований стан і хвильові поля шляхом їх моделювання, оцінена збіжність розроблених алгоритмів, проведені тестові випробування і порівняння з даними експериментальних спостережень;
- розроблені алгоритм і програма, що мінімізують відхилення між теоретичною і експериментальними сейсмограмами, що попередньо занесені до створеного банку сейсмологічної інформації, з близькими характеристиками середовища для уточнення його будови;
- з використанням розробленого матрично-скінченоелементного методу досліджений вплив зовнішніх стаціонарних сил на розподіл напружень і деформацій у гірничих об'єктах та в земній корі Закарпаття, а також

досліджене сейсмічне хвильове поле вадовж II Міжнародного геотраверса, на нафтогазовому родовищі Прикарпаття;

- уточнені моделі земної кори під сейсмічними станціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" Карпатського регіону.

**Практична цінність роботи.** Використання роботи дає можливість аналізувати і краще інтерпретувати хвильову картину, що реєструється в процесі сейсмічних досліджень, шляхом моделювання сейсмограм і виділення на них хвиль заданих типів і кратностей у тому числі дифрагованих і розсіяних. Тому запропонований метод дослідження сейсмічного хвильового поля в неоднорідному півпросторі може бути використаний геологічними підприємствами при інтерпретації даних сейсморовідки з метою пошуку неструктурних пасток нафти і газу, прогнозуванні покладів вуглеводнів, у тому числі вугілля. Розроблений спосіб вирішення оберненої динамічної задачі сейсміки може використовуватись у геофізичних організаціях для уточнення будови земної кори в околі сейсмічних станцій, під час масштабних експериментів по вивченню глибинної будови Землі, при вирішенні задач сейсморовідки. Застосування методу розв'язку прямої і оберненої динамічної задачі сейсміки дає можливість оцінювати сейсмічну небезпеку, досліджувати вогнища землетрусів. Розроблений підхід до вивчення і моделювання напружено-деформованого стану гірських порід у земній корі можна застосовувати для оцінки напружень і деформацій при розбудові та укріпленні шахт та штолень, будівництві різної складності житлових та інженерних об'єктів, зокрема, великих споруд типу атомних станцій.

**Реалізація та впровадження роботи.** Розроблений метод моделювання хвильових полів і вирішення оберненої динамічної задачі сейсмології випробовувався на сейсмогеологічних розрізах Передкарпатського прогину при виконанні спільних робіт з Західно-українською геолого-розвідувальною експедицією (ЗУГРЕ) Міністерства геології, Карпатською дослідно-методичною сейсмологічною партією (КДМСП).

Метод був розвинутий на базі розробленого автором методу вирішення прямої динамічної задачі сейсмології на основі матричного методу і аналізу хвильових полів, який випробовувався при проведенні господарсько-договірних робіт з Київським геофізичним відділенням Українського науково-дослідного геолого-розвідувального інституту (КГВ УкрНДГРІ), Управлінням Захсинафтогеофізика м.Тюмені; був впроваджений у ЗУГРЕ, КДМСП, КГВ УкрНДГРІ, Захсинафто-геофізиді. Дослідження, результати яких подані в дисертації, були виконані в рамках планових тем по наукових проблемах НАН України "Комплексні геофізичні дослідження напружено-деформованого стану земної кори і пошук провісників землетрусів у Закарпатті" та "Геофізичні дослідження сейсотектонічних процесів у Карпатському регіоні"; по темах завдань Державного комітету України з питань науки і технологій (ДКНТ) 05.41.02/013-92 "Вивчення внутрішньої будови земної кори в сейсмонебезпечних районах Карпатського регіону на основі врахування горизонтальної неоднорідності середовища" програми 04.02. "Ресурсозберігаючі технології хімічної та біологічної промисловості" і 05.53.01/139-93 "Уточнення будови сейсмогеологічного розрізу для вирішення задачі прямих пошуків родовищ вуглеводнів на великих глибинах" програми 04.13. "Ресурси енергетичної сировини, рудних і нерудних корисних копалин".

### Основні положення, що пропонуються до захисту.

1. Розроблений новий матрично-скінченоелементний метод для сейсміки дає можливість моделювати хвильові поля в неідеально-пружному неоднорідному півпросторі, аналізувати і виділяти на сейсмограмах дифраговані та розсіяні на неоднорідних структурах хвилі заданих кратностей відбиттів-заломлень у горизонтально-шаруватих пачках при дії складних за фізичною і геометричною будовою джерел коливань у виді сил або переміщень у півпросторі або на його вільній границі; запропонований підхід дає можливість вивчати напружено-деформований стан і вплив зовнішніх статичних напружень і переміщень на складні

інженерно-геологічні об'єкти та ділянки земної кори.

2. Розроблений на основі вирішення прямої динамічної задачі сейсмології матричним методом новий підхід до розв'язання оберненої задачі, який базується на стохастичному методі, дозволяє виключити вплив невідомої просторової та часової форми джерела і оцінити похибку та роздільну здатність уточнених моделей. Побудований оптимальний по швидкодії і використанню оперативної пам'яті комп'ютерний алгоритм, що мінімізує відхилення між теоретичною сейсмограмою і набором сейсмограм, які попередньо занесені до створеного банку сейсмологічної інформації з близькими характеристиками середовища, для уточнення будови сейсмічного розрізу.

3. Використання запропонованого матрично-скінченоелементного методу дозволило вперше дослідити вплив зовнішніх стаціонарних сил на розподіл напружень і деформацій у земній корі Закарпаття, в гірничих об'єктах, змодельовати сейсмічне хвильове поле вдовж II-го Міжнародного геотраверса та залягаючого на значній глибині Лопушнянського нафтогазового родовища на Прикарпатті, уточнити моделі земної кори під сейсмічними станціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" Карпатського регіону.

**Апробація роботи.** Результати роботи доповідалися і опубліковані в матеріалах конференцій ІППММ АН України (Львів, 1986; 1987); Першій республіканській школи-семінару по геофізиці (Алушта, 1986); на семінарі комісії Академії наук соціалістичних країн з планетарної геофізики (КАПГ) "Розрахункові та статистичні методи вивчення сейсмічних коливань" (Москва, 1987); на IV Міжнародному Симпозіумі з аналізу сейсмічності і сейсмічного ризику (Бехіне, Чехословаччина, 1989); XXIII Генеральній асамблеї Європейської сейсмологічної комісії (ЄСК) (Прага, Чехословаччина, 1992) та на XXIV Генеральній Асамблеї ЄСК (Афіни, Греція, 1994); на конференції наукового товариства ім.Т.Шевченка "Геолого-геофізичні проблеми сейсмічного районування території західних областей України" (Львів, 1992); на семінарах секцій

ДКНТ (Дніпропетровськ, 1993, 1994, 1995; Київ, 1995); на Всеукраїнській науковій конференції "Застосування обчислювальної техніки, математичного моделювання та математичних методів у наукових дослідженнях" у Львівському державному університеті (Львів, 1994); на секції прикладної математики науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Української академії друкарства (Львів, 1995). Результати були представлені також на XXI Генеральній Асамблеї Європейського геофізичного товариства (Гаага, Голандія, 1996) та на XXV Генеральній Асамблеї ЄСК (Рейк'явік, Ісландія, 1996). Про результати робіт автор доповідав на 9 Симпозіумі Європейського товариства наук про Землю (Страсбург, Франція, 1997).

**Характеристика методології дослідження** - синтез відомих математичних методів стосовно вирішення конкретних задач теоретичної і експериментальної сейсмології та сейсморозвідки. При цьому забезпечується коректність постановки задач математичної фізики розв'язання прямої та оберненої динамічних задач теорії поширення сейсмічних хвиль; застосування загальноприйнятих принципів, дотримання математичної строгості при отриманні розв'язків і рекурентних формул матрично-скінченоелементного методу; використання даних експерименту при вирішенні прямої і оберненої динамічних задач сейсміки; інтерпретація числових результатів, розрахованих розробленим методом; порівняння з результатами, отриманими перевіреними на практиці методами.

**Результати досліджень опубліковані** в 30 наукових працях (у тому числі 2 монографіях, 22 статтях, 4 препринтах).

**Структура і об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається з шести розділів основного змісту, вступу, підсумків та списку літератури з 208 найменувань. Загальний об'єм роботи 261 сторінка машинописного тексту, ілюстрації складають 47 рисунків, 7 таблиць.

**Відзначимо особистий внесок автора** в наукові праці, опубліковані за темою дисертації. Теорію, алгоритми методу і інтерпретацію

результатів розробляв автор. Аспіранти Гнип А.Р., Брич Т.Б. разом з науковим керівником-автором дисертації відлагоджували програми для ПЕОМ, здійснювали постановки задач та аналіз теоретичних і числових результатів. У спільних публікаціях із іншими колегами автору належать результати, що стосуються теми дисертаційної роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** схарактеризована актуальність проблеми, що складає предмет наукового дослідження; сформульовані мета та основні завдання дисертаційної роботи; описані наукова новизна, теоретична і практична цінність, реалізація та впровадження, апробація наукової розробки, структура і об'єм роботи; згаданий особистий внесок автора; дана коротка анотація дисертації по розділах.

**У першому розділі** зроблено огляд найбільш суттєвих результатів вивчення хвильових полів, напружено-деформованого стану та розв'язку оберненої динамічної задачі сейсміки для земної кори, на основі чого обгрунтована мета дисертаційної роботи.

З точки зору дослідження структури земної літосфери за допомогою методів математичного моделювання, для покращення розуміння питання побудови сучасного методу вирішення прямої і оберненої задач сейсміки та в порядку наростання складності вирішуваних завдань виділено три головні напрямки, які тематично висвітлюють дане питання:

- моделювання напружено-деформованого стану земної кори;
- розв'язок прямої динамічної задачі теорії поширення сейсмічних хвиль;
- вирішення оберненої динамічної задачі сейсмології.

Розглядаються розвиток та необхідність доповнень кожного з них з метою сформулювати основні принципи побудови нового узагальненого методу.

Деформаційні вимірювання для вивчення напружень у розломах земної кори, приливних деформацій і тектонічних рухів проводились Латиніною Л.А. (1975) і її колегами (Латынина Л.А., Рываева С.Д.,

1975; Латынина Л.А., Шишкіна Т.П., 1978). Вони експериментально на одновимірних моделях показали, що над розломами в земній корі спостерігаються максимальні амплітуди деформацій і різкий спад деформацій при віддаленні від розломів. Харісон (Harrison T.C., 1976), Такемото (Takemoto S., 1981) і Шахінгер (Schachinger M., 1992) вивчали вплив пустот, топографічних змін, локальних неоднорідностей на поле приливних деформацій і напружень у земній корі, вони пропонували використовувати метод скінчених елементів (МСЕ) при вивченні будови земної кори (Ильюшин А.А., 1978; Бате К., Вилсон Е., 1982; Еременко С.Ю., 1991; Савула Я.Г., 1993).

На основі результатів авторів публікацій робіт і принципів побудови МСЕ зроблено висновок: метод скінчених елементів порівняно з іншими математичними методами дає можливість розв'язувати більш загальні в розумінні вивчення будови середовища геофізичні задачі. Необхідно розробити алгоритм і побудувати схему МСЕ для дослідження напружено-деформованого стану земної кори з врахуванням неоднорідностей у її будові (пустот, включень, розломів) в умовах Карпатського регіону.

З точки зору застосування МСЕ врахування залежності від часу для переміщень, деформацій, напружень є ускладненням рівнянь вивчення напружено-деформованого стану шляхом врахування першої і другої похідних по часу від переміщень (Зенкевич О., 1975; Деклу Ж., 1976; Bathe K.-J., 1982). Практично, це означає формулювання хвильових рівнянь для розв'язку прямої динамічної задачі сейсміки і відкриває можливість порівняння теоретичних сейсмограм з даними спостережень у сейсмології і сейсморозвідці. Сучасна сейсміка дає в сотні разів більше даних порівняно з деформографічними вимірюваннями. Значний розвиток практичних сейсмогеологічних досліджень (Глушко В.В. і ін., 1963; Глушко В.В., 1968; Утробин В.Н. і ін., 1980; Гутерх А., 1980; Гутерх А., Соллогуб В.Б., Чекунов А.В., 1980;

Кендзера А.В. и др., 1992; Чекунов А.В., Белоусов В.В., Старостенко В.И., 1993; Харитонов О.М. и др., 1996) призвів до інтенсивного поступу теорії методів розв'язку прямих задач сейсміки. Розв'язки задач дифракційним методом отримані для середовищ із складною конфігурацією границь типу клина, розлому, скиду і т.д. та для задач вивчення дифракції пружних хвиль на об'єктах канонічної форми і на сильно викривлених областях (Стародуб Ю.П., 1978; Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Черевко М.А., 1978; Клем-Мусатов К.Д., 1980). Цей підхід застосовується при дослідженні дифракції на одному або двох-трьох об'єктах; коли ж потрібно розрахувати хвильове поле в протяжних неоднорідних і блокових структурах, використовують променевий метод (Алексеев А.С., Бабич В.М., Гельчинский Б.Я., 1961; Харитонов О.М., 1972). Останній передбачає чітку виразність променевих фронтів і наступний розклад поля переміщень по обернених значеннях частоти в степеневий ряд, коефіцієнти якого в деякій прифронтовій зоні характеризують послідовні наближення до повного поля переміщень. Як стверджує Червени (Червени В. и др., 1981), при отриманні променевих теоретичних сейсмограм викликає труднощі не розрахунок елементарних сейсмограм окремих хвиль, а знаходження алгоритму послідовного утворення їх числових кодів. Тому променевий метод пропонується використовувати, коли необхідно прослідкувати в просторі окремі хвилі, записані декількома сейсмоприймачами (Бабич В.М., 1981) і, зрозуміло, в тому випадку, коли інтерференція променів у середовищі дає змогу проінтерпретувати їх коди. При дослідженні повної хвильової картини сейсмічного поля в моделі або в її частині в шаруватих середовищах доцільно застосувати матричний метод, запропонований Томсоном та Хаскелом (Thomson W.T., 1950; Haskell N.A., 1953) і розвинутий в роботах Молоткова Л.А. з учнями (Молотков Л.А., 1961; 1984; 1990; Молотков Л.А., Равумовский Н.А., 1985; Молотков Л.А., Крауклис В.П., 1989), Харитонова О.М. (1972; 1973; 1974; 1980; 1988), Ратнікової Л.І. і

Льовшина А.А. (*Ратникова Л.И., Левшин А.А., 1967; Ратникова Л.И., 1973; Левшин А.А., 1973*) Кеннета (*Kennet B.L.N., 1972; 1973; 1979; 1980*). Молотков Л.А. отримав стійкі алгоритми розрахунку сейсмограм, він вивчав інтерференційні хвилі у вільному неоднорідному пружному шарі, відбиття і заломлення хвиль неоднорідним шаром, коефіцієнти відбиття-заломлення у випадку пружно-рідких середовищ, коливання пачки тонких шарів між двома пружними півпросторами. Харитонов О.М. (1973) вперше запропонував ідею застосування матричного методу для середовищ з нахиленими границями, він розвинув цей метод на випадок тривимірних середовищ і провів широкі дослідження з застосування матричного методу для дослідження великих глибин у літосфері (*Харитонов О.М., 1980; 1988*). Роботи Кеннета (*Kennet B.L.N., 1972; 1973; 1979; 1980*) з колегами Керрі і Ілінгвортом (*Kennet B.L.N., Kerry N.J., 1979; Kennet B.L.N. Illingworth M.R., 1981*) базуються на векторно-матричній алгебрі і мають порівняно з теорією Молоткова Л.А. більше прикладне значення. Цінність їх у тому, що вони спрямовані на реалізацію математичного апарату матричного методу на ЕОМ. Лоссовський Є.К. і Харитонов О.М. (*Лоссовский Е.К., Харитонов О.М., 1970*) досліджували вплив багатократних сумарних відбиттів на хвильову картину, яка спостерігається при вивченні сейсмічних розривів методом глибинного сейсмічного зондування. Лоссовський Є.К. (1981) дослідив хвильові поля в поглинаючому середовищі на основі феноменологічного підходу Футтерман (*Futterman W.I., 1962*) з врахуванням принципу причинності, який має місце при поширенні сейсмічних хвиль. Найбільш повна теорія загасання сейсмічних хвиль, заснована на фізичних закономірностях деформування гірських порід, вільна від порушення умови причинності при поширенні імпульсів була запропонована Гуревичем Г.І. (1974), її вдало застосували Левшин А.А., Ратникова Л.И., Сакс М.В. (1980), врахувавши, що отримані на її основі дисперсійні співвідношення можуть бути приведені до формул, які отримуються в

феноменологічному підході Футтерман.

Таким чином, не розв'язаним залишалося питання розрахунку з допомогою матричного методу поля переміщень-напружень у неідеально-пружному шаруватому півпросторі, коли джерело довільної форми і приймач розміщені на різних границях, а середовище моделюється як тіло Гуревича. Не розв'язана задача визначення на вільній границі хвильового поля, розсіяного чи дифрагованого локальними неоднорідностями, коли джерело знаходиться всередині півпростору, при цьому не забезпечені розділення та інтерпретація на отриманих сейсмограмах хвиль заданих типів і кратностей відбиття-заломлення. Підсумовуючи викладене, зроблений висновок про необхідність побудувати розв'язок задачі про визначення поля переміщень в шарувато-неоднорідному півпросторі, коли імпульсне джерело знаходиться всередині або на його вільній границі, а приймач - на денній поверхні; для такої моделі - забезпечити виділення відбиттів заданих кратностей, монотипних, обмінних, однорідних і неоднорідних хвиль на сейсмограмах; отримати стійкий алгоритм для всіх кутів поширення плоских хвиль, що утворюють фронт дифрагованого чи розсіяного поля на неоднорідностях.

Обчислювальні методи (Іванов *И.И.*, 1986) почали застосовуватись для вирішення задач сейсмології і сейсморовідки з появою електронно-обчислювальних машин. Метод скінчених різниць (МСР) був запропонований для опису хвильових процесів Альтерман і Карал (*Alterman Z., Karal F.*, 1958). У сучасному вигляді МСР представлений у роботі Вафідіса, Абрамовіці, Канасевича (*Vafidis A., Abramovici F., Kanasevich E.R.*, 1992). У роботі Алексеєва А.С. і Михайленка Б.Г. (*Алексеев А.С., Михайленко Б.Г.*, 1981) МСР комплексується з інтегральними перетвореннями Фур'є-Бесселя. Сучасним обчислювальним методом, який отримує що-раз більше поширення в зв'язку з удосконаленням ЕОМ є МСЕ. Порівняно з МСР, враховуючи апроксимацію на елементах, МСЕ краще захищений від обчислювальних помилок, які можуть у різницевих методах мати місце через

контрастність у значеннях параметрів, що характеризують земну кору. До задач вивчення поширення сейсмічних хвиль МСЕ був застосований Смітом (*Smith W.D.*, 1975). Отримані при цьому результати мають значення для довгохвильового наближення в сейсмології (*Червены В. и др.*, 1981). Ускладнення моделей з використанням МСЕ має місце, зокрема, при об'єднанні МСЕ з методом граничних елементів (*Крауч С., Старфілд А.*, 1987). Хаїр з колегами (*Khair K.R., Datta S.K., Shah A.H.*, 1989) застосовують комбінований метод, у якому внутрішні області моделюються МСЕ, а зовнішні - граничними інтегральними рівняннями. Очевидною є перспектива застосування МСЕ, який враховує області складної фізичної конфігурації, у комбінації з матричним методом, перевага якого перед іншими методами полягає в можливості аналізувати хвильове поле, що поширюється через шарувате середовище. Це дозволяє вирішувати складні задачі сейсміки з моделювання хвильового поля, врахування неоднорідностей, (розломів, тріщин); ускладнювати в майбутньому задачі шляхом врахування тривимірності і нелінійності із впровадженням все більш потужних комп'ютерів, і що не менш важливо, аналізувати та інтерпретувати складне сейсмічне поле, яке отримується при розрахунках у моделях неоднорідних середовищ.

Розв'язок прямої динамічної задачі сейсміки спрямований на вивчення внутрішньої будови Землі, тому отримані результати використані для вирішення оберненої задачі сейсміки: за сейсмограмами, які отримані на денній поверхні слід уточнити будову земної кори.

Метод мінімізації цільового функціоналу і строга теорія вирішення обернених задач геофізики на прикладі гравіметрії і гравіроздавки вперше були розроблені Старостенком В.І. і Булахом Є.Г. з колегами (*Старостенко В.И.*, 1978; *Оганесян С.М., Старостенко В.И.*, 1978; *Булах Е.Г., Ржаницын В.А., Маркова М.Н.*, 1976; *Булах Е.Г., Бабенко Л.В.*, 1979). Тимошин Ю.В. (1977; 1978) побудував модель середовища, розбиваючи сейсмічні горизонти на елементарні відбиваючі площадки, що створюють дифракційне поле. Змодельоване таким чином

хвильове поле Тимошин Ю.В. використовував для вирішення оберненої задачі. Некоректні обернені задачі математичної фізики розглядаються в класичній монографії Тихонова А.Н., Арсеніна В.Я. (1986), де розв'язки обернених задач геофізики пропонується регуляризувати: встановлюються обмеження, які приводять до взаємодозначної відповідності між зареєстрованими в експерименті даними і результатами моделювання - відновленими характеристиками досліджуваної моделі. З іншого боку, якщо виходити з імовірнісної природи коливань (Аки К., Ричардс П., 1983), коли кожна сейсмограма є окремою реалізацією деякого статистичного процесу, доцільно використати метод резольвентного ядра Бакуса і Гльберта (Bacus G., Gilbert F., 1967; 1970). При цьому для вирішення обернених задач сейсміки використовується апарат матричної алгебри і операції з сейсмічними записами, як з ансамблем реалізацій, і з шуканими параметрами, як з фізичними величинами, що характеризують хвильовий процес. Мостовий С.В. і Кушнір О.Ф. досліджували оптимальні оцінки і проводили статистичний аналіз геофізичних полів (Мостовой С.В., 1987; Кушнір А.Ф., Мостовой С.В., 1990). У даній роботі при розв'язанні оберненої динамічної задачі сейсмології використовується підхід, у якому передаточна функція середовища розраховується на границі півпростору із застосуванням матричного методу. Це дає змогу при вивченні будови середовища на шляху проходження променів відділити вплив джерела з допомогою аналітичних перетворень. При цьому пропонується швидкий алгоритм розрахунку спектрів, який базується на запам'ятовуванні матричних добутоків модифікованого матричного підходу, що значно пришвидшує процес обчислень. Процедура нелінійної оптимізації будується з допомогою методу стохастичного обертання, який дозволяє коректно вирішити питання існування і єдиності розв'язку, врахувати статистичний характер сейсмічних записів і на цій основі розрахувати похибку і роздільну здатність результатуючих даних. Швидкий алгоритм враховує розумний компроміс між збіжністю ітераційної процедури, похибкою і роздільною

адатністю результуючої моделі та фізичними обмеженнями на діапазон зміни шуканих параметрів.

**У другому розділі**, що складається з чотирьох підрозділів, на початку зроблено опис фізико-математичної моделі середовища, яка використовується для моделювання хвильових полів при дослідженні поширення сейсмічних хвиль у середовищах типу літосфери Землі. Дослідження внутрішньої будови земної кори і мантії, взагалі кажучи, передбачає врахування впливу великої кількості фізичних параметрів. Тут, окрім найбільш характерних: швидкостей поздовжніх та поперечних хвиль, густини і загасання; було б корисно врахувати вплив гравітаційних ефектів (Старостенко В.И., 1978), нелінійної пружності (Вербицкий Т.З., 1977), електричних та магнітних явищ (Сану-жак Я.С., 1993), температурних властивостей при високих тисках (Teisseyre K., 1986). Вказані фактори у їх взаємозв'язку, напевно, дали б можливість побудувати досконалу модель, якою найбільш повно можливо було б описати поведінку земних надр. Проте значне збільшення числа незалежних параметрів при комп'ютерному моделюванні вимагає недосяжної потужності електронно-обчислювальних машин або веде до розгляду часткових чи узагальнених випадків і зниження інформативності результуючих моделей. Прийнято вважати ознаками, що достатньо адекватно відображають модель сейсмогеологічного розрізу, наступні фізичні параметри: швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, густину та загасання внаслідок неідеальної лінійної пружності геологічних порід. Ці параметри з врахуванням їх змін у просторі описують сейсмічні перерізи Землі, які вивчаються в прикладних задачах сейсмології і сейсморозвідки. Характерною в цьому розумінні є модель горизонтально-шаруватого півпростору, в якій можуть бути присутні поперечні неоднорідності. В даній роботі, враховуючи шаруватість структур, характерну, зокрема, для Прикарпаття, використаний матричний метод розв'язання прямої динамічної задачі сейсміки. Наводяться основні положення матричного методу, який описує проходження хвиль

у горизонтально-шаруватому середовищі, і методу скінчених елементів - у околі локальних неоднорідностей. З метою оцінки вірогідності та ефективності нового матрично-скінченоелементного методу дається алгоритм розрахунку хвильових полів для горизонтально-шаруватих середовищ, що застосовувався при порівнянні результатів різних методів (Стародуб Ю.П., 1979; 1987; 1996). При цьому використовувалось класичне формулювання Томсона-Хаскела (Thomson W.T., 1950; Haskell N.A., 1953). Розглядається пряма задача динамічної теорії поширення сейсмічних хвиль для шаруватого півпростору (Стародуб Ю.П., 1985). В Декартовій системі координат XYZ задається півпростір, який складається з пачки  $N$  ізотропних, горизонтально-однорідних, ідеально-пружних шарів, нижній з яких ( $N$ -ий) - напівбезмежний. Кожний шар характеризується потужністю  $d_n$ , густиною  $\rho_n$ , швидкістю поширення позовжніх  $V_{P_n}$  і поперечних  $V_{S_n}$  хвиль. На границях між шарами задаються умови жорсткого контакту для переміщень і напружень, що описують умови неперервності для нормальних, тангенціальних переміщень і напружень при переході через границю. Задача розв'язується в Фур'є-просторі. Граничні умови для вектора переміщень-напружень

$$\bar{\mathbf{B}}_n(\mathbf{r}) = \left( \bar{u}_x^{(n)}(\mathbf{r}), \bar{u}_z^{(n)}(\mathbf{r}), \bar{\sigma}_{zz}^{(n)}(\mathbf{r}), \bar{\sigma}_{xz}^{(n)}(\mathbf{r}) \right)^T, \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}(x, z); \quad (1)$$

(для горизонтальної проекції хвильового числа  $k$  і кутової частоти  $\omega$ ) мають вигляд  $\bar{\mathbf{B}}_1(z_0) = \bar{\mathbf{B}}_0$ ;  $\bar{\mathbf{B}}_n(z_n) = \bar{\mathbf{B}}_{n+1}(z_n)$ ,  $n = 1, N-1$ ; (2)

де  $\bar{\mathbf{B}}_0$  - вектор, заданий на денній границі. Використовуючи крайові умови (2) і рекурентну формулу для шару  $\bar{\mathbf{S}}_{n+1}(z_n) = \mathbf{P}_n \bar{\mathbf{S}}_n(z_{n-1})$  для матриці-пропагатора  $\mathbf{P}_n$  (Gilbert F., Backus G.E., 1968) на денній границі півпростору матимемо

$$\bar{\mathbf{S}}_0 = \mathbf{R} \bar{\Phi}_N, \quad \mathbf{R} \equiv \{\mathbf{R}\}_{4 \times 4} = (\mathbf{P}_{N-1} \dots \mathbf{P}_1)^{-1} \mathbf{T}_N, \quad (3)$$

де  $T_n$ ,  $n = N$  - матриця зв'язку вектора  $\bar{B}_N$  і вектора хвильових потенціалів  $\bar{\Phi}_N \equiv \bar{\Phi}_n(\mathbf{r})|_{n=N} \equiv (\bar{\Phi}_n^+(\mathbf{r}), \bar{\Psi}_n^+(\mathbf{r}), \bar{\Phi}_n^-(\mathbf{r}), \bar{\Psi}_n^-(\mathbf{r}))^T$  -

відповідно поздовжніх  $\bar{\Phi}_n(\mathbf{r})$  і поперечних  $\bar{\Psi}_n(\mathbf{r})$  хвиль, що поширюються від денної границі вниз - індекс "+" і вверх - "-" по п-му шару. Якщо хвилі з глибини півпростору не приходять ( $\bar{\Phi}_n^+ = \bar{\Psi}_n^+ = 0$ ), на вільній поверхні задані Фур'є-трансформанти напружень  $[\bar{\sigma}_{zz}^{(0)}, \bar{\sigma}_{xz}^{(0)}]^T$ , то із (3) маємо

$$\begin{bmatrix} u_x^{(0)} \\ u_z^{(0)} \end{bmatrix} = F^{-2} \left\{ \mathbf{R}_{12} \mathbf{R}_{22}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{zz}^{(0)} \\ \bar{\sigma}_{xz}^{(0)} \end{bmatrix} \right\}. \quad (4)$$

У формулі (4)  $F^{-2}$  - оператор подвійного зворотного перетворення Фур'є від  $k$  до координати  $x$  і від  $\omega$  до часу  $t$ . Отже, залежності компонент переміщень від часу на денній поверхні півпростору мають вид (4).

Для ілюстрації можливостей матричного методу враховувати слабкі горизонтальні неоднорідності дається розроблена автором методика моделювання розсіяних хвильових полів на локальних неоднорідностях (Стародуб Ю.П., Починайко Р.С., 1978). Робиться наступне припущення  $\mathbf{B}(x, z) = \mathbf{B}^0(x, z) + \mathbf{B}^1(x, z)$ ,  $\mathbf{B}^1(x, z) \ll \mathbf{B}^0(x, z)$ ,

де  $\mathbf{B}^0(x, z)$  - поле напружень-переміщень в поперечно-однорідному середовищі,  $\mathbf{B}^1(x, z)$  - поле, розсіяне на горизонтальних неоднорідностях. Хвильове рівняння, записане у матричному виді, розв'язується при умові  $(\omega/V_s) k_{\max} (HL/\pi) b_{(p, s)} < 1$ , (5)

де  $k_{\max}$  - максимальне значення, якого досягає змінна  $k$ ;  $H, L$  - відповідно максимальні вертикальний і горизонтальний розміри неоднорідностей;  $b_{(p, s)}$  - "міри неоднорідності", які характеризують зміну фізичних характеристик у напрямку осі  $X$ . Розв'язок рівняння руху для поля

$\mathbf{V}^1(x, z)$  представляємо у виді

$$\mathbf{V}^1(x, z) = \mathbf{F}^{-2} \left\{ \mathbf{P}(k, z, z_0) \bar{\mathbf{V}}^1(k, z_0) + \frac{1}{2\pi} \int_{z_0 - \infty}^{z_0 + \infty} \mathbf{P}(k, z, y) \mathbf{C}(k, \xi, y) \mathbf{V}^0(\xi, y) d\xi dy \right\}. \quad (6)$$

В останньому підрозділі описано розроблений підхід методу скінчених елементів для розрахунку переміщень, деформацій, напружень та їх залежностей від часу. На основі лінійної апроксимації компонент переміщення  $\mathbf{u}$  на скінчених елементах та інтерполяції  $\mathbf{u}$  з допомогою квадратичного полінома  $\mathbf{U}(t) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 t + \mathbf{a}_2 t^2$ ,  $t \in [0, \Delta t]$  ( $\Delta t$  - крок по часу, а коефіцієнти  $\mathbf{a}_0$ ,  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$ , шукаються, користуючись умовами на кінцях часового проміжку) отримані дві наступні рекурентні схеми МСЕ для часових розв'язків поставлених задач

$$\left( \mathbf{M} + \frac{\Theta \Delta t}{3} \mathbf{C} + \frac{\Theta^2 \Delta t^2}{12} \mathbf{K} \right) \mathbf{U}^{i+1} = \left( \mathbf{M} + \frac{\Theta \Delta t}{3} \mathbf{C} - \frac{\Delta t^2}{12} (6 - \Theta^2) \mathbf{K} \right) \mathbf{U}^i +$$

$$\left( \mathbf{M} + \frac{(2\Theta - 3)\Delta t}{6} \mathbf{C} + \frac{\Theta(\Theta - 2)\Delta t^2}{12} \mathbf{K} \right) \mathbf{S}^i + \frac{\Delta t^2}{6} ((3 - \Theta)\mathbf{P}^i + \Theta \mathbf{P}^{i+1}); \quad (7)$$

$$\left( \frac{\Theta^2}{2} \mathbf{M} + \frac{\Theta^2 \Delta t}{12} (2\Theta - 3) \mathbf{C} + \frac{\Theta^3 \Delta t^2}{24} (\Theta - 2) \mathbf{K} \right) \mathbf{U}^{i+1} =$$

$$\left( \Theta^2 \mathbf{M} + \frac{\Theta^2 \Delta t}{3} (\Theta - 3) \mathbf{C} + \frac{\Theta^3 \Delta t^2}{12} (\Theta - 4) \mathbf{K} \right) \mathbf{U}^i =$$

$$\left( -\frac{\Theta^2}{2} \mathbf{M} + \frac{\Theta^2 \Delta t}{12} (9 - 2\Theta) \mathbf{C} + \frac{\Theta^2 \Delta t^2}{24} (6\Theta - \Theta^2 - 12) \mathbf{K} \right) \mathbf{U}^{i-1} +$$

$$\frac{\Theta^2 \Delta t^2}{24} (\Theta(\Theta - 2)\mathbf{P}^{i+1} + 2\Theta(4 - \Theta)\mathbf{P}^i + (12 - 6\Theta + \Theta^2)\mathbf{P}^{i-1}), \quad (8)$$

де  $\mathbf{S}^i = \mathbf{U}^i \Delta t$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  - відповідно матриці мас, загасання та жорсткості системи;  $\Theta$  - параметр інтегрування рівнянь руху при виведенні рекурентних схем (7), (8), який має вплив на стійкість і збіжність останніх;  $\mathbf{U}^i$ ,  $\mathbf{P}^i$  - глобальні вектори переміщень і зовнішніх сил МСЕ на  $i$  - тому кроці обчислювального процесу. Схема (7) використовується

для запуску розрахункового процесу на першому кроці, а наступні виконуються на базі схеми (8).

**У третьому розділі** представлена теорія розробленого матрично-скінченоелементного методу розв'язку прямої динамічної задачі сейсміки.

З метою побудови матрично-скінченоелементного методу динамічної теорії поширення сейсмічних хвиль у даному розділі використаний матричний метод у модифікації, яка дає можливість аналізувати коливання за типами (поздовжні, поперечні, Релея, Лява, каналові і т.п.) і кратностями відбитих та заломлених хвиль з врахуванням загасання енергії або без нього. Матричний метод, розвинутий у роботах автора (Стародуб Ю.П., 1985; 1986; 1987), забезпечує строгий математичний розв'язок низки контактних задач динамічної теорії поширення сейсмічних хвиль з застосуванням інтегральних перетворень та дозволяє ефективно використовувати можливості сучасних ЕОМ для отримання кінцевих результатів і враховувати дію джерел коливань, розміщених на вільній поверхні або всередині півпростору. Він використовується для розрахунку теоретичних сейсмограм на вільній поверхні або всередині трансверсально-ізотропного ідеально- та неідеально-пружного шаруватого півпростору з слабкими (в сенсі Борнівської апроксимації) поперечними неоднорідностями. Розроблений підхід дозволяє аналізувати хвильове поле за типами і кратностями відбиттів-заломлень сейсмічних хвиль у горизонтально-шаруватих середовищах і в сейсмічних перетинах із слабовикривленими границями, він випробований на ряді нафтових родовищ із використанням сейсмологічних даних (Стародуб Ю.П., 1979; 1981; Починайко Р.С., Стародуб Ю.П., Худобяк О.Б., 1986; Стародуб Ю.П., Вербицкий Т.З., Брыч Т.Б., і ін. 1988).

Розробка комбінованого матрично-скінченоелементного методу для вирішення проблем моделювання хвильового поля в складнобудованому середовищі, на основі розв'язку прямої динамічної задачі сейсміки з можливістю аналізу цього поля у виділених шаруватих пачках е

одним з головних завдань, що розв'язуються в дисертаційній роботі. Новий метод будується на основі поєднання матричного і скінченоелементного підходів (Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б., Гнып А.Р., 1988; Starodub G., Brych T., 1994; Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б., 1995; Стародуб Ю.П., 1996). При цьому використані переваги методу скінчених елементів, який за рахунок апроксимації неоднорідностей моделі кусково-неперервними функціями дає змогу дослідити вплив складних змін фізичних і геометричних характеристик досліджуваного середовища на хвильове поле.

На початку розділу наводяться фізична і математична постановки задач поширення сейсмічних хвиль у неоднорідному півпросторі, в якому можливо виділити шаруваті пачки. Прообразом моделі неідеально-пружного тіла запропоноване полікристалічне середовище, що знаходиться при таких температурах і умовах навантаження, коли незворотня деформація проходить переважно за рахунок відносного зміщення кристалічних зерен (Гуревич Г.И., 1974). Останні є частинками моделі, а середовище в області контакту - матеріалом "прошарків". Незворотня деформація може бути результатом деформування площин розділу всередині зерен і відповідних ковзань одних частин кристалічної ґрадки відносно інших у напрямку вирівнювання напружень в кожній точці макроскопічно суцільного тіла. Роль прошарків грають дислокації, що знаходяться всередині зерен в області площин ковзання і мікрочастинки, які зміщуються по площинах одна відносно іншої. Незворотня деформація полікристала може бути одночасно результатом внутрізернових перегрупувань атомів і міжзернових переміщень загалом. Описана модель приймається як прототип неідеально-пружного середовища, яке може містити вclusions, зокрема, нафтові чи газові поклади. Закінчуючи опис, формулюємо фізико-математичну постановку задачі. Розглядається неоднорідний неідеально-пружний півпростір, у якому можуть бути виділені близькі до горизонтальних шаруваті ділянки. Необхідно визначити вектор

$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = (\mathbf{u}_x(\mathbf{r}, t), \mathbf{u}_z(\mathbf{r}, t), \sigma_{zz}(\mathbf{r}, t), \sigma_{xz}(\mathbf{r}, t))^T$  у півпросторі  $(r < |r|_{\max})$  з горизонтально-неоднорідними шарами, який задовольняє рівняння руху, якщо джерело коливань  $\mathbf{B}(\mathbf{r}_s, t)$  знаходиться на вільній границі або всередині півпростору; мають місце умови (2) жорсткого контакту на границях шарів (в області часів  $t$ , координат  $x$ ) і задовольняється принцип причинності для хвильового поля, що поширюється в півпросторі

$$\mathbf{B}_n(z, t) = 0, v^* = \min(v_{np}, v_{ns}), 1 \leq n \leq N.$$

Досліджується стійкість одержаних рекурентних співвідношень (7), (8) скінченоеlementного методу з метою оцінити радіус збіжності і частотний діапазон, на якому МСЕ можна комбінувати з матричним методом. Розраховані залежності радіуса збіжності:  $\rho(\Theta)$  і  $\rho(\alpha)$ , де  $\Theta$  - параметр інтегрування рівнянь руху,  $\alpha = 2\pi(\Delta t/T)$ ,  $\Delta t$  - крок по часу,  $T$  - період коливань системи. В роботі підбрані оптимальні параметри в схемах (7), (8) з метою застосування отриманих рекурентних співвідношень до задач сейсмології, сейсморовідки, деформографічних спостережень. Дослідження залежності радіуса збіжності від параметра інтегральних співвідношень МСЕ  $\Theta$  для рекурентних схем (7), (8) показали, що для схеми (7) при  $\Theta \geq 1.98$  маємо  $\rho(\Theta) < 1$ , що означає стійкість рекурентних схем. Мінімальне значення радіуса збіжності для схеми (7)  $\rho = 0.58$  отримуємо при  $\Theta = 3$ . Аналізуючи залежності  $\rho(\Theta)$  при  $\alpha \rightarrow \infty$  і  $\rho(\alpha)$  приходимо до висновку, що схема (8) є стійкою при значеннях  $\Theta > 3$ . Інтерактивним шляхом на модельних прикладах було вибрано оптимальне значення параметру інтегрування -  $\Theta = 4.7$ , при такому значенні  $\Theta$  значення  $\rho(\alpha)$  прямує до мінімуму  $\rho = 0.68$ .

У наступному підрозділі описується використана у роботі математична модель неідеально-пружного тіла і особливості розв'язків у випадку незначного відхилення від горизонтальності в шаруватих пачках. Окремо наведений підхід до аналізу хвильових полів з допомогою розро-

бленого методу. Матричний метод дає можливість проаналізувати хвильове поле і розділити на сейсмограмах однократні відбиття і багатократні. Останні звичайно загашують при обробці (наприклад, в методі спільної глибинної точки), однак, частка енергії багатократних хвиль у відбитому хвильовому полі зростає з глибиною у порівнянні з енергією однократних відбиттів (Лоссовский Е.К., Харитонов О.М., 1970). Оскільки, енергія поля кратних хвиль є пропорційною квадрату амплітуди відбиттів інформативні характеристики хвильового поля, що характеризують його на малих глибинах, можуть бути перенесеними на великі глибини. Тут допомагає розроблений модифікований підхід до розв'язку прямої динамічної задачі сейсміки, який дозволяє виділити окремі типи хвиль: змодельовати незалежно подовжні, поперечні, однорідні, неоднорідні (об'ємні і поверхневі) хвилі, що в сукупності дають повне хвильове поле. Запропонований алгоритм дозволяє для порівняння одночасний розрахунок всіх коливань. Опишемо розв'язки рівнянь руху у випадку врахування незначного відхилення від горизонтальності, алгоритм виділення хвиль заданих типів і кратностей для тіла Гуревича матричним методом (Стародуб' Ю.П., 1996). Повна зсувна деформація  $e_{\theta r}(t)$  розглядається як сума пружної  $e_{r\theta r}(t)$  і пружньо-релаксаційної  $e_{p\theta r}(t)$  деформацій. При цьому  $e_{p\theta r}(t)$  володіє неперервним спектром

релаксації по часу  $e_{p\theta r}(t) = \int_{T_p}^{T_M} \varepsilon_{\theta r}(t, \tau) \frac{d\tau}{\tau}$ , де  $1/\tau$  - ядро перетворення;

$T_p \ll T_M$ ;  $\varepsilon_{\theta r}(t, \tau)$  - задовільняє рівняння стану типу Кельвіна-Фойгта

$\sigma_{\theta r}(t) = \mu^* \varepsilon_{\theta r}(t, \tau) + (\mu + \mu^*)\tau \frac{\partial \varepsilon_{\theta r}(t, \tau)}{\partial t}$ . Тут  $\mu$  - модуль зсуву

Гука,  $\mu^*$  - пружньо-релаксаційний модуль. Для повної дилатації

$\theta(t) = e_{\theta\theta} + e_{\pi}$  у співвідношення для  $\sigma_{\pi}(t)$  замість  $\mu$  і  $\mu^*$  входять  $K$  і

$K^*$  - відповідно Гуківський і пружньо-релаксаційний модулі стиску.

В дисертації описано як використовувати запропонований підхід

для інтерпретації різних типів хвиль і кратностей їх відбиття-заломлення в шаруватих пачках і в неоднорідних частинах півпростору. Наприклад, для хвилі що поширюється в глибину півпростору від границі  $n-1$  матричний коефіцієнт відбиття розраховується за формулою

$$R_D^{n-1,n+1} = R_D^{n-1,n} + T_U^{n-1,n} R_D^{n,n+1} \sum_{p=0}^M (R_U^{n-1,n} R_D^{n,n+1})^p T_D^{n-1,n}$$

Тут символами  $R$  і  $T$  позначені матричні коефіцієнти розмірності  $2 \times 2$  відповідно відбиття і заломлення (елементи матричних коефіцієнтів  $R$  і  $T$  по рядках - відповідно коефіцієнти відбиття і заломлення для  $PP$ ,  $PS$ ,  $SP$ ,  $SS$  хвиль), нижні індекси "U" і "D" позначають коефіцієнти хвиль, що поширюються вгору і вниз по шару; "M" - число, яке показує кратність відбиттів у  $(n+1)$ -му шарі: при  $M=0$  маємо однократні хвилі відбиття в  $(n+1)$ -му шарі; при  $M=1$  - двократні, і т.д. Для того щоб усунути труднощі при числовому аналізі сейсмограм для складних моделей земної кори, в дисертації розроблений і представлений в кінці третього розділу комплексний підхід до моделювання хвильових полів у земній корі, який з одного боку дає можливість моделювати комплекси структур земної кори з допомогою числового методу: для цього застосовуємо МСЕ; і з другого боку - аналізувати відбиття-заломлення у виділених у моделях шаруватих структурах. Таким чином, на основі принципу інтерференції отримуємо можливість оптимально використати пам'ять і швидкодію комп'ютера. Метод був розвинутий у три етапи: розв'язок статичної і динамічної задач сейсміки методом скінчених елементів, розвиток матричного методу і, нарешті, об'єднання двох підходів у матрично-скінченоелементний метод із задоволенням умови рівності для переміщень і напружень на границях у областях "зшивання" розв'язків. При побудові комплексного матрично-скінченоелементного методу розглядаємо три випадки:

1) хвилі поширюються з глибини півпростору і реєструються на вільній границі, коли джерело коливань вміщене всередині півпростору, і

моделюється з допомогою неоднорідного включення, над яким знаходиться шарувате середовище; або хвиля поширюється з глибини від джерела через шарувате середовище, падає на неоднорідний шар, що моделюється МСЕ і далі знову поширюється до вільної границі, де знаходяться приймачі;

2) хвиля поширюється від джерела на вільній границі через шарувате середовище, падає на неоднорідний шар, який моделюється з допомогою МСЕ, відбита від структур у півпросторі хвиля реєструється на вільній границі;

3) хвиля від джерела на вільній границі проходить через неоднорідне середовище верхньої товщі розрізу, який моделюється за допомогою МСЕ, відбивається від шаруватої структури, реєструється на вільній границі.

Особливістю першого випадку є те, що при "зшиванні" матричного методу і МСЕ на нижній границі неоднорідного шару розраховуємо просторово-часову залежність вектора напружень-переміщень, що дає крайову умову для задачі МСЕ і в результаті можемо розрахувати вектор напружень-переміщень на верхній границі неоднорідного шару, далі отримати Фур'є-трансформанти цього вектора і використати їх для розрахунку поля до верхньої границі з допомогою матричного методу.

У другому випадку хвильове поле, яке отримуємо на верхній границі неоднорідного шару у часовій області в результаті перетворення Фур'є до часу і простору залежностей розрахованих матричним методом, використовуємо для постійного коректування в часі рекурентних часових залежностей МСЕ. Це дає змогу розрахувати поле на верхній границі неоднорідного глибинного шару і використати його знову для перерахунку на вільну границю з допомогою матричного методу.

У третьому випадку частину поля, яка відповідає поширенню в шаруватому середовищі виділяємо у вигляді вільного члена в рівнянні руху, який впливає як зовнішня сила на розв'язок, отриманий з

допомогою МСЕ для верхньої неоднорідної товщі.

**Четвертий розділ** роботи присвячений питанням моделювання та інтерпретації напружено-деформованого стану і хвильових полів у земній корі. Результати подані в порядку наростання складності застосувань матрично-скінченоелементного методу, який розроблений для розв'язання цієї проблеми.

Розділ починається описом дослідження полів переміщень-напружень у земній корі. Моделювання проведене для штольні в селі Мужієво Закарпатської області. Колишня золотоносна копальня "Мужієво" викопана в товщі ліпаритових туфів і глин у схилі гори Велика Берегівська (на віддалі 2 км від села Мужієво). Хвиля сезонної деформації з амплітудою  $10^{-6}$  спостерігалась тут на довгому (27.5 м) і короткому (11.7 м) екстензіметрах. Постійний стиск порід у штольні може призвести до деструктивних явищ (Сапужак Я.С., під ред., 1993). Експериментальні дані, отримані в результаті деформографічних вимірювань, були використані вперше для детального дослідження розподілу напружень і деформацій у моделі штольні з допомогою МСЕ (Стародуб Ю.П., Брич Т.Б., 1995). В напрямку осі головного тунелю було змодельоване стискуjące напруження величиною 0.125 МПа. Площина штольні була розбита на прямокутні трикутники з вимірами 1.6 м  $\times$  1.8 м. Щоб усунути вплив границь моделі на точність розрахунків МСЕ, напруження було прикладене на достатній відстані (50 м від границь штольні). Результати показують, що зростання величини деформації спостерігається в північній частині, де тунелі розходяться, до максимальних значень змін  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{xy}$ . Крім того, для  $\varepsilon_{xy}$  наявні значні зміни в кінцях штольні і амплітуди - на її вході. Слід відзначити, що коли напруження  $\sigma_{yy}$  і  $\sigma_{xy}$  спадають при відході від головного тунелю до 0 поза межами штольні, то поперечні напруження  $\sigma_{xx}$  мають не нульові значення у широкому околі штольні - значно більшому від її геометричних розмірів, що треба враховувати для контролю можливих зсувів порід за межами кріплень самої штольні. Результати порівняння модельних

експериментів з натурними даними у шгольні "Мужієво" з врахуванням існування рівних тектонічних структур та розміщення розломів вперше були використані при дослідженні напружено-деформованого стану земної кори сейсмоактивної зони Берегове-Мукачеве-Свалява Закарпаття з застосуванням МСЕ. Деформації кори у регіоні Закарпаття - порядку  $10^{-6}$ . Тут маємо віддадь приблизно 50 км до джерел землетрусів з магнітудами 5.5. Крім того, часові варіації таких геоакустичних параметрів як швидкості поадовжних і поперечних хвиль і густини кори нерідко пов'язані з локальними землетрусами і тектонічними деформаціями земної кори. Тому дослідження аномалій напружено-деформованого стану земної кори регіону грає важливу роль у практиці оцінки сейсмічної небезпеки у такій гористій сейсмоактивній зоні. Для оцінки впливу рельєфу розглядалася плита товщиною 5 км, розміри регіону 100 км  $\times$  50 км. Напружено-деформований стан земної кори в Закарпатті був досліджений під впливом стискууючого зусилля величиною 0.5 МПа, прикладеного перпендикулярно до лінії Закарпатського розлому (Стародуб Ю.П., Брич Т.Б., 1995). У околі міста Мукачеве і на Сході досліджуваної області в поперечних деформаціях  $\epsilon_{yy}$  (тангенціальних до лінії Закарпатського розлому) виділяються дві зони максимумів меридіонального напрямку. Области вищої концентрації деформацій  $\epsilon_{yy}$  і  $\epsilon_{xy}$  зустрічаються біля міста Мукачеве вадовж розломів, що перетинають цю зону. Разом з тим у районі міста Мукачеве маємо очевидний максимум деформації  $\epsilon_{xy}$ , який прямує до  $10^{-4}$ , що може мати деструктивний характер для регіону. Отримані великі градієнти  $\sigma_{xx}$  у районі міст Мукачеве і Берегове. Напруження  $\sigma_{yy}$  і  $\sigma_{xy}$  мають приблизно в три - чотири рази менші абсолютні значення. Характерними рисами для  $\sigma_{xx}$  і  $\sigma_{xy}$  є те, що їх максимуми повторюють контури меридіональних у східній та західній частинах моделі і концентруються в околі міста Мукачеве. Локальні максимуми  $\sigma_{yy}$  і  $\sigma_{xy}$  зустрічаються в місцях перетину розломів на досліджуваній території.

Для показу дієвості матрично-скінченоелементного методу при до-

слідженні хвильових полів у наступному підрозділі вивчено вплив розломів земної кори на теоретичні сейсмограми вдовж розрізу в напрямку II Міжнародного геотраверсу по лінії Берегове-Долина (Стародуб Ю.П., Брич Т.Б., 1995). Джерело враховане як плоска сейсмічна хвиля, що поширюється з глибини Панніонської рівнини з Південного Сходу, сформована з допомогою матричного методу, часова форма її підбрана подібною до вигляду першого вступу на натурних сейсмограмах. Теоретичні сейсмограми, розраховані МСЕ, порівнювалися з експериментальними, зареєстрованими сейсмічними станціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" Карпатської мережі сейсмічних станцій. Були виявлені та проінтерпретовані ефекти неоднорідностей (розломів) земної кори Східних Карпат на картинах сейсмічних коливань, що пройшли через досліджувану область. Результати представлені у вигляді набору сейсмічних трас, що є підґрунтям майбутніх досліджень у регіоні з використанням значної кількості цифрових сейсмостанцій.

На модель неоднорідного півпростору на глибині 100 км падає плоска хвиля під кутом  $7^\circ$  до вертикальної осі у південно-західному напрямку. Лінійні розміри елементів моделі МСЕ  $\cong 4$  км. Щоб усунути вплив жорстко закріплених бокових границь моделі на сейсмічне хвильове поле, приймачі розміщені на віддалі 50 км від них. Сейсмостанція "Косів" зареєструвала сейсмограму 06.08.89. Два періоди сейсмограми мають тривалість 20 секунд. Розраховані теоретичні сейсмограми вдовж ділянки протяжністю 150 км, куди проектується сейсмічні станції "Міжгір'я", "Ужгород", "Берегове". Підбір форми імпульса джерела здійснювався шляхом накладання теоретичної сейсмограми на експериментальну для сейсмостанції "Косів". При цьому хвильове джерело моделювалося у виді імпульса типу Берлаге тривалістю 20 с, що відповідає двом періодам синусоїди. Амплітуди вертикальних компонент швидкості переміщення - добре видимі в часовому діапазоні 12 - 35 с. Горизонтальні компоненти слабкі на перших вступках на Південний-Захід від міста Берегове, що пов'язано з відсутністю розломів у цьому

напрямку. Амплітуди горизонтальних компонент на часах 30 с є відносно більшими від вертикальних. Завдяки рефракції від розлому ці хвилі (на часах більших ніж 30 с) відповідають мультиполям відбитим від вільної границі. У районі Міжгір'я маємо зростання амплітуди Р-хвилі, яке пов'язане з дифракцією на розломі. Подібний ефект отримуємо для горизонтальних коливань. Характерні часи вступів для швидкостей переміщень тут зростають для мультиполів. На північний схід від станції "Міжгір'я" маємо загальне збільшення амплітуди кратних відбиттів і зменшення часу їх приходу. Останній ефект найбільш відчутний для горизонтальних коливань. Щоб дослідити вплив моделі перетину земної кори на імпульс вищої частоти, було змодельоване падіння коротшого імпульса тривалістю 12 с (трьох періодів) на модель півпростору. Натурна сейсмограма зареєстрована сейсмостанцією "Міжгір'я" 03.05.89. Вибір імпульса в джерелі був зроблений шляхом накладання на експериментальну сейсмограму. Імпульс вищої частоти приводить до зміни відповідних трас, що дозволяє чіткіше виділити відбиття, зокрема, вступи на часах в околі 22 с, що відповідають часам приходу поперечних хвиль. У цьому випадку бачимо загасання амплітуд мультиполів у інтервалі 45 - 50 секунд. Специфічні риси хвильового поля, описані для сейсмограми, зареєстрованої 06.08.89 повторюються у випадку сейсмограми - 03.05.89. Однак, для вертикальних коливань маємо інверсію фази вступів Р-хвиль. На трасах горизонтальних коливань більш виразні вступи хвиль, відбитих між розломами в районі Косова у північно-східному напрямку.

Наступним прикладом застосування розробленого методу є моделювання хвильових полів на нафтогазових родовищах. У роботі наведено дослідження сейсмічних хвильових полів на трьох профілях Лопушнянського нафтогазового родовища Чернівецької області: дається опис моделі, аналіз хвильових відбиттів та інтерпретація числового експерименту (Стародуб Ю.П., 1996). Відомі методи синтезування та аналізу сейсмічних хвильових полів, зокрема, на нафтогазових родовищах

розроблені для порівняно простих шаруватих моделей середовищ (Харитонов О.М., 1988; Стародуб Ю.П., 1985). У випадку, що розглядається, верхню частину сейсмогеологічного розрізу не можна вважати горизонтально шаруватою, чи близькою до шаруватої. Тому хвильові поля моделюються в розрізі, де присутні неоднорідності типу виклиновань і шаруваті пачки із суттєвими відхиленнями від горизонтальної однорідності. При вирішенні задачі інтерпретації хвильового поля в середовищі, яке складається із загаданих суттєво-неоднорідних, але шаруватих структур логічно застосовувати комплексний матрично-скінченноелементний метод (Стародуб Ю.П., 1996). Вхідними даними експерименту послужили розподіли пластових швидкостей і густини середовища визначені в опорних свердловинах. Тривалість вхідного сигналу для джерела, розміщеного на денній поверхні, - приблизно 8 мс. Крок по часу на розрахованих теоретичних сейсмограмах - 0.002 с, загальна тривалість сейсмограм - 3 с. Шарувате середовище на глибині більше 3000 м, де прогноуються поклади нафти, моделюються матричним методом, а структури на глибинах до 3000 м - МСЕ. Щоб усунути вплив відбиттів від бокових границь, рамки моделі розширені вправо і вліво на 500 м. Вплив шаруватого середовища, який розраховуємо матричним методом, відображається знизу в зоні стику. Приймачі знаходяться на вільній границі з інтервалом приблизно 150 м один від одного. Результати моделювання - траси швидкостей переміщення. Моделювання проводилося в два етапи. На першому - розрахунок хвильового поля методом скінчених елементів у моделі зі складною будовою без шаруватої нижньої структури, яка містить нафту; з жорстким закріпленням знизу по Z. На другому - моделювання повного складнопобудованого середовища комплексом двох методів. При цьому для МСЕ обмеження знизу по Z збережене. Вплив шаруватого середовища враховувався як джерело підняте на один крок по сітці розбиття і розраховане матричним методом. Далі проводився аналіз хвильових полів на вільній поверхні. Отримане повне хвильове поле має

складний характер і важко піддається інтерпретації. Тому розглядається різниця хвильових полів, розрахованих на першому і другому етапах числового експерименту. Таким чином, отримуємо частину хвильового поля, яка пройшовши через складнобудоване середовище, яке моделювалося МСЕ, характеризує шарувату структуру на глибині. Ефекти запізнень часів вступів у точки, які віддалені від джерела, спостерігаються краще на горизонтальних складових сейсмограм, ніж на вертикальних, оскільки, швидкість S-хвиль на третину менша від позовжніх. Відбиттям від нафтових пластів відповідають часи в околі 1.5 с. При тривалості часу проходження шаруватої пачки приблизно 0.2 с для імпульсів Р-хвиль, які спостерігаються, в основному, на вертикальних компонентах коливань, відбиття на часах більших 2.5 с можна інтерпретувати як вплив кратних хвиль, що розповсюджуються в напрямку до вільної границі. При цьому на горизонтальних компонентах наявна складна хвильова картина з інтенсивними коливаннями практично у всьому діапазоні 1.5-4 с, що пов'язується з впливом поперечних хвиль на компоненту  $\partial U_x / \partial t$ .

В околі 2 с на трасах спостерігаються S-хвилі відбиті від покрівлі нафтових пластів. Додамо, що в результаті аналізу хвильових полів з метою виявлення впливу верхньої товщі неоднорідного півпростору, вдалося оцінити ефекти країв родовища на хвильове поле, отримати вигляд останнього, який легше інтерпретувати за рахунок видалення розсіяних відбиттів у верхній частині півпростору для хвиль, що поширюються вниз від джерела, а також - детально вивчити ефекти кратних та інших типів хвиль.

**П'ятий розділ** містить розроблений підхід до вирішення оберненої динамічної задачі сейсмології на основі розвинутого (для випадку стохастичного обертання) методу розв'язку прямої динамічної задачі сейсмології для об'ємних Р-хвиль. У розділі зроблений докладний опис теорії методу і статистики помилок. Проведене дослідження структури простору вхідних даних (результатів спостережень) і розв'язків (шука-

них моделей) оберненої задачі сейсміки. Дані розрахункові приклади збіжності отриманого на цій основі алгоритму. Використовуючи результати аналізу задачі на власні значення і вектори, побудований розв'язок оберненої динамічної задачі сейсмології методом стохастичного обертання з врахуванням оцінки похибки і роздільної здатності даного підходу. Вважається, що вхідні дані складаються з корисного сигналу і шуму  $\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m} + \mathbf{n}$ , де  $\mathbf{d}$  - вектор відхилення між спостереженими і обчисленими даними;  $\mathbf{m}$  - вектор поправок до вектора параметрів шуканої моделі  $\mathbf{M}$ ;  $\mathbf{n}$  - шум у спостережених даних;  $\mathbf{m}$  і  $\mathbf{n}$  - описують випадкові (Гаусові) процеси з середніми значеннями рівними нулю  $\langle \mathbf{m} \rangle = \langle \mathbf{n} \rangle = \mathbf{0}$  (Аки К., Ричардс П., 1983). Обчислюються коваріаційні матриці  $\mathbf{R}_{mm} = \langle \mathbf{m}\mathbf{m}^T \rangle$ ,  $\mathbf{R}_{nn} = \langle \mathbf{n}\mathbf{n}^T \rangle$  випадкових процесів  $\mathbf{m}$  і  $\mathbf{n}$ , що генеруються у ряді повторних експериментів. Стохастичне усереднення за багатьма записами дозволяє отримати більш надійну оцінку результуючої моделі. Пропонується мінімізувати норму (Starodub G., Гур А., 1992)

$$A = \sum_{l=1}^L \left| U^{(l)} - F^{(l)}(\mathbf{M}) \right|^2 = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{\Omega} (U_i^{(l)} - F_i^{(l)}(\mathbf{M}))^2, \quad l = 1, \dots, L; \quad (9)$$

де  $U^{(l)}$  - спектр  $l$ -ої експериментальної сейсмограми,  $F^{(l)}$  - розрахований спектр теоретичної сейсмограми для джерела  $l$ -ої спостереженої сейсмограми. Залежність (9) лінеаризується в околі деякої початкової моделі  $\mathbf{M}^*$ . Мінімізації (9) відповідає знаходженню абсолютного

мінімуму  $A = \sum_{l=1}^L \left| \mathbf{d}^{(l)} - \mathbf{G}^{(l)} \mathbf{m} \right|^2$ . Тут  $\mathbf{d}^{(l)} = U^{(l)} - F^{(l)}(\mathbf{M}^*)$ ,

$$G_{ij}^{(l)} = \left[ \frac{\partial F_i^{(l)}}{\partial M_j} \right]_{\mathbf{M} = \mathbf{M}^*}, \quad \mathbf{m} = \mathbf{M} - \mathbf{M}^*, \quad \text{чого можна досягнути для}$$

$$\mathbf{m}, \quad \text{розв'язуючи рівняння} \quad \mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{d}. \quad (10)$$

В загальному випадку при пошуку оптимальних значень параметрів моделі, для кожного з яких визначається своє значення дисперсії, розв'язок рівняння (10) дається оператором  $\hat{m} = Ld$ . Обернений стохастичний оператор  $L$  мінімізує різницю між векторами  $m$  і  $Ld$ . У даній теорії  $L$  визначається у вигляді  $L = R_{\text{нм}} \tilde{G} (GR_{\text{нм}} \tilde{G} + R_{\text{дд}})^{-1}$ . Для отримання стохастичного оберненого оператора такого виду необхідно знайти обернену матрицю розмірності  $N = L \times \Omega$ , де  $L$  - загальна кількість сейсмограм,  $\Omega$  - кількість відліків у кожній сейсмограмі. Похідні елементів матриці  $R^{-1}$ , яка визначається згідно формули (3), за швидкостями поздовжніх і поперечних хвиль та товщиною шарів, що входять у матрицю похідних  $G$  із (10), розраховуються за аналітичними формулами

$$\begin{aligned} \frac{\partial(R^{-1})}{\partial d_n} &= T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots T_n \frac{\partial E_n}{\partial d_n} T_n^{-1} \dots T_1 E_1 T_1^{-1}; \\ \frac{\partial(R^{-1})}{\partial(v, Q)_{P, S_n}} &= T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots E_{n+1} \frac{\partial(T_{n+1} T_n^{-1})}{\partial(v, Q)_{P, S_n}} E_n \dots T_1 E_1 T_1^{-1} + \\ & T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots T_n \frac{\partial E_n}{\partial(v, Q)_{P, S_n}} T_n^{-1} \dots T_1 E_1 T_1^{-1} + \\ & T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots E_n \frac{\partial(T_n T_{n-1}^{-1})}{\partial(v, Q)_{P, S_n}} E_{n-1} \dots T_1 E_1 T_1^{-1}, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $\frac{\partial}{\partial d_n}$  - оператор частинної похідної по товщині  $n$ -го шару;

$\frac{\partial}{\partial(v, Q)_{P, S_n}}$  - оператор позначає частинні похідні відповідно по  $v_{P_n}$ ,

$v_{S_n}$ ,  $Q_{P_n}$ ,  $Q_{S_n}$  у випадку  $P$ - або  $S$ - хвиль у  $n$ -му шарі;  $E_n$  - матриця, яка зв'язує хвильові потенціали на границях  $n$  і  $(n-1)$  шаруватого середовища. У випадку ідеально-пружного середовища добутки типу

$T_{n+1}T_n^{-1}$ ,  $T_nT_{n-1}^{-1}$  (Стародуб Ю.П., Починайко Р.С., 1978) не залежать від частоти. Це дозволяє обчислити їх лише один раз для всіх компонент вектора спектра теоретичної сейсмограми. Розраховуються матриці  $F_i^*$ ,  $S_i^*$ ,  $i=1, \dots, 2N+1$ ; які є добутками типу

$$F_{2N+1}^* = T_{N+1}^{-1}T_N^*; F_{2N}^* = F_{2N+1}^*E_N^*; F_{2N-1}^* = F_{2N}^*T_N^{-1}T_{N-1}^{-1}; \dots; F_1^* = F_2^*T_1^{-1}; \\ S_1^* = T_1^{-1}; S_2^* = E_1S_1^*; S_3^* = T_2^{-1}T_1^{-1}S_2^*; \dots; S_{2N+1}^* = T_{N+1}^{-1}S_{2N}^*.$$

Економія часу обчислень полягає в запам'ятовуванні матричних добутоків, які використовуються при розрахунку теоретичної сейсмограми і похідних по кожному з параметрів моделі згідно формул (11). Дослідження надійності процедури лінійної оптимізації проведене з використанням розрахованої сейсмограми для тришарової моделі. Така модель названа "дійсною". Фізичні параметри, що характеризували "дійсну" модель змінювались. Отримана модель бралась за вихідну для оптимізаційної процедури, що мінімізувала відхилення теоретичної сейсмограми від спостереженої. З метою тестування процедури по кожному параметру проводилась окрема перевірка для товщини одного з шарів, швидкостей, добротностей P- і S- хвиль. Це дозволило, зокрема, перевірити правильність розрахунку похідних теоретичної сейсмограми по параметрах моделі.

**У шостому розділі** розроблений метод розв'язання оберненої динамічної задачі сейсміки використаний для вивчення внутрішньої будови Землі: із використанням сейсмограм, зареєстрованих на денній границі, уточнюється структура земної кори під сейсмічними станціями. Сформульований ряд умовностей відповіді на питання про ступінь співпадіння отриманої моделі з реальним середовищем (Стародуб Ю.П., 1996). Ці умовності наступні:

- 1) чи можливо задати такі параметри моделі в розв'язок оберненої задачі, щоб відтворити результати натурних вимірювань, тобто чи співпадатимуть розраховані сейсмограми з отриманими в експерименті;
- 2) реєстрація та збір вхідних даних для вирішення оберненої задачі та

відділення впливу джерела від впливу середовища, інтерпретація різних типів хвиль на сейсмограмах;

3) вплив ефектів дисперсії та шумових сигналів на сейсмограми.

Згадані труднощі породжують ряд проблем математичної геофізики, які вирішені в дисертаційній роботі. До них відносяться питання про некоректність оберненої задачі сейсмології та вибір числового методу оптимізації; постановка задачі; збір і аналіз вхідних даних з метою виділення корисного сигналу та ідентифікації шумів, розв'язок прямої задачі сейсміки; вибір методу розв'язання оберненої задачі, побудова алгоритму визначення моделі за експериментальними даними; інтерпретація отриманих результатів, оцінка статистичної вірогідності та оптимальності результуючої моделі. Хоча кожне із згаданих завдань є нетривіальним, для правильного вирішення вони розглядаються у взаємозв'язку і взаємовпливі одного кроку розв'язку оберненої динамічної задачі сейсмології на інший (Стародуб Ю.П., Гнып А.Р., 1989; Starodub G., Gnyr A., 1989; Стародуб Ю.П., Гнып А.Р., 1992; Стародуб Ю.П., Стародуб Г.Р., Гнып А.Р., Кендзера А.В., Капитанова С.А., 1992; Starodub G., Gnyr A., 1992; Стародуб Ю.П., Гнып А.Р., 1993; Starodub G., Gnyr A., 1996; Стародуб Ю.П., 1997). Розроблений підхід використовується для вирішення задачі уточнення будови земної кори під трьома станціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" Карпатського регіону. Отримані покращені розподіли швидкості та добротності для сейсмічних хвиль і густини середовища. Розраховані роадільна здатність, розраховані похибки обчислювального експерименту (Starodub G., Gnyr A. P., 1996; Стародуб Ю.П., 1996).

Існуючі геологічні та геофізичні дані про будову земної кори, використовуються для побудови початкових моделей сейсмічних перетинів. У роботі створюється банк даних сейсмограм Р-хвиль Карпатського регіону, при організації якого, задовольняються основні вимоги теорії баз даних (Мартин Дж., 1980). Використовуються сейсмограми зареєстровані в частотному діапазоні 0-5 Гц з використанням датчиків типу

СКД. Крок оцифрування ручним способом на сейсмограмах - 0,25 с, що відповідає максимальній частоті частотного спектра сейсмограм - 2 Гц (Бат М., 1980). Спектральна обробка натурних сейсмограм здійснена із застосуванням фільтра Гауса, максимум частотної характеристики - 1 Гц. Моделювання для земної кори під сейсмічними станціями "Ужгород", "Косів" проводилося на основі 8 сейсмограм, "Міжгір'я" - 7 сейсмограм, зареєстрованих в районі Японських островів. Результуюча модель під сейсмостанцією "Ужгород" отримана в результаті 53 ітерацій, "Косів" - 43, "Міжгір'я" - 39. Середньоквадратичне відхилення теоретичної сейсмограми від експериментальних зменшилось у 3,2, 2,7 і 2,9 рази порівняно із значенням цього відхилення для початкової моделі для сейсмостанцій "Ужгород", "Міжгір'я", "Косів", відповідно.

Так, зокрема, для сейсмостанції "Ужгород" встановлено:

- підвищення потужності третього шару, який відповідає метаморфізованим палеозойським відкладам і "гранітному" шару, - з 10 км в початковій моделі до 13,8 км у результуючій та інверсія в ньому швидкості поперечних хвиль ( $v_{S_2} = 3.41$  км/с - для початкової моделі,  $v_{S_2} = 3.36$  км/с - для результуючої);
- зменшення глибини залягання поверхні третього шару або дорифейського фундаменту (сейсмічної границі  $K_1$ ) з 9 км до 7,2 км і збільшення її контрастності для швидкостей поширення поздовжніх хвиль ( $\Delta v_p = v_{P_3} - v_{P_2} = 0.3$  км/с у початковій моделі,  $\Delta v_p = 0.56$  км/с - у результуючій);
- збільшення глибини поверхні четвертого шару або протофундаменту (сейсмічної границі -  $K_2$ ) з 19 км до 21 км та контрастності цієї границі за поперечними хвилями ( $\Delta v_s = v_{P_4} - v_{P_3} = 0.4$  км/с на початку експерименту,  $\Delta v_s = 0.69$  км/с - по його завершенні).

Найбільш характерні зміни результуючої моделі земної кори під сейсмостанцією "Косів":

- загальне підвищення потужності земної кори (з 43 до 51 км);
- збільшення її контрастності для швидкостей поширення поперечних хвиль при переході з кори в мантію (стрибок швидкості  $\Delta v_s = v_{s_5} - v_{s_4}$  збільшується з 0.7 км/с до 1.16 км/с);
- зменшення добротності для поперечних хвиль в осадовому шарі (з 60 до 35).

Результуюча модель для сейсмостанції "Міжгір'я" характеризується наступними ознаками:

- збільшенням глибини покрівлі "базальтового" шару (горизонту  $K_{1,2}$ ) або нижньої границі третього шару (з 19 км до 23.4 км);
- зростанням швидкості  $v_p$  у поверхневому шарі (з 4.5 км/с до 5 км/с), у "базальтовому" - четвертому (з 6.8 км/с до 7.33 км/с), у коро-мантіїному комплексі - п'ятому шарах (з 7.7 км/с до 8 км/с) і спаданням  $v_p$  в другому шарі (з 5.4 км/с до 5.1 км/с); збільшенням добротності для поздовжніх хвиль  $Q_p$  у другому (з 340 до 380), зменшенням  $Q_p$  у першому (з 240 до 209), в четвертому (з 500 до 469) і в п'ятому (з 562 до 528) шарах; при тому добротності поперечних хвиль повторюють зміни для  $Q_p$ .

Робота закінчується висновками. У кінці наведений список використаних вітчизняних і зарубіжних літературних джерел.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Розроблений новий метод розв'язування статичних і динамічних задач сейсміки для моделювання полів переміщень, деформацій і напружень у складних геометрично і фізично неоднорідних середовищах.

Запропонований комбінований матрично-скінченоелементний метод дозволяє аналізувати загальну динамічну хвильову картину в об'єктах рівноманітної геологічної природи під дією сейсмічних джерел коливальної складної просторової і часової форми.

Проведене математичне моделювання і розв'язана обернена дина-

мічна задача сейсмології дали змогу дослідити інтерференційну картину хвильового поля в сейсмогеологічних розрізах, що вивчаються в задачах сейсмології і сейсморовідки, з використанням методу стохастичного обертання - визначити оптимальні статистично неідеально-пружні горизонтально-шаруваті моделі земної кори під сейсмічними станціями Карпатського регіону за даними сейсмограм Р-хвиль.

Основні результати роботи можна сформулювати наступним чином.

1. Запропонований підхід прямого інтегрування рівнянь руху для розрахунку полів переміщень, швидкостей переміщень і прискорень при вирішенні статичних та динамічних задач деформографічних досліджень, сейсмології і сейсморовідки методом скінчених елементів. На основі проведеного аналізу підібрано оптимальні параметри розроблених рекурентних схем МСЕ.
2. Розроблений комплексний матрично-скінченоелементний метод, що дозволяє моделювати хвильові поля в середовищах складної конфігурації, у яких можуть існувати шаруваті пачки. Метод дозволяє аналізувати хвильові поля в шаруватих структурах, ідентифікувати та виділяти на теоретичних сейсмограмах, розрахованих, зокрема, на вільній границі горизонтально-шаруватого неідеально-пружного півпростору, хвилі заданих типів і кратностей відбиття-заломлення, розсіянь, монотипних, обмінних, однорідних і неоднорідних хвиль. Існує також можливість розділення хвильового поля на дифраговану або розсіяну в неоднорідному середовищі і проникаючу в шаруваті структури частини.
3. Алгоритм і комп'ютерна програма з можливістю інтерактивної роботи та візуального опрацювання вхідних даних і результатів моделювання переміщень, деформацій та напружень та їх часових залежностей у довільній точці середовища, реалізовані з використанням матричного та скінченоелементного методів і використані для вивчення напружено-деформованого стану в сейсмонебезпечних районах та хвильових полів у розрізах земної кори Карпатського регіону. Показано високу ефективність комплексного матрично-скінченоелементного методу при

модельованні складених шаруватих і неоднорідних середовищ, коли для дослідження шаруватих структур та неоднорідностей використовуються матричний метод і метод скінчених елементів відповідно.

4. На основі доведення доцільності застосування матричного методу, як засобу модельовання хвильових полів в середовищах типу земної кори і методу стохастичного обертання для побудови ітераційної процедури, яка мінімізує відхилення теоретичної сейсмограми від експериментальних при пошуку моделі, розв'язана обернена динамічна задача сейсмології. Підхід стохастичного обертання дозволяє оцінити статистичні характеристики результуючої моделі: матриці похибок та роздільної здатності і домогтися компромісу між ними з метою отримання оптимальних значень шуканих геофізичних параметрів. Теоретично обгрунтоване усунення впливу невідомих джерела коливань і шляху поширення сейсмічних хвиль до нижньої границі земної кори під сейсмостанцією від інформації на сейсмограмах, що стосується лише будови кори.

5. Матричний метод використаний для побудови швидкого алгоритму розрахунку теоретичних сейсмограм та отримання аналітичних виразів похідних теоретичних сейсмограм за параметрами моделі, необхідних для побудови алгоритму визначення статистично оптимальної моделі земної кори, що мінімізує відхилення теоретичної сейсмограми від серії експериментальних сейсмограм. На тестових прикладах досліджено збіжність розробленої процедури мінімізації з оцінкою впливу величин початкового відхилення параметрів моделі і рівня шумів у вхідних даних. Показана необхідність включення процедури відбору і попередньої обробки вхідних даних у методику розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології.

6. Розроблений алгоритм і комп'ютерна програма застосовані до натурних сейсмічних даних з метою уточнення моделей земної кори під сейсмічними станціями Карпатського регіону. Дослідження проведені з використанням створеного банку сейсмічних записів, у який внесли

сейсмограми Р-хвиль, зареєстровані сейсмостанціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я". На основі початкових моделей земної кори під сейсмічними станціями, побудованих з використанням наявних геолого-геофізичних даних про тектоніку Карпатського регіону, розраховані статистично оптимальні результуючі моделі земної кори під сейсмічними станціями, що мінімізують відхилення теоретичних сейсмограм від експериментальних. Обчислені похибки і роздільна здатність моделей.

Математичне моделювання дозволяє отримати результати, які необхідні при розбудові та укріпленні шахт і штолень, будівництві виробничих і житлових об'єктів, розв'язанні практичних задач сейсмології та сейсморовідки, в тому числі при вивченні і прогнозуванні покладів вуглеводнів. Запропонований алгоритм розв'язання прямої та оберненої динамічної задачі сейсмології доповнює набір засобів вивчення складнобудованої земної кори, допомагає сформулювати нові комплексні підходи з залученням результатів новітніх геофізичних і геологічних досліджень. Моделі, що мінімізують розходження теоретичних і експериментальних сейсмограм, можуть використовуватись при уточненні глибинної будови Землі на мережах з великою кількістю сейсмостанцій, при вивченні тектонічної картини, механізмів і локалізації вогнищ землетрусів, а також у задачах оцінки сейсмічної небезпеки.

#### ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ РОБОТИ

1. *Стародуб Ю.П.* Пряма динамічна задача сейсміки для вивчення будови земної кори. - Львів: Світ, 1997. - 164 с.
2. *Стародуб Ю.П.* Обернена динамічна задача сейсміки для вивчення будови земної кори. - Львів: Світ, 1997. - 132 с.
3. *Стародуб Ю.П.* Математическое моделирование сейсмических волн в слоистой и неоднородной земле // Математическое моделирование в сейсмороведке. - К.: Наук. Думка, 1985. - С. 125-182.
4. *Стародуб Ю.П.* Определение эхо-сигнала от упругой сферы в полупространстве с жесткой границей // Математические методы и физико-механические поля. - 1978. - №8. - С. 131-135.

5. **Стародуб Ю.П.** Расчет волнового поля, рассеянного слабоконтрастными включениями, на свободной границе горизонтально-слоистого идеально-упругого полупространства // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. - К.: Наук. думка. - 1984. - С. 37-47.
6. **Стародуб Ю.П.** Структура поля механических волн на свободной границе горизонтально-слоистого локально-неоднородного неидеально-упругого полупространства // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1986. - №6. - С. 43-47.
7. **Стародуб Ю.П., Починайко Р.С.** Методика расчета сейсмограмм от слабоконтрастных упругих включений в слоистом горизонтально-однородном полупространстве // Физико-механические поля в деформируемых средах. - К.: Наук. Думка, 1978. - С. 146-150.
8. **Кендзера А.В., Роман А.А., Стародуб Г.Р., Стародуб Ю.П., Исичко Б.С., Илиеш І.І.** О способе получения частотных характеристик среды при построении расчетных акселерограмм методом пересчета // Вопросы инженерной сейсмологии. - 1987. - № 28. - С. 200-205.
9. **Вербицкий Т.З., Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б.** Изучение распределения напряжений, деформаций и перемещений в массиве горных пород с цилиндрической неоднородностью // Геофиз. журн. - 1988. - 10, № 6. - С. 36-43.
10. **Кендзера А.В., Стародуб Г.Р., Стародуб Ю.П.** О методике изучения строения земной коры по записям волн от удаленных землетрясений // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. - К.: Наук. думка. - 1988. - С. 106-111.
11. **Стародуб Ю.П., Гып А.Р.** Уточнение строения среды в районах расположения сейсмостанций Карпатского региона на математической модели поля объемных сейсмических волн. - Сейсмологические исследования (результаты исследований по международным геофизическим проектам). - 1989. - №11. - С. 25-33.

12. *Стародуб Ю.П., Гнып А.Р.* Методика определения строения среды под сейсмостанциями на основе решения двумерной обратной задачи сейсмологии для объемных волн // Геодинамика и сеймопрогностические исследования на Украине. - К.: Наук. Думка, 1992. - С.80 - 86.
13. *Стародуб Ю.П., Стародуб Г.Р., Гнып А.Р., Кендзера А.В., Капитанова С.А.* Выбор модели строения земной коры под сейсмической станцией "Ужгород" // Геодинамика и сеймопрогностические исследования на Украине. - К.: Наук. Думка, 1992. - С. 162-170.
14. *Starodub G., Gnyp A.* Automatical correction of the medium model structure under the West Ukraine seismostations. - Prague: Proceedings. 4th Intl. Analysis of Seismicity and Seismic Risk Symp. - 1989. - 1. - P. 231-236.
15. *Starodub G., Gnyp A.* The medium structure specification under the "Uszhorod" seismostation based on the solution of the inverse dynamic problem of seismology // Bulgarian Geophys. Journal. - 1989. - 14, N4. - P. 41-46.
16. *Starodub G., Gnyp A.* An inversion method to determine the crustal structure at the East Carpathian seismic network stations using P-wave seismograms. - Prague: Proceedings. 23rd Europ. Seism. Commission Gen. Assembly. - 1992. - 1. P. 151-154.
17. *Starodub G., Brych T.* East Carpathian crust structure exploration by the finite element method. - Athens, Greece: Proceedings. European Seismological Commission XXIV General Assembly. - 1994. - P. 600-609.
18. *Starodub G., Brych T.* Investigation by the finite element method of stress-strain state of the Transcarpathian crust // Acta Geophysica Polonica. - 1995. - 18, N4. - P. 303-312.
19. *Starodub G., Gnyp A.* Models of the Earth's crust structure in the East Carpathian region inferred from inversion of teleseismic P wave-

- forms // *Annales Geophysicae*. - 1996. - 14, N1. - P. C68.
20. **Стародуб Ю.П.** Исследование влияния характеристик геологического разреза на амплитуды отраженных волн по теоретическим сейсмограммам // Материалы VI конф. молодых ученых ИППММ АН УССР. Секция мех.деформ. тв.тела. - Львов: (Деп. в ВИНТИ 13.X.1979), 1979. - 6 с.
  21. **Стародуб Ю.П.** Применение матричного метода к задаче определения параметров очагов землетрясения // Материалы VII конф. молодых ученых ИППММ АН УССР. Секция мех.деформ.тв.тела. - Львов: (Деп. в ВИНТИ 26.III.1981), 1981. - 8 с.
  22. **Стародуб Ю.П.** Исследование прогнозных показателей залежей углеводородов на основе анализа теоретических сейсмограмм // Препринт ИППММ АН УССР. - 1987. - №4. - 38 с.
  23. **Стародуб Ю.П.** Математичне моделювання динамічних задач сейсміки для вивчення будови земної кори. Пряма задача. Т.1. - Львів: Наукова бібліотека ім.В.Стефаника НАН України, 1996. - 172 с.
  24. **Стародуб Ю.П.** Математичне моделювання динамічних задач сейсміки для вивчення будови земної кори. Обернена задача. Т.2. - Львів: Наукова бібліотека ім.В.Стефаника НАН України, 1996. - 106 с.
  25. **Починайко Р.С., Стародуб Ю.П., Худобяк О.Б.** Методика оценки коллекторских параметров отложений по данным сейсморазведки и решения прямой-обратной задач сейсмики. - Львов: (Деп. в ВИНТИ 07.01.1986 № 152-B86). - 1986. - 27 с.
  26. **Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б., Гнып А.Р.** Комплексирование МКЭ и матричного метода динамической теории распространения сейсмических волн в задаче уточнения строения среды под сейсмическими станциями // Матер. 12 конф. молод. ученых ИППММ АН УССР (21-23 октября 1987). - Львов: (Деп. в ВИНТИ №6308-B88), 1988. - 3 с.
  27. **Стародуб Ю.П., Вербицкий Т.З., Брыч Т.Б., Трусов Л.Л., Мин-**

- ченков Н.Н. Опробование методики решения прямой динамической задачи сейсморозведки на Покачевском и Родниковом месторождениях Западной Сибири // Препринт ИППММ АН УССР. - 1988. - №15-88. - 24 с.
28. *Стародуб Ю.П., Гнип А.Р.* Метод визначення будови земної кори під сейсмостанціями Східних Карпат шляхом обертання сейсмограм Р-хвиль // Препринт ИППММ АН України. - 1993. - №17-93. - С. 41-44.
29. *Стародуб Ю.П., Брич Т.Б.* Дослідження глибинної будови та сейсмоактивних розломів земної кори на основі математичного моделювання // Препринт КВ ІГФ НАНУ. - 1995. - №2. - 38 с.
30. *Starodub G., Gnip A.* P - waveform inversion results for the East Carpathian region // European Seismological Commission. Abstracts. XXV General Assembly. - Reykjavik, Iceland: University of Iceland. - 1996. - P. SC-D1.

Автор висловлює глибоку подяку за постійну підтримку і наукову допомогу керівнику КВ ІГФ НАН України, професору, доктору геол.-мін. наук Я.С.Сапужаку. Щиро вдячний за критичне прочитання роботи та наукові поради завідуючому відділом сейсмічності Карпатського регіону ІГФ НАН України к.ф.-м.н. О.В.Кендзері і директору Державного МП "Геофізичне моделювання", к.ф.-м.н., ст.н.с. КВ ІГФ НАН України Р.С.Починайку. Глибоку подяку за цінні поради і зауваження висловлюю моєму першому науковому керівнику, завідуючому відділом методів сейсмотектонічних досліджень КВ ІГФ НАНУ, к.г.-м.н. Т.З.Вербицькому. Сердечно вдячний колишнім моїм аспірантам к.т.н. Т.Б.Бричу і к.ф.-м.н. А.Р.Гнипу, які надали всесторонню допомогу при виконанні цієї роботи.

Стародуб Ю.П. Математическое моделирование динамических задач сейсмологии для изучения строения земной коры // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 - геофизика. - Институт геофизики им.С.И.Субботина НАН Украины. - Киев: 1997.

Защищается 30 научных работ. В диссертации разработана теория матрично-конечноэлементного метода для моделирования процесса распространения сейсмических волн в неоднородных средах. Исследована устойчивость алгоритма, даны контрольные расчеты при решении статических и динамических задач теории распространения сейсмических волн. Приведены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния и волновых полей на примерах сейсмически-опасных районов Карпат и нефтегазового месторождения на Прикарпатье. Разработаны теория и алгоритм решения обратной динамической задачи сейсмологии на основе метода стохастического обращения и матричного метода решения прямой динамической задачи сейсмологии. Представлены примеры уточнения моделей сейсмических разрывов под сейсмостанциями с использованием натуральных сейсмограмм, зарегистрированных станциями "Ужгород", "Косов", "Межгорье" Карпатского региона.

Ключевые слова: математическое моделирование, земная кора, неоднородные среды, неидеальная упругость, матрично-конечноэлементный метод, устойчивость алгоритма, напряженно-деформированное состояние, распространение сейсмических волн, обратная задача сейсмологии, уточненные модели, ошибка и разрешающая способность решения.

Starodub G. P. Mathematical Modelling of Dynamical Seismic Problems for the Investigation of the Earth's Crust Structure // Doctor of Physical and Mathematical Sciences Degree Dissertation. Speciality classification code - 04.00.22 - Geophysics. - Subbotin Geophysical Institute of the Ukrainian National Academy of Sciences. - Kyiv: 1997.

30 scientific works are maintained. Theory of matrix-finite element method for seismic wave propagation modelling is worked out in the dissertation. Algorithm stability is investigated. Method control calculations for solving static and dynamic problems of seismic wave propagation theory are given. Stress-strain state and wave field modelling results on examples of seismic hazard Carpathian regions and Fore-Carpathian oil and gas deposits are quoted. Theory and algorithm of solving the inverse dynamic seismology problem based on stochastic inversion method and matrix method solution of direct dynamic seismology problem are developed. Examples of seismic cuts, "Uzhgorod", "Kosiv", "Miszhir'ja" Carpathian region models, specification under seismostations using the observed seismograms have been shown.

Key-words: mathematical modelling, Earth's crust, inhomogeneous media, nonideal elasticity, matrix-finite element method, algorithm stability, stress-strain state, seismic waves propagation, inverse seismology problem, models.

436891

АВ 37.915  
**АВ 37.915**

Підписано до друку 14.04.97. Формат паперу 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір для множ. техніки. Друк офсетний. Обл.вид.арк. 2.0.  
Тираж 150. Зам. 8/1.

---

ТзОВ "ОРПІ"  
290018 м.Львів, вул.Ясна,1.