

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

---

*На правах рукопису*

**Г Н И П**  
**Андрій Романович**

**МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ДИНАМІЧНОЇ  
ЗАДАЧІ СЕЙСМОЛОГІЇ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДО  
ВИВЧЕННЯ БУДОВИ ЗЕМНОЇ КОРИ**

**Спеціальність 01.04.12 Геофізика**

**Автореферат**  
**на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата фізико-математичних наук**

**Київ - 1996 р.**

AB 34.044

Дисертація в рукописі ЛННБ України ім.В.Стефаніка  
Робота виконана в Інституті геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України



00754287 (X)

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук  
старший науковий співробітник,  
Стародуб Юрій Петрович

Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук,  
Пилипенко Віталій Миколайович

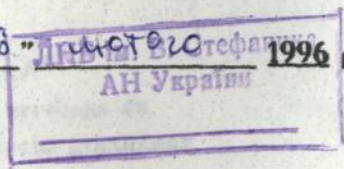
доктор геолого-мінералогічних наук,  
професор, Лизун Степан Олексійович

Провідна установа - Інститут прикладних проблем  
механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України

Захист дисертації відбудеться "19" березня 1996 р. о  
10-00 год. на засіданні спеціалізованої Вченої ради  
Д 01.95.01 в Інституті геофізики ім.С.І.Субботіна НАН  
України (м.Київ, пр.Палладіна 32).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту  
геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України (м.Київ, пр.Палладіна  
32).

Автореферат розісланий "16" лютого 1996 р.



Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.С.Гейка

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Знання про будову кори Землі є виключно важливими для вирішення багатьох питань сучасних геофізичних досліджень і потреб практичної діяльності. Сейсмічні хвилі від природних і штучних джерел, які реєструються на поверхні Землі, є головним джерелом інформації про стан і будову її надр, недоступних для прямого спостереження. Основні відомості про глибину будову земної кори в межах України отримано в результаті проведення сейсмічних досліджень з застосуванням методів глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ) і спільної глибинної точки (СПТ). Однак, складність такого об'єкта, як земна кора, і обмеженість засобів її вивчення спонукають до розширення їх спектра, формування нових комплексних підходів з залученням новітніх досягнень геофізичних і геологічних досліджень. Тому розробка нових ефективних методів розв'язання обернених динамічних задач сейсмології є важливим і актуальним завданням сучасних сейсмологічних досліджень.

Метою дисертаційної роботи є розробити методіку визначення параметрів шаруватої моделі земної кори шляхом обертання сейсмограм Р-хвиль від віддалених вогнищ землетрусів і продемонструвати можливість її застосування на прикладі вивчення будови земної кори під сейсмічними станціями Карпатського регіону.

Наукова новизна роботи полягає в таких основних положеннях, які виносяться на захист.

1. Розроблено методіку розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології за даними сейсмограм Р-хвиль від віддалених вогнищ землетрусів з метою визначення статистично оптимальних неідеально-пружних горизонтально-шаруватих моделей земної кори під сейсмічними станціями.

2. Запропоновано новий підхід до виключення впливу джерела землетрусу невідомої форми при підборі оптимальних параметрів моделі.
3. Побудовано алгоритм, що дозволяє визначати модель земної кори, яка одночасно мінімізує відхилення синтетичної сейсмограми від кожної з серії спостережених сейсмограм.
4. Визначено статистично оптимальні горизонтально-шаруваті моделі земної кори під сейсмічними станціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" і їх статистичні характеристики (похибку, роадільну здатність).

Достовірність результатів. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням теоретично обгрунтованого підходу до врахування проблеми некоректності обернених задач сейсмології; застосуванням визнаних методів моделювання сейсмічних хвильових полів та чітким дотриманням меж їх придатності; застосуванням статистичного підходу до побудови алгоритму обертання сейсмограм, що дозволяє отримати добре обгрутовані моделі земної кори; обчисленням кількісних характеристик моделей - роадільної здатності та похибки.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленої методики, програмного забезпечення та одержаних результатів для визначення статистично оптимальних моделей земної кори під сейсмічними станціями, обладнаними відповідною реєструючою апаратурою. Ці моделі можуть бути використані при локалізації вогнищ землетрусів, вивченні їх механізмів, оцінці сейсмічної небезпеки, уточненні тектонічної картини.

Реалізація роботи. Ефективність розробленої методики розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології за даними сейсмограм Р-хвиль перевірялась на прикладах визначення

статистично оптимальних горизонтально-шаруватих неідеально-пружних моделей земної кори під сейсмічними станціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" мережі Карпатської дослідно-методичної сейсмологічної партії.

Апробація роботи. Результати, отримані на різних етапах виконання дисертаційної роботи, доповідалися на 12 конференції молодих вчених ІППММ АН УРСР (Львів, 21-23 жовтня 1987 р.), на семінарі комісії Академії наук соціалістичних країн в планетарній геофізики (КАПГ) "Розрахункові та статистичні методи вивчення сейсмічних коливань" (Москва, вересень 1987 р.), на IV Міжнародному симпозіумі з аналізу сейсмічності і сейсмічної небезпеки (замок Бехіне, Чехословаччина, 4-9 вересня 1989 р.), XXIII Генеральній Асамблеї Європейської сейсмологічної комісії (ЄСК) (Прага, 7-12 вересня 1992 р.), конференції НТШ "Геолого-геофізичні проблеми сейсмічного районування території західних областей України" (Львів, 11-12 листопада 1992 р.), на XXIV Генеральній асамблеї ЄСК (Афіни, 19-24 вересня 1994 р.).

В цілому робота обговорювалась на науковому семінарі Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України.

Розроблені методика і програмне забезпечення були використані при проведенні досліджень за темами Державного комітету України з питань науки і технологій 05.41.02/013-92 "Вивчення внутрішньої будови земної кори в сейсмонебезпечних районах Карпатського регіону на основі врахування горизонтальної неоднорідності середовища" програми "Ресурсозберігаючі технології хімічної та біологічної промисловості"; 05.53.01/139-93 "Уточнення будови сейсмогеологічного розрізу для вирішення задачі прямих пошуків родовищ вуглеводів на великих глибинах" програми "Ресурси енергетичної сировини, рудних і нерудних корисних копалин".

Публікації. Результати виконаних досліджень опубліковані в 12 роботах.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, підсумків і списку літератури з 108 найменувань. Робота містить 117 сторінок основного тексту, в тому числі 18 рисунків, 11 таблиць.

## ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовується актуальність завдання постановки і розв'язування обернених задач в сучасних сейсмологічних і геофізичних дослідженнях, формулюється мета дисертаційної роботи, перераховуються завдання, які необхідно вирішити при її виконанні.

У першому розділі проводиться стислий аналіз комплексу проблем, які виникають при постановці і розв'язуванні обернених задач сейсмології. Різноманітні підходи до їх вирішення ілюструються на прикладах сучасних робіт у цій галузі. На основі проведеного аналізу обґрунтовується доцільність виконання дослідження з виснесеної в заголовок дисертаційної роботи теми, використовуваних при постановці та розв'язуванні оберненої задачі підходів. Використання у якості вхідних даних сейсмограм Р-хвиль від віддалених вогнищ землетрусів суттєво полегшує виділення корисного сигналу, оскільки значне запізнення на великих епіцентральных відстанях вступу S-хвилі порівняно з вступом Р-хвилі дозволяє виділити відрізок запису, що відповідає хвильовому полю, збудженому в земній корі тільки Р-хвилею. Тривалість цієї ділянки є достатньою для того, щоб на ній з'явилися відбиття від усіх основних сейсмічних границь в товщі кори. Фронт падаючої Р-хвилі можна вважати плоским, що позбавляє необхідності інтегрування за

хвильовими числами при обчисленні синтетичних сейсмограм в частотній області. І, для такого типу даних можна в коректний спосіб відділити вплив джерела землетрусу невідомої форми від впливу кори, модель якої потрібно визначити.

Використання матричного методу Томсона-Хаскелла, який дає широкі можливості докладного моделювання хвильових полів у горизонтально-шаруватих середовищах і аналізу типів хвиль і кратності відбиття, дозволяє в оцідний з обчислювальної точки зору спосіб обчислити синтетичні сейсмограми і їх точні похідні по параметрах моделі.

Ітераційна процедура нелінійної оптимізації будується з застосуванням оператора стохастичного обертання, з допомогою якого отримується розв'язок оберненої лінеаризованої задачі. Це дозволяє у коректний спосіб врахувати проблему існування та єдиності розв'язку, статистичну природу вхідних даних, оцінити похибку і роздільну здатність розв'язку. Крім того, використовуючи метод стохастичного обертання, можна домогтися компромісу між швидкістю зміни модельних параметрів і досягненням збіжності ітераційної процедури, роздільною здатністю і похибкою результуючої моделі, врахувати фізичні обмеження на діапазон зміни параметрів моделі.

Другий розділ присвячено викладу теоретичних основ розв'язання прямої задачі з використанням матричного методу моделювання хвильових полів в горизонтально-шаруватих середовищах і оберненої задачі з застосуванням методу стохастичного обертання.

За допомогою матричного методу обчислюються синтетичні сейсмограми для заданої горизонтально-шаруватої моделі земної кори і джерела коливань у виді плоскої Р-хвилі, яка поширюється з глибини. Матричне співвідношення між потенціалами на нижній границі пачки шарів ( $z_{N-1}$ ) і напруженнями-зміщеннями на вільній поверхні ( $z_0 = 0$ ) має вид

$$\begin{aligned}\Phi_N(z_{N-1}) &= T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots T_1 E_1 T_1^{-1} S_1(z_0), \\ &= R S_1(z_0),\end{aligned}\quad (1)$$

де матриця  $T_m$  ( $m = 1, \dots, N$ ) встановлює співвідношення між векторами потенціалів  $\Phi_m = [\varphi_m^+, \psi_m^+, \varphi_m^-, \psi_m^-]^T$  і переміщень-напружень  $S_m = [u_x^{(m)}, u_z^{(m)}, \sigma_{xz}^{(m)}, \sigma_{zz}^{(m)}]^T$  в  $m$ -ому шарі:  $S_m(z) = T_m \Phi_m(z)$ ; матриця  $E_m$  зв'язує потенціали на сусідніх границях розділу між шарами:  $\Phi_m(z_m) = E_m \Phi_m(z_{m-1})$ . З врахуванням граничних умов (відсутності напружень на вільній поверхні -  $\sigma_{xz}^{(1)}(0) = \sigma_{zz}^{(1)}(0) \equiv 0$  і рівності нулю у нижньому півпросторі векторного потенціалу  $S$ -хвилі, що поширюється в напрямку до вільної границі, для заданого джерела -  $\psi_N^+ \equiv 0$ ) співвідношення (1) переписується у виді

$$\begin{bmatrix} \varphi_N^+ \\ 0 \\ \varphi_N^- \\ \psi_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x(0) \\ u_z(0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.\quad (2)$$

З другого рівняння матричної рівності (2) отримується відоме співвідношення між спектрами горизонтальної і вертикальної складових переміщень на вільній поверхні

$$u_x(0) = -\frac{r_{22}}{r_{21}} u_z(0).\quad (3)$$

Поширеним підходом до виключення впливу невідомого джерела при підборі оптимальних параметрів моделі є обчислення частки  $r_{22}/r_{21}$  для заданої моделі і порівняння її з часткою вертикальної і горизонтальної компонент спектра спостереженої сейсмограми  $u_x'/u_z'$ . З метою уникнення спотворення частки компонент спектра спостереженої сейсмограми внаслідок того, що в знаменнику можуть опинитись випадкові малі числа, з нашої роботи пропонується альтернативний підхід до розв'язання проблеми невідомого джерела. Горизонтальна компонента синтетичної сейсмограми  $u'$  обчислюється шляхом підстановки в праву частину (3) вертикальної компоненти

зареєстрованої сейсмограми  $u_2'$

$$u_1'(0) = -\frac{r_{22}}{r_{21}} u_2'(0) \quad (4)$$

і порівнюється з горизонтальною компонентою спостереженої сейсмограми  $u_2'$ .

З метою врахування неідеальної пружності земної кори в модель середовища вводиться механізм загасання коливань, який базується на підходах Гуревича Г.І. (1974) і Калініна В.В. та ін. (1967). Феноменологічний підхід, розроблений Калініним В.В. та ін., полягає в знаходженні закону дисперсії фазової швидкості плоскої хвилі, який би задовольняв спостережувану форму її фронту, як функції часу, на певній віддалі від джерела коливань в неідеально пружному ізотропному середовищі. З запропонованого ними закону дисперсії отримується наступне співвідношення між фазовими швидкостями на двох різних частотах

$$\frac{v(\omega_1)}{v(\omega_2)} = 1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right), \quad (5)$$

де  $Q$  - добротність середовища. Теорія Гуревича Г.І. побудована на фізичних закономірностях стискуваності і деформованості середовища. При малих дотичних напруженнях повна зсувна деформація  $e_{xz}$  вважається сумою пружної (Гуківської) деформації  $e_{Гxz}$  і пружнорелаксаційної деформації  $e_{Рxz}$ :  $e_{xz} = e_{Рxz} + e_{Гxz}$ . Причому  $e_{Рxz}$  властивий обмежений неперервний спектр часів релаксації  $\tau$  (з ядром  $1/\tau$ )

$$e_{Рxz}(t) = \int_{T_p}^{T_M} \varepsilon_{xz}(t, \tau) \frac{d\tau}{\tau}$$

В реальних середовищах співвідношення для верхньої  $T_M$  та нижньої  $T_p$  меж часу релаксації має вигляд  $T_p \ll T_M$ . Величина  $\varepsilon_{xz}(t, \tau)$  задовольняє рівняння стану типу Кельвіна-Фойгта виду

$$\sigma_{xx}(t) = \mu e_{\Gamma_{xx}}(t) = \mu^* \varepsilon_{xx}(t, \tau) + (\mu^* + \mu) \tau \frac{\partial \varepsilon_{xx}(t, \tau)}{\partial t},$$

де  $\mu$  - Гуківський модуль зсуву, а  $\mu^*$  - пружнорелаксаційний модуль. Аналогічні формули справедливі для зсувних деформацій  $e_{xx}$ ,  $e_{yy}$ . Подібним чином, повна дилатація  $\Theta(t) = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}$  представляється як сума пружної та пружнорелаксаційної дилатації. В остаточному підсумку, при достатньо малому загасанні на основі застосування підходу Гуревича - Г.І. (1974) отримується співвідношення між фазовими швидкостями на різних частотах аналогічне (5). Задавши значення фазової швидкості на деякій опорній частоті, отримуємо її значення на усіх інших частотах

$$v_{P,S}(\omega) = v_{P,S}(\omega_0) \left( 1 + \frac{1}{\pi Q_{P,S}} \ln \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right).$$

Покладаючи шари нашої моделі земної кори неідеально пружними, а нижній півпростір - ідеально пружним, уникаємо врахування векторної природи загасання. У цьому випадку загасання відбувається лише у вертикальному напрямку і горизонтальна проекція хвильового числа залишається дійсною. Швидкості P- і S-хвиль  $v_P$ ,  $v_S$ , що входять у добре відомі вирази для коефіцієнтів матриць  $T_m$ ,  $E_m$  з (1) задаються наступним чином

$$\frac{1}{v_{P,S}(\omega)} = \frac{1}{v_{P,S}(\omega_0)} \left( 1 + i \frac{1}{2Q_{P,S}} \right).$$

В розділі 2.2 наводяться основи теорії лінеаризованих обернених задач сейсмології. При побудові оператора відображення з простору спостережених даних у простір моделей (лінеаризованого оберненого оператора) беруться до уваги наступні положення: і) наявність шуму (стороннього сигналу) в спостережених даних або неадекватність моделі реальній будові середовища приводять до того, що жодна з моделей не задовольнить спостережені дані (точний

обернений оператор не існує), або існує безліч моделей, які в однаковій мірі задовольняють спостережені дані; ii) статистичні властивості спостережених даних і моделі визначають критерії, які необхідно мінімізувати в просторі спостережених даних і в просторі моделей при відшукуванні наближеного розв'язку; iii) необхідно вказати спосіб оцінки похибки і роздільної здатності моделі, яка є розв'язком оберненої задачі. Технічними проблемами, які зв'язані з вказаними вище і які також необхідно враховувати при побудові оберненого оператора, є питання існування збіжного розв'язку і швидкості збіжності ітераційної процедури нелінійної оптимізації. На основі аналізу структури просторів спостережених даних і моделей враховується вплив перахових проблемних моментів при побудові (за Акі К. і Річардсом П., 1983) оператора узагальненого обертання і визначення похибки і роздільної здатності моделі. Використовуваний в нашій методиці обернений стохастичний оператор  $L$  будується в припущенні, що спостережені дані складаються з корисного сигналу і шуму

$$d = Gm + n, \quad (6)$$

де вектор поправок  $m$  до моделі  $M$ , як і шум  $n$  в спостережених даних, є випадковими процесами з нульовими середніми значеннями і коваріаційними матрицями  $R_{mm}$  і  $R_{nn}$ ,  $G$  - лінеаризований оператор прямого відображення з простору моделей у простір спостережених даних,  $d$  - вектор відхилення між спостереженими даними і обчисленими на основі моделі  $M$ . Стохастичний обернений оператор  $L$  мінімізує відмінність між  $Ld$  і  $m$  і має вид (Акі К., 1983)

$$L = R_{nn} \tilde{G} (GR_{mm} \tilde{G} + R_{nn})^{-1},$$

де хвилька означає комплексне спряження і транспонування. Для обчислення  $L$  необхідно обернути матрицю розмірністю рівною розмірності вектора спостережених даних. Переважно ця розмірність є досить великою, однак, при заданні відповідних елементів матриці  $R_{nn}$ , матриця  $GR_{mm} \tilde{G} + R_{nn}$ , яку необхідно обернути набуває

регуляризованого виду і проблем з її оберненням, як правило, не буває. Підбором оптимальних значень елементів матриці  $R_{mm}$  можна домогтися компромісу між роздільною здатністю і похибкою результуючої моделі, а також накласти обмеження на діапазон зміни модельних параметрів з метою запобігання їх виходу за фізично припустимі межі. Впливаючи на характер і величину зміни модельних параметрів, матриця  $R_{mm}$  визначає швидкість збіжності ітераційного процесу.

У третьому розділі описується методика визначення моделі земної кори під сейсмічною станцією за даними сейсмограм телесеїсмічних хвиль. розглядаються особливості її програмної реалізації, наводяться результати тестування на модельних прикладах, формулюється процедура підбору і обробки вхідних даних. З метою підвищення статистичної достовірності модельних параметрів, пропонується мінімізувати норму

$$A = \sum_{l=1}^L \left| U^{(l)} - F^{(l)}(M) \right|^2 = \sum_{l=1}^L \sum_{I=1}^n (U_I^{(l)} - F_I^{(l)}(M))^2, \quad (7)$$

де  $U^{(l)}$  - спектр  $l$ -ої спостереженої сейсмограми,  $F^{(l)}$  - обчислений за (4) спектр синтетичної сейсмограми для джерела  $l$ -ої спостереженої сейсмограми.

Співвідношення (7) лінеаризується в околі деякої початкової моделі  $M^*$ , тоді мінімізації (7) відповідатиме мінімізація

$$A = \sum_{l=1}^L \left| d^{(l)} - G^{(l)} m \right|^2, \quad (8)$$

$$\text{де } G_{ij}^{(l)} = \left[ \frac{\partial F_i^{(l)}}{\partial M_j} \right]_{M=M^{(*)}}, \quad d^{(l)} = U^{(l)} - F^{(l)}(M^*), \quad m = M - M^*.$$

Абсолютного мінімуму (8) по  $m$  можна досягти шляхом розв'язання рівняння

$$Gm = d, \text{ де } G = \begin{bmatrix} G^{(0)} \\ \vdots \\ G^{(L)} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} d^{(0)} \\ \vdots \\ d^{(L)} \end{bmatrix}.$$

Таким чином, отримуються введення даної задачі до виду (6). Розв'язок задачі відшукується за методом стохастичного обертання. Перевагою розробленого алгоритму є те, що похідні матриці  $R$  по параметрах моделі, необхідні для формування матриці  $G$ , обчислюються за точними виразами

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial v_{p,s_m}} = & T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots E_{m+1} \frac{\partial (T_{m+1}^{-1} T_m)}{\partial v_{p,s_m}} E_m \dots T_1 E_1 T_1^{-1} + \\ & + T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots T_m \frac{\partial E_m}{\partial v_{p,s_m}} T_m^{-1} \dots T_1 E_1 T_1^{-1} + \\ & + T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} \dots E_m \frac{\partial (T_m^{-1} T_{m-1})}{\partial v_{p,s_m}} E_{m-1} \dots T_1 E_1 T_1^{-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

де похідні по  $v_{p,s_m}$  в правій частині рівності (9) отримані аналітично.

Для густин шарів будувалась квадратична апроксимація по швидкостях  $v_p$ . Похідні по товщинах шарів і добротностях  $Q_{p,s}$  обчислюються подібно до похідних по швидкостях. Добутки матриць виду  $T_{m+1}^{-1} T_m$  у випадку ідеально-пружної моделі не залежать від частоти, що дозволяє обчислити їх лише один раз при обчисленні всіх компонент вектора спектра синтетичної сейсмограми. Використання цього ф. ту, а також запам'ятовування проміжних матричних добуток дозволили створити обчислювальний алгоритм, який дає значну економію оперативної пам'яті і часу.

Дослідження розробленого алгоритму розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології на модельних прикладах відбувалось у кілька етапів. На першому етапі перевірялись правильність обчислення синтетичних сейсмограм та їх похідних по параметрах моделі, а також ефективність ітераційної процедури нелінійної

оптимізації. У тесті для порівняно простої моделі (два шари на півпросторі) обчислювалась синтетична сейсмограма Р-хвилі, що поширюється з глибини нижнього півпростору. Потенціал позовжних коливань  $\Phi_N^*$  в півпросторі задавався таким чином, щоб переміщення в Р-хвилі мали форму одиночного імпульса. Для таких моделі і джерела коливань легко впевнитись в правильності обчислення синтетичної сейсмограми шляхом перевірки часів приходу і амплітуд заломлених і відбитих від границь шарів хвиль. При випробуванні ефективності процедури нелінійної оптимізації у якості спостереженої використовувалась сейсмограма для моделі, яка вважалась "істинною". Параметри "істинної" моделі відхилялись на певну величину і змінена модель бралась за початкову при підборі за допомогою розробленої оптимізаційної процедури параметрів моделі, яка б мінімізувала відхилення обчисленої для неї сейсмограми від спостереженої. При цьому досліджувалась збіжність моделі з відхиленими параметрами до "істинної". Для перевірки правильності обчислення похідних синтетичної сейсмограми по параметрах моделі задавалися початкові моделі з лише одним відхиленням параметром. Проводились тестування для товщини одного з шарів, швидкості позовжних хвиль, швидкості поперечних хвиль, добротності для позовжних коливань і добротності для поперечних коливань. Збіжність до "істинної" моделі наступала навіть при значному відхиленні параметра. Кількість ітерацій для отримання збіжного результату майже не залежала від величини відхилення.

На другому етапі досліджувалась збіжність ітераційного процесу в залежності від кількості параметрів, які необхідно оптимізувати, і величини відхилення початкової моделі від "істинної". Для моделі з п'ятьма шарами на півпросторі ітераційна процедура мінімізації збігалась за 44 кроки при відносному відхиленні параметрів початкової моделі від "істинної"  $\sim 18\%$ . Усереднене відхилення результуючої моделі від "істинної" складало  $\sim 1.2\%$ . Суттєвий вплив на процес і результат обертання справляло задання матриці  $R_{opt}$ .

елементи якої є регуляризуючим параметром методу стохастичного обертання. Значення діагональних елементів матриці (решта поклались рівними нулю) підбирались в інтерактивному режимі. Збільшення елементів  $R_{mm}$  приводило до розширення діапазону зміни відповідних параметрів моделі. При цьому мінімум досягався досить швидко, якщо ітераційний процес взагалі збігався. Однак, параметри результуючої моделі могли суттєво відрізнятись від параметрів "істинної" моделі, або й виходити за фізично припустимі межі. Зменшення елементів  $R_{mm}$  сповільнювало збіжність ітераційного процесу, збільшуючи при цьому імовірність досягнення збіжного результату. Варто підкреслити, що матриця  $R_{mm}$  входить у вирази для матриць роздільної здатності і коваріації, і визначає компроміс між роздільною здатністю і похибкою результуючої моделі, що необхідно мати на увазі при визначенні моделі земної кори за реальними даними.

В наступній серії модельних експериментів проводилось дослідження стійкості і збіжності розробленого алгоритму при наявності шумів у вхідних даних. З цією метою сейсмограма для "істинної" моделі згорталась у часовій області в шумовою ділянкою реального сейсмічного запису. Матриця  $R_{dd}$  у цьому випадку була відмінною від нульової, і задавалась відповідною до рівня шуму, який був некорельованим і характеризувався єдиним значенням дисперсії. У решті деталей експеримент збігався в проведенні на другому етапі. Збіжний до "істинної" моделі результат вдалося отримати за 53 кроки при відносному відхиленні параметрів початкової моделі від "істинної"  $\sim 14\%$  і співвідношенні потужностей шуму і сигналу  $\sim 0,17$ . Усереднене відхилення результуючої моделі від "істинної" складало  $\sim 1,8\%$ .

Розробка методика розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології за даними сейсмограм телесеїсмічних Р-хвиль доповнена алгоритмом підбору і обробки сейсмограм в частотній області.

У четвертому розділі наводяться результати визначення оптимальних моделей земної кори під сейсмічними станціями Карпатської дослідно-методичної сейсмологічної партії Інституту геофізики НАН України, з використанням розробленої методики вирішення оберненої динамічної задачі сейсмології за даними сейсмограм телесеїсмічних Р-хвиль. Режимні сейсмічні станції КДМСП обладнані трьохкомпонентними аналоговими сейсмографами з низькочастотними (0-5 Гц) датчиками типу СКД і постачають сейсмічні записи, які можуть бути використані, як вхідні дані для розробленої методики. Відсутність цифрової реєструючої апаратури суттєво утруднює використання обчислювальної техніки для обробки записів. З метою створення банку даних відібрані аналогові записи сейсмограм оцифровувались ручним способом. Крок оцифрування становив 0.25 с. Верхня межа частотного спектра таких оцифрованих сейсмограм становить 2 Гц, чого цілком достатньо для визначення моделей з товщинами шарів, що становлять від кількох до кільканадцяти кілометрів. Труднощі з оцифруванням і обмежені можливості внесення у банк даних сейсмологічної інформації великої кількості записів не дозволили провести моделювання земної кори під усіма станціями мережі. З цією метою були обрані сейсмічні станції "Ужгород", "Міжгір'я", "Косів", які постачають сейсмічні записи задовільної якості і відрізняються за геологічними умовами та характером будови земної кори під ними.

Ступінь повноти і комплексності, з якими враховуються апріорні відомості про будову кори в досліджуваному регіоні при побудові початкових моделей, може вирішальним чином вплинути на результат розв'язання оберненої задачі. З метою обгрупування початкових моделей під сейсмічними станціями "Ужгород", "Косів", "Міжгір'я" наводиться загальна характеристика будови земної кори в Карпатському регіоні за літературними даними.

Початкова модель земної кори під сейсмостанцією "Ужгород" складалась з чотирьох шарів на півпросторі. Визначались товщини

шарів, швидкості поширення  $P$ - і  $S$ -хвиль в шарах, добротності для  $P$ - і  $S$ -хвиль. У нижньому півпросторі, який вважався ідеально пружним, визначались швидкості поширення  $P$ - і  $S$ -хвиль. За відді дані була використана група з 8 сейсмограм з епіцентрами в районі Японських островів. Результуюча модель була отримана після 53 ітерацій. Сумарне квадратичне відхилення спектрів синтетичних сейсмограм від спостережених для результуючої моделі зменшилось у 3,2 раза порівняно з відхиленням для початкової моделі. Обчислено матриці роздільної адатності і автокореляції результуючої моделі, похибки визначених параметрів моделі. Найбільш характерною рисою результуючої моделі є інверсія швидкості  $S$ -хвиль в третьому шарі між глибинами 7,2 км і 21,0 км. Вона зменшилась з 3,6 км/сек (у початковій моделі) до 3,36 км/сек і стала меншою від швидкості у верхньому шарі, рівної 3,41 км/сек. Швидкість  $P$ -хвиль при цьому навіть трохи збільшилась - з 6,1 км/сек (у початковій моделі) до 6,3 км/сек.

У якості вхідних даних при визначенні оптимальних моделей під сейсмостанціями "Косів" і "Міжгір'я" були використані групи з 8 і 7 сейсмограм з епіцентрами в районі Японського архіпелагу. Для отримання результуючої моделі земної кори під сейсмостанцією "Косів" було потрібно 43 ітерації, "Міжгір'я" - 39 ітерацій. Квадратичне відхилення спектрів синтетичних сейсмограм від спостережених для результуючої моделі "Косів" зменшилось у 2,9 рази порівняно з відхиленням для початкової моделі, "Міжгір'я" - у 2,7 рази. Обчислено похибки параметрів результуючих моделей. Основною рисою, яка визначає відмінність результуючої моделі "Косів" від початкової є значне збільшення сумарної товщини кори (з 43 км до 51 км) за рахунок потовщення трьох поверхневих шарів. Відзначається також різке збільшення контрастності по швидкостях  $S$ -хвиль границі переходу мантія-кора (в початковій моделі швидкість в мантії - 4,8 км/сек, в нижньому шарі кори - 4,1 км/сек, в результуючій моделі швидкість в мантії - 5,1 км/сек, в корі - 3,9

км/сек). Результуюча модель земної кори під сеймостанцією "Міжгір'я" характеризується менш значними змінами порівняно з початковою.

У підсумках сформульовано основні результати роботи і наведено основні висновки.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику (алгоритми) розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології визначення статистично оптимальної неідеально-пружної горизонтально-шаруватої моделі земної кори під сейсмічною станцією за даними сейсмограм Р-хвиль. Обґрунтовано доцільність використання матричного методу Томсона-Хаскела, як засобу моделювання хвильових полів в середовищах типу кори Землі (пряма задача), і розв'язку методом стохастичного обернення для побудови ітераційної процедури відшукування моделі, що мінімізує відхилення синтетичної сейсмограми від спостережених (обернена задача).

2. Запропоновано новий підхід до відокремлення впливу невідомих джерела коливань і шляху їх поширення від джерела до нижньої границі кори під сеймостанцією від інформації в сейсмічних записах, що стосується лише будови кори. На цій основі сформульовано алгоритм визначення статистично оптимальної моделі земної кори, яка одночасно мінімізує відхилення синтетичної сейсмограми від кожної з серії спостережених сейсмограм.

3. Розроблений алгоритм розв'язання оберненої динамічної задачі сейсмології реалізовано у виді пакету комп'ютерних програм, запропоновано оптимальні за швидкістю програми обчислення синтетичних сейсмограм та їх точних похідних по параметрах моделі. При проведенні тестування алгоритму на модельних прикладах доведено правильність обчислення синтетичних сейсмограм і їх похідних по параметрах моделі, досліджено збіжність у залежності від

величини відхилення параметрів моделі, їх кількості, рівня шумів у вхідних даних.

4. В методику розв'язання оберненої задачі за даними сейсмограм телесеїсмічних Р-хвиль включено процедуру підбору і обробки вхідних даних.

5. Розроблені методика і пакет програм були застосовані до реальних сейсмічних даних з метою дослідження особливостей будови земної кори під сейсмічними станціями Карпатського регіону. Створено комп'ютерний банк сейсмологічної інформації, у який внесено сейсмограми Р-хвиль, зареєстровані сейсмічними станціями "Ужгород", "Міжгір'я", "Косів". Визначено статистично оптимальні результуючі моделі земної кори під сейсмічними станціями, які мінімізують відхилення синтетичних сейсмограм від спостережених. Обчислено похибки і роздільну адатність моделей, проаналізовано їх особливості порівняно з початковими моделями.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНІ В РОБОТАХ :

1. Гньп А.Р. (1987). Об одном алгоритме решения обратной задачи сейсмологии. - Матернали 12 конф. молодых ученых ИППММ АН УССР, Львов, 21-23 октября, 1987 (Деп. в ВИНТИ 08.08.1988, №6308-В88).

2. Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б., Гньп А.Р. (1987). Комплексование МКЭ и матричного метода динамической теории распространения сейсмических волн в задаче уточнения строения среды под сейсмическими станциями. - Материали 12 конф. молодых ученых ИППММ АН УССР, Львов, 21-23 октября, 1987 (Деп. в ВИНТИ 08.08.1988, №6308-В88).

3. Стародуб Ю.П., Гньп А.Р. (1989). Уточнение строения среды в районах расположения сеймостанций Карпатского региона

на математической модели поля объемных сейсмических волн. - Сейсмологические исследования (результаты исследований по международным геофизическим проектам), 1989, №11, с.25-33.

4. Стародуб Ю.П., Гнып А.Р. (1992). Методика определения строения среды под сеймостанциями на основе решения двумерной обратной задачи сейсмологии для объемных волн. В кн.: Геодинамика и сеймопрогностические исследования на Украине, К.: Наук. Думка, 1992, с.80-86.

5. Стародуб Ю.П., Стародуб Г.Р., Гнып А.Р., Кендзеря А.В., Капитанова С.А. (1992). Выбор модели строения земной коры под сеймостанцией "Ужгород". В кн.: Геодинамика и сеймопрогностические исследования на Украине, К.: Наук. Думка, 1992, с.162-170.

6. Стародуб Ю.П., Гнып А.Р. (1993). Метод визначення будови земної кори під сеймостанціями Східних Карпат шляхом обертання сейсмограм Р-хвиль. В кн.: Геолого-геофізичні проблеми сейсмічного районування території західних областей України, Препринт №17-93, Львів, 1993, с.41-44.

7. Starodub G., Gnyp A. (1989). Automatical correction of the medium model structure under the WestUkraine seismostations, *Abstr. 4th Intl. Analysis of Seismicity and Seismic Risk Symp.*, Prague, 43.

8. Starodub G., Gnyp A. (1989). Automatical correction of the medium model structure under the WestUkraine seismostations, *Proc. 4th Intl. Analysis of Seismicity and Seismic Risk Symp.*, Prague, 1, 231-236.

9. Starodub G., Gnyp A. (1989). The medium structure specification under the "Uszhorod" seismostation based on the solution of the inverse dynamic problem of seismology, *Bulgarian Geophys. J.* 14, 1989, No. 4, 41-46.

10. Starodub G., Gnyp A. (1992). An inversion method to determine the crustal structure at the East Carpathian seismic network

stations using P-wave seismograms, *Abstr. 23rd Europ. Seism. Commission Gen. Assembly, Prague.*

11. Starodub G., Gnyп A. (1992). An inversion method to determine the crustal structure at the East Carpathian seismic network stations using P-wave seismograms, *Proc. 23rd Europ. Seism. Commission Gen. Assembly, Prague, 1, 151-154.*

12. Gnyп A., Starodub G. (1994). Inversion of the far-field P-wave seismograms registered at the Carpathian seismostations to the anelastic crust structure of the region, *Abstr. 24th Europ. Seism. Commission Gen. Assembly, Athens, Greece, 39.*

Гньп А.Р.

Метод решения обратной динамической задачи сейсмологии и его применение к изучению строения земной коры.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.12 - геофизика.

Институт геофизики им.С.И.Субботина Национальной академии наук Украины, Киев, 1996.

### АННОТАЦИЯ.

Разработаны методика и алгоритм решения обратной динамической задачи сейсмологии по данным сейсмограмм P-волн от удаленных очагов землетрясений с целью определения статистически оптимальных неидеально-упругих горизонтально-слоистых моделей земной коры под сейсмическими станциями. Методика и алгоритм реализованы в виде оптимальных по быстродействию и экономии оперативной памяти компьютерных программ. Эффективность применения методики продемонстрирована на примере изучения строения земной коры под сейсмическими станциями Карпатского региона.

A.R. Gnyv

A Method for Solving the Inverse Dynamic Problem of Seismology and Its Application to Study of the Earth's Crust Structure.

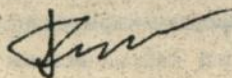
Candidate of Physical and Mathematical Sciences Degree Dissertation.  
Speciality classification code - 01.04.12-Geophysics.

Subbotin Geophysical Institute of the Ukrainian National Academy of Sciences, Kyiv, 1996.

### ABSTRACT

Method and algorithm to solve the inverse dynamic problem of seismology using far-field  $P$ -wave seismogram data are developed with the aim to determine statistically optimal anelastic horizontally-layered models of the Earth's crust under seismostations. The method and algorithm are implemented by constructing fast and computer memory saving software. The efficiency of the method have been shown by application to study of the Earth's crust structure under seismostations of the Carpathian region.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** обернена задача сейсмології, некоректна задача, земна кора, шаруватий півпростір, поширення хвиль, неідеальна пружність, лінеаризована задача, нелінійна оптимізація, стохастичне обертання, похибка розв'язку, роздільна здатність розв'язку.



Ротапринт ЛвЦНТЕІ Замовлення 41 Тираж 100

A Method for Solving the ... of ... and ...

... of ... and ...

... of the ...

ABSTRACT

Method and algorithm to solve the ...

... of ...

[Signature]