

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СИНТЕТИЧНИХ СЕЙСМОГРАМ У ВЕРТИКАЛЬНО-НЕОДНОРІДНОМУ ПІВПРОСТОРІ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ ДО ІНВЕРСІЇ ТЕНЗОРА СЕЙСМІЧНОГО МОМЕНТУ

Резюме. Розроблено методику (алгоритм і програму) для моделювання трикомпонентних сейсмограм від довільного дипольного ефективно-точкового джерела у вертикально-неоднорідному півпросторі з поглинанням. Алгоритм і програму випробувано на прикладі реального землетрусу, зареєстрованого на різних епіцентральных віддальх з використанням горизонтально-шаруватих моделей середовища. Використовуючи запропоновану методику, зроблено спробу оцінити тензор сейсмічного моменту для вогнища Кримського землетрусу 16. 10. 1998 р. ($M_w = 3.6$).

Ключові слова: математичне моделювання; сейсмічне хвильове поле; синтетична сейсмограма; вертикально-неоднорідне середовище; тензор сейсмічного моменту.

У роботі демонструються можливості програми розрахунку повних синтетичних сейсмограм, розробленої на основі оригінального алгоритму [Пак, 2004; Пак, 2005].

Алгоритм призначений для розрахунку повних синтетичних сейсмограм в плоскопаралельному середовищі, що складається з однорідних пружних ізотропних шарів. Відомо, що для розв'язку таких задач часто використовується зображення переміщень в частотній області у вигляді розкладу за горизонтальними хвильовими функціями, яке включає інтеграли за хвильовим числом. Невідомі функції від глибини (вертикальні функції), що входять у ці зображення задовольняють системі звичайних диференціальних рівнянь першого порядку і визначаються на основі введених крайових умов.

Традиційним методом розв'язку цієї системи є матричний метод. За його допомогою можна будувати інтерференційні точні розв'язки для горизонтально-шаруватих середовищ, для середовищ з поверхнями розділу у вигляді концентричних сфер і циліндрів. При цьому є можливість проаналізувати отримані розв'язки: виділити із повного хвильового поля відбиття чи розсіяння заданих кратностей і типів.

Підхід до побудови хвильових полів у плоскопаралельному середовищі, що пропонується, є розв'язком методу, який описаний у праці Молоткова Л. А. [Молотков, 1984].

Метод був узагальнений автором [Пак, 2005] на випадок розташування джерела хвиль у довільному шарі горизонтально-шаруватого середовища. Крім цього, на відміну від роботи [Молотков, 1984] джерело може бути представлено довільно спрямованими силою або подвійною парою сил. Остання сьогодні використовується як найбільш продуктивна модель тектонічного землетрусу.

Розроблений алгоритм полягає у наступному: а) визначенні хвильового поля, породженого довільно-спрямованою силою в ідеальному просторі; б) розгляді такого джерела (сили) у горизонтально-шаруватому середовищі і виведенні формул для первинних хвиль, які

будучи випромінені джерелом, приводять у рух систему шарів; в) виведенні співвідношень для хвильового поля на вільній поверхні середовища, у якому діє сила, використовуючи матричний метод; г) переході від співвідношень з пункту в) до співвідношень для хвильового поля, збудженого ефективно-точковою дислокацією (подвійна пара сил) за допомогою диференціювання за просторовими координатами.

Переміщення на вільній поверхні середовища від дипольного джерела виражаються формулами:

$$\begin{pmatrix} u_r^{(0)} \\ u_z^{(0)} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^3 \int_0^{\infty} k^2 \mathbf{j}_i L^{-1} [m_i \mathbf{G}_i] dk,$$

$$u_{\phi}^{(0)} = \sum_{i=5}^6 \int_0^{\infty} k^2 j_i L^{-1} [m_i G_i] dk,$$

у яких L^{-1} — обернене перетворення Лапласа від змінної η , k — горизонтальне хвильове число. Величини G_i залежать від параметрів середовища, а величини m_i від функцій-зображень компонент тензора сейсмічного моменту (ТСМ).

Алгоритм реалізований у вигляді комп'ютерної програми, що дозволяє розраховувати синтетичні сейсмограми від точкового джерела з довільним ТСМ. Розрахунок сейсмограм складається з таких кроків: а) обчислення підінтегральних виразів в інтегралах за горизонтальною повільністю; б) оцінка цих інтегралів; в) підстановка в зображення для розв'язку в частотній області; г) перехід у часову область.

Оскільки розроблений в даній роботі підхід є модифікацією матричного методу, то у ньому відсутні обмеження на кількість шарів у півпросторі і на відношення їхніх товщин до довжин хвиль. Обмеження на смугу частот пов'язані з тим наскільки добре плоскопаралельна модель адекватна реальній і наскільки добре відомі значення її параметрів.

Програма була протестована порівняннями з результатами розрахунків, проведених іншими авторами. Результати тестування показали, що програма дозволяє розраховувати повні теоретич-

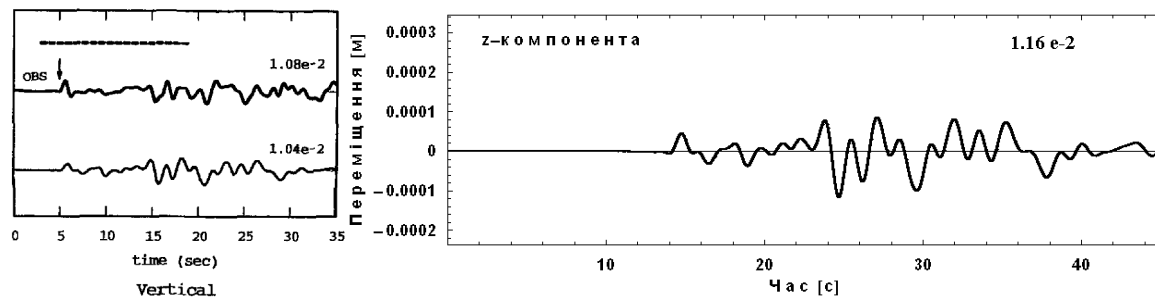


Рис. 1. Порівняння вертикальної компоненти реального запису переміщення із синтетичними сейсмограмами, обчисленими різними підходами

ні сейсмограми для епіцентральної віддалей і глибин, характерних для Закарпатських і Кримських землетрусів і може бути використана для моделювання низькочастотних сейсмограм від реальних землетрусів, зареєстрованих на місцевих сейсмічних станціях.

Для випробування алгоритму на реальних даних було використано записи землетрусу ($M_w=5.1$), що відбувся 5-го серпня 1990-го року з епіцентром біля м. Одавара (Японія). Параметри вогнища, середовища та координати точок спостереження, необхідні для розрахунку сейсмограм, було взято зі статті [Sato T. et al., 1998]. Механізм вогнища: падіння 35° , нахил 40° , простягання 215° . Сейсмічний момент становив 3.3×10^{16} Н \times м. Гіпоцентрально віддалі 15.3 км. Часову функцію джерела взято у вигляді трапеції (0.3, 0.2, 0.15) с.

Використовувались записи цього землетрусу, зроблені чотирма сейсмічними станціями в діапазоні епіцентральної віддалей від 7 до 82 км. Для кожної станції було розраховано три компоненти сейсмограм.

Результат розрахунку вертикальної компоненти переміщення для станції HNG (відстань від епіцентру 82.0 км, азимут 46.7°) [Sato T. et al., 1998] показано на рис. 1. Моделлю середовища під цією станцією є горизонтально-шаруватий півпростір, що складається з 11-ти неідеально пружних шарів. Ліворуч на рис. 1 наведено компоненти реального запису (угорі) та синтетичних сейсмограм, обчислених за допомогою $f-k$ -методу [Saikia S. K., 1994] (унизу). Праворуч – сейсмограми, розраховані за допомогою розробленої програми. Спостережувані і синтетичні хвильові форми профільовані у межах від 0.1 до 1 Гц смуговим косинусним фільтром з параметрами (0.0, 0.2, 0.7, 1.3) Гц. Числа над кривими позначають максимальні зміщення в сантиметрах, стрілки – вступу Р-хвилі, а пунктирні лінії над спостережуваними даними показують наскільки початок відліку за часом зміщений відносно часу початку дії вогнища. Для сейсмограм праворуч нуль шкали часу відповідає часу у джерелі.

Розроблена методика і комп'ютерна програма розрахунку синтетичних сейсмограм від точкового джерела в шарувато-однорідному сере-

довищі може стати основою методики розрахунку ТСМ для сейсмонезпечних регіонів України за записами місцевих сейсмічних станцій.

Першим кроком у цьому напрямі може стати алгоритм оцінки ТСМ, що ґрунтується на “підгонці” реальних сейсмограм синтетичними. Для цього використано модель вогнища у вигляді точкового диполя з ТСМ і часовою функцією джерела (ЧФД). Тривалість ЧФД оцінюється разом з ТСМ, а форма повинна бути визначена окремо. Координати епіцентру припускаються відомими. Глибина джерела оцінюється разом з ТСМ. Припускається, що слід ТСМ рівний нулю.

Застосовується ітеративна процедура оцінки ТСМ. Кути, що визначають орієнтацію площини розлому (падіння δ , простягання ϕ і нахил λ) змінюються з кроком 10° . Теоретичні і реальні сейсмограми суміщаються за вступом Р-хвилі. Для цієї мети розраховується початкове наближення для ТСМ. Далі за ТСМ розраховуються теоретичні сейсмограми. Ітерації повторюються доти, доки відносна середньоквадратична нев'язка теоретичних і реальних сейсмограм не стабілізується.

Для випробування алгоритму було взято запис землетрусу, який відбувся у Кримському регіоні 16-го жовтня 1998 р. ($M_w = 3.6$). Епіцентрально відстань склала 66 км, азимут на станцію 5.34° . Використано три компоненти записів.

Для інверсії використано реальні і теоретичні сейсмограми, профільовані в межах від 0.1 до 1 Гц. Використано сегменти сейсмограм, що містять групи поздовжніх і поперечних хвиль.

Результати підбору параметрів джерела мають ілюстративний характер. Їх мета продемонструвати осмисленість постановки оберненої задачі для вогнища землетрусу з використанням моделі ефективно-точкового джерела.

Література

- Пак Р. М. Хвильове поле в однорідному середовищі для джерела у вигляді одинарної сили або подвійної пари сил // Геоінформатика – 2004. – № 1. – С. 36 – 44.
- Пак Р. М. Моделювання хвильового поля, збудженого глибинним джерелом у вертикально-неоднорідному середовищі // Геофизический журнал – 2005. – №5. – С. 887 – 894.

Молотков Л. А. Матричный метод в теории распространения волн в слоистых, упругих и жидких средах — Л.: Наука, 1984. — 201 с.

Sato T., Helmberger D. V., Somerville P. G., Graves R. W., Saikia C. K. Estimates of regional and local strong motions during the great 1923 Kanto, Japan, earthquake (M_s 8.2). Part I: Source estimation of a calibration event and modeling of

wave propagation paths // Bull. Seism. Soc. Am. — 1998. — Vol. 88, № 1. — P. 183 — 205.

Saikia C. K. Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: modelling of Lg waves in eastern North America // Geophys. J. Int. — 1994. — Vol. 118. — P. 142 — 158.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИНТЕТИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ В ВЕРТИКАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ К ИНВЕРСИИ ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА

Р. М. Пак

Разработана методика (алгоритм и программа) для моделирования трикомпонентных сейсмограмм от произвольного дипольного точечного источника в вертикально-неоднородном полупространстве с поглощением. Алгоритм и программа испытаны на примере реального землетрясения, зарегистрированного на разных эпицентральных расстояниях с использованием горизонтально-слоистых моделей среды. Используя предложенную методику, сделана попытка оценить тензор сейсмического момента для очага Крымского землетрясения 16. 10. 1998 г. ($M_w = 3.6$).

Ключевые слова: математическое моделирование; сейсмическое волновое поле; синтетическая сейсмограмма; вертикально-неоднородная среда; тензор сейсмического момента.

A TECHNIQUE FOR SEISMOGRAMS CALCULATION IN A LAYERED HALF-SPACE, AS APPLIED TO SEISMIC MOMENT TENSOR INVERSIONS

R. Pak

In this article one developed the method (algorithm and program) for modelling three-way seismogram of arbitrary dipole point source in a vertically inhomogeneous half-space with the acquisitions. The algorithm and program were tested on the example of a real earthquake, registered at different epicentrum distance for the horizontally-layered models of the environment. Using the proposed methodology I attempted to estimate the seismic moment tensor for the earthquake of Crimea 16. 10. 1998 ($M_w = 3.6$).

Key words: mathematical modelling; seismic wave-field; synthetic seismogram; vertically heterogeneous medium; tensor of seismic moment.

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України