

УДК 550.344

Д. Малицький, д-р фіз.-мат. наук, проф.
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua;О. Муйла, канд. фіз.-мат. наук, мол. наук. співроб.
E-mail: orestaro@gmail.com;О. Грицай, асп.
E-mail: grycaj.oksana@gmail.com;

А. Павлова, канд. фіз.-мат. наук;

О. Асташкіна, канд. геол. наук, мол. наук. співроб.
E-mail: sac1@ukr.net;О. Обідіна, асп.
E-mail: jane.det@yandex.ua;Е. Козловський, канд. фіз.-мат. наук
Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
вул. Наукова, 3-б, м. Львів, 79060 Україна

РОЗПОДІЛЕНЕ ДЖЕРЕЛО: РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕЙСМОЛОГІЇ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою та рецензентом канд. фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України О.В. Кендзерою)

У роботі представлено розв'язок прямої задачі для поля переміщень на вільній поверхні шаруватого ізотропного середовища з використанням матричного методу у випадку розподіленого джерела. Розподілене джерело розглядається як сукупність точкових джерел, кожне з яких представлено тензором сейсмічного моменту. Важливий аспект полягає в тому, що для розв'язку оберненої задачі використано аналітичні співвідношення прямої задачі, тобто інверсію для сейсмічного тензора здійснено шляхом використання розв'язків для поля переміщень. Для розподіленого джерела у роботі використано той факт, що хвильове поле від такого вогнища є суперпозицією полів переміщень від кожного точкового джерела. Таким чином, постановка прямої задачі полягає у визначенні хвильового поля на вільній поверхні шаруватого півпростору, коли вогнище землетрусу представлено розподіленим джерелом у просторі й часі. Описано методику для визначення поля переміщень на вільній поверхні у спектральній області з використанням значення посувок для елементарних джерел, а також часу наростання (*rise time*) і часу розриву (*rupture time*). Матричний метод застосовують саме у випадку поширення сейсмічних хвиль у горизонтально-шаруватому півпросторі, коли неоднорідне середовище моделюється системою однорідних ізотропних шарів із паралельними границями. Вогнище землетрусу як розподілене джерело є розміщеним в однорідному шарі. Показано перехід від перевизначеної системи рівнянь для визначення вектора посувки по розриву до розв'язку для узагальненої оберненої задачі. Результати оберненої задачі для визначення площини розриву апробовано на прикладі події, що відбулася біля Мальти (24.04.2011: $13^{\circ}02'12''$, 35.92° N, 14.95° E, $M_w 4.0$). Для даної події показано визначення часу наростання (*rise time*) і часу розриву (*rupture time*). Коректність оберненої задачі забезпечено шляхом визначення функціоналу, при якому мінімізується норма між реальними даними та параметрами, які отримано з використанням запропонованої методики. У випадку матриць, близьких до сингулярних, запропоновано використовувати сингулярний розклад.

Ключові слова: розподілене джерело, сейсмічне поле, тензор сейсмічного моменту, вогнище землетрусу, ізотропне середовище.

Вступ. У цій роботі авторами представлено основні результати моделювання хвильового поля у шаруватому півпросторі, викликаного розподіленим джерелом, використовуючи матричний метод Томсона-Хаскела та можливості розв'язання оберненої задачі щодо вогнища землетрусу. Одержані напрацювання як у теоретичному, так і в прикладному аспектах, знайшли своє застосування для побудови механізмів вогнищ землетрусів, а також для визначення площини розриву, та мають перспективи для інших сейсмологічних задач, що буде показано нижче.

Як відомо, обернені задачі є некоректними й для їх розв'язання необхідні додаткові умови, які накладаються на фізичні параметри. Але й при таких умовах немає певності, що знайдено правильний розв'язок. Це означає, що може існувати достатньо багато різних систем шуканих параметрів, які задовольняють розв'язок прямої задачі. По суті, для більшості випадків сейсмологічна задача знаходження характеристик джерела сейсмічних хвиль чи досліджуваного середовища зводиться до методу підбору [3], коли шукані параметри змінюються у відомих межах, які визначено фізичними властивостями. Крім методу підбору, відомі чисельні методи скінченних різниць і скінченних елементів, а також матричний метод, які також широко використовують для обернених задач. Автори представленої роботи, проаналізувавши достатньо багато методів розв'язок як прямих, так і обернених задач, розробили декілька модифікацій матричного методу Томсона-Хаскела, показавши його переваги й недоліки, а також перспективи використання для багатьох задач сейсмології [3-7]. Ві-

домо, що розподілене джерело можна розглядати як суму точкових джерел [10]. Це означає, що кожна точка на площині розриву є генератором сейсмічних хвиль. Тому визначення параметрів такого джерела, а саме зміщення по розриву, часу наростання (*rise time*), часу розриву (*rupture time*), є важливим сейсмологічним завданням [8]. Для подій Карпатського регіону на сьогоднішній день такі задачі потребують свого розв'язання. У даній статті на прикладі події, яка відбулася біля Мальти, показано побудову площини розриву та визначено його основні параметри.

1. Розподілене джерело. Теорія прямої та оберненої задачі

Розглядається поширення сейсмічних хвиль у вертикально неоднорідному середовищі, яке моделюється системою однорідних ізотропних n шарів на $(n+1)$ півпросторі. Вважаємо, що границі між шарами є паралельними. На кожній границі виконуються умови жорсткого контакту. Метою нашого дослідження є побудова хвильового поля на вільній поверхні шаруватого середовища, коли на глибині H_0 в однорідному шарі діє розподілене джерело як сума точкових джерел і представлено тензорами сейсмічних моментів або посувками по розриву для кожного точкового джерела. Матричний метод застосовують саме у випадку поширення сейсмічних хвиль у горизонтально-шаруватому півпросторі, коли неоднорідне середовище моделюється системою однорідних ізотропних шарів із паралельними границями. Вогнище землетрусу як розподілене джерело є розміщеним в однорідному шарі. Відомо, що для сучас-

ної сейсмології представлення точкового джерела знайшло своє застосування, а його опис сейсмічним тензором є найбільш ефективним, оскільки дислокаційну модель вогнища задано площиною розриву, яка орієнтована в просторі трьома кутами (рис. 1) і сейсмічним моментом M_0 , який визначає енергію землетрусу. Таке джерело сейсмічних хвиль є точковим у просторі, але може бути розподіленим у часі. Автори даної статті достатньо багато уваги приділяли у своїх роботах саме такій моделі точкового джерела [1]. Ще один важливий аспект полягає в тому, що для розв'язків оберненої задачі використано аналітичні співвідношення прямої задачі, тобто інверсію для сейсмічного тензора здійснено шляхом використання розв'язків для поля переміщень. Для розподіленого джерела у роботі використано той факт, що хвильове поле від такого вогнища є суперпозицією полів переміщень від кожного точкового джерела. Таким чином, постановка прямої задачі полягає у визначенні хвильового поля на вільній поверхні шаруватого півпростору, коли вогнище землетрусу представлено як розподілене джерело у просторі та часі. У такому випадку, кожна компонента тензора сейсмічного моменту є функцією часу для кожної точки на площині розриву. Отже, для кожного точкового джерела вводиться час наростання (rise time), час розриву (rupture time), а також зміщення по розриву (так звана дислока-

ція на площині розриву). У випадку точкового джерела, параметрами вогнища є середня зміщення по розриву і часова функція вогнища $STF(t)$. На рис. 2 наведено час наростання (rise time) і час розриву (rupture time) для розподіленого джерела. Часова функція вогнища $STF(t)$ є комбінацією часу наростання й часу розриву. Слід відзначити, що для побудови площини розриву потрібно знати її орієнтацію, тобто визначити тензор сейсмічного моменту або фокальний механізм. Цей підхід забезпечується наявністю достатньо великої кількості сейсмічних станцій, які мають бути розміщені навколо епіцентра землетрусу. Тоді за знаками вступів прямих P хвиль і за кутами їх виходу на фокальній площині будуються дві нодальні площини, одна з яких є площиною розриву [3]. Такий відомий метод дозволяє визначати орієнтацію площини розриву, визначати скалярний сейсмічний момент M_0 за сейсмічними записами та знаходити за відомими формулами компоненти сейсмічного тензора. Але зрозуміло, що фізичні процеси у вогнищі не відбуваються миттєво. Наприклад, час, протягом якого відбувається сейсмічна подія, може тривати від часток секунди для малих землетрусів до десятків хвилин для великих землетрусів. У такому випадку, введення часової функції вогнища $STF(t)$ є важливим кроком переходу від точкового до розподіленого джерела.

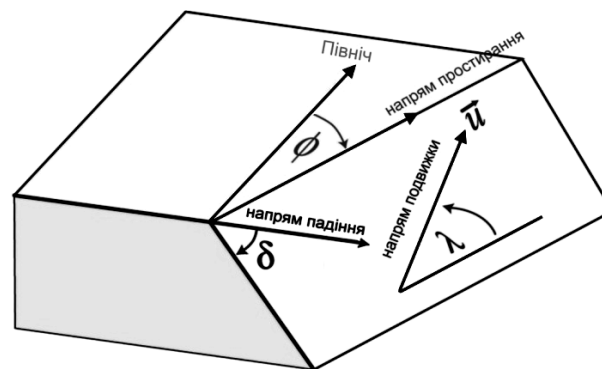


Рис. 1. Дислокаційна модель вогнища землетрусу

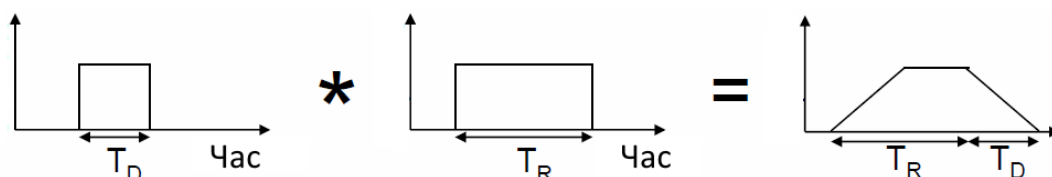


Рис. 2. Час наростання (rise time – T_D) і час розриву (rupture time – T_R) для розподіленого джерела

У цій статті приведено основні результати математичного моделювання поширення сейсмічних хвиль у шаруватому півпросторі для розподіленого джерела. Отже, розглядається реєстрація поля переміщень на вільній поверхні однією станцією від розподіленого джерела, що є сумою s елементарних (точкових) джерел. У запропонованій методиці використано математичні представлення у спектральній області. У роботі [7] показано, що для точкового джерела хвильове поле, викликане прямими P та S хвилями, має вигляд:

$$U_s^{(0)} = (U_x^{(0)p}, U_x^{(0)s}, U_y^{(0)p}, U_y^{(0)s}, U_z^{(0)p}, U_z^{(0)s})^T = K \cdot M \quad (1)$$

де $M = (M_{xx}, M_{yz}, M_{zz}, M_{xy}, M_{yy}, M_{xz})^T$ – тензор сейсмічного моменту; $U_s^{(0)} = (U_x^{(0)p}, U_x^{(0)s}, U_y^{(0)p}, U_y^{(0)s}, U_z^{(0)p}, U_z^{(0)s})^T$ – компоненти прямих P і S -хвиль на вільній поверхні середовища.

Матриця K визначається параметрами шаруватої моделі середовища [7]:

$$K = \begin{pmatrix} K_{11}^P & K_{12}^P & K_{13}^P & K_{14}^P & K_{15}^P & K_{16}^P \\ K_{21}^S & K_{22}^S & K_{23}^S & K_{24}^S & K_{25}^S & K_{26}^S \\ K_{31}^P & K_{32}^P & K_{33}^P & K_{34}^P & K_{35}^P & K_{36}^P \\ K_{41}^S & K_{42}^S & K_{43}^S & K_{44}^S & K_{45}^S & K_{46}^S \\ K_{51}^P & K_{52}^P & K_{53}^P & K_{54}^P & K_{55}^P & K_{56}^P \\ K_{61}^S & K_{62}^S & K_{63}^S & K_{64}^S & K_{65}^S & K_{66}^S \end{pmatrix}.$$

У випадку розподіленого джерела поле переміщень (у спектральній області), зареєстроване на одній станції й викликане прямими P та S хвилями від s точкових джерел, буде мати вигляд:

$$U_s^{(0)} = K_1 M_1 + K_2 M_2 + \dots + K_s M_s \quad (2)$$

Рівняння (2) можна переписати, ввівши сейсмічний момент M_0 для кожного точкового джерела, а саме $M_0 = \mu A u(t)$ (μ – модуль зсуву, A – площа точкового джерела, $u(t)$ – зміщення по розриву для точкового джерела). Вважатимемо, що розподілене джерело розміщене в однорідному шарі (хоча це не обов'язково), площі всіх елементарних джерел є однаковими, але посувки по розриву є різними, а отже часи наростання й часи розриву для кожного точкового джерела мають свої значення. Крім того, використаємо формули для компонент тензора сейсмічного моменту для кожного точкового джерела через кути, які визначають геометричну орієнтацію площини розриву:

$$\begin{aligned} M_{xx} &= -M_0 (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\varphi_s + \sin 2\delta \sin \lambda \sin^2 \varphi_s); \\ M_{xy} &= M_0 (\sin \delta \cos \lambda \cos 2\varphi_s + 1/2 \sin 2\delta \sin \lambda \sin 2\varphi_s); \\ M_{xz} &= -M_0 (\cos \delta \cos \lambda \cos \varphi_s + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \varphi_s) = M_{zx}; \\ M_{yy} &= M_0 (\sin \delta \cos \lambda \sin 2\varphi_s - \sin 2\delta \sin \lambda \cos^2 \varphi_s); \\ M_{yz} &= -M_0 (\cos \delta \cos \lambda \sin \varphi_s - \cos 2\delta \sin \lambda \cos \varphi_s) = M_{zy}; \\ M_{zz} &= -M_0 \sin 2\delta \sin \lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

де δ – кут падіння, φ_s – кут простирання, λ – кут між напрямом посувки й простяганням.

Тоді рівняння (2), використовуючи (3), перепишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} U_s^{(0)} &= K_1 \mu_1 A u_1 f(\delta, \varphi_s, \lambda) + K_2 \mu_2 A u_2 f(\delta, \varphi_s, \lambda) + \\ &+ \dots + K_s \mu_s A u_s f(\delta, \varphi_s, \lambda). \end{aligned} \quad (4)$$

Вектор $f(\delta, \varphi_s, \lambda)$ визначається правою частиною рівняння (3) (без M_0) і є розмірністю 1×6 .

Слід відзначити, що у формулі (4) матриці K для кожного точкового джерела відрізняються азимутами φ і глибинами їх залягання.

Таким чином, з використанням значення для вектора $f(\delta, \varphi_s, \lambda)$ поле переміщень для розподіленого джерела (4), яке викликане лише прямими P і S -хвилями на вільній поверхні, середовища має вигляд:

$$U_s^{(0)} = \begin{pmatrix} U_x^{(0)p}, U_x^{(0)s}, U_y^{(0)p}, U_y^{(0)s}, U_z^{(0)p}, U_z^{(0)s} \end{pmatrix}^T = G \cdot u, \quad (5)$$

де елементи матриці G визначено як $g_{ij} = \mu A b_{ij} = \mu A K_{ij} f_i, (i, j=1-6)$.

Вектор $u = (u_1, u_2, \dots, u_s)^T$ визначає посувки по розриву для кожного точкового джерела.

Приведемо перевизначену систему лінійних рівнянь (5) до наступного вигляду, помноживши зліва та справа на матрицю $\tilde{G}^*$, яка по відношенню до матриці G є комплексно-спряженою й транспонованою, тобто:

$$\tilde{G}^* G u = \tilde{G}^* U_s^{(0)}. \quad (6)$$

або

$$u = (\tilde{G}^* G)^{-1} \tilde{G}^* U_s^{(0)}. \quad (7)$$

Розв'язок (7) для вектора u названо розв'язком узагальненої оберненої задачі в сенсі середньоквадратичного, при якому мінімізується норма:

$$\|U_s^{(0)} - G u\|^2. \quad (8)$$

У теорії оцінки параметрів методом найменших квадратів рівняння (6) відоме під назвою нормального рівняння. Отже, найкращий розв'язок буде отримано, якщо записи на станції будуть без шумів і для швидкісної моделі, наближеної до реальної. Зазначимо також, що отриманий метод для визначення посувки по розриву для розподіленого джерела є ефективним і для слабких місцевих землетрусів, що є характерними для подій Карпатського регіону. Зазначимо, що розв'язок оберненої задачі слід досліджувати у випадку відхилень у значеннях швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, а також коли розглядається тонкошарувата модель. Таким чином, аналізуючи розв'язок для вектора u шляхом розв'язання оберненої задачі, треба досліджувати вище наведені особливості. Матриця $(\tilde{G}^* G)$ може бути також близькою до сингулярної, що може привести до труднощів для визначення вектора u . У цьому випадку потрібно використовувати сингулярний розклад.

Зазначимо також, що можливості використання запропонованої методики слід додатково перевіряти на реальних подіях.

2. Апробація методики для реальної події

Апробацію методики для визначення параметрів розподіленого джерела покажемо на прикладі події, яка відбулася біля Мальти (24.04.2011: $13^h 02^m 12^s$, $\lambda=35.92^\circ N$, $\varphi=14.95^\circ E$, $M_w=4.0$). Механізм вогнища землетрусу та його параметри визначено у роботі [9] і наведено на рис. 3 і в табл. 1.

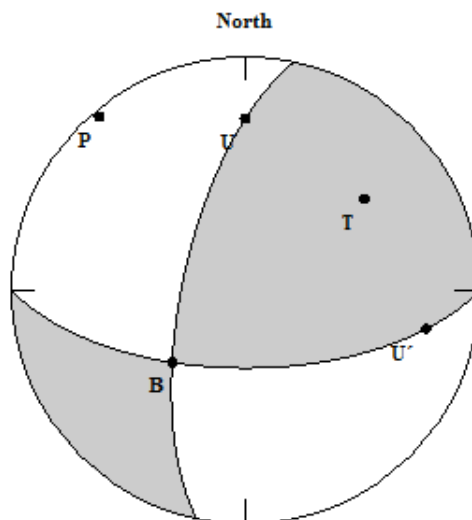


Рис. 3. Механізм вогнища землетрусу для події біля Мальти (24.04.2011: $13^h 02^m 12^s$, $\lambda=35.92^\circ N$, $\varphi=14.95^\circ E$, $M_w=4.0$)

Таблиця 1

Параметри фокального механізму для події біля Мальти 24.04.2011

Plane1			Plane2			P		T		N	
Strike (ϕ_s)	Dip (δ)	Slip (λ)	Strike (ϕ_s)	Dip (δ)	Slip (λ)	Azm	Plunge	Azm	Plunge	Azm	Plunge
192°	68°	30°	90°	63°	155°	320°	3°	52°	36°	226°	54°

На рис. 4 показано сейсмограми, записані на станції WDD на епіцентрній відстані 39,56 км. Використовуючи методику для визначення вектора посливу по розриву, згідно з викладеною теорією, на рис. 5 наводимо площину розриву для розподіленого джерела, а в табл. 2 – час наростання (rise time) і час розриву (rupture time). На отримані результати суттєво впливає

швидкісна модель, а також правильність визначення орієнтації площини розриву, тобто фокальний механізм. Слід також відзначити, що важливим є визначення вектора $U_s^{(0)} = (U_x^{(0)p}, U_x^{(0)s}, U_y^{(0)p}, U_y^{(0)s}, U_z^{(0)p}, U_z^{(0)s})$ для прямих P та S хвиль.

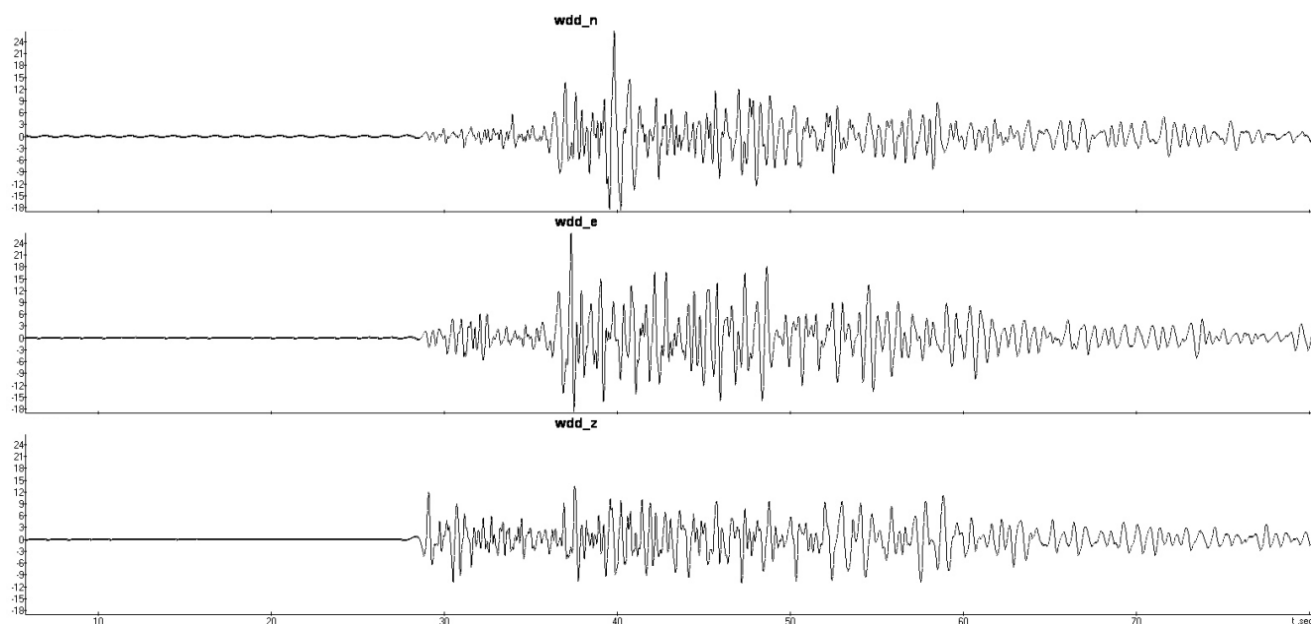


Рис. 4. Сейсмограми, які записано на станції WDD на епіцентрній відстані 39,56 км

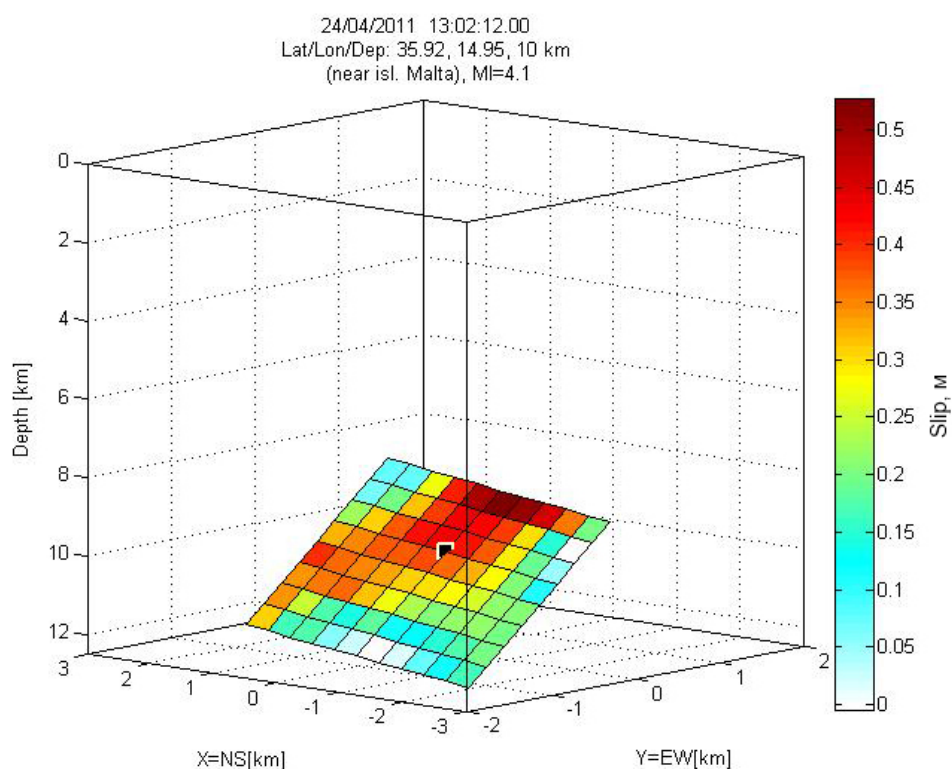


Рис. 5. Площина розриву для розподіленого джерела

Таблиця 2

Параметри розподіленого джерела для події біля Мальти (24.04.2011)

N	Slip, м	Rupture time, с	Rise time, с	N	Slip, м	Rupture time, с	Rise time, с
1	0,1625	1,419	0,568	41	0,1110	1,313	0,568
2	0,1174	1,171	0,461	42	0,2091	1,455	0,603
3	0,0729	1,206	0,497	43	0,2798	1,490	0,497
4	0,0203	1,242	0,497	44	0,3279	1,384	0,603
5	0	1,029	0,497	45	0,3664	1,490	0,426
6	0,0261	1,100	0,461	46	0,3827	1,100	0,532
7	0,0609	1,242	0,426	47	0,3762	1,242	0,568
8	0,1734	1,419	0,603	48	0,3697	1,490	0,568
9	0,1652	1,100	0,568	49	0,3518	1,490	0,603
10	0,3041	1,455	0,568	50	0,3264	1,500	0,497
11	0,2027	1,348	0,497	51	0,0531	1,455	0,461
12	0,1749	0,923	0,426	52	0,1874	1,567	0,603
13	0,1483	1,739	0,568	53	0,2892	1,916	0,603
14	0,1210	1,135	0,497	54	0,3710	1,881	0,603
15	0,1143	1,029	0,497	55	0,4162	1,845	0,568
16	0,1851	1,206	0,390	56	0,4339	1,952	0,603
17	0,1399	0,816	0,390	57	0,4142	1,774	0,568
18	0,1767	1,400	0,532	58	0,3729	1,774	0,568
19	0,2481	1,242	0,532	59	0,3062	1,703	0,532
20	0,3443	1,400	0,497	60	0,2261	1,703	0,603
21	0,2015	0,923	0,426	61	0	1,774	0,568
22	0,2121	0,887	0,426	62	0,1491	1,526	0,603
23	0,2160	0,745	0,532	63	0,2980	1,526	0,568
24	0,2108	0,993	0,532	64	0,3893	1,881	0,568
25	0,2297	0,958	0,355	65	0,4273	1,845	0,603
26	0,2775	1,171	0,603	66	0,4297	1,845	0,603
27	0,3192	1,348	0,532	67	0,3900	1,419	0,568
28	0,3615	1,313	0,568	68	0,3141	1,455	0,603
29	0,3610	1,384	0,426	69	0,2020	1,703	0,568
30	0,3405	1,410	0,568	70	0,0680	1,774	0,568
31	0,2055	1,490	0,568	71	0,1980	1,490	0,603
32	0,2164	1,450	0,603	72	0,3582	1,419	0,532
33	0,2554	1,100	0,568	73	0,4602	1,348	0,603
34	0,2807	1,135	0,532	74	0,5052	1,455	0,603
35	0,3003	1,419	0,603	75	0,5275	1,455	0,532
36	0,3101	1,348	0,461	76	0,4927	1,419	0,497
37	0,3320	0,958	0,603	77	0,4094	1,455	0,568
38	0,3485	1,384	0,603	78	0,2750	1,490	0,568
39	0,3672	1,455	0,461	79	0,0771	1,384	0,497
40	0,3988	1,455	0,568	80	0,0771	1,480	0,496

Висновки. У представленій роботі проведено аналіз отриманого узагальненого розв'язку оберненої задачі для вектора посувки по розриву. Про важливість визначення параметрів розподіленого джерела та його використання у сучасній сейсмології ведуться дискусії серед сейсмологів як вітчизняних, так і зарубіжних. На сьогодні цій проблемі присвячено багато конференцій і симпозіумів. Слід навести проект Source Inversion Validation (SIV), у якому беруть участь багато відомих учених. А це наводить на думку, що обернена задача сейсмології щодо визначення параметрів вогнища землетрусу є актуальною, потребує розробки нових методів і є перспективною для подальших досліджень. Автори даної роботи розглядають можливості введення анізотропного середовища для моделювання поширення сейсмічних хвиль з метою виявлення впливу анізотропії на хвильове поле. Така задача потребує свого розв'язання, оскільки відомо, що реальне середовище є анізотропним і його вплив на розв'язок оберненої задачі також потрібно досліджувати, що буде показано в наступних роботах.

Список використаних джерел

1. Акі К., Річардс П., (1983). Количественная сейсмология. Теория и методы. М.: Мир, 520 с.
2. Вербицкий Т.З., Починайко Р.С., Стародуб Ю.П., Федоришин О.С., (1985). Математическое моделирование в сейсморазведке. Київ: Наук. думка, 275 с.

Verbitsky T.Z., Pochinaiko R.S., Starodub Y.P., Fedorishin O.S., (1985). Mathematical modelling in seismic exploration. Kiev, Science Thought – Naukova Dumka, 275 p. (In Russian).

3. Малицький Д.В., (2010). Аналітично-числові підходи до обчислення часової залежності компонент тензора сейсмічного моменту. Геоінформатика, 1, 79–86.

Malysky D.V., (2010). Analytical and numerical approaches to the calculation of time depending on the seismic moment tensor components. Geoinformatics, 1, 79–86. (In Ukrainian).

4. Малицький Д.В., (1998). Основні принципи розв'язання динамічної задачі сейсмології на основі рекурентного підходу. Геофіз. журн., 5, 96–98.

Malysky D.V., (1998). Basic principles of solving of the seismology dynamic problems based on recurrent approach. Geophysics Journal, 5, 96–98. (In Ukrainian).

5. Малицький Д.В., (2005). Про джерело сейсмічних хвиль. Геофіз. журнал, 27(2), 304–308.

Malysky D.V., (2005). About the seismic waves source. Geophysics Journal, 27 (2), 304–308. (In Ukrainian).

6. Малицький Д.В., (1994). Рекуррентный метод решения обратной динамической задачи сейсморазведки в вертикально-неоднородной среде. Геофиз. журнал, 16(3), 61–66.

Malysky D.V., (1994). The recursive method for the inverse dynamic problem solving of seismic exploration in a vertically inhomogeneous medium. Geophysics Journal, 16 (3), 61–66. (In Russian).

7. Малицький Д.В., Муйла О.О., (2007). Про застосування матричного методу і його модифікацій для дослідження поширення сейсмічних хвиль у шаруватому середовищі. Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики, 124–136.

Malysky D.V., Muyla O.O., (2007). About the application of the matrix method and its modifications for the seismic waves study in layered media. Theoretical and applied aspects of geoinformatics, 124–136. (In Ukrainian).

8. Chen Ji, (2005). Computer Simulation of Earth Movement that Spawnd the Tsunami. California Institute of Technology.

9. Malysky D., D'Amico S., (2015). Moment tensor solutions through waveforms inversion. Messina, Mistral Service sas, 25 p.

10. Müller G., (1985). The reflectivity method: a tutorial. Geophys. J., 58, 153–174.

D. Malysky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua;
O. Muyla, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research Associate
E-mail: orestaro@gmail.com;
O. Hrytsaj, Postgraduate Student
E-mail: grycaj.oksana@gmail.com;
A. Pavlova, Ph.D.;
O. Astashkina, Cand. Sci. (Geol.), Research Associate
E-mail: sac1@ukr.net;
O. Obidina, Postgraduate Student
E-mail: jane.det@yandex.ua;
E. Kozlovskyy, Ph.D.
Carpathian Branch of Subbotin Institute of Geophysics NAS of Ukraine
3-b Naukova St., Lviv, Ukraine, 79060

EXTENDED SOURCE: MODELING RESULTS AND PROSPECTS OF APPLICATION FOR SEISMOLOGY PROBLEMS

The solution of the direct problem is presented for the displacement field on the free surface of layered isotropic medium using the matrix method. The results of the direct problem are used to determine the seismic moment tensor. An extended source is considered as a set of point sources, each one is presented by seismic moment tensor. An important aspect is that for the solution of inverse problem an analytical value of the direct problem is used, i.e. inversion for seismic tensor is realized by using solutions for displacement fields. The solution for extended sources is based in the fact that the wave field from such a source is the superposition of displacement fields from each point source. Thus, the statement of the direct problem is to determine the wave field on the free surface of layered half-space when the earthquake's focus is represented as an extended source in space and time. A method is described which determines the displacement field on the free surface in the spectral domain using the values of the shift for elementary sources as well as rise time and rupture time. Matrix method is used in case of seismic waves in horizontal layered half-space where heterogeneous medium is simulated by homogeneous isotropic layers with parallel boundaries. The earthquake's focus as an extended source is placed in a uniform layer. We have shown the transition from a redefined system of equations for determining a slip vector to the solution for the generalized inverse problem. The results of the inverse problem for determining the rupture plane were tested on the example of the events that took place near Malta (24.04.2011: 13h02m12s, 35.92N, 14.95E, Mw4.0). For this event, the determination of the rise time and rupture time is shown. Correctness of the inverse problem is provided by determining of a functional in which the norm is minimized between the real data and parameters that are obtained using the proposed method. For a singular matrix it is suggested to use a singular decomposition.

Keywords: extended source, seismic field, seismic moment tensor of the earthquake, isotropic medium.

Д. Малицкий, д-р физ.-мат. наук, проф.
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua;
О. Муйла, канд. физ.-мат. наук, млад. науч. сотрудник
E-mail: orestaro@gmail.com;
О. Грицай, асп.
E-mail: grycaj.oksana@gmail.com;
А. Павлова, канд. физ.-мат. наук;
А. Асташкина, канд. геол. наук, млад. науч. сотрудник
E-mail: sac1@ukr.net;
О. Обидина, асп.
E-mail: jane.det@yandex.ua;
Э. Козловский канд. физ.-мат. наук
Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
ул. Научная, 3-б, г. Львов, Украина, 79060

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ИСТОЧНИК: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕЙСМОЛОГИИ

В работе представлено решение прямой задачи для поля перемещений на свободной поверхности слоистой изотропной среды с применением матричного метода. Результаты прямой задачи использованы для определения тензора сейсмического момента. Распределенный источник рассматривается как совокупность точечных источников, каждый из которых представлен тензором сейсмического момента. Важный аспект заключается в том, что для решения обратной задачи использованы аналитические соотношения прямой задачи, то есть инверсия для сейсмического тензора осуществлена путем использования решений для поля перемещений. Для распределенного источника в работе использован факт, что волновое поле от такого очага является суперпозицией полей перемещений от каждого точечного источника. Таким образом, постановка прямой задачи заключается в определении волнового поля на свободной поверхности слоистого полупространства, когда очаг землетрясения представлен как распределенный источник в пространстве и времени. Приведена методика определения поля перемещений на свободной поверхности в спектральной области с использованием значения подвижки для элементарных источников, а также времени нарастания (rise time) и времени разрыва (rupture time). Матричный метод применяют именно в случае распространения сейсмических волн в горизонтально-слоистом полупространстве, когда неоднородная среда моделируется системой однородных изотропных слоев с параллельными границами. Очаг землетрясения как распределенный источник расположен в однородном слое. Показан переход от переопределенной системы уравнений для определения вектора подвижки по разрыву к решению для обобщенной обратной задачи. Результаты обратной задачи для определения плоскости разрыва апробированы на примере события, произошедшего у Мальты (24.04.2011: 13h02m12s, 35.92N, 14.95E, Mw4.0). Для данного события показано определение времени нарастания (rise time) и времени разрыва (rupture time). Корректность обратной задачи обеспечена путем определения функционала, при котором минимизируется норма между реальными данными и параметрами, полученными с использованием предложенной методики. В случае матриц, близких к сингулярным, предложено использовать сингулярное разложение.

Ключевые слова: распределенный источник, сейсмическое поле, тензор сейсмического момента, очаг землетрясения, изотропная среда.