

УДК 550.34

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.08>

Дмитро МАЛИЦЬКИЙ¹, д-р. фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-9156-739x
e-mail: dmalytsky@gmail.com

Олександра АСТАШКІНА¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0009-0004-2065-4236
e-mail: sac1@ukr.net

Руслан ПАК¹, канд. фіз.-мат. наук, наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-8781-4688

Андрій ГНИП¹, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-2612-4234
e-mail: agnyp.gm@gmail.com

Маркіян ДОБУШОВСЬКИЙ¹, канд. фіз.-мат. наук, мол. наук. співроб.
ORCID ID: 0009-0004-4358-2298
e-mail: mdobush13@gmail.com

¹Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОГНИЩА ЗЕМЛЕТРУСУ ЗА ДАНИМИ ОБМЕЖЕНОЇ КІЛЬКОСТІ СЕЙСМІЧНИХ СТАНЦІЙ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф., член-кор. НАНУ С.А. Вижвою)

Вступ. Представлено метод визначення тензора сейсмічного моменту з використанням лише прямих Р- і S-хвиль, менш чутливих до модельних ефектів поширення, ніж відбиті та заломлені хвилі, що значно підвищує точність і надійність методу. Вогнище землетрусу розглядається як точкове, із заздалегідь відомим розташуванням і часом початку події.

Методи. Поширення хвиль у середовищі, яке моделюється набором горизонтально-однорідних пружних шарів, обчислюється за допомогою матричного методу, що дає змогу виділяти лише прямі хвилі. На основі прямої задачі із використанням розв'язку узагальненого обернення показано алгоритм обернення спостережених хвильових форм з метою визначення компонент сейсмічного тензора $M(t)$. Аналіз здійснено на основі записів землетрусу, що стався 22 лютого 2024 року у Східній Словаччині, використовуючи дані лише двох сейсмічних станцій Словацької мережі: sk19 (49.25°N, 21.93°E) та sk20 (49.21°N, 21.61°E).

Результати. Для перевірки достовірності отриманих параметрів вогнища землетрусу здійснено порівняльний аналіз синтетичних сейсмограм, розрахованих на основі методики математичного моделювання хвильового поля матричним методом і спостережуваних записів для прямих Р- і S-хвиль на станції sk19. Проведено кореляційний аналіз прямих Р- і S-хвиль для спостережуваних і синтетичних сейсмограм. Результати аналізу показали високу достовірність визначеного тензора сейсмічного моменту для землетрусу 2024-02-22 (Східна Словаччина), отриманого шляхом обернення лише прямих хвиль.

Висновки. Використання точкового джерела у вигляді сейсмічного тензора, розміщеного всередині горизонтально-шаруватого півпростору, є ефективним для визначення фокальних механізмів землетрусів. Результати дослідження підтверджують доцільність використання лише прямих Р- і S-хвиль для визначення тензора сейсмічного моменту, що сприяє підвищенню точності обчислень та зменшенню впливу модельних ефектів поширення.

Ключові слова: тензор сейсмічного моменту, фокальний механізм, матричний метод, синтетичні сейсмограми, кореляційний аналіз.

Вступ

Визначення параметрів вогнищ землетрусів є важливою сейсмологічною задачею. Такі задачі зазвичай вирішують шляхом розв'язання оберненої задачі (Малицький, 2016; Dreger, & Helmberger, 1993; Asano et al., 2024; Hallo, & Gallovič, 2016; Minson, 2024; Stiernström, 2024; Kubo et al., 2020; Chen et al., 2019), а також на підставі записів на сейсмічних станціях із використанням полярностей вступу прямих Р-хвиль (Dziewonski et al., 1981). Останній метод є найбільш використаний для великої кількості станцій. На сьогодні відразу після сейсмічної події розроблено методи дають змогу в автоматичному режимі визначати фокальний механізм. У такому випадку є можливість використання фокальних механізмів для вирішення інших важливих задач, зокрема для визначення тензора напружень за фокальними механізмами (Vavříček, & Kuhn, 2012). Але у випадку сейсмічних регіонів з малою сейсмічністю, коли лише кілька станцій зареєстрували сейсмічну подію, визначення параметрів вогнища за полярностями прямих Р-хвиль є неможливим. Потрібні нові підходи і методи для таких задач. Автори даної статті застосували розроблений у роботах (Малицький, 2016; Malytsky, & Asano, 2024) метод визначення сейсмічного тензора і фокального механізму, використовуючи прямі Р- і S-хвилі на обмеженій кількості станцій. У

представленій роботі автори визначають тензор сейсмічного моменту для події, яка відбулася 22 лютого 2024 р. ($t_0=12:54:15$ UTC, 21.75°E, 49.03°N, Depth 9 km, ML3.0, Східна Словаччина). Даний землетрус записаний кількома сейсмічними станціями Словацької мережі. Автори використали записи тільки на двох станціях, а саме sk19 і sk20 (рис. 1). Відзначимо, що такі сейсмологічні задачі щодо визначення параметрів вогнищ землетрусів є важливими як для Східної Словаччини (Schlomer et al. 2024), так і для сейсмоактивних регіонів України.

Методи

У роботах (Малицький, 2016, Malytsky, & Asano, 2024) показано методику визначення сейсмічного тензора і фокального механізму для прямих хвиль з використанням записів на обмеженій кількості станцій. Зауважимо, що дану методику розроблено для поширення сейсмічних хвиль від точкового джерела, представленого сейсмічним тензором. Сейсмічні хвилі поширюються в шаруватому півпросторі (Малицький, 2016). Метод базується на матричному методі Томпсона і Хаскела (Thomson, 1950), який достатньо добре розвинутий у роботі (Aki, & Richards, 2002).

Схема обернення складається з двох кроків: пряме й обернене моделювання. Спочатку розглядаємо поширення сейсмічних хвиль у вертикально неоднорідних середовищах і з використанням розробленого варіанта

© Малицький Дмитро, Асташкіна Олександра, Пак Руслан, Гнип Андрій, Добушовський Маркіян, 2025

матричного методу обчислюємо синтетичні сейсмограми на вільній поверхні горизонтально-шаруватого ізотропного середовища. Точкове вогнище розташоване всередині однорідного шару. Переміщення на поверхні представляємо у матричній формі, окремо для далекого і близького поля. Далі розглядаємо переміщення лише в далекому полі, а хвильове поле для прямих Р- та S-хвиль отримуємо з використанням задачі на власні вектори і власні значення (Малицький, 2016). Обернена задача полягає в обчисленні спектрів компонент тензора сейсмічного моменту, які отримуємо з використанням так званого розв'язку узагальненого обернення і перетворення їх у часову ділянку з використанням оберненого перетворення Фур'є.

Отже, компоненти тензора сейсмічного моменту, отримані з використанням узагальненого обернення (Малицький, 2016), мають вигляд

$$M(\tilde{G}^*G)^{-1}\tilde{G}^*U, \quad (1)$$

де $U^{(0)}=(U_x^{(0)P}, U_x^{(0)S}, U_y^{(0)P}, U_y^{(0)S}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S})$ – компоненти переміщення прямих Р- і S- хвиль; сейсмічний тензор $M=(M_{xx}, M_{yy}, M_{zz}, M_{xy}, M_{yz}, M_{zx})^T$ містить шість незалежних компонент; G – матриця, яка визначається швидкісною моделлю (Малицький, 2016); матриця $\tilde{G}^*$ є комплексно-спряжена і транспонована до матриці G .

Відрізки записів, що відповідають лише прямим Р- і S-хвилям, визначаємо візуально, з урахуванням затримок фаз за відповідної епіцентральної відстані та глибини вогнища. Максимальна частота у спектрах записів контролюється припущенням про точкове вогнище та відповідає довжині хвилі, що перевищує лінійні розміри розриву у ньому.

Результати

Ефективність запропонованого методу протестовано на землетрусу у Східній Словаччині. Для цієї мети вибрано сейсмічну подію, яка відбулася 22 лютого 2024 р. (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). Використано сейсмічні записи лише на двох станціях: sk19 (49.25°N, 21.93°E) і sk20 (49.21°N, 21.61°E) Словацької мережі (рис. 1).

Швидкісну модель представлено в табл. 1 (Malek et al., 2023). Джерело сейсмічних хвиль – на глибині 9 км. Відзначимо, що сейсмічні станції sk19 і sk20 розташовані в різних квадрантах навколо епіцентру землетрусу (рис. 1).

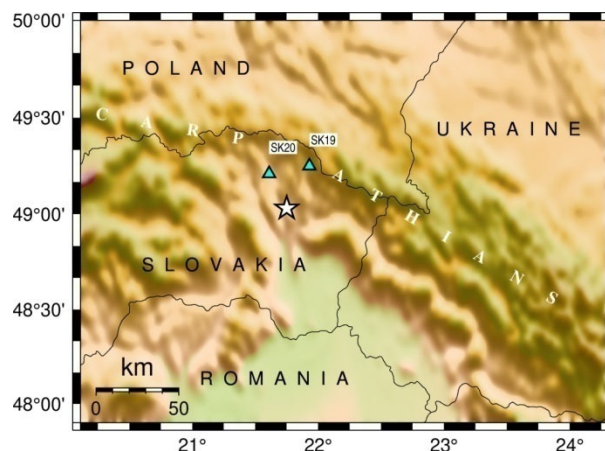


Рис. 1. Розміщення станцій sk19 (49.25°N, 21.93°E) і sk20 (49.21°N, 21.61°E) (трикутники) словацької мережі. Епіцентр землетрусу 2 лютого 2024 року показано зіркою (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0) (Malytsky et al., 2025)

Таблиця 1

1D швидкісна модель			
$h_s(\text{km})$	$V_p(\text{km/s})$	$V_s(\text{km/s})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$
1,0	2,5	1,445	2,2
3,0	3,7	2,139	2,44
3,0	5,2	3,006	2,74
10	5,9	3,41	2,88
3	6,4	3,699	2,98
4	6,75	3,902	3,05
	8,0	4,624	3,3

Компоненти тензора сейсмічного моменту, які обчислено за формулою (1), використовуючи обернення хвильових форм для прямих хвиль на станціях sk19 and sk20 та фокальний механізм, представлено на рис. 2.

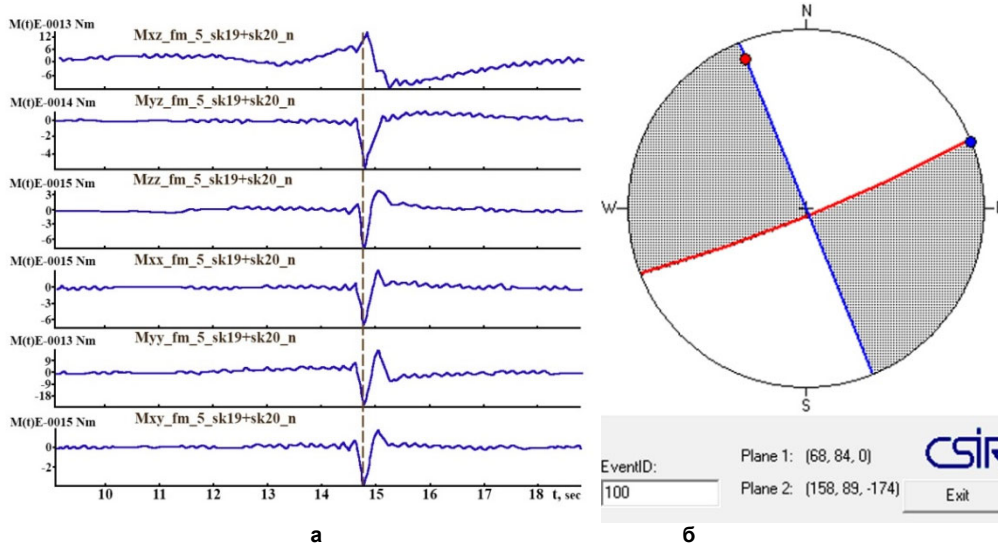


Рис. 2. Компоненти тензора сейсмічного моменту для землетрусу 2024-02-22 (Східна Словаччина), які отримано шляхом обернення тільки прямих хвиль, записаних на станціях sk19 and sk20:

вертикальна лінія в а) показує час у вогнищі (час початку події: 12:54:14.8), а) який також отримано за інверсією хвильових форм (Malytsky et al., 2025); б) версія фокального механізму, який отримано згідно із сейсмічним тензором

Наступним кроком у даній роботі є порівняльний аналіз отриманих синтетичних сейсмограм, розрахованих на основі методики математичного моделювання хвильового поля матричним методом (Пак, 2014, 2015) і спостережуваних записів для прямих Р- і S-хвиль на станції sk19. На рис. 3 наведено синтетичні та спостережені

форми прямих Р- і S-хвиль. Компоненти синтетичних сигналів E, N та Z у швидкостях обчислено для тензора моменту (рис. 2), отриманого внаслідок інверсії прямих Р- і S-хвиль для глибини вогнища 9 км та епіцентральної відстані 22,72 км з використанням швидкісної моделі, наведеної у табл. 1.

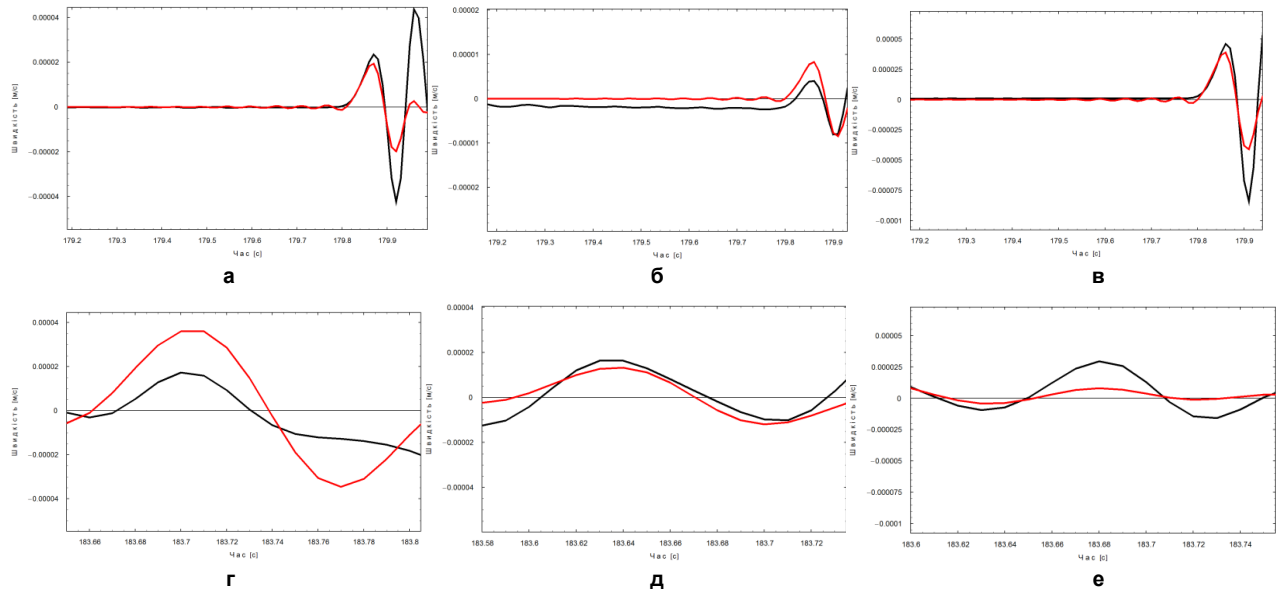


Рис. 3. Порівняльний аналіз прямих Р-хвиль:

а) N – компонента б) E – компонента в) Z – компонента і S-хвиль г) N – компонента д) E – компонента е) Z – компонента (для джерела на глибині 9 км) для спостережуваних і синтетичних сейсмограм, отриманих на станції sk19 з використанням швидкісної моделі, наведеної у таблиці 1. Спостережувані хвильові форми показано чорним кольором, а синтетичні – червоним відповідно

Тривалість імпульсу в джерелі та форму його часової функції вибрано такі, що найкраще відповідають тривалості та формі першого імпульсу на спостережених

записах. На рис. 4 наведено вигляд часової функції джерела та її амплітудний і фазовий спектри.

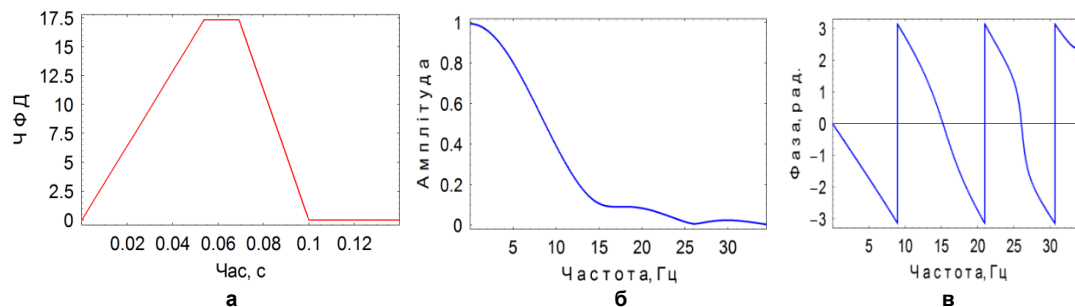


Рис. 4. Часова функція джерела у вигляді трапеції (а) та її амплітудний (б) і фазовий спектри (в). Тривалість імпульсу дорівнює 0,1 сек

Для кожної із фаз на рис. 3 вибрано візуально вікна, у яких проведено порівняння форм сигналів. Складові Р-хвилі для кожної компоненти розглянуто у вікні, яке починається за 0,6 сек до її вступу та закінчується через 0,2 сек після її вступу. Складові S-хвилі для кожної компоненти розглянуто у вікні, яке починається за 0,01 сек до її вступу та закінчується через 0,02 сек після її вступу. Вибір часової функції джерела у вигляді трапеції з тривалістю імпульсу 0,1 сек дає найкращий результат для порівняльного аналізу спостережуваних і синтетичних сейсмограм.

У роботі проведено кореляційний аналіз (Chiles, & Delfiner, 2012) прямих Р- і S-хвиль для спостережуваних і синтетичних сейсмограм (рис. 3), отриманих на станції sk19. Коефіцієнти кореляції для Р-хвилі на N-компоненті становить 0,82, на E-компоненті 0,84, на Z-компоненті 0,86.

Коефіцієнти кореляції для S-хвилі на N-компоненті становить 0,78, на E-компоненті 0,82, на Z-компоненті 0,80.

Дискусія і висновки

У даній роботі ми представили метод визначення тензора сейсмічного моменту, який отримано шляхом обернення тільки прямих хвиль, зареєстрованих на двох сейсмічних станціях sk19 (49.25°N, 21.93°E) і sk20 (49.21°N, 21.61°E) (рис. 1) Словацької мережі. Сейсмічні станції розташовані у різних квадрантах на фокальній сфері. Метод базується на підходах, які описано зокрема в роботах (Малицький, 2016), в яких версія матричного методу розвинута для обчислення переміщень тільки для прямих хвиль. Точкове джерело розміщено всередині шаруватого півпростору і представлено тензором сейсмічного моменту. Запропонований метод

протестовано на сейсмічній події у Східній Словаччині, яка відбулася 22 лютого 2024 р. (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). Вибір для інверсії тільки прямих хвиль замість повного хвильового поля дає змогу зменшити вплив швидкісної моделі. Крім того, слід відзначити, що в результаті обернення тільки прямих хвиль можна отримати також час початку сейсмічної події. Запропонований метод можна успішно використовувати для регіонів із малою сейсмічністю, де кількість сейсмічних станцій, які записали подію, обмежена.

Для достовірності отриманих результатів для сейсмічного тензора та фокального механізму автори провели порівняльний аналіз синтетичних та спостережуваних сейсмограм для прямих хвиль. Синтетичні сейсмограми розраховано на основі методики математичного моделювання хвильового поля матричним методом (Пак, 2015). Аналіз отриманих результатів на основі кореляційного аналізу показав високу достовірність результатів для тензора сейсмічного моменту для землетрусу 2024-02-22 (Східна Словаччина), які отримано шляхом обернення тільки прямих хвиль, записаних на станціях sk19 and sk20. Вважаємо, що використання точкового джерела, представленої сейсмічним тензором, яке розміщене всередині горизонтально-шаруватого півпростору можна використовувати для визначення фокальних механізмів.

Внесок авторів: Дмитро Малицький – концептуалізація, методологія, адміністрування проєкту; Олександра Асташкіна – програмне забезпечення, написання (перегляд і редагування); Руслан Пак – аналіз і обробка даних; Андрій Гніп – курація даних, візуалізація; Маркіян Добушовський – програмне забезпечення.

Список використаних джерел

- Малицький, Д. В. (2016). *Математичне моделювання в задачах сейсмології*. Наукова думка.
- Пак, Р. М. (2015). Моделювання хвильового поля, збуреного локальними джерелами у вертикально-неоднорідному півпросторі, та розрахунок синтетичних сейсмограм. *Геоінформатика*, 4(56), 35–42.
- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*. University Science Books.
- Asano, K., Sekiguchi, H., & Iwata, T. (2024). Validation of Deep Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins Using Autocorrelation Functions of Strong Motion Records. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 24(5), 45–57. https://doi.org/10.5610/jaee.24.5_45
- Dreger, D. S., & Helmberger, D. V. (1993). Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data. *Journal of Geophysical Research*, 98(B1), 1162–1179.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4), 2825–2852.
- Chen, Y.-C., Huang, H.-C., Iwata, T., & Asano, K. (2019). Strong Ground Motion Simulation of the 2016 ML 6.6 Meinong, Taiwan, Earthquake Using the Empirical Green's Function Method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12), 12905–12919. <https://doi.org/10.1029/2019JB017661>
- Chiles, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Hallo, M., & Gallovič, F. (2016). Fast and cheap approximation of Green function uncertainty for waveform-based earthquake source inversions. *Geophysical Journal International*, 207(2), 1012–1029.
- Kubo, H., Asano, K., Iwata, T., & Aoi, S. (2020). Along-dip variation in seismic radiation of the 2011 Ibaraki-oki, Japan, earthquake (Mw 7.9) inferred using a multiple-period-band source inversion approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12), e2020JB019936. <https://doi.org/10.1029/2020JB019936>
- Malek, J., Brokesova, J., & Novotny, O. (2023). New velocity structure of the Novy Kostel earthquake – swarm region, West Bohemia, determined by the isometric inversion. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 2111–2134.
- Malytskyy, D., & Asano, K. (2024). Seismic Moment Tensor and Focal Mechanism of the MW3.3 earthquake of May 11, 2021 in the Kyoto-Osaka Border Region Determined by Waveform Inversion. *Baltic Journal of Modern Computing*, 12(4), 434–442. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2024.12.4.05>
- Malytskyy, D., Fojtikova, L., Malek, J., Astashkina, O., Gnyp, A., Dobushovskyy, M., Pak, R., Melnyk, M., Nikulins, V., & Ignatyshyn, V. (2025). Seismic moment tensor and focal mechanism for earthquake of February 22, 2024 in Eastern Slovakia (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). *Геофізичний журнал* (у друці).

Minson, S. E. (2024). Cross-fade sampling: extremely efficient Bayesian inversion for a variety of geophysical problems. *Geophysical Journal International*, 239(3), 1629–1649.

Schlomer, A., Hetenyi, G., Plomerova, J., Vecsey, L., Bielik, M., Bokelmann, G., Csicsay, K., Fojtikova, L., Friederich, W., Fuchs, F., Grad, M., Janik, T., Exnerova, H., K., Kolinsky, P., Malinowski, S., Meier, T., Mendecki, M., Papco, J., Szucs, E., Sule, B., Timko, M., Gyarmati, A., Weber, Z., Westergom, V., Zlebcikova, H., & AlpArray-PACASE Working Group. (2024). The Pannonian-Carpathian-Alpine seismic experiment (PACASE): network description and implementation. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 59, 249–270. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00439-w>

Stiernström, V., Almquist, M., & Dunham, E. M. (2024). Adjoint-based inversion for stress and frictional parameters in earthquake modeling. *Journal of Computational Physics*, 519, 113447.

Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89–93.

Vavryčuk, V., & Kuhn, D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two-step time-frequency approach. *Geophysical Journal International*, 190(3), 1761–1776. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05592.x>

References

- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*. University Science Books.
- Asano, K., Sekiguchi, H., & Iwata, T. (2024). Validation of Deep Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins Using Autocorrelation Functions of Strong Motion Records. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 24(5), 45–57. https://doi.org/10.5610/jaee.24.5_45
- Chen, Y.-C., Huang, H.-C., Iwata, T., & Asano, K. (2019). Strong Ground Motion Simulation of the 2016 ML 6.6 Meinong, Taiwan, Earthquake Using the Empirical Green's Function Method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12), 12905–12919. <https://doi.org/10.1029/2019JB017661>
- Chiles, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Dreger, D. S., & Helmberger, D. V. (1993). Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data. *Journal of Geophysical Research*, 98(B1), 1162–1179.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4), 2825–2852.
- Hallo, M., & Gallovič, F. (2016). Fast and cheap approximation of Green function uncertainty for waveform-based earthquake source inversions. *Geophysical Journal International*, 207(2), 1012–1029.
- Kubo, H., Asano, K., Iwata, T., & Aoi, S. (2020). Along-dip variation in seismic radiation of the 2011 Ibaraki-oki, Japan, earthquake (Mw 7.9) inferred using a multiple-period-band source inversion approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12), e2020JB019936. <https://doi.org/10.1029/2020JB019936>
- Malek, J., Brokesova, J., & Novotny, O. (2023). New velocity structure of the Novy Kostel earthquake – swarm region, West Bohemia, determined by the isometric inversion. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 2111–2134.
- Malytskyy, D., & Asano, K. (2024). Seismic Moment Tensor and Focal Mechanism of the MW3.3 earthquake of May 11, 2021 in the Kyoto-Osaka Border Region Determined by Waveform Inversion. *Baltic Journal of Modern Computing*, 12(4), 434–442. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2024.12.4.05>
- Malytskyy, D., Fojtikova, L., Malek, J., Astashkina, O., Gnyp, A., Dobushovskyy, M., Pak, R., Melnyk, M., Nikulins, V., & Ignatyshyn, V. (2025). Seismic moment tensor and focal mechanism for earthquake of February 22, 2024 in Eastern Slovakia (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). *Геофізичний журнал* (у друці).
- Malytskyy, D. V. (2016). *Mathematical modeling in seismology problems*. Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Minson, S. E. (2024). Cross-fade sampling: extremely efficient Bayesian inversion for a variety of geophysical problems. *Geophysical Journal International*, 239(3), 1629–1649.
- Pak, R. M. (2015). Modeling of a wave field perturbed by local sources in a vertically inhomogeneous half-space and calculation of synthetic seismograms. *Geoінформатика*, 4(56), 35–42 [in Ukrainian].
- Schlomer, A., Hetenyi, G., Plomerova, J., Vecsey, L., Bielik, M., Bokelmann, G., Csicsay, K., Fojtikova, L., Friederich, W., Fuchs, F., Grad, M., Janik, T., Exnerova, H., K., Kolinsky, P., Malinowski, S., Meier, T., Mendecki, M., Papco, J., Szucs, E., Sule, B., Timko, M., Gyarmati, A., Weber, Z., Westergom, V., Zlebcikova, H., & AlpArray-PACASE Working Group. (2024). The Pannonian-Carpathian-Alpine seismic experiment (PACASE): network description and implementation. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 59, 249–270. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00439-w>
- Stiernström, V., Almquist, M., & Dunham, E. M. (2024). Adjoint-based inversion for stress and frictional parameters in earthquake modeling. *Journal of Computational Physics*, 519, 113447.
- Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89–93.
- Vavryčuk, V., & Kuhn, D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two-step time-frequency approach. *Geophysical Journal International*, 190(3), 1761–1776. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05592.x>

Отримано редакцію журналу / Received: 10.04.25

Прорецензовано / Revised: 21.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Dmytro MALYTSKYI¹, DSc. (Phys.-Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-9156-739x

e-mail: dmalytskyi@gmail.com

Oleksandra ASTASHKINA¹, PhD (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0009-0004-2065-4236

e-mail: sac1@ukr.net

Ruslan PAK¹, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0001-8781-4688

Andriy GNYP¹, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0002-2612-4234

e-mail: agnyp.gm@gmail.com

Markiyan DOBUSHOVSKYY¹, PhD (Phys.-Math.), Junior Researcher

ORCID ID: 0009-0004-4358-2298

e-mail: mdobush13@gmail.com

Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

DETERMINATION OF EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS BASED ON DATA FROM A LIMITED NUMBER OF SEISMIC STATIONS

Background. This paper presents a method for determining the seismic moment tensor using only direct P- and S-waves, which are less sensitive to modeling effects of wave propagation than reflected and refracted waves, significantly improving the accuracy and reliability of the method. The earthquake source is considered as a point source with a known location and origin time.

Methods. Wave propagation in a medium modeled as a set of horizontally homogeneous elastic layers is calculated using the matrix method, which allows isolating only direct waves. Based on the forward problem and the solution of the generalized inversion, an inversion algorithm for observed waveforms to determine the components of the seismic moment tensor $M(t)$ is presented. The analysis is conducted based on records of the earthquake that occurred on February 22, 2024, in Eastern Slovakia, using data from only two seismic stations of the Slovak network: sk19 (49.25°N, 21.93°E) and sk20 (49.21°N, 21.61°E).

Results. To verify the reliability of the obtained earthquake source parameters, a comparative analysis was conducted between synthetic seismograms, calculated using the wavefield modeling methodology based on the matrix method, and observed records of direct P- and S-waves at station sk19. A correlation analysis of direct P- and S-waves for observed and synthetic seismograms was performed. The results of the analysis demonstrated a high reliability of the determined seismic moment tensor for the February 22, 2024 earthquake (Eastern Slovakia), obtained through inversion using only direct waves.

Conclusions. The use of a point source represented by a seismic moment tensor, placed within a horizontally stratified half-space, is an effective approach for determining earthquake focal mechanisms. The study results confirm the feasibility of using only direct P- and S-waves for determining the seismic moment tensor, which enhances computational accuracy and reduces the impact of modeling effects on wave propagation.

Keywords: seismic moment tensor, focal mechanism, matrix method, synthetic seismograms, correlation analysis.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.