

УДК 550.34

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.103.06>

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

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

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

Наталя ЗАБРОДСЬКА¹, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.

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

Василь ІГНАТИШИН^{1,2}, канд. фіз.-мат. наук
ORCID ID: 0000-0003-0727-2132

Віталій ФУРМАН^{1,3}, канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-4009-0923
e-mail: vitaliy.furman@lnu.edu.ua

Валерій НІКУЛІН^{1,4}, д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0003-4489-8708
e-mail: seismolat@gmail.com

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

²Закарпатський угорський інститут ім. Ф. Ракоці II, Берегове, Україна,

³Львівський національний університет ім. Івана Франка, Львів, Україна

⁴Латвійський центр навколишнього середовища, геології та метеорології, Рига, Латвія

ФОКАЛЬНІ МЕХАНІЗМИ СЕЙСМІЧНИХ ПОДІЙ НА МАРСІ

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

Згідно з даними, отриманими під час місії NASA InSight, Марс є сейсмічно активною планетою. У цій роботі ми зосередилися на двох подіях – S0235b та S1222a, друга з яких (4 травня 2022 р., Mw~4,7) є найсильнішою зі всіх зареєстрованих ширококутковою сейсмічною станцією ELYSE, єдиною на Марсі. Епіцентральною відстанню S1222a становила 37,2°. Фокальні механізми цих подій ми визначаємо, використовуючи метод, оснований на моделі точкового вогнища у пружному горизонтально-шаровому середовищі. З метою визначення тензора сейсмічного моменту здійснюється інверсія високочастотних сейсмограм, обчислених матричним методом для прямих хвиль. Процес включає перетворення до переміщень у часовій області після інтегрування по частоті та хвильовому числу. Використання у запропонованому методі лише прямих P- і S-хвиль, менш чутливих до ефектів поширення, ніж відбиті та конвертовані, значно підвищує його точність і надійність. Для події S1222a продемонстровано відповідність синтетичних форм прямих хвиль спостереженням. Наведено також порівняльний аналіз фокальних механізмів події S0235b, отриманих шляхом інверсії лише прямих хвиль та шляхом повної прямої інверсії.

Ключові слова: марсотрус, фокальні механізми, пряма задача, тензор сейсмічного моменту, прямі P- і S-хвилі.

Вступ

Дані, зареєстровані сейсмічною станцією ELYSE (Lognonné et al., 2019, 2020), доставленою на Марс космічним апаратом у рамках місії InSight 26 листопада 2018 р. (Banerdt et al., 2020), свідчать про те, що планета є сейсмічно активною, з більш ніж 1300 марсотрусами, виявленими та каталогізованими Службою марсотрусів InSight (MQS) (Giardini et al., 2020; Clinton et al., 2020; Ceylan et al., 2022). Аналіз сейсмічної активності на Марсі свідчить про те, що вона зумовлена подіями з переважно дуже низькою магнітудою (максимум до 2) (Banerdt et al., 2020). Однак 4 травня 2022 р. станція ELYSE зареєструвала подію, яка виявилася набагато сильнішою за всі, що відбувалися раніше, протягом більш ніж трьох років неперервних спостережень. Марсотрус з магнітудою Mw 4,7 стався на 1222-й марсіанський день, або сол, місії (Kawamura et al., 2022). Зважаючи на це, особливо актуальним постало завдання визначення параметрів вогнища марсотрусу за даними лише однієї сейсмічної станції.

Основним засобом кількісної характеристики вогнищ сейсмічних подій є тензор сейсмічного моменту (СМ). Визначення параметрів СМ здійснюють, зокрема,

шляхом інверсії (обернення) повних хвильових форм, що є підходом, який широко використовують і який придатний як до великих, так і до малих землетрусів. Точність і надійність інверсій з метою визначення СМ залежить від виконання двох основних припущень. По-перше, про те, що точкова модель вогнища за даних умов прийнята (адекватна), і, по-друге, що вплив середовища між вогнищем і станцією на сейсмічні хвилі моделюється достатньо точно. Якщо хоч одне з цих припущень неправильне, отриманий СМ може містити значну компоненту, що не є подвійною парою. Тут слід відзначити, що ми розглядаємо дислокаційну модель вогнища, у якій подвійна пара (double couple) є визначальною у механізмі вогнища. Для забезпечення адекватності точкової моделі вогнища у запропонованому нами методі визначення СМ використовуються лише хвилі з довжинами, що перевищують розміри площини розриву. Друге ж припущення передбачає наявність відповіді на питання про точність параметрів середовища між вогнищем і приймачем, за якими обчислюють функції Гріна, які далі використовують в інверсії. Перше дослідження з метою визначення фокальних

© Малицький Дмитро, Гнип Андрій, Асташкіна Олександра, Забродська Наталя, Пак Руслан, Ігнатишин Василь, Фурман Віталій, Нікулін Валерій, 2023

механізмів зареєстрованих на Марсі подій, представлено в роботі Брінкмана (Brinkman et al., 2021). Її автори, зокрема, роблять висновок, що використана у роботі швидкісна модель середовища Марса, достатньо адекватно відображає процес поширення сейсмічних хвиль між станцією та вогнищами. (Jacob et al., 2022) розробили метод визначення тензора СМ та застосували його до дев'яти тектонічних землетрусів. З цією метою було здійснено інверсію форм P - і S -хвиль, а також амплітуд вторинних фаз (PP , SS , PPP і SSS).

Далі наведемо основні результати моделювання поширення хвильового поля у шаруватому півпросторі з використанням матричного методу Томсона–Хаскелла та розглянемо можливість розв'язання оберненої задачі щодо вогнищ подій на Марсі з використанням лише прямих P - і S -хвиль (Малицький, 2016). Отже, розроблені теоретичні основи використаємо для визначення механізмів вогнищ марсотрусів й оцінимо їхню перспективність і щодо інших сейсмологічних задач.

Теорія. Спочатку розглядаємо поширення сейсмічних хвиль у вертикально неоднорідних середовищах і представляємо запропоновану нами версію матричного методу обчислення синтетичних сейсмограм на вільній поверхні горизонтально-шаруватого ізотропного середовища (пряма задача). Точкове джерело розташоване всередині одного шару і представлене тензором СМ. Для визначення тензора СМ ми пропонуємо інвертувати лише прямі хвилі замість повного поля. Перевага такого підходу полягає в тому, що порівняно з відбитими та розсіяними хвилями прямі P - і S -хвилі зазнають значно меншого впливу середовища між вогнищем і станцією і, відповідно, менше залежать від неточності моделі, використаної в інверсії. Перевага ж нашої версії матричного методу полягає саме у можливості аналітичного виділення з повного хвильового поля лише прямих хвиль (Малицький, 2016). Якщо і час у вогнищі відомий заздалегідь, обернена задача зводиться до обчислення за спостереженими хвильовими формами компонент тензора СМ. Із цією метою ми використовуємо розв'язок узагальненого обернення (Aki, & Richards, 1980).

У попередній версії нашого методу – як і в більшості інших методів визначення тензора СМ – здійснювалася одночасна інверсія хвильових форм на кількох сейсмічних станціях (Malyskyu, & D'Amico, 2015; Малицький, 2016). Хоч набагато більше інформації про вогнище і міститься у хвилях, зареєстрованих на кількох станціях, нами доведено, що запропонований нами метод може бути придатний й у випадку лише однієї.

Таким чином, на основі матричного методу Томсона і Хаскелла (Aki, & Richards, 1980) запропоновано новий аналітичний метод (Малицький, 2016) обчислення сейсмічного хвильового поля у шаруватих середовищах (пряма задача) і підхід до визначення тензора СМ, а отже й фокального механізму і часової функції у вогнищі (STF) (обернена задача).

Пряма задача. Розглядаємо поширення сейсмічних хвиль у вертикально неоднорідному середовищі, яке моделюємо системою однорідних ізотропних n шарів на $(n+1)$ півпросторі. Вважаємо, що границі між шарами горизонтальні і на кожній із них чинна умова ідеального контакту. Нашою первинною метою є обчислення хвильового поля на вільній поверхні шаруватого середовища, коли на глибині H_s в однорідному шарі діє точкове джерело, представлене тензором сейсмічного моменту. Вогнище землетрусу розташоване на довільній уявній границі і може бути представлене довільно-орієнтованою силою або дев'ятьма парами сил (тензором СМ). У сучасній

сейсмології таке представлення вогнища використовується найчастіше, а його опис тензором СМ є найефективнішим, оскільки дислокаційна модель вогнища описується площиною розриву, орієнтація у просторі якої визначається трьома кутами (рис. 1), і скалярним сейсмічним моментом M_0 , який визначає енергію землетрусу. Важливий аспект запропонованої нами версії матричного методу полягає в тому, що в ній із застосуванням розв'язку задачі на власні вектори і власні значення запропоновано спосіб аналітичного виділення з повного поля лише прямих P - і S -хвиль, що дає змогу звести пряму задачу до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, в обчисленні розв'язку якої і полягає обернена.

Хоч і точкове у просторі, вогнище може бути розподілене в часі. Автори цієї статті доволі багато уваги зосереджували у попередніх роботах на саме такій моделі вогнища (Малицький, 2016). Отже, постановка прямої задачі полягає у визначенні хвильового поля на вільній поверхні шаруватого півпростору, коли вогнище землетрусу представлене як точкове у просторі, але розподілене в часі. Тоді кожна компонента тензора СМ є функцією часу, тобто згортокою сейсмічного тензора і так званої часової функції вогнища $STF(t)$.

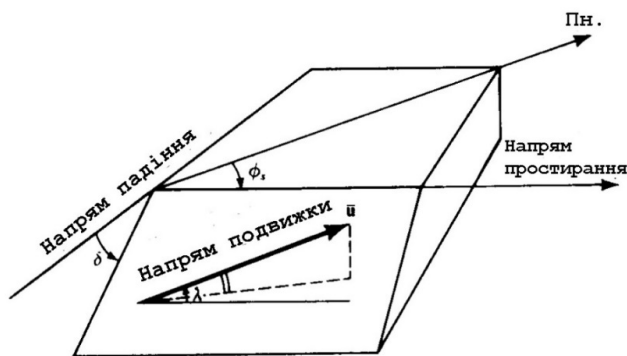


Рис. 1. Дислокаційна модель вогнища землетрусу

У роботах (Malyskyu, & D'Amico, 2015; Малицький, 2016) у циліндричній системі координат отримано такі вирази для поля переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору, зумовленого точковим вогнищем, представленим тензором сейсмічного СМ:

$$\begin{pmatrix} u_z^{(0)} \\ u_r^{(0)} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^3 \int_0^\infty k^2 I_i L^{-1} [m_i g_i] dk, \\ u_\phi^{(0)} = \sum_{i=5}^6 \int_0^\infty k^2 J_i L^{-1} [m_i g_{\phi i}] dk, \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} m_1 &= M_{xz} \cos \phi + M_{yz} \sin \phi, \quad m_2 = M_{zz}, \\ m_3 &= \cos^2 \phi \cdot M_{xx} + \sin^2 \phi \cdot M_{yy} + \sin 2\phi \cdot M_{xy}, \\ m_4 &= -\cos 2\phi \cdot M_{xx} + \cos 2\phi \cdot M_{yy} - 2 \sin 2\phi \cdot M_{xy}, \\ m_5 &= M_{yz} \cos \phi - M_{xz} \sin \phi, \\ m_6 &= \sin 2\phi \cdot M_{xx} - \sin 2\phi \cdot M_{yy} - 2 \cos 2\phi \cdot M_{xy}, \end{aligned}$$

$M_{xx}, M_{xy}, \dots, M_{zz}$ – компоненти тензора сейсмічного моменту в декартовій системі координат, ϕ – азимут станції відносно епіцентру землетрусу (рис. 2), k – хвильове число, функції $g_i = (g_{zi}, g_{\phi i})^T$ та $g_{\phi i}$ містять ефекти поширення хвиль між вогнищем і станцією, $I_1 = \begin{pmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_0 \end{pmatrix}$, $I_2 = \begin{pmatrix} J_0 & 0 \\ 0 & J_1 \end{pmatrix}$, $I_3 = I_2$, $I_5 = J_0$, $I_6 = J_1$ – функції Бесселя, L^{-1} – обернене перетворення Фур'є.

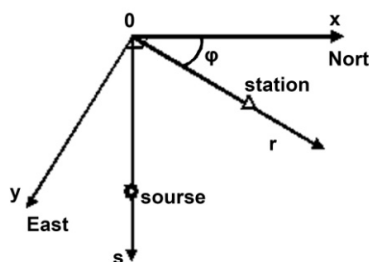


Рис. 2. Вогнище і станція в декартовій і циліндричній системі координат

Обернена задача. У роботі (Малицький, 2016) із застосуванням розв'язку задачі на власні значення та власні вектори запропоновано спосіб аналітичного виділення лише прямих P - і S -хвиль із повного хвильового поля (1), що дозволяє звести (1) до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. У декартовій системі координат й у ділянці частот і хвильових чисел вона має такий вигляд:

$$U^{(0)} = K \cdot M, \quad (2)$$

де вектор $U^{(0)} = (U_x^{(0)P}, U_x^{(0)S}, U_y^{(0)P}, U_y^{(0)S}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S})^T$ містить шість компонент переміщень у прямих P - і S -хвилях, вектор $M = (M_{xz}, M_{yz}, M_{zz}, M_{xx}, M_{yy}, M_{xy})^T$ містить шість компонент СМ, матриця K містить параметри швидкісної моделі.

Використовуючи розв'язок узагальненого обернення (Aki, & Richards, 1980), отримуємо вираз для тензора СМ у матричному вигляді:

$$M = (\tilde{K}^* \cdot K)^{-1} \tilde{K}^* U^{(0)}. \quad (3)$$

Розв'язок (3) для тензора M називають розв'язком узагальненого обернення за критерієм мінімального-квадратичного. Тензор сейсмічного моменту $M(\omega)$, обчислений за рівнянням (3) у ділянці частот, може бути перетворений в $M(t)$ у часовій з використанням оберненого перетворення Фур'є і виглядає так:

$$M_{ij}(t) = M_{ij} \cdot STF(t), \quad (4)$$

де M_{ij} – тензор сейсмічного моменту, а $STF(t)$ – часова функція вогнища.

Утім, у роботі (Vavryšuk, & Kuhn, 2012) продемонстровано, що в частотному діапазоні лише прямих хвиль припущення про незалежний від часу фокальний механізм є доволі точним наближенням.

Слід зазначити, що розв'язок (3) отримано з використанням переміщень лише на одній станції. Адже оскільки усі шість незалежних компонент тензора СМ містяться у виразах для прямих P - і S -хвиль на лише на одній станції, з перевизначеної системи рівнянь (2) схема інверсії (3) дозволяє, принаймні теоретично, отримати унікальний розв'язок для кожного з них. У межах припущення про адекватність точкової моделі вогнища й моделювання ефектів поширення хвиль у середовищі розв'язок (3) є точним і досягається після однієї ітерації. Обернена задача, таким чином, полягає в обчисленні параметрів

вогнища за умови, що відомі його координати і час, а також розподіл швидкостей хвиль між вогнищем і станцією (швидкісна модель).

Фокальні механізми подій S0235b та S01222a (рис. 3). Спочатку розглянемо визначення фокального механізму події S0235b, яка сталася 26 липня 2019 р. на відстані 25° від станції (Brinkman et al., 2021).

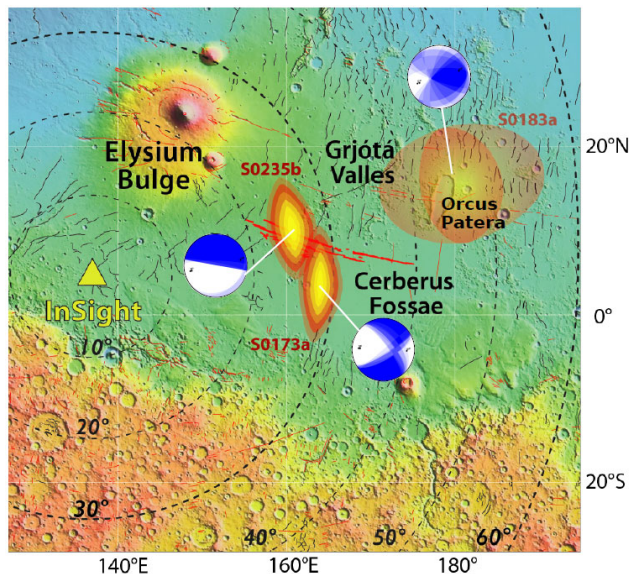


Рис. 3. Орбітальний рельєф Марса у ділянці площини Elysium Planitia (Giardini et al., 2020).

Сейсмічну станцію ELYSE зображено жовтим трикутником.

Еліпсоїди довкола епіцентрів сейсмічних подій:

S0235b (широта – 11°, довгота – 161°), S0173a (широта – 3°, довгота – 165°) і S0183a (широта – 23°, довгота – 177°) враховують ступінь неточності координат. Версії фокальних механізмів наведено за даними (Brinkman et al., 2021)

Для порівняння наведемо версії механізму, обчислені двома методами. У першому для інверсії використано лише прямі хвилі (Малицький, 2016). У другому здійснюється пряма інверсія повного хвильового поля (Brinkman et al., 2021). Розглянуто три варіанти глибини вогнища: 17, 32 і 56 км. Для обчислення СМ обома методами було використано швидкісну модель TAYAK (табл. 1).

Версії фокального механізму за глибини вогнища 32 км, зображені на рис. 4, виявилися дуже схожі між собою.

Версії механізмів для глибин вогнища 17 і 56 км теж були дуже схожі.

Далі наведемо результати визначення механізму найбільшої за час спостережень події S1222a (2022-05-04, вступ P -хвилі: 23:27:45, 3:54 LMST, Mw 4,7, зворотний азимут 109° (Kawamura et al., 2022)), що сталася на відстані 37,2° від станції ELYSE. На рис. 5 наведено записи цієї події у переміщеннях, профільовані у межах смуги пропускання від 0,2 до 9,0 Гц.

Таблиця 1

Параметри швидкісної моделі TAYAK (Brinkman et al., 2021)

Товщина шару [км]	Швидкість V_p [км/с]	Швидкість V_s [км/с]	Густина ρ [кг/м³]
10	3.800	1.850	2304
14	4.500	2.800	2570
24	6.224	3.753	2863

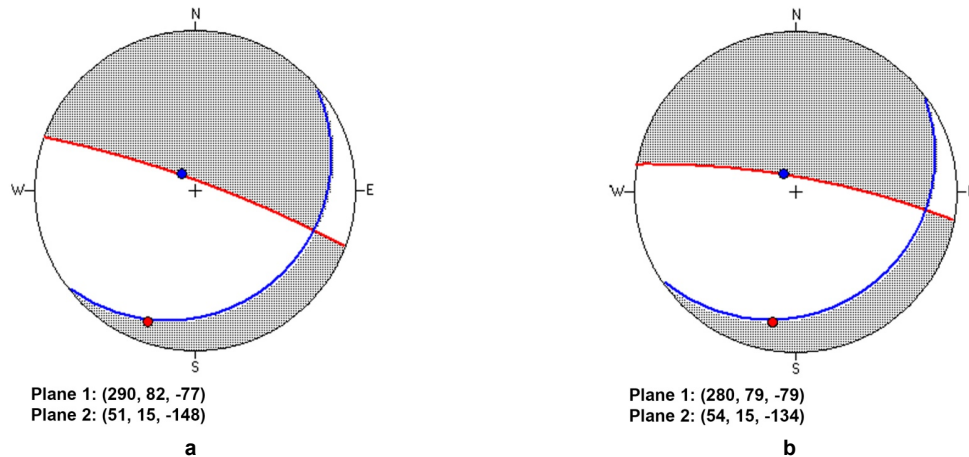


Рис. 4. Версії фокального механізму події S0235b, отримані шляхом інверсії лише прямих хвиль (Малицький, 2016) (а) та шляхом прямої повної інверсії хвильового поля (Brinkman et al., 2021) (b), за глибини вогнища 32 км

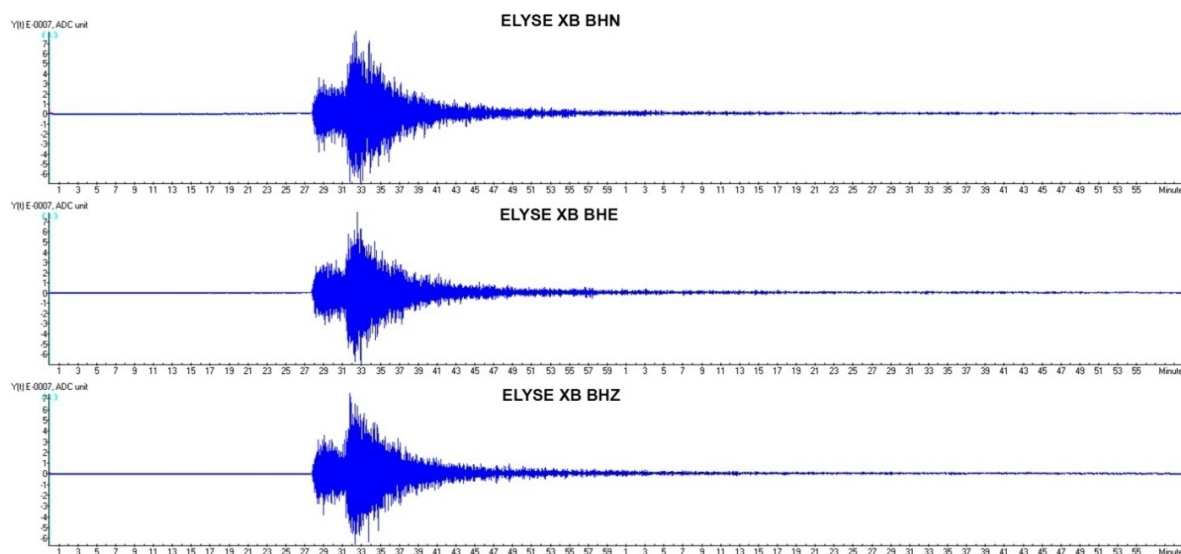


Рис. 5. Записи сейсмічної події S1222a на станції ELYSE у переміщеннях, профільовані у межах смуги пропускання від 0,2 до 9,0 Гц

Тривалість відрізків записів, що відповідають лише прямим P - і S -хвилям, ми оцінювали візуально і з урахуванням затримки вступів фаз за відповідної епіцентральної відстані та глибини вогнища. Для події S1222a на станції ELYSE вона могла змінюватися в інтервалі між 1,1 і 4,5 с для P -хвилі, і від 1,4 до 3 с для S -хвилі.

На рис. 6. зображено версію фокального механізму події S1222a, обчислену з використанням лише прямих P - і S -хвиль.

На рис. 7 для порівняння наводимо синтетичні й спостережені форми сигналу у ділянці лише прямих хвиль. Компоненти синтетичних сигналів E , N та Z у переміщеннях було обчислено для версії тензора моменту, отриманого шляхом інверсії лише прямих P - і S -хвиль за глибини вогнища 22 км, з використанням модифікованої швидкісної моделі TAYAK та алгоритму Instaseis (van Driel et al., 2015), який дає змогу швидко отримувати за-здалегідь обчислені з використанням програми AxiSEM (Nissen-Meyer et al., 2014) функції Гріна. Перед порівнюванням синтетичні й спостережені форми сигналу перетворюємо до радіальної (R), тангенціальної (T) і вертикальної (Z) компонент і фільтруємо у межах смуги пропускання з періодами від 3 до 12 с. Для кожної з фаз візуально обираємо вікна, у яких порівнюватимемо

форми сигналу. Вертикальну і радіальну складові P -хвилі порівнюємо у вікні, що починається за 2,5 с до та закінчується через 17,5 с після її вступу (P_z , P_R). Радіальну і тангенціальну складові S -хвилі порівнюємо у вікні, що починається за 12,5 с до та 17,5 с до її вступу (S_R , S_T).

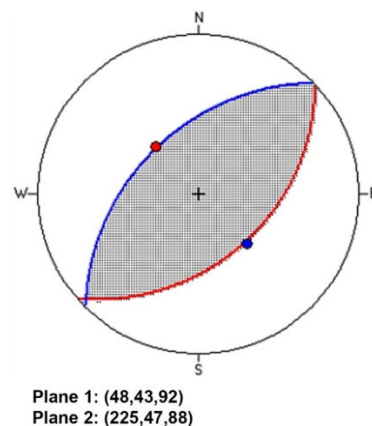


Рис. 6. Версія фокального механізму події S1222a, отримана шляхом інверсії хвильових форм лише прямих P - і S -хвиль

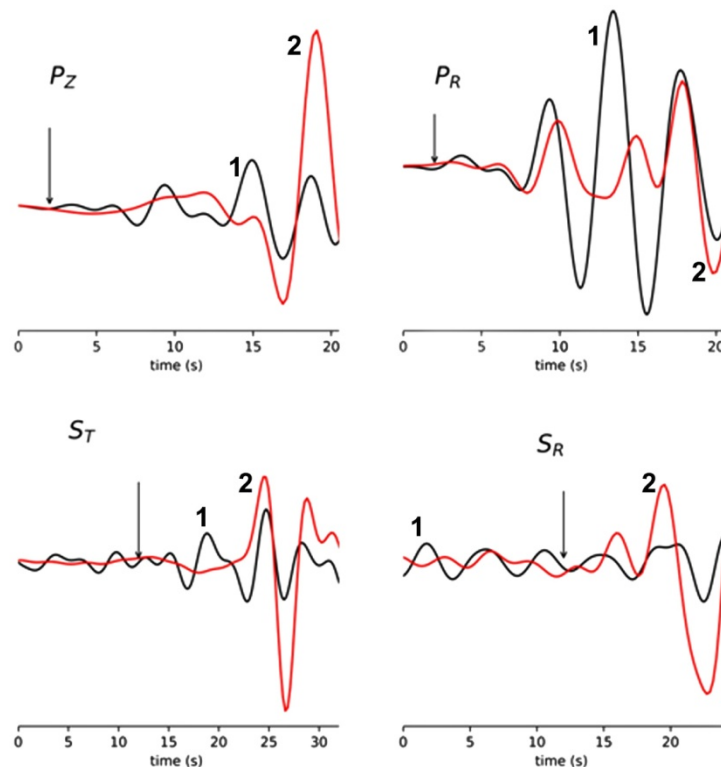


Рис. 7. Синтетичні та спостережені записи об'ємних P - і S -хвиль для події S1222a у переміщеннях
Синтетичний запис, що відповідає глибини вогнища 22 км, обчислено з використанням моделі TAYAK (табл. 1).
Записи профільовано у межах смуги пропускання з періодами від 3 до 12 с.
Спостережені сигнали зображено чорною лінією (1), а синтетичні – червоною (2)

Обговорення та висновки. У представлений статті ми вперше дослідили можливість визначення фокальних механізмів для двох подій на Марсі (S0235b та S01222a) з використанням тільки прямих P - та S -хвиль на одній станції. Теоретично показано, що переміщення в кожній точці на вільній поверхні горизонтально шаруватого й ідеально пружного напівпростору, у випадку точкового джерела, представленого змінним у часі симетричним тензором моменту, залежать від усіх шести його компонент і можуть бути обчислені шляхом узагальненого обернення. Обрання замість повного поля лише прямих P - і S -хвиль, обчислених матричним методом, дає змогу зменшити вплив неточності моделі середовища, оскільки відбиті та конвертовані фази значно більше спотворюються нею. Отже, ми представили метод отримання інверсії тензора моменту прямих P - і S -сигналів, зареєстрованих лише на одній станції. Метод базується на інверсійному підході, описаному Д. Малицьким (2016), де представлено версію матричного методу для розрахунку прямих P - та S -хвиль у горизонтально-шаруватому півпросторі від точкового джерела, представленого тензором моменту CM. Порівняльний аналіз синтетичних сейсмограм та спостережуваних записів (рис. 7) показав достатньо високий відсоток кореляції для прямих хвиль. Отже, представлений метод можна використовувати для визначення фокальних механізмів для подій на Марсі, що буде продовжено та показано у наступних роботах.

Список використаних джерел

- Малицький, Д. (2016). *Математичне моделювання в задачах сейсмології*. Наукова думка.
Aki, K., & Richards, P.G. (2002). *Quantitative seismology*. University Science Books.

- Banerdt, W.B., Smrekar, S., Banfield, D., Giardini, D., Golombek, M.P., Johnson, C., et al. (2020). Initial results from the insight mission on Mars. *Nature Geoscience*, 13 (3), 183–189. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0544-y>
Brinkman, N., Stähler, S.C., Giardini, D., Schmelzbach, C., Khan, A., Jacob, A., et al. (2021). First focal mechanisms of marsquakes. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(4), e2020JE006546. <https://doi.org/10.1029/2020JE006546>
Ceylan, S., Clinton, J., Giardini, D., Stähler, S.C., Horleston, A., Kawamura, T. et al. (2022). The marsquake catalogue from InSight, sols 0-1011. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 333, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106943>
Clinton, J., Ceylan, S., van Driel, M., Giardini, D., Stähler, S.C., Bose, M. et al. (2020). The Marsquake catalogue from InSight, sols 0-478. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 310, 106595. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106595>
Giardini, D., Lognonné, P., Banerdt, W.B., Pike, W.T., Christensen, U., Ceylan, S. et al. (2020). The seismicity of Mars. *Nature Geoscience*, 13, 205–212. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0539-8>
Jacob, A., Plasman, M., Perrin, C., Fuji, N., Lognonné, P., Xu, Z. et al. (2022). Seismic sources of InSight marsquakes and seismotectonic context of Elysium Planitia, Mars. *Tectonophysics*, 837, 229434. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229434>
Kawamura, T., Clinton, J.F., Zenhausen, G., Ceylan, S., Horleston, A.C., Dahmen, N.L. (2022). S1222a- the largest Marsquake detected by InSight. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2022GL101543>
Lognonné, P., Banerdt, W., Pike, W.T., Giardini, D., Christensen, U., Garcia, R.F. et al. (2020). Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. *Nature Geoscience*, 13(3), 213–220. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0536-y>
Lognonné, P., Banerdt, W.B., Giardini, D., Pike, W.T., Christensen, U., Laudet, P. et al. (2019). SEIS: InSight's Seismic Experiment for Internal Structure of Mars. *Space Science Reviews*, 215(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6>
Malysky, D., D'Amico, S. (2015). Moment tensor solutions through waveforms inversion, *Mistral Service S.a.S., Earth and Environmental Sciences*.
Nissen-Meyer, T., van Driel, M., Stähler, S. C., Hosseini, K., Hempel, S., Auer, L. et al. (2014). AxiSEM: broadband 3-D seismic wavefields in axisymmetric media. *Solid Earth*, 5(1), 425–445.
van Driel, M., Krischer, L., Stähler, S. C., Hosseini, K., & Nissen-Meyer, T. (2015). Instanteis: Instant global seismograms based on a broadband waveform database. *Solid Earth*, 6(2), 701–717.
Vavryčuk, V., & Kuhn, D. (2012). Moment tensor in version 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.
- Banerdt, W.B., Smrekar, S., Banfield, D., Giardini, D., Golombek, M.P., Johnson, C., et al. (2020). Initial results from the insight mission on Mars. *Nature Geoscience*, 13 (3), 183–189. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0544-y>
- Brinkman, N., Stähler, S.C., Giardini, D., Schmelzbach, C., Khan, A., Jacob, A., et al. (2021). First focal mechanisms of marsquakes. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(4), e2020JE006546. <https://doi.org/10.1029/2020JE006546>
- Ceylan, S., Clinton, J., Giardini, D., Stähler, S.C., Horleston, A., Kawamura, T. et al. (2022). The marsquake catalogue from InSight, sols 0–1011. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 333, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106943>
- Clinton, J., Ceylan, S., van Driel, M., Giardini, D., Stähler, S.C., Bose, M. et al. (2020). The Marsquake catalogue from InSight, sols 0–478. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 310, 106595. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106595>
- Giardini, D., Lognonné, P., Banerdt, W.B., Pike, W.T., Christensen, U., Ceylan, S. et al. (2020). The seismicity of Mars. *Nature Geoscience*, 13, 205–212. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0539-8>
- Jacob, A., Plasman, M., Perrin, C., Fuji, N., Lognonné, P., Xu, Z. et al. (2022). Seismic sources of InSight marsquakes and seismotectonic context of Elysium Planitia, Mars. *Tectonophysics*, 837, 229434. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229434>
- Kawamura, T., Clinton, J.F., Zenhausen, G., Ceylan, S., Horleston, A.C., Dahmen, N.L. (2022). S1222a- the largest Marsquake detected by InSight. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2022GL101543>.
- Lognonné, P., Banerdt, W., Pike, W.T., Giardini, D., Christensen, U., Garcia, R.F. et al. (2020). Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data. *Nature Geoscience*, 13(3), 213–220. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0536-y>
- Lognonné, P., Banerdt, W.B., Giardini, D., Pike, W.T., Christensen, U., Laudet, P. et al. (2019). SEIS: InSight's Seismic Experiment for Internal Structure of Mars. *Space Science Reviews*, 215(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6>
- Malytskyy, D. (2016). *Mathematical modeling in the tasks of seismology*. Naukova dumka [in Ukrainian].
- Malytskyy, D., D'Amico, S. (2015). Moment tensor solutions through waveforms inversion, *Mistral Service S.a.S., Earth and Environmental Sciences*.
- Nissen-Meyer, T., van Driel, M., Stähler, S. C., Hosseini, K., Hempel, S., Auer, L. et al. (2014). AxiSEM: broadband 3-D seismic wavefields in axisymmetric media. *Solid Earth*, 5(1), 425–445.
- van Driel, M., Krischer, L., Stähler, S. C., Hosseini, K., & Nissen-Meyer, T. (2015). Instaseis: Instant global seismograms based on a broadband waveform database. *Solid Earth*, 6(2), 701–717.
- Vavryčuk, V., & Kuhn, D. (2012). Moment tensor in version 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 редакцією журналу / Received: 17.05.23
Прорецензовано / Revised: 27.09.23
Схвалено до друку / Accepted: 18.10.23

Dmytro MALYTSKYI¹, DSc (Phys.-Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-9156-739x
e-mail: dmalytskyy@gmail.com

Andriy GNYP¹, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-2612-4234
e-mail: agnyp.gm@gmail.com

Oleksandra ASTASHKINA¹, PhD (Geol.), Researcher
ORCID ID: 0009-0004-2065-4236
e-mail: sac1@ukr.net;

Natalia ZABRODSKA¹, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher

Ruslan PAK¹, PhD (Phys.-Math.), Researcher
ORCID ID: 0000-0001-8781-4688

Vasil IGNATYSHYN², PhD (Phys.-Math.)
ORCID ID: 0000-0003-0727-2132

Vitaliy FURMAN³, PhD (Phys.-Math.)
ORCID ID: 0000-0002-4009-0923

Valery NIKULIN⁴, DSc (Geol.)
ORCID ID: 0000-0003-4489-8708

¹Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

²Ferenc Rákóczi II. Transcarpathian Hungarian Institute, Ukraine

³Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

⁴Latvian Environment, Geology and Meteorology Center, Riga, Latvia

FOCAL MECHANISMS OF SEISMIC EVENTS ON MARS

According to data obtained by NASA's InSight mission, Mars appears to be a seismically active planet. In this paper, we focus on two events – S0235b and S1222a, the second of which (May 4, 2022, Mw~4.7) is the strongest of all recorded by the broadband seismic station ELYSE, the only one on Mars. Epicentral distance of S1222a was 37.2°. We determine the focal mechanisms of events using the method based on the model of a point source in an elastic horizontally layered medium. Seismic moment tensor is determined by inversion of high-frequency seismograms calculated by the matrix method for direct waves. The process involves conversion into displacements in the time domain after integration over frequency and wavenumber. The use of only direct P- and S-waves, which are less sensitive to propagation effects than reflected and converted ones, significantly improves accuracy and reliability of the proposed method. For the event S1222a, the match of the synthetic forms of direct waves to the observed ones is demonstrated. A comparative analysis of the focal mechanisms obtained for the S0235b event by inversion of only direct waves and by full direct inversion is also presented.

Keywords: Marsquake, focal mechanisms, direct problem, seismic moment tensor.

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; in the decision to publish the results.