УДК 550.34.01

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.05>Д. Малицький¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.,E-mail: dmalytskyu@gmail.com,В. Нікулін^{1,2}, д-р геол. наук,E-mail: valerijs.nikulins@lvgtmc.lv,¹Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
вул. Наукова, 3-б, м. Львів, 79060, Україна;²Латвійський центр навколишнього середовища, геології та метеорології,
м. Рига, LV-1091, Латвія

МЕХАНІЗМ ВОГНИЩА ЛИТОВСЬКОГО ЗЕМЛЕТРУСУ НА ОСНОВІ ІНВЕРСІЇ ХВИЛЬОВИХ ФОРМ

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

Мета: Визначення механізму вогнища Литовського землетрусу (12.06.15, $M_L = 2,6$) методом інверсії хвильових форм із використанням прямих хвиль і за даними обмеженої кількості станцій.**Методика:** Матричний метод використано для моделювання поширення сейсмічних хвиль у неоднорідному середовищі, який подано у вигляді горизонтально-шаруватої пружної структури. Отримані співвідношення для полів переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору використано для визначення тензора сейсмічного моменту шляхом виділення тільки прямих Р- та S-хвиль. На основі розробленої методики для точкового джерела подається визначення сейсмічного тензора і, відповідно, механізму вогнища землетрусу. Таким чином, цей метод на основі розв'язання прямої задачі використано для інверсії спостережуваних сигналів для компонент тензора сейсмічного моменту.**Результати:** Подано розв'язання оберненої задачі щодо визначення механізму вогнища Литовського землетрусу (12.06.15, $M_L = 2,6$) методом інверсії хвильових форм у випадку обмеженої кількості станцій. Фокальний механізм визначено за даними двох станцій – PABE, SLIT і за даними трьох станцій – PABE, MTSE, SLIT, які належать до Балтійської віртуальної сейсмологічної мережі BAVSEN (Baltic Virtual Seismic Network).**Наукова новизна та практична значимість:** Запропоновано використання методу інверсії хвильових форм для визначення механізмів вогнищ для подій, які відбуваються в регіонах з малою сейсмічністю, яким є Східно-Балтійський регіон. Запропоновано методику для визначення механізмів вогнищ за даними обмеженої кількості сейсмічних станцій. Визначений у роботі механізм вогнища Литовського землетрусу 12.06.15 може бути використаний для вивчення, дослідження та ідентифікації відносно слабких сейсмічних подій на основі даних малої кількості станцій.**Ключові слова:** матричний метод, метод інверсії хвильових форм, механізм вогнища землетрусу, тензор сейсмічного моменту, прямі Р- та S-хвилі.

Вступ. Визначення фокальних механізмів землетрусів є однією з найактуальніших проблем для місцевих сейсмологічних досліджень. За умов низької сейсмічної активності та недостатньої кількості місцевих сейсмічних станцій виникає необхідність розробляти нові альтернативні методи для розв'язання оберненої задачі щодо вогнища землетрусу та вдосконалювати існуючі. Найчастіше використовується підхід, в якому нодальні площини зображуються на нижній півкулі стереографічної сітки відповідно до полярності перших вступів Р-хвиль на станціях та їхнього розміщення в проєкціях залежно від азимута станції й кута виходу променя Р-хвилі та його полярності. Проте досить часто не вистачає наведеної вище інформації для визначення механізму вогнища. Тому слід використовувати інші методи для визначення параметрів джерела, що показано в даній роботі.

Основою кількісної характеристики вогнища землетрусу є тензор сейсмічного моменту, який визначають за допомогою різних методів: з використанням амплітуд сейсмічних хвиль (Vavrychuk and Kuhn, 2012; Godano et al., 2011), співвідношення амплітуд S/P (Miller et al., 1998; Hardebeck and Shearer, 2003) і повних хвильових форм (Dziewonski et al., 1981; Sipkin, 1986; Kikuchi and Kanamori, 1991; Sileny et al., 1992; Malytskyu, 2010). Теорія поширення сейсмічних хвиль у шаруватому півпросторі, тобто в середовищі, пружні властивості якого залежать тільки від глибини, є основним предметом дослідження багатьох учених-сейсмологів. Використання горизонтально-шаруватої моделі Землі знаходить застосування в дослідженнях джерел землетрусів і структурних властивостей середовища. Найбільш важливі підходи для дослідження поширення сейсмічних хвиль, розв'язання прямих та обернених задач можна знайти в книгах і монографіях: рефлексивний метод (Aki and Richards, 1980; Ben-Menahem and

Singh, 1981; Kennet, 1972, 2002; Fuchs and Muller, 1971); узагальнений променевий метод (Wiggins and Helmberger, 1974); повна хвильова теорія (Cormier and Richards, 1977); WKBJ теорія (Chapman, 1987); матричний метод (Alekseev and Mikhailenko, 1980; Bouchon, 1981; Molotov, 1984, 2001; Малицький, 2010, 2016).

Авторами роботи використано матричний метод для моделювання поширення сейсмічних хвиль у шаруватому середовищі. Теоретичні результати для поля переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору використано для обчислення тензора сейсмічного моменту та для визначення фокального механізму.

Методи і матеріали. Східно-Балтійський регіон (СБР), до якого відносять Естонію, Латвію, Литву, Калінінградську область Росії, а також прилягаючу акваторію Балтійського моря ($\varphi = 53,9 - 59,7^\circ\text{N}$; $\lambda = 19,4 - 29,6^\circ\text{E}$), належить до територій з дуже малою сейсмічністю (Нікулін, 2020). Поштовхом для розвитку сейсмологічного моніторингу для даного регіону стали два Калінінградські землетруси 21 вересня 2004 р., які відбулися в часовому відрізку близько двох годин один від одного з $M_w = 5,0$ і $5,2$ (Gregersen et al., 2007). У результаті, на базі існуючих станцій, у 2008 р. було створено Балтійську віртуальну сейсмологічну мережу BAVSEN (Baltic Virtual Seismic Network) (рис. 1). BAVSEN є частиною міжнародної сейсмологічної мережі GEOFON з центром у GFZ Potsdam, а також включає деякі станції національних сейсмічних мереж Фінляндії, Естонії, Данії та Польщі.

Таким чином, для локалізації регіональних сейсмічних подій СБР головним чином використовуються сейсмічні станції Фінляндії (MEF, RAF), Естонії (VSU, MTSE, ARBE), Латвії (SLIT), Литви (PABE, PBUR), Польщі (SUW) і Данії (BSD). Основним об'єктом досліджень для сейсмологів, крім тектонічних землетрусів, є техногенна сейсмічність, яка переважає в СБР.

У результаті сейсмічного моніторингу СБР за період із 2008 по 2019 р. локалізовано вісім тектонічних землетрусів, в основному на території Естонії, і більш як 5640 техногенних сейсмічних подій. Загальна кількість сейсмічних подій, які локалізовано мережею BAVSEN, досягає 13328, включаючи 1146 телесеісмічних подій (Нікулін, 2020). Актуальність сейсмологічного моніторингу в регіоні зростає у зв'язку з несприятливими геодинамічними умовами в районі розміщення деяких великих енергетичних, транспортних об'єктів і агломерацій, що потребує вивчення сейсмічного режиму території навколо цих об'єктів. Основні проблеми

сейсмічного моніторингу СБР пов'язані з ідентифікацією відносно слабких сейсмічних подій невеликою кількістю сейсмічних станцій, несприятливими сейсмогеологічними умовами осадових порід і низькою активністю тектонічних землетрусів, які відбуваються в регіоні. Таким чином, відсутність перспективних методів розпізнавання генезису сейсмічних подій ставить дану проблему в ряд першочергових. У низці публікацій, як наприклад (Nikulins and Assinovskaya, 2018), припускається, що Литовський землетрус 12.06.15 ($M_L = 2,6$) слід віднести до техногенних сейсмічних подій.

Рис. 1. Балтійська віртуальна сейсмологічна мережа BAVSEN.

Позначення: 1 – сейсмічні станції; 2 – границя Східно-Балтійського регіону; 3 – Teisseyre-Tornquist зона

У даній роботі локалізація гіпоцентру землетрусу виконувалась з використанням програми локалізації SEISAN. Оскільки методика визначення фокального механізму методом інверсії хвильових форм передбачає, що швидкісна модель має бути відомою, то в даній роботі використано п'ятишарувату модель *baltic 08* (Nikulins, 2020). Автори даної статті на основі методу інверсії хвильових форм визначають фокальний механізм даного землетрусу, використовуючи записи на трьох сейсмічних станціях: PABE, MTSE, SLIP, які належать до Балтійської віртуальної сейсмологічної мережі BAVSEN.

Метод інверсії хвильових форм для визначення механізму вогнища землетрусу з використанням даних малої кількості станцій наведено в роботах (Малицький, 2010, 2016). Метою розробленого методу є визначення параметрів джерела, яке подано тензором сейсмічного моменту у випадку моделі точкового джерела. Вхідними даними є записи сейсмічних хвиль на станціях і так зване узагальнене точкове джерело, представлене симетричним тензором сейсмічного моменту. Поширення сейсмічних хвиль у шаруватому півпросторі від такого джерела приводить до визначення поля переміщень на вільній поверхні для дальньої та

ближньої зон (Malytskyy and Kozlovskyy, 2014). Використовуючи матричні співвідношення тільки для прямих Р- та S-хвиль (Малицький, 2010, 2016), визначено часову функцію тензора сейсмічного моменту $M_{lm}(t)$:

$$M_{lm}(t) = M_{lm} STF(t),$$

де $STF(t)$ – часова функція джерела.

На рис. 2 зображено локалізацію гіпоцентру Литовського землетрусу 12.06.15, а також основні тектонічні розломи, пов'язані з процесами, що відбуваються у вогнищі.

Для визначення фокального механізму авторами використано сейсмічні записи на трьох станціях, які приведено до переміщень. Як приклад сейсмограми в переміщеннях на станції PABE показано на рис. 3. У роботі дається визначення механізму вогнища з використанням даних на двох станціях PABE і SLIT і на трьох станціях PABE, SLIT та MTSE. Слід зазначити, що використання сейсмічних записів на інших станціях сейсмологічної мережі BAVSEN для визначення сейсмічного тензора для Литовського землетрусу 12.06.15 було неможливим через погану якість сейсмограм. Необхідні параметри, використані в роботі для визначення сейсмічного тензора, подано в табл. 1.

Рис. 2. Локалізація гіпоцентру Литовського землетрусу (12.06.15, $M_L = 2.6$):

- 1 – епіцентр землетрусу; 2 – еліпс помилок; 3 – розлом надрегіонального масштабу Клайпеда–Вільнюс; 4 – тектонічні розломи в кристалічному фундаменті; 5 – густина теплового потоку (mW/m^2); 6 – нафтові родовища; 7 – нафтові потенційні поля; 8 – механізм вогнища землетрусу за двома станціями; 9 – механізм вогнища землетрусу за трьома станціями. Позначення тектонічних розломів (у кружочках): 1 – Telsiai; 2 – Gargzdai; 3 – Endriejavas; 4 – South Silale; 5 – Lankupiai; 6 – Silute; 7 – North Nemunas; 8 – South Nemunas; 9 – Klaipeda–Vilnius suture (південна границя депресії в земній корі, на рівні Mocho)

Таблиця 1

Параметри сейсмічних станцій, які використано для визначення фокального механізму Литовського землетрусу (12.06.15, $M_L = 2.6$) методом інверсії хвильових форм

Станція	Широта °N	Довгота °E	Епіцентральна відстань, km	Азимут, град.
PABE	55,5052	23,9680	162	89
MTSE	58,7144	23,8146	385	21
SLIT	57,6287	22,2905	241	13

Рис. 3. Сейсмічні записи в переміщеннях на станції PABE для Литовського землетрусу 12.06.15

Механізм вогнища Литовського землетрусу 12.06.15. Відомо, що визначення механізмів вогнищ землетрусів стандартними методами, у тому числі за полярностями перших вступів Р-хвиль, потребує даних з великої кількості сейсмічних станцій, розміщених навколо епіцентру події. У випадку реєстрації землетрусу малою кількістю станцій потрібно використовувати інші методи. Такі випадки спостерігаються, коли подію зареєстрували декілька станцій, наприклад три-чотири, що часто спостерігається в регіонах з малою сейсмічністю, яким є СБР. Авторами запропоновано визначати механізм вогнищ, використовуючи сейсмічні записи на трьох станціях: PABE, MTSE, SLIT, які належать до Балтійської віртуальної сейсмологічної мережі BAVSEN. Отримавши розв'язок для сейсмічного тензора $M_{lm}(t)$ методом інверсії хвильових форм, використовуючи прямі хвилі (Малицький, 2010, 2016), визначено

механізм вогнища Литовського землетрусу (12.06.15, $M_L = 2,6$) (рис. 4). Глибина залягання джерела становить 0,9 км. Як було зазначено вище, деякі сейсмологи припускають, що дана сейсмічна подія є техногенною, це пов'язано з певними геологічними та геодинамічними умовами (Nikulins and Assinovskaya, 2018).

Таким чином, використовуючи методику визначення тензора сейсмічного моменту на основі інверсії хвильових форм для прямих Р- і S-хвиль (Малицький, 2010, 2016), визначено два види механізму вогнища землетрусу для даної події. Для визначення фокального механізму авторами використано сейсмічні записи (у переміщеннях) на двох станціях PABE і SLIT, а також на трьох станціях – PABE, SLIT, MTSE (рис. 4). Параметри двох видів вогнища Литовського землетрусу 12.06.15 згідно з рис. 4 подано в табл. 2, в якій $\varphi_s, \delta, \lambda$ – кути простирання, падіння, нахилу.

Рис. 4. Два види фокального механізму для Литовського землетрусу 12.06.15

($t_0 = 08:18:26.4$; $55,52^\circ \text{N}$, $21,40^\circ \text{E}$; $h_s = 0,9$ км; $M_L = 2,6$) на основі інверсії хвильових форм:

а – з використанням даних на станціях PABE і SLIT; б – з використанням даних на станціях PABE, SLIT і MTSE.

P – орієнтація максимального стиснення; T – орієнтація максимального розширення

Таблиця 2

Параметри фокального механізму для Литовського землетрусу 12.06.15
(час у вогнищі $t_0 = 08:18:26.4$; $55,52^\circ \text{N}$, $21,40^\circ \text{E}$; $h_s = 0,9$ км; $M_L = 2,6$) на основі інверсії хвильових форм

Вид фокального механізму за даними станцій	Нод. пл. 1			Нод. пл. 2			P, град.		T, град.	
	φ_s град.	δ град.	λ град.	φ_s град.	δ град.	λ град.	AZ	PL	AZ	PL
PABE і SLIT	311	68	20	213	71	156	84	0.5	173	29
PABE, SLIT і MTSE	330	47	56	194	52	120	83	3.5	167	66

Висновки. У роботі авторами подано два види механізму вогнища Литовського землетрусу 12.06.15 (час у вогнищі $t_0 = 08:18:26.4$; $55,52^\circ \text{N}$, $21,40^\circ \text{E}$; $h_s = 0,9$ км; $M_L = 2,6$) на основі інверсії хвильових форм, використовуючи записи на двох станціях – PABE і SLIT (рис. 4, а) та на трьох станціях – PABE, SLIT та MTSE (рис. 4, б).

Під час використання як двох, так і трьох станцій, механізм вогнища землетрусу являє собою насув із невеликою компонентою зсуву (predominately thrust faulting with a strike-slip component). Компонента зсуву залежить від положення нодальної площини (рис. 4). Для площини 1 (plane 1) – зсув лівосторонній, а для площини 2 (plane 2) – зсув правосторонній.

Епіцентр землетрусу розміщений всередині супер-регіональної структури поряд із густою сіткою

регіональних розломів, у районі інтенсивної розробки нафтових і геотермальних ресурсів (рис. 2).

Щодо тектонічної обстановки епіцентр землетрусу розташований поблизу тектонічного вузла, утвореного чотирма регіональними розломами, які пересікає *Klaipeda-Vilnius* сутура, супер-регіонального масштабу (рис. 2). *Klaipeda-Vilnius* сутура збігається з південним краєм глибинної депресії в земній корі (на рівні Мохо), орієнтованої з південного сходу на північний захід і яку виявлено в Балтійському морі. Північний край депресії розміщений за межами рис. 2. Глибинну структуру на рівні границі Мохо підтверджено на морських сейсмічних профілях під час виконання трьох незалежних міжнародних проектів: FENNOLOGRA, BABEL и BALTIC

SEA. Ширина депресії приблизно 150 км, а довжина близько 350 км (Ostrovsky et al., 1994).

Порівняння отриманих результатів для фокального механізму землетрусу (табл. 2) з розміщенням регіональних тектонічних розломів (рис. 2) показує, що розлом Gargzdai (193°) і розлом Lankuriai (175°) мають азимут простирання, які найбільш близькі до азимуту простирання нодальної площини 2 (plane 2) для трьох станцій. Азимут простирання розлому Gargzdai і згаданої вище нодальної площини 2 практично повністю збігається. Велика піввісь еліпса помилок (рис. 2) досягає 23,0 км, а мала піввісь – 8,0 км. Обидва тектонічні розломи (Gargzdai і Lankuriai) – у межах еліпса помилок. Як результат, сейсмогенною структурою перш за все слід розглядати розлом Gargzdai.

Район розміщення епіцентра землетрусу характеризується підвищенням техногенним навантаженням. Поблизу епіцентру розміщені нафтові родовища і потенційні нафтові поля: 6 – Ablinga, 7 – Vezaiciai, 8 – Siuparjai, 9 – Pietu Siupariai, 10 – Degliai, 11 – Pociiai, 12 – Vilkysiai, 13 – Sakuciai (рис. 2). Усього в районі, який обмежено контуром Palanga–Plunge–Silute, розташовані 10 родовищ нафти і 3 нафтові поля. У 2001–2002 р. тут видобуто 905 тис. т нафти. Найближче нафтове родовище Vilkysiai розміщено приблизно в 4 км від епіцентру землетрусу і віднесено до тектонічного розлому Lankuriai (рис. 2).

Крім нафтових родовищ, у даному районі розташована геотермальна аномалія з густиною теплового потоку до 95 mW/m², який є максимальним на Східно-Європейському кратоні (Kepeszinskas et al., 1996). Центр геотермальної аномалії знаходиться приблизно на відстані 14 км у південно-східному напрямі від епіцентра розглядуваного землетрусу. Литва володіє значними гідрогеотермальними ресурсами, зосередженими в основному у великих сілікатних резервуарах кембрія, нижнього девону і верхньо-середнього девону, що складені осадовими відкладами (потужністю до 2 км) Балтійського осадового басейну, який покриває ранньодкембрійський кристалічний фундамент Східно-Європейського кратону. Товщина осадового чохла збільшується із 200 м на південному сході Литви до 2,3 км – на крайньому заході Литви (Sliaupa et al., 2019).

Клайпедський геотермальний демонстраційний завод побудовано в 2000 р. і відтоді він почав виробляти тепло. У червні 2004 р. Держкомісія Литви підтвердила його потужність у 35 МВт (геотермальна частина 13,6 МВт) (Zinevicius and Sliaupa, 2010). Завод використовує воду з температурою 38 °C зі свердловини, яку пробурено в девонському водоносному горизонті на глибину приблизно 1100 м від поверхні. З метою збільшення віддачі в листопаді 2014 р. проведено радіальне буріння на напірній свердловині Klaipeda 11, розташованій на відстані приблизно 21 км від епіцентра землетрусу. Крім теплової станції Klaipeda, у Литві зростає кількість невеликих наземних теплових насосів. Загальна потужність теплових насосів у 2015 р. досягала 81,8 Mw (Sliaupa et al., 2019).

У багатьох промислових кар'єрах Литви добування корисних копалин (доломит, вапняк) відбувається з використанням вибухів. Ці кар'єри розташовані на півночі Литви (Pacesa, 2015) і віддалені від епіцентра землетрусу на достатньо великі відстані (130–167 км).

Згідно з каталогом землетрусів у Північній Європі (FENCAT, 2014), на території Литви у районі, де відбувся землетрус 12.06.20 ($M_L = 2.6$), не відмічено землетрусів як за історичний, так і за сучасний період часу (із 1375 по 2014 р.)

Із загальносвітової практики відомо, що причинами індукованих землетрусів може бути: заповнення водосховищ; побудова висотних будівель; розробка кар'єрів; видобуток підземних вод, корисних копалин, у тому числі нафти, газу та геотермальних ресурсів; прокладення тунелів; закачування рідини для захоронення відходів; підвищення нафтовіддачі; гідророзрив пласта; збереження газу; ядерні вибухи.

Таким чином, наведені вище фактори дозволяють з великим відсотком вірогідності віднести досліджуваний Литовський землетрус 12.06.15 ($M_L = 2.6$) до категорії індукованих землетрусів. Оскільки техногенне навантаження на земну кору зростає, то дослідження індукованої сейсмічності й дискримінантів, які дозволяють відрізнити техногенні й тектонічні події, стає актуальним завданням. Дане дослідження є першим кроком у цьому напрямі для Східно-Балтійського регіону. У перспективі як дискримінант передбачається використання властивостей тензора сейсмічного моменту, який отримується за інверсією хвильових форм.

Список використаних джерел

- Малицький, Д.В. (2010). Аналітично-числові підходи до обчислення часової залежності компонент тензора сейсмічного моменту. *Геоінформатика*, 1, 79–85.
- Малицький, Д.В. (2016). Математичне моделювання в задачах сейсмології. Київ: Наукова думка.
- Никулин, В.Г. (2020). Современные сейсмологические исследования в Латвии с 2008 по 2019 г. и перспективы их развития. *Российский сейсмологический журнал*, 2, 1, 27–39. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.03>
- Alekseev, A.S., Mikhailenko, B.G. (1980). The solution of dynamic problems of elastic wave propagation in inhomogeneous media by a combination of partial separation of variables and finite-difference method. *J. Geophys.*, 48, 161–172.
- Aki, K., Richards, P.G. (1980). *Quantitative seismology – Theory and method*. San Francisco: Freeman and Co.
- Ben-Menahem, A., Singh, S.J. (1981). *Seismic Waves and Sources*. New York: Springer.
- Bouchon, M. (1981). A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71, 959–971.
- Chapman, C.H. (1987). A new method for computing synthetic seismograms. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 54, 481–518.
- Cormier, V.P., Richards, P.G. (1977). Full wave theory applied to a discontinuous velocity increase: The inner core boundary. *J. Geophys.*, 43, 3–31.
- 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. *J. geophys. Res.*, 86, 2825–2852.
- FENCAT (2014). Catalog of earthquakes in Northern Europe, 1375–2014. Отримано з https://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/catalog/Scandia_updated.html
- Fuchs, K., Muller, G. (1971). Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 23, 417–433.
- Godano, M., Bardainne, T., Regnier, M., Deschamps, A. (2011). Moment tensor determination by nonlinear inversion of amplitudes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 101, 366–378.
- Gregersen, S., Wiejacz, P., Debski, W., Domanski, B., Assinovsky, B.A., Guterch, B., Mäntyniemi, P., Nikulin, V.G., Pacesa, A., Puura, V., Aronov, A.G., Aronova, T.I., Grünthal, G., Husebye, E.S., Sliaupa, S. (2007). The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 164, 1–2, 63–74.
- Hardebeck, J.L., Shearer, P.M. (2003). Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 93, 2432–2444.
- Kennett, B.L.N. (1972). Seismic waves in laterally inhomogeneous media. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 27, 301–325.
- Kennett, B.L.N. (2002). *The Seismic Wavefield*. V. 1, 2. UK: Cambridge University Press.
- Kepeszinskas, K., Rasteniene, V., Suveizdis, P. (1996). The West Lithuanian Geothermal Anomaly. Vilnius: Institute of Geology.
- Kikuchi, M., Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body waves-III. *Bull. seism. Soc. Am.*, 81, 2335–2350.
- Molotov, L.A. (1984). *The Matrix Method in the Theory of Wave Propagation in Layered Elastic and Liquid Media*. Moscow: Nauka.
- Malytskyy, D., Kozlovskyy, E. (2014). Seismic waves in layered media. *J. of Earth Science and Engineering*, 4, 311–325.
- Miller, A.D., Julian, B.R., Foulger, G.R. (1998). Three-dimensional seismic structure and moment tensors of non-double-couple earthquakes at the Hengill-Grensadalur volcanic complex, Iceland. *Geophys. J. Int.*, 133, 309–325.

Nikulins, V., Assinovskaya, B. (2018). Seismicity of the East Baltic region after the Kaliningrad earthquakes on 21 September 2004. *Baltica*, 31, 1, 35–48.

Nikulins, V. (2020). Seismological monitoring in Latvia. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, 54 (I), 50–66. <https://doi.org/10.31905/BKETRT2R>

Ostrovsky, A.A., Flueh, E.R., Luosto, U. (1994). Deep seismic structure of the Earth's crust along the Baltic Sea profile. *Tectonophysics*, 233, 279–292.

Pacesa, A. (2015). Seismological investigations in 2014. Lietuvos geologijos tarnyba. *Technical Report*, 40–43. Отримано з <http://www.researchgate.net/publication/285588658>

Sileny, J., Panza, G.F., Campus, P. (1992). Waveform inversion for point source moment tensor retrieval with variable hypocentral depth and structural model. *Geophys. J. Int.*, 109, 259–274.

Sipkin, S.A. (1986). Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Global seismicity, 1981–1983. *Bull. seism. Soc. Am.*, 76, 1515–1541.

Sliaupa, S., Zinevicius, F., Mazintas, A., Petrauskas, S., Dagilis, V. (2019). Geothermal Energy Use, Country Update for Lithuania. *European Geothermal Congress*.

Vavrychuk, V., Kuhn, D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two-step time frequency approach. *Geophys. J. Int.*, 190, 1761–1776.

Wiggins, R.A., Helmberger, D.V. (1974). Synthetic seismogram computation by expansion in generalized rays. *Geophys. J.*, 37, 73–90.

Zinevicius F., Sliaupa S. (2010). Lithuania – Geothermal Energy Country Update. *Proceeding World Geothermal Congress*.

References

Aki, K., Richards, P.G. (1980). Quantitative seismology – Theory and method. San Francisco : Freeman and Co.

Alekseev, A.S., Mikhailenko, B.G. (1980). The solution of dynamic problems of elastic wave propagation in inhomogeneous media by a combination of partial separation of variables and finite-difference method. *J. Geophys.*, 48, 161–172.

Ben-Menahem, A., Singh, S.J. (1981). *Seismic Waves and Sources*. New York : Springer.

Bouchon, M. (1981). A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71, 959–971.

Chapman, C.H. (1987). A new method for computing synthetic seismograms. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 54, 481–518.

Comier, V.P., Richards, P.G. (1977). Full wave theory applied to a discontinuous velocity increase: The inner core boundary. *J. Geophys.*, 43, 3–31.

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. *J. geophys. Res.*, 86, 2825–2852.

FENCAT (2014). Catalog of earthquakes in Northern Europe, 1375 – 2014. Retrieved from https://www.seismo.helsinki.fi/bulletin/list/catalog/Scandia_updated.html

Fuchs, K., Muller, G. (1971). Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 23, 417–433.

Godano, M., Bardainne, T., Regnier, M., Deschamps, A. (2011). Moment tensor determination by nonlinear inversion of amplitudes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 101, 366–378.

Gregersen, S., Wiejacz, P., Debski, W., Domanski, B., Assinovskaya, B.A., Guterch, B., Mäntyniemi, P., Nikulin, V.G., Pacesa, A., Puura, V., Aronov, A.G., Aronova, T.I., Grünthal, G., Husebye, E.S., Sliaupa, S. (2007). The exceptional

earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 164, 1–2, 63–74.

Hardebeck, J.L., Shearer, P.M. (2003). Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 93, 2432–2444.

Kennett, B.L.N. (1972). Seismic waves in laterally inhomogeneous media. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 27, 301–325.

Kennett, B.L.N. (2002). *The Seismic Wavefield*. V. 1, 2. UK : Cambridge University Press.

Kepezinskas, K., Rastenienė, V., Suveizdis, P. (1996). *The West Lithuanian Geothermal Anomaly*. Vilnius: Institute of Geology.

Kikuchi, M., Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body waves-III. *Bull. seism. Soc. Am.*, 81, 2335–2350.

Malytskyy D. (2010). Analytic-numerical approaches to the calculation of seismic moment tensor as a function of time, *Geoinformatika*, 1, 79–85. [in Ukrainian]

Malytskyy, D. (2016). Mathematical modeling in the problems of seismology. Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian]

Malytskyy, D., Kozlovskyy, E. (2014). Seismic waves in layered media. *J. of Earth Science and Engineering*, 4, 311–325.

Miller, A.D., Julian, B.R., Foulger, G.R. (1998). Three-dimensional seismic structure and moment tensors of non-double-couple earthquakes at the Hengill-Grensdalur volcanic complex, Iceland. *Geophys. J. Int.*, 133, 309–325.

Molotov, L.A. (1984). *The Matrix Method in the Theory of Wave Propagation in Layered Elastic and Liquid Media*. Moscow: Nauka.

Nikulins, V. (2020). Sovremennyye sjesmologicheskije issledovania v Latvii s 2008 po 2019 i perspektivy ikh razvitiya. *Rossiyskiy sjesmologicheskij jurnal*, 2, 1, 27–39. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.03> [in Russian]

Nikulins, V. (2020). Seismological monitoring in Latvia. *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre*, 54 (I), 50–66. <https://doi.org/10.31905/BKETRT2R>

Nikulins, V., Assinovskaya, B. (2018). Seismicity of the East Baltic region after the Kaliningrad earthquakes on 21 September 2004. *Baltica*, 31, 1, 35–48.

Ostrovsky, A.A., Flueh, E.R., Luosto, U. (1994). Deep seismic structure of the Earth's crust along the Baltic Sea profile. *Tectonophysics*, 233, 279–292.

Pacesa, A. (2015). Seismological investigations in 2014. Lietuvos geologijos tarnyba. *Technical Report*, 40–43. Retrieved from <http://www.researchgate.net/publication/285588658>

Sileny, J., Panza, G.F., Campus, P. (1992). Waveform inversion for point source moment tensor retrieval with variable hypocentral depth and structural model. *Geophys. J. Int.*, 109, 259–274.

Sipkin, S.A. (1986). Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Global seismicity, 1981–1983. *Bull. seism. Soc. Am.*, 76, 1515–1541.

Sliaupa, S., Zinevicius, F., Mazintas, A., Petrauskas, S., Dagilis, V. (2019). Geothermal Energy Use, Country Update for Lithuania. *European Geothermal Congress*.

Vavrychuk, V., Kuhn, D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two-step time frequency approach. *Geophys. J. Int.*, 190, 1761–1776.

Wiggins, R.A., Helmberger, D.V. (1974). Synthetic seismogram computation by expansion in generalized rays. *Geophys. J.*, 37, 73–90.

Zinevicius F., Sliaupa S. (2010). Lithuania – Geothermal Energy Country Update. *Proceeding World Geothermal Congress*.

Надійшла до редколегії 25.03.21

D. Malytskyy¹, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,

E-mail: dmalytskyy@gmail.com,

V. Nikulins^{1,2}, Dr. Sci. (Geol.),

E-mail: valerijs.nikulins@lvgmc.lv,

¹Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine,

3-b Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine;

²Latvian Environment, Geology and Meteorology Center,

Riga, LV-1019, Latvia

FOCAL MECHANISM OF THE LITHUANIAN EARTHQUAKE OF BASED ON WAVEFORM INVERSION

The aim: Determination of focal mechanism of Lithuanian earthquake of 12.06.15 ($t_0 = 08:18:26.4$; 55.52° N, 21.40° E; $h_s = 0.9$ km.; $M_L = 2.6$) by waveform inversion using direct waves and a limited number of stations. **Method:** Matrix method is used for modelling of seismic wave propagation in the medium modelled as horizontally layered heterogeneous elastic structure. There were obtained the relations of displacement waves on the free surface that were used for seismic tensor determination using only direct P- and S- waves. **Determination of seismic tensor and the focal mechanism on the base of developed method for a point source is described.** Thus, based on forward modeling, numerical techniques are developed for the inversion of observed waveforms for the components of moment tensor. **Results:** In the paper, a method is presented for the focal mechanism determination of Lithuanian earthquake of 12.06.15 ($M_L = 2.6$) by waveform inversion using limited number of stations. The focal mechanism is determined using the data from two stations: PABE, SLIT and from three stations: PABE, MTSE, SLIT. These seismic stations are the part of BAVSEN (BalticVirtualSeismicNetwork). **Scientific novelty:** 1. In the paper, a method is presented for moment tensor inversion for the focal mechanism determination of events with a low seismicity. The East Baltic region (EBR) is the region with low seismicity. 2. The focal mechanism is determined using the data from a limited number of stations. **Practical significance:** The results of focal mechanism determination can be used to study seismicity for regions with a low seismicity using a limited number of stations.

Keywords: matrix method, method of waveform inversion, the focal mechanism, seismic moment tensor, direct P- and S-waves.

Д. Малицкий, д-р физ.-мат. наук, проф.,
E-mail: dmalytsky@gmail.com,
Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
ул. Научная, 3-б, г. Львов, 79060, Украина;
В. Никулин, д-р геол. наук,
E-mail: valerijs.nikulins@lvgtmc.lv,
Латвийский центр окружающей среды, геологии и метеорологии,
г. Рига, LV-1019, Латвия

МЕХАНИЗМ ОЧАГА ЛИТОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 12.06.15 НА ОСНОВАНИИ ИНВЕРСИИ ВОЛНОВЫХ ФОРМ

Цель: Определение механизма очага Литовского землетрясения 12.06.15 ($t_0 = 08:18:26.4$; 55.52° N, 21.40° E; $h_s = 0.9$ км.; $M_L = 2.6$) методом инверсии волновых форм с использованием прямых волн и ограниченного количества станций. *Методика:* Матричный метод используется для моделирования распространения сейсмических волн в среде, моделируемой горизонтально-слоистой неоднородной упругой структурой. Получены соотношения волн смещения на свободной поверхности для определения сейсмического тензора с использованием только прямых P- и S-волн. Описано определение сейсмического тензора и механизма очага на основе разработанной методики для точечного источника. Таким образом, на основе прямого моделирования разработан численный метод инверсии наблюдаемых форм сигналов для компонентов тензора момента. *Результаты:* В статье представлен метод определения механизма очага землетрясения в Литве (12.06.15, $M_L = 2.6$) путем инверсии формы волны с использованием ограниченного количества станций. Механизм очага определяется на основании данных: двух станций – PABE, SLIT и трех станций – PABE, MTSE, SLIT. Эти сейсмические станции являются частью BAVSEN (Балтийская виртуальная сейсмическая сеть). Научная новизна и практическая значимость: Представлен метод обращения тензора моментов для определения механизма очага событий с низкой сейсмичностью (Восточно-Балтийский регион – регион с низкой сейсмичностью). Механизм очага определяется с использованием данных ограниченного числа станций. Результаты определения механизма очага могут быть использованы для изучения сейсмичности для регионов с низкой сейсмичностью с использованием ограниченного количества станций.

Ключевые слова: матричный метод, метод инверсии волновых форм, механизм очага землетрясения, тензор сейсмического момента, прямые P- и S-волны.