

## ВИЗНАЧЕННЯ РІЗНИЦЕВИХ КООРДИНАТ І МЕХАНІЗМУ ВОГНИЩА ЗЕМЛЕТРУСІВ ПОБЛИЗУ с. ТРОСНИК У ЗАКАРПАТТІ ПРОТЯГОМ 2013–2015 рр.: МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Координати вогнищ серії слабких ( $1,0 < M_L < 2,5$ ) схожих між собою (повторних) землетрусів, що відбувалися протягом 2013–2015 рр. поблизу с. Тросник на півдні Закарпаття, визначено за їхніми різницевиими (диференційними) вступами на українських, словацьких, угорських і румунських станціях із одночасним визначенням т. зв. епіцентрально-специфічних станційних поправок. З метою підвищення надійності різницевих вступів за умови дуже низького співвідношення сигнал/шум запропоновано адаптивне фільтрування записів для зменшення впливу корельованих шумів, модифікований критерій максимуму функції взаємної кореляції між відрізками записів з одночасним мінімумом зміщення відносно початкового обчисленого часу вступу, а також верифікацію вступів із використанням діаграм запізньєнь вступів тих самих землетрусів на одних станціях відносно інших. Чутливість отриманих результатів до конфігурації мережі перевірено за допомогою т. зв. *jack-knife* тесту, визначено координати вогнищ із вилученням з повного набору станцій щоразу однієї. За результатами 3D інтерпретації різницевих гіпоцентрів нодальну площину з азимутом простягання  $\sim 150^\circ$  спільного для усіх землетрусів серії фокального механізму вогнища, визначеного за полярностями вступів *P*-хвиль на 16 станціях, ототожнено як площину розриву, а сам механізм класифіковано як лівосторонній зсув із компонентою насуву. Епіцентр найсильнішого землетрусу опинився майже точно на розломі донегенового фундаменту, паралельного до дуги Карпат, простягання якого майже збігається з простяганням ототожненої площини розриву. Вісь стискання у механізмі вогнища спрямована на схід, що цілком узгоджується із північно-східним напрямком загальнорегіонального поля.

*Ключові слова:* повторні (схожі між собою) землетруси; кореляція хвильових форм; різниці (диференційні) вступу; станційні поправки; механізм вогнища; розломно-блокова тектоніка; тектонічні напруження.

### *Вступ*

Серію із приблизно 17 землетрусів, що відбувалися протягом 2013–2015 рр. приблизно за 10 км від с. Тросник на півдні Закарпаття (рис. 1, табл. 1), можна вважати типовою для регіону, як за силою ( $1,0 < M_L < 2,5$ ), так і за тривалістю (принаймні для західної частини регіону, де вона зазвичай набагато більша, ніж у східній).

Підвищення точності координат землетрусів необхідне для вирішення багатьох важливих завдань сейсмологічних досліджень, таких як визначення їхньої сили, механізму вогнища, швидкостей поширення і коефіцієнтів поглинання сейсмічних хвиль, сейсмічної небезпеки і ризику, дослідження внутрішньої будови Землі, розломно-блокової тектоніки і тектонічного режиму, особливо у регіонах з невисоким рівнем сейсмічності, таких як українське Закарпаття тощо.

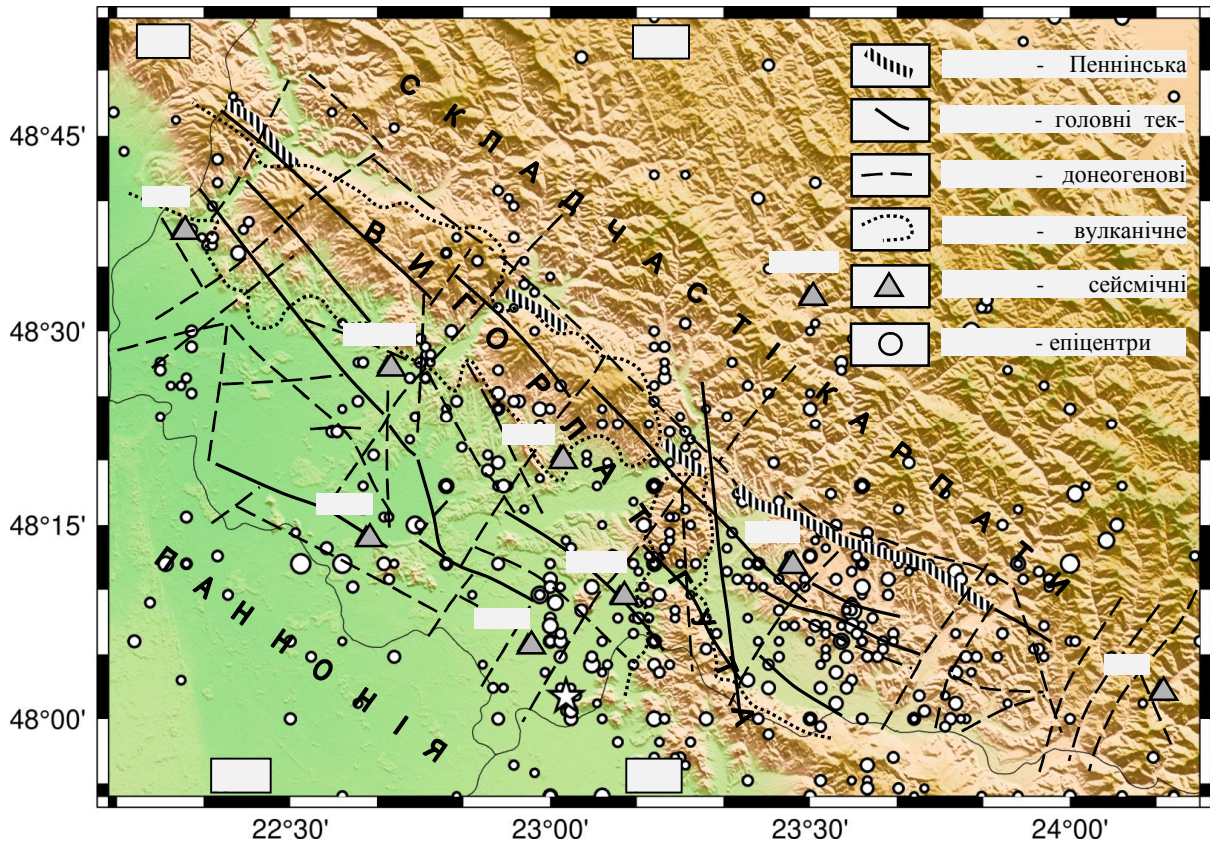
Упродовж останніх десятиліть з цією метою дедалі ширше й ефективніше використовують кореляцію хвильових форм т. зв. повторних (або схожих) землетрусів, які зазвичай належать до ривів (серій, кластерів), форшокових або афтершокових послідовностей [Shearer, 1997; Shearer et al.,

2005; Waldhauser & Ellsworth, 2000]. Йдеться, утім, не лише про визначення т. зв. диференційних (різницевих) вступів фаз за зміщеннями максимуму функції взаємної кореляції між записами, а й про використання значень максимуму як міри відстані між вогнищами, що уможливує визначення відносних (взаємних) координат навіть за записами лише однієї станції [Robinson et al., 2007, 2007; Robinson et al., 2013; Gnyр, 2013, 2014; Harris & Douglas, 2021]. Кореляцію хвильових форм використовували також для вирішення багатьох інших, таких різноманітних завдань сейсмологічних досліджень, як оцінювання швидкості ковзання вздовж розлому на глибині [Nadeau & McEvilly 1999], визначення неоднорідності нижньої мантії [Tibuleac & Herrin, 1999], моніторингу варіацій швидкості в земній корі [Roupinet et al., 1984], ідентифікації вибухів [Вербицький та ін., 2011; Harris, 1991] тощо.

У Закарпатті різниці (диференційні) координати раніше вже визначали (одночасно із епіцентрально-станційними поправками) для землетрусів серій 2005–2006 рр. поблизу м. Мукачеве [Gnyр, 2010] та 2015 р. поблизу м. Тересва [Gnyр

& Malytskyy, 2021]. Відносні координати вогнищ поблизу м. Мукачеве встановлено і за значеннями максимумів взаємної кореляції між записами лише на одній станції [Gnur, 2013]. Як результат, не лише різко зменшився розкид координат (вогнищ) порівняно із наведеними у бюлетені, а

й було з'ясовано форму й просторову орієнтацію області розкиду, що у поєднанні із визначенням механізму вогнища для найсильнішого землетрусу дало змогу ідентифікувати спільну площину розриву, до якої належали інші землетруси серії.



**Рис. 1.** Закарпатський регіон України, місцева сейсмічність ( $0,7 \leq M_L \leq 5,6$ ) протягом 1961–2015 рр., серія землетрусів поблизу с. Тросник у 2013–2015 рр. (зірочка) та елементи місцевої тектоніки за [Хоменко, 1971; 1987]

У цих роботах запропоновано також нові методологічні підходи як до контролю якості первинних даних, так і до їх прямої інтерпретації. Зокрема, доволі істотний дрейф часу (іноді навіть майже до 1 с) на деяких сейсмічних станціях карпатської мережі виявлено у результаті побудови діаграм інтервалів між вступами *P*-хвиль тих самих землетрусів на різних станціях. Як з'ясувалося, діаграми інтервалів між вступами *P*-хвиль виявилися корисними і для виявлення хибних вступів, а також інтерпретації просторового розподілу землетрусів, що особливо важливо під час визначення площини розриву.

Зрозуміло, що імовірнісні характеристики (зокрема, функцію взаємної кореляції) найдоцільніше використовувати для порівнювання записів саме слабких землетрусів, вступу фаз на яких дуже невиразні або й зовсім непомітні, із записами сильніших, із чіткішими вступами. Утім, що стосується серії поблизу с. Тросник у 2013–2015 рр., як ви-

явилось уже під час побіжного аналізу, частина її землетрусів були настільки слабкими, із таким низьким співвідношенням сигнал/шум у записах, що максимуми взаємної кореляції іноді навіть далеко не досягали порогу значущості 0,7–0,8, мінімально прийняттого (за відсутності істотних вторинних максимумів) у таких роботах. Зазвичай такими землетрусами нехтують.

З огляду на це і щоб не втрачати цінного матеріалу спостережень у регіоні з порівняно невисоким рівнем сейсмічної активності, пропонуємо у цій роботі нові підходи до підвищення вірогідності вступів фаз, які ґрунтуються на адаптивному фільтруванні первинних записів із метою зменшення впливу корельованих шумів, застосуванні критерію максимуму функції взаємної кореляції у комбінації із мінімумом зсуву, а також використанні діаграм інтервалів між вступами *P*-хвиль тих самих землетрусів на різних станціях.

**Ідентифікація та верифікація  
різницевих вступів**

Точність кінцевих координат вогнищ за всіх інших однакових умов (модель швидкостей тощо) залежить не так від методу їх визначення, як від точності вступів фаз, які використано. З першого погляду завдання визначення різницевих вступів може видаватися простим, навіть тривіальним (рис. 2). Однак, з огляду на причини, про які вже йшлося у вступі, це аж ніяк не стосувалося землетрусів серії поблизу с. Тросник. Процедура визначення різницевих вступів серії складалася з кількох етапів або навіть їх циклів, якщо після верифікації деякі вступу виявлялися хибними.

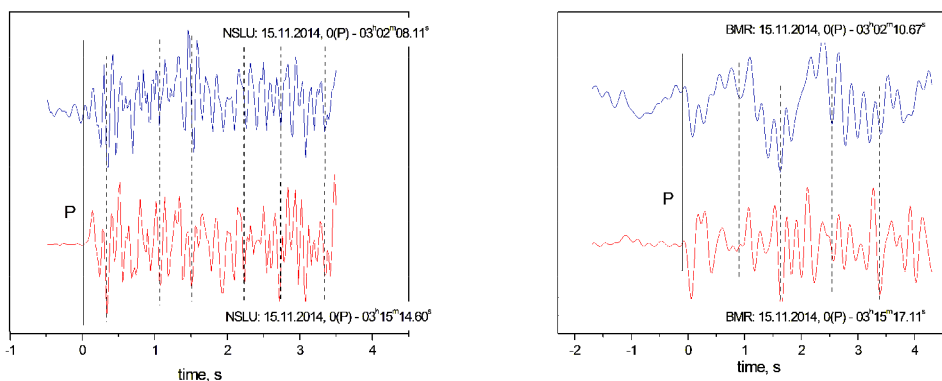
Спочатку було здійснено ідентифікацію землетрусів, що належали до серії, встановлюючи

ступінь схожості хвильових форм усіх подій, що, за даними бюлетеня [Вербицький та ін., 2014, 2014, 2016], відбувалися у цьому епіцентральному районі протягом 2013–2015 рр. Для цього використано записи на найближчих станціях із найбільшим співвідношенням сигнал/шум (TRSU, KORU, BRIU та ін.). З метою підвищення обумовленості кінцевих координат, зокрема для зменшення впливу конфігурації мережі станцій, намагалися використовувати вступу на якомога більшій кількості станцій, найближче розташованих до епіцентрального району (але не наведених у бюлетені) Румунії, Словаччини й Угорщини. Ці записи (хоч і не усіх станцій) наявні в прямому доступі в міжнародних базах сейсмологічної інформації IRIS, ORFEUS та GeoForschungsZentrum.

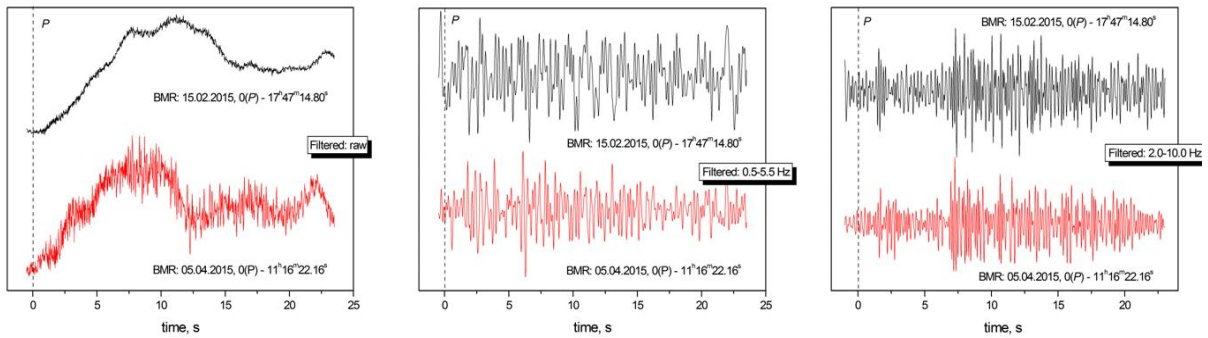
Таблиця 1

**Параметри землетрусів поблизу с. Тросник протягом 2013–2015 рр.  
за даними Бюлетеня [Вербицький та ін., 2014; Вербицький та ін., 2014, 2016].**

Номер події	Дата	Час (hh:mm:ss)	Широта, (°N)	Довгота, (°E)	Глибина, км	$M_{SH}$	$M_L$	$K_p$
1	13.07.2013	12:18:18.0	48,03	23,04	13,8	1,3	1,6	6,8
2	05.12.2013	22:17:29.1	48,02	23,05	4,6	0,8	1,0	6,0
3	15.11.2014	02:42:24.8	48,03	23,04	13,9	2,4	2,5	8,8
4		03:02:00.7	48,01	23,03	12,9	1,7	1,9	7,5
5		03:15:07.4	48,00	23,04	9,8	2,4	2,5	9,0
6		05:47:10.9	48,01	23,04	11,8		1,4	
7		19:41:57.5	48,00	23,03	12,0		1,0	
8	22.11.2014	00:26:33.6	48,01	23,05	13,0		0,7	
9	26.11.2014	10:49:52.4	48,01	23,04	13,0	2,3	2,4	9,0
10	09.12.2014	23:56:30.0	48,04	23,04	14,0		1,0	
11	16.12.2014	16:00:01.6	48,03	23,02	15,1	1,3	1,7	7,1
12	13.01.2015	09:05:12.3	48,03	23,05	8,9	1,6	1,8	7,6
13	06.02.2015	02:11:39.4	48,04	23,02	15,1	1,6	1,8	7,4
14	15.02.2015	14:35:13.5	48,04	23,04	15,2	1,6	2,0	7,3
15	15.02.2015	17:47:05.0	48,04	23,03	15,0		1,0	
16	05.04.2015	11:16:12.1	48,05	23,02	16,9	1,4	1,6	6,5
17	13.04.2015	22:04:54.8	48,02	23,04	12,7	1,2	1,4	6,7



**Рис. 2.** Визначення різницевих вступів *P*-хвиль землетрусів поблизу Тросника за зміщенням максимуму функції взаємної кореляції між нефільтрованими записами на станції NSLU і фільтрованими у смузі пропускання від 0,5 до 5,5 Гц на станції BMR



**Рис. 3.** Корельований шум у записах землетрусів поблизу Тросника на станції BMR на різних ділянках частот

З іншого боку, кількість станцій обмежувала умова наявності на кожній із них записів усіх 17 землетрусів серії. Адже неточність швидкісної моделі середовища по-різному впливає за різного набору станцій на кінцеві координати, як абсолютні, так і передусім відносні, які, зрозуміло, цікавили нас найбільше. Такий повний (або майже повний) набір записів, передусім через технічні причини, був лише на станціях TRSU, KORU, NSLU (Україна), KOLS (Словаччина), BMR, CJR (Румунія), LTVH та PSZ (Угорщина). Зрозуміло також, що жодного сенсу уже не було залучати до аналізу записи таких порівняно слабких землетрусів на станціях, розміщених на епіцентральных віддалях, більших за кілька сотень кілометрів. Певним винятком, утім, виявилася станція PSZ (на віддалі понад 230 км), з огляду, мабуть, і на сприятливі умови реєстрації, і на якість апаратури (станція експлуатується GeoForschungs Zentrum).

Після цього ідентифікували відрізки записів, які можуть містити вступ. У разі опрацювання значної кількості записів з великої кількості станцій та ще й за низького співвідношення сигнал/шум візуальне ототожнення перших вступів не те що трудомістке й непрактичне, а часто просто і неможливе. Тому спочатку було обчислено час пробігу до кожної зі станцій (передусім не наведених у бюлетені) для головного (найсильнішого) землетрусу серії (15.11.2014,  $3^{\text{h}}15^{\text{m}}7,4^{\text{s}}$ ,  $M_L = 2,5$ ,  $M_{SH} = 2,4$   $K_p = 9,0$  [Вербицький та ін., 2014]) з використанням швидкісної моделі середовища MEZU [Starodub & Gnyr, 1999], яку надалі використано і для визначення різницевої координат. Додаючи цей час до часу у вогнищах, за даними бюлетеня обчислювали приблизний час вступу для інших землетрусів. Варіації реального часу через різне розташування вогнищ (а також через неточність моделі, час у вогнищі тощо) враховано додаванням відповідного запasu.

З метою покращення співвідношення сигнал/шум записи з кроком дискретизації 0,02 с (на українських станціях) і 0,01 с (на закордонних) фільтрували на цьому етапі в діапазоні від 0,5 до 5,5 Гц.

Довжину відрізка запису вибрано так, аби у ньому містилася і ділянка S-хвилі, яка на всіх

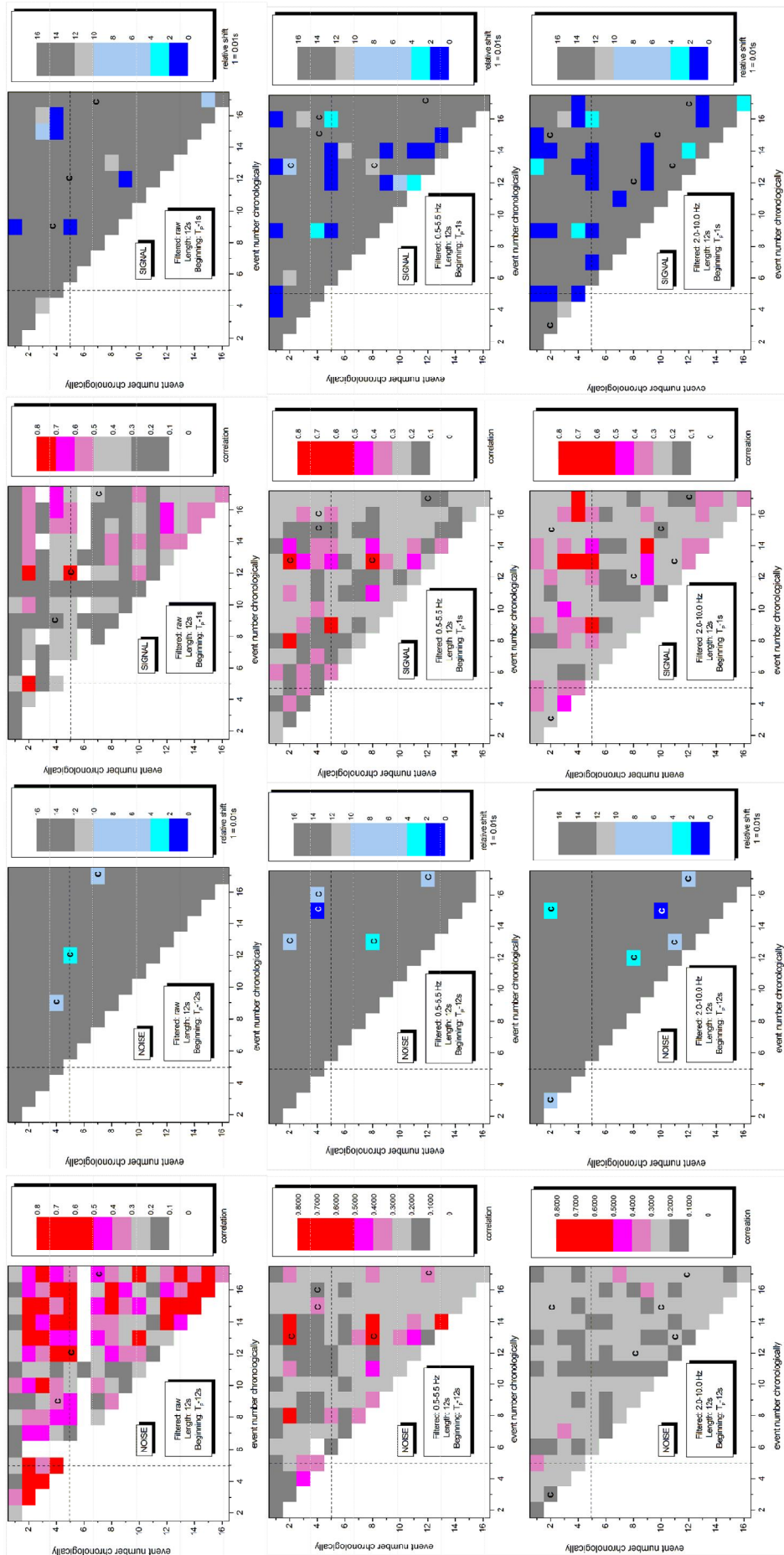
компонентах запису зазвичай набагато більшої амплітуди (відповідно, і співвідношення сигнал/шум), ніж P-хвиль. Зрозуміло, що максимум кореляції визначався саме ділянкою S-хвилі. Варіації інтервалу між першими вступами P- і S-хвиль через різне розташування вогнищ врахували вже на наступному етапі, вибираючи довжину відрізка так, щоб він уже не містив S-хвилі.

Оскільки неточність ідентифікації перших вступів S-хвилі навіть для найсильніших землетрусів серії могла бути лише набагато більшою за варіації їх запізнення щодо P-хвиль, різницевої координати вогнищ серії визначено лише за першими вступами P-хвилі: урахування вступів S-хвилі у цій ситуації призвело б до істотного спотворення координат.

У роботах [Gnyr, 2010; Gnyr & Malyskyu, 2021] перший вступ P-хвилі визначено щодо т. зв. *master event* (головної події), що є найпоширенішою практикою у схожих дослідженнях [Shearer, 1997; Shearer et al., 2005]. Вступ, утім, визначено не прямо (за зміщенням максимуму взаємної кореляції із головною подією), а через ланцюжки пар із найбільшим значенням максимуму, застосовуючи принцип т. зв. одноланкових кластерів [Sibson, 1973].

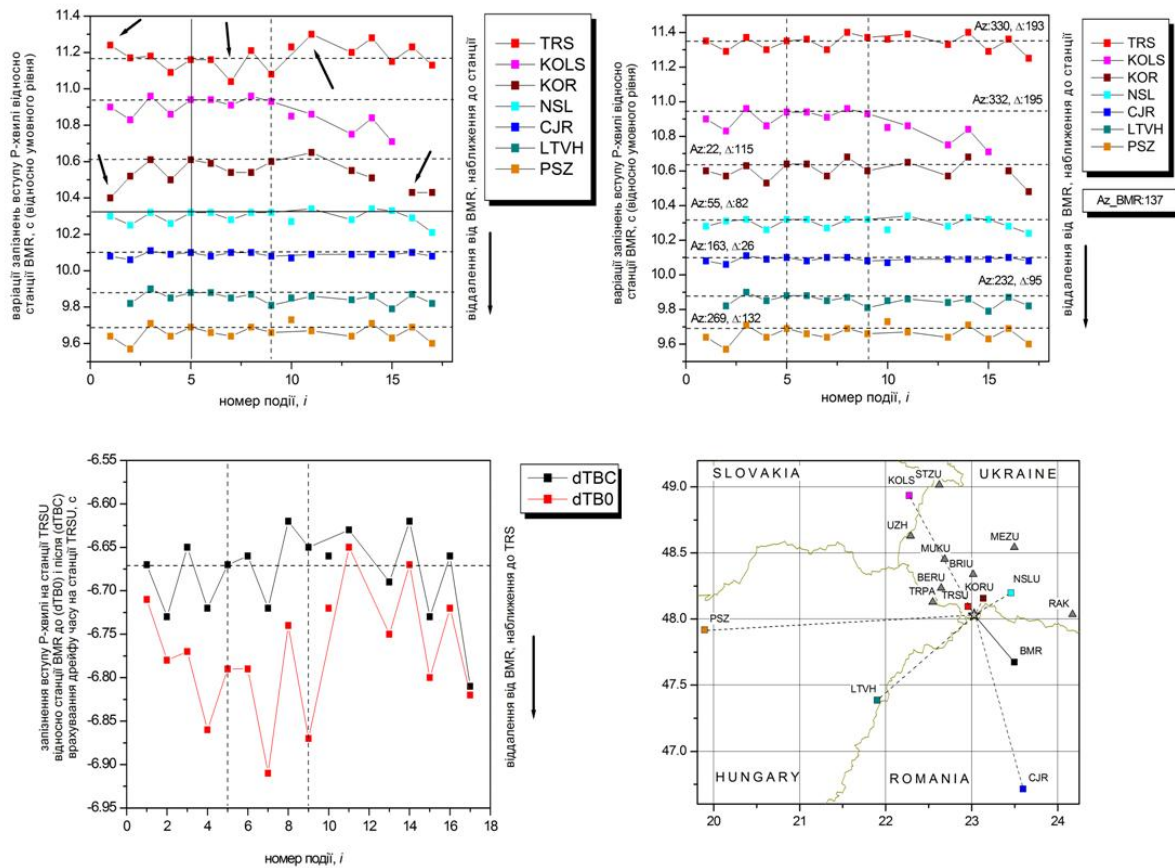
За дуже низького співвідношення сигнал/шум у записах землетрусів серії у Троснику на кореляцію дуже істотно впливали т. зв. корельовані шуми (рис. 3). Фільтрування у смузі пропускання між 0,5 і 5,5 Гц, звичайно ж, частину з них вилучало, але, як видно з рис. 4, не усі. Тож, щоб ще більше зменшити цей вплив, було вирішено підібрати інший, оптимальніший частотний діапазон.

Проблема, однак, полягала у тому, що шум може міститися і в ділянці спектра самого корисного сигналу. Тож під час вибору діапазону фільтрування йшлося про компроміс між видаленням шумів і втратою інформативності запису. Наявність корельованого шуму (а також зміщення, що йому відповідає) виявляли, визначаючи кореляцію між відрізками записів, що не містили корисного сигналу (до вступу P-хвилі) (рис. 4). Диференційні вступу у парах з корельованими шумами не визначали, вибирали інші пари, хоч і з меншою кореляцією.



**Рис. 4.** Вплив корельованого шуму в різних ділянках частот – кольорове подання максимумів функції взаємної кореляції між записами на станції СJR.

У горішньому рядку (зліва направо) – максимуми функції взаємної кореляції між відрізками нефільтрованих (raw) записів довжиною 12 с і з початком за 12 с до вступу  $P$ -хвилі ( $T_P$ -12, NOISE), відповідні їм змищення, максимуми між відрізками з початком за 1 с до різницевого вступу  $P$ -хвилі ( $T_P$ -1, SIGNAL) і відповідні їм змищення. У середньому рядку – між записами, фільтрованими у смузі пропускання між 0,5 і 5,5 Гц, у нижньому – між 2,0 і 10,0 Гц. Літерою  $c$  позначено пари з мінімальним (менш ніж 0,1 с) зсувом максимуму між відрізками, що містять шум. Штриховою лінією позначено пари з головною подією (*master event*).



**Рис. 5.** Варіації запізнень вступів *P*-хвиль на станціях відносно станції BMR до (нагорі ліворуч) і після (праворуч) усунення дрейфу часу на станціях TRSU, NSLU і KORU із зазначенням азимуту з епіцентра на станцію.

Варіації запізнень на станції TRSU (знизу зліва). Розташування станцій (кольорові квадратики) відносно епіцентра (зірочка) – знизу справа. Сіримі трикутниками позначено станції, використані лише для визначення механізму вогнища.

Оскільки повністю позбутися впливу корельованого шуму неможливо, за збереження принципу одноланкових кластерів та пов'язування подій із головною критерій максимуму функції взаємної кореляції було доповнено умовою мінімуму зміщення щодо раніше обчисленого вступу. Перевагу надавали також парам зі вступами, що узгоджувалися із азимутальними варіаціями запізнень вступів тих самих подій на одній станції відносно іншої, вибраної за опорну (рис. 5) [Gnyr & Malytskyu, 2021].

Для кожного із землетрусів ці запізнення фактично пропорційні до різниці відстаней між вогнищем і станціями. Варіації ж різниць відповідають зміні розташування одного землетрусу щодо іншого (збільшення – відносно віддалення від станції та наближення до опорної, і навпаки). Зрозуміло, що варіації різниць мали б бути певною мірою упорядкованими, залежно від азимуту станції та епіцентральної віддалі. Порушення ж такої

упорядкованості може свідчити про неправильність визначених вступів. За порушеннями у варіаціях запізнень у роботі [Gnyr & Malytskyu, 2021] було виявлено, зокрема, й істотний дрейф часу на окремих станціях української мережі (на станції BRIU він, наприклад, досягав 0,7 с).

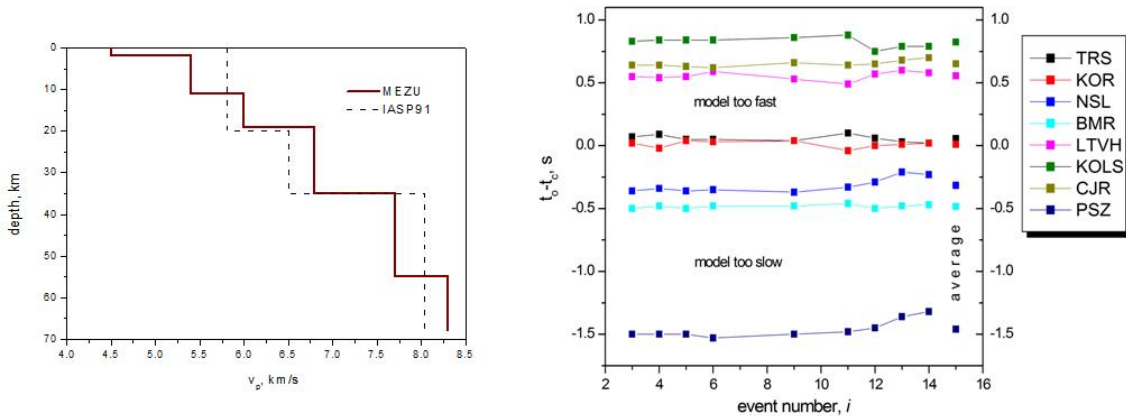
Для урахування дрейфу часу під час дослідження було розроблено спеціальний алгоритм, в якому уточнений час обчислено за припущення постійної швидкості дрейфу протягом періоду між сеансами синхронізації за радіосигналами точного часу (рис. 5).

**Визначення різницевих координат**

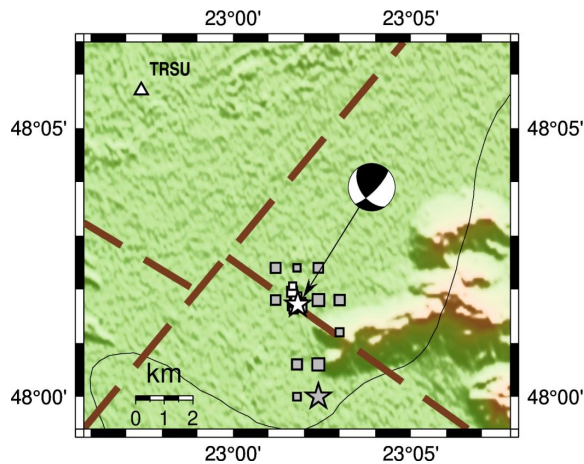
Різницеві координати вогнищ землетрусів серії визначено з використанням відомого – хоч запропонованого й уже кілька десятиліть тому, але все ще дуже ефективного і надійного алгоритму FASTHYPO [Herrmann, 1979] і горизонтально-шаруватої моделі швидкостей MEZ [Starodub &

Гнур, 1999], з урахуванням епіцентрально-специфічних станційних поправок (рис. 6). Поправки обчислювали в ітераційному режимі, повторно визначаючи координати з урахуванням кожного разу усереднених, але лише за найсильнішими землетрусами (аби уникнути впливу можливих похибок у різницевих вступах слабших), незбігів між “спостереженими” (на першій ітерації – різницеви)

й обчисленими часами пробігу ( $t_o - t_c$ ). Дисперсія незбігів на тих самих станціях виявилася незначною, а сам процес збігся уже після двох ітерацій, що (одне й друге) може свідчити як про надійність початкових (різницевих) вступів (принаймні для тих самих найсильніших землетрусів), так і про стійкість отриманого розв’язку (кінцевих координат і часу у вогнищах, табл. 2).

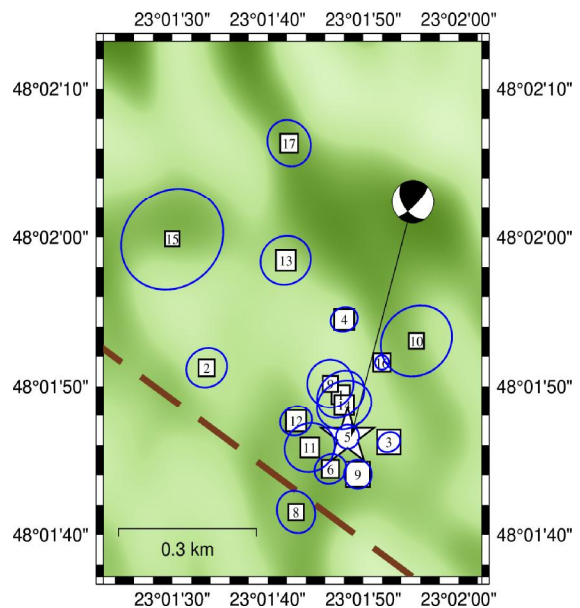


**Рис. 6.** Модель MEZ [Starodub et al., 1999], використана для обчислення різницевих координат (порівняно з моделлю IASP91). Станційні поправки, отримані після двох ітерацій.



**Рис. 7.** Епіцентри землетрусів серії за Бюлетенем [Вербицький та ін., 2014; Вербицький та ін., 2014, 2016] (сірі квадратики) і за різницеви вступами з урахуванням станційних поправок (білі, табл. 2) і механізм найсильнішого землетрусу за знаками перших вступів на 16 станціях.

Зірочки – найсильніший землетрус. Товсті штрихові лінії – розломи донеогенового фундаменту [Хоменко, 1971, 1987]. Справа внизу видно західний схил Юлівської (Клиновецької) гори, яка є частиною Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма.



**Рис. 8.** Епіцентри землетрусів за різницеви вступами на повному наборі станцій (табл. 2) з еліпсами неузгодженостей і механізм вогнища найсильнішого землетрусу.

Товста штрихова лінія – розлом донеогенового фундаменту [Хоменко, 1971, 1987].

Як і можна було сподіватися, найбільшими поправки виявилися для найвіддаленіших станцій (рис. 6). Зокрема, для станції PSZ (на епіцентрально-

ній віддалі понад 230 км) поправка становила майже  $-1,5$  с. Зрозуміло, що у різних напрямках від епіцентра (рис. 5, 6) зі зростанням віддалі збільшуються і варіації швидкостей поширення хвиль, які неможливо врахувати у тій самій моделі.

Як і очікувалось, після визначення різницевої координат вогнища серії розташувалися на набагато меншій площі, ніж у бюлетені (рис. 7, 8) [Вербицький та ін., 2014; Вербицький та ін., 2014, 2016]. Найбільша віддаль між епіцентрами була меншою за 1 км. Глибини вогнищ виявилися практично однаковими, в діапазоні між 10,45 і 10,92 км. Ця глибина, однак, могла контролюватися наявністю границі між шарами з різною швидкістю на глибині 11 км у моделі MEZ. У горизонтальній площині площа розкиду різницевої епіцентрів виразно витягнута у напрямку з північного заходу на південний схід (рис. 8), що цілком узгоджується із варіаціями запізнень вступів  $P$ -хвиль на станціях щодо станції BMR (рис. 5). Справді, їх найбільша амплітуда спостерігається на станціях вздовж осі BMR-TRSU (саме з пн. заходу на пд. схід), тоді як найменша у перпендикулярному напрямку – NSLU-LTVH. Якби вісь горизонтального розкиду була спрямована вздовж осі NSLU-LTVH, то було б навпаки – найбільші варіації були б на станціях саме вздовж цього напрямку.

Оскільки середньоквадратичні похибки абсолютних координат після урахування станційних поправок втрачають первинний фізичний зміст (окрім, можливо, щодо відносних), для оцінювання впливу розташування станцій довкола епіцентрів (як, можливо, і грубих похибок у вступях)

здійснено т. зв. *jack-knife* тест, коли координати вогнищ визначають, вилучаючи з повного набору станцій щоразу одну [Efron, 1982; Waldhauser & Ellsworth, 2000]. Найбільші варіації координат стосовно повного набору станцій спостерігалися для найслабших землетрусів (8, 10, 11, 15, 17) (табл. 2), що цілком природно і може свідчити про наявність похибок у різницевих вступях на деяких станціях (рис. 9).

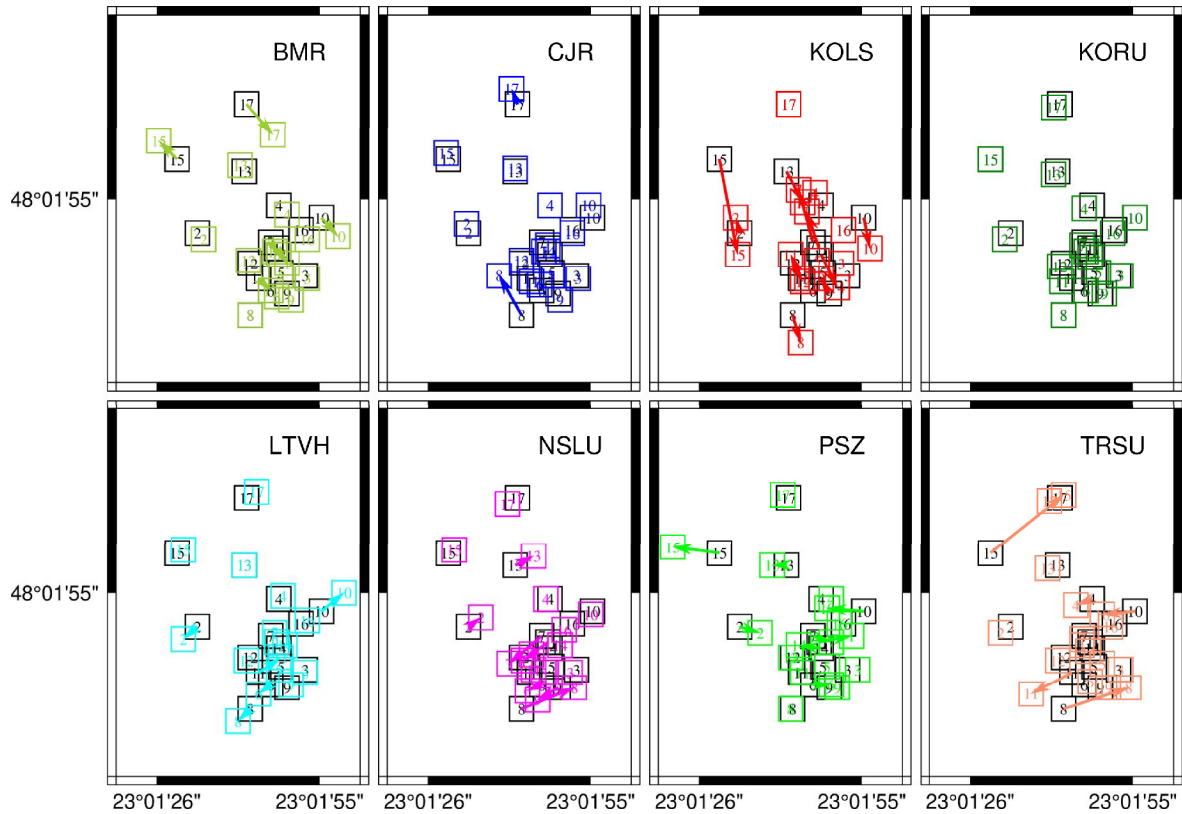
Оскільки через низький рівень кореляції записів цих землетрусів з іншими ще більше уточнити їх вступу неможливо, було запропоновано ще один варіант кінцевих координат, отриманий за результатами *jack-knife* тесту з вилученням станції KOLS, яка зумовлювала найбільшу середньоквадратичну похибку для більшості землетрусів (рис. 10, 11, табл. 3). Доцільність вилучення станції видається дещо аномальною та обґрунтованою поведінкою запізнень перших вступів  $P$ -хвиль на ній відносно станції BMR (рис. 5) (особливо після початку 2015 р.), що може свідчити про виникнення проблеми з часом на ній. До того ж записів двох останніх землетрусів серії на станції взагалі не було, що порушувало згадану вже умову однакової конфігурації мережі під час визначення координат. З іншого боку, як видно зі схеми на рис. 5, епіцентральної азимут станції KOLS майже збігається зі станцією TRSU і, отже, набагато чіткіші перші вступу на останній набагато надійніше “контролювали” епіцентральної віддаль у цьому напрямку. Утім, як видно з рис. 8 та 10, доволі істотно змінилося лише розташування 15-го землетрусу, який “посунувся” набагато ближче до основної групи, взаємне розташування епіцентрів у якій залишилися фактично таким самим.

Таблиця 2

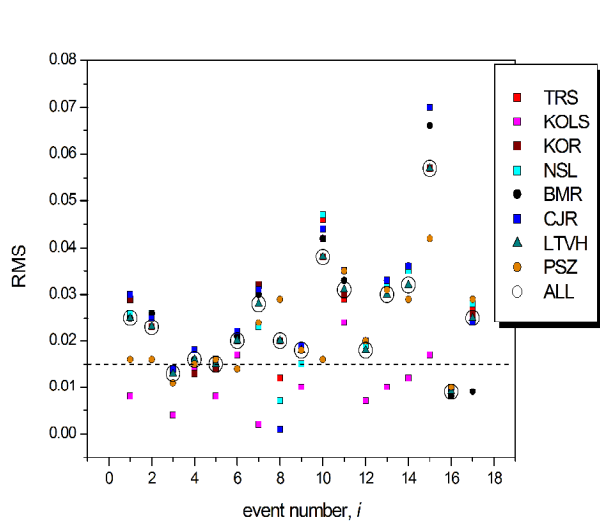
**Параметри землетрусів поблизу с. Тросник протягом 2013–2015 рр., визначені за різницевими вступами (силу землетрусів подано за даними [Вербицький та ін., 2014; Вербицький та ін., 2014, 2016])**

№	Дата	Час (hh:mm:ss)	Широта (°E)	Довгота (°N)	Глибина, км	$S_{\text{час}}$ , км	$S_{\text{дов.}}$ , км	$S_{\text{шир.}}$ , км	$S_{\text{глуб.}}$ , км	RMS	$M_L$
1	13.07.2013	12:18:18.38	23,0299	48,0304	10,64	0,01	0,1	0,1	0,11	0,025	1,6
2	05.12.2013	22:17:28.62	23,0260	48,0309	10,60	0,01	0,08	0,09	0,10	0,023	1,0
3	15.11.2014	02:42:25.17	23,0313	48,0295	10,49	0,01	0,04	0,04	0,05	0,013	2,5
4		03:02:01.25	23,0300	48,0318	10,52	0,01	0,06	0,05	0,07	0,016	1,9
5		03:15:07.73	23,0301	48,0296	10,53	0,01	0,05	0,05	0,06	0,015	2,5
6		05:47:11.27	23,0296	48,0290	10,53	0,01	0,07	0,07	0,08	0,020	1,4
7		19:41:58.03	23,0296	48,0306	10,45	0,01	0,10	0,11	0,12	0,028	1,0
8	22.11.2014	00:26:34.09	23,0286	48,0282	10,46	0,01	0,09	0,09	0,10	0,020	0,7
9	26.11.2014	10:49:52.97	23,0304	48,0289	10,67	0,01	0,06	0,06	0,07	0,018	2,4
10	09.12.2014	23:56:30.29	23,0321	48,0314	10,69	0,02	0,14	0,15	0,18	0,038	1,0
11	16.12.2014	16:00:02.26	23,0290	48,0294	10,60	0,01	0,11	0,10	0,13	0,031	1,7
12	13.01.2015	09:05:12.13	23,0286	48,0299	10,74	0,01	0,06	0,06	0,07	0,018	1,8
13	06.02.2015	02:11:39.85	23,0283	48,0329	10,80	0,01	0,11	0,10	0,12	0,030	1,8
14	15.02.2015	14:35:13.91	23,0300	48,0302	10,92	0,01	0,11	0,10	0,13	0,032	2,0
15	15.02.2015	17:47:05.39	23,0250	48,0333	10,81	0,03	0,21	0,23	0,27	0,057	1,0
16	05.04.2015	11:16:12.74	23,0311	48,0310	10,64	0,00	0,03	0,03	0,04	0,009	1,6
17	13.04.2015	22:04:55.16	23,0284	48,0351	10,68	0,01	0,09	0,09	0,11	0,025	1,4

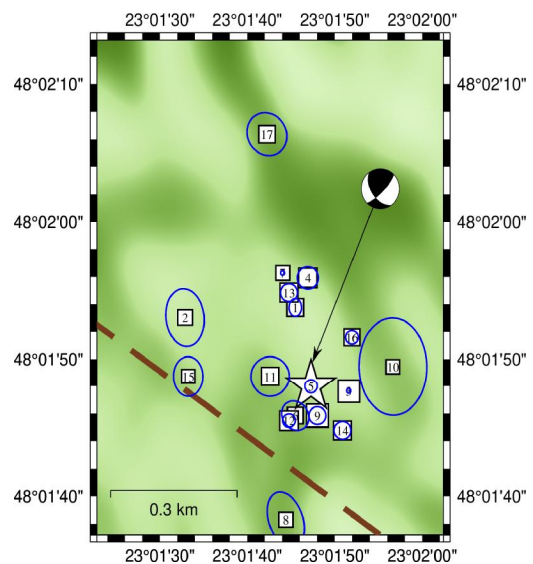




**Рис. 9.** Епіцентри землетрусів серії за вступами на повному наборі станцій (чорні квадратики) і без однієї станції (кольорові квадратики) (т. зв. *jack-knife* тест)



**Рис. 10.** Середньоквадратичні похибки за повного набору станцій (ALL) і без однієї станції (*jack-knife* тест)



**Рис. 11.** Варіант кінцевих координат за результатами *jack-knife* тесту із вилученням станції KOLS, яка спричиняла найбільшу середньоквадратичну похибку (рис. 10) для більшості землетрусів (табл. 3).

Товста штрихова лінія – розлом донеогенового фундаменту [Хоменко, 1971, 1987]

**Параметри землетрусів поблизу с. Тросник протягом 2013–2015 рр., визначені за їх різницеvими вступами без урахування станції KOLS (силу землетрусів подано за даними [Вербицький та ін., 2014; Вербицький та ін., 2014, 2016])**

№	Дата	Час (hh:mm:ss)	Широта, (°E)	Довгота, (°N)	Глибина, км	S <sub>час</sub> , км	S <sub>дов</sub> , км	S <sub>шир</sub> , км	S <sub>зг</sub> , км	RMS	M <sub>L</sub>
1	13.07.2013	12:18:18.38	23,0293	48,0316	10,77	0,00	0,03	0,04	0,04	0,008	1,6
2	05.12.2013	22:17:28.62	23,0258	48,0314	10,66	0,01	0,09	0,13	0,13	0,025	1,0
3	15.11.2014	02:42:25.17	23,0310	48,0299	10,54	0,00	0,01	0,01	0,02	0,004	2,5
4		03:02:01.25	23,0297	48,0322	10,56	0,01	0,05	0,05	0,06	0,014	1,9
5		03:15:07.73	23,0298	48,0300	10,58	0,00	0,03	0,03	0,04	0,008	2,5
6		05:47:11.27	23,0293	48,0294	10,58	0,01	0,06	0,06	0,08	0,017	1,4
7		19:41:58.03	23,0289	48,0323	10,63	0,00	0,01	0,01	0,01	0,002	1,0
8	22.11.2014	00:26:34.09	23,0290	48,0273	10,38	0,01	0,09	0,13	0,12	0,020	0,7
9	26.11.2014	10:49:52.97	23,0300	48,0294	10,73	0,00	0,04	0,04	0,05	0,010	2,4
10	09.12.2014	23:56:30.29	23,0324	48,0304	10,60	0,02	0,16	0,22	0,23	0,042	1,0
11	16.12.2014	16:00:02.26	23,0285	48,0302	10,69	0,01	0,09	0,09	0,11	0,024	1,7
12	13.01.2015	09:05:12.13	23,0291	48,0293	10,67	0,00	0,03	0,03	0,03	0,007	1,8
13	06.02.2015	02:11:39.85	23,0291	48,0319	10,69	0,00	0,04	0,04	0,04	0,010	1,8
14	15.02.2015	14:35:13.91	23,0308	48,0291	10,80	0,01	0,04	0,04	0,05	0,012	2,0
15	15.02.2015	17:47:05.39	23,0259	48,0302	10,53	0,01	0,07	0,09	0,10	0,017	1,0
16	05.04.2015	11:16:12.74	23,0311	48,0310	10,64	0,00	0,03	0,03	0,04	0,009	1,6
17	13.04.2015	22:04:55.16	23,0284	48,0351	10,68	0,01	0,09	0,09	0,11	0,025	1,4

Варто також зазначити, що 15-й землетрус відбувся саме тоді, коли на станції KOLS, ймовірно, і виникли проблеми з часом (рис. 5), які згодом призвели навіть до призупинення її роботи.

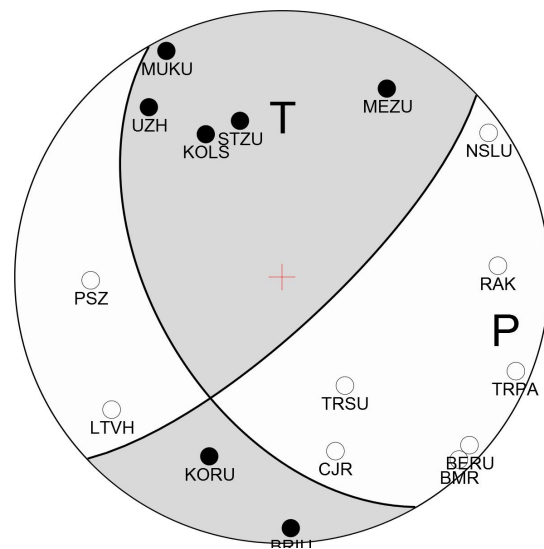
**Механізм вогнища найсильнішого землетрусу**

З огляду на високий ступінь кореляції хвильових форм землетрусів серії на тих самих станціях, а також на однаковий знак вступів P-хвиль (принаймні на тих з них, де його можна було чітко розпізнати), можна з упевненістю стверджувати, що механізм вогнища всіх землетрусів був однаковий.

Оскільки навіть найсильніший землетрус серії 15.11.2014 все одно був занадто слабким (M<sub>L</sub> = 2,5), отримати метричні оцінки першого вступу (тривалість і амплітуду) на більшості станцій було практично неможливо. Адже оцінювання метричних параметрів передбачає врахування частотної характеристики приладу, тобто фільтрування первинного запису. Якщо амплітуда сигналу мала, то це призводить до такого його спотворення, що перший вступ часто неможливо й ототожнити.

Тому механізм вогнища було визначено традиційним способом за знаками вступів P-хвиль на 16 станціях сейсмологічних мереж України, Румунії, Угорщини та Словаччини (рис. 12) і з використанням тієї самої швидкісної моделі MEZ, що і для

визначення координат (рис. 5, 6), для обчислення кутів виходу. Можливий реверс полярності давачів вертикальної компоненти на станціях перевіряли за записами сильних телесейсмічних землетрусів із відомим механізмом.



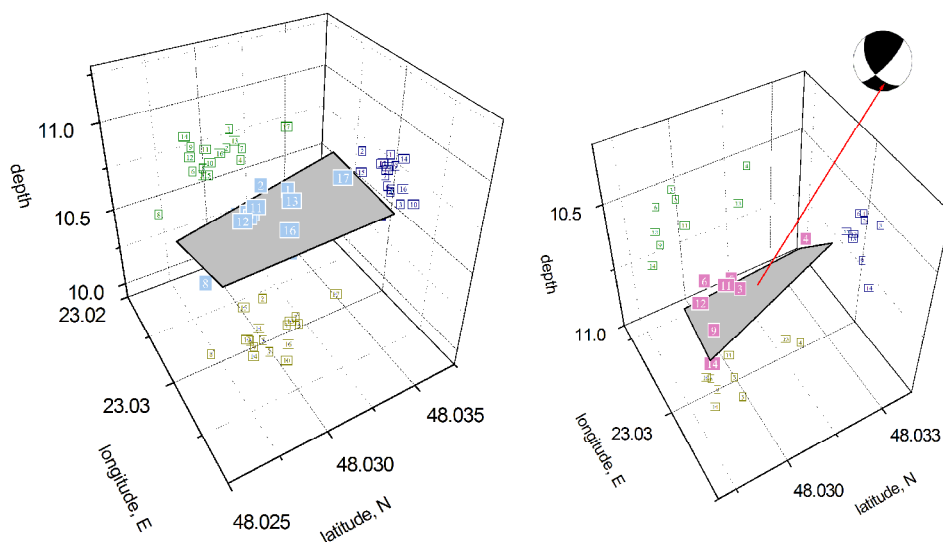
**Рис. 12.** Механізм вогнища найсильнішого землетрусу, визначений за знаками вступів P-хвиль на 16 станціях і з використанням швидкісної моделі MEZ (рис. 6) для обчислення кутів виходу. Азимут простягання – ~150°, кут падіння – ~50°, напрямок зсуву по площині – ~20°

### Обговорення результатів

Найочевиднішим результатом, що впливає з високого ступеня кореляції хвильових форм землетрусів поблизу села Тросник у 2013–2015 рр., є те, що вони належали до класу т. зв. повторних (або схожих) і мали швидше за все спільну площину розриву, яка у той чи інший спосіб мала би бути пов'язана із місцевою розломною тектонікою.

Така велика тривалість серії, ймовірно, характерна саме для західної частини Закарпаття, де співмірні за тривалістю серії схожих землетрусів виявлено поблизу с. Міхаловце у Словаччині (на кордоні з Україною) у 2003, 2009 р., поблизу Мукачеве у 2005–2006 рр. [Gнур, 2010] та ін. А в іншій частині регіону (умовно на схід від меридіонального відгалуження Вигорлат-Гутинського пасма) тривалість серій зазвичай не перевищує кількох тижнів, як, наприклад, серії кількох сотень (!) доволі сильних як для Закарпаття ( $M_L \approx 3,5$ ) повторних землетрусів поблизу м. Тересва у липні – серпні 2015 р. [Gнур & Malytskyu, 2021]. На відмінностях у режимі та характері сейсмічності у різних частинах Закарпаття одним із перших наголошував Р. С. Пронишин ще кілька десятиліть тому [Пронишин & Пустовитенко, 1982]. Різна тривалість розряджання тектонічних напружень на тій самій площині розриву може бути наслідком як різної геологічної будови, а відповідно і різних реологічних властивостей сейсмогенного середовища, тектонічного походження землетрусів (пов'язаності з іншими типами і класами тектонічних структур), так і різного тектонічного режиму (розподілу полів напружень і деформацій, швидкості накопичення і розряджання напружень), або й інших причин, які ще потребують подальшого з'ясування.

Якщо вогнища повторних землетрусів за визначенням мали б належати до тієї самої площини розриву, то характерною рисою 3D зображення множини різницевих гіпоцентрів землетрусів у Троснику (рис. 13) можна вважати те, що усі вони дуже виразно тяжіють до майже субгоризонтальної площини, яку, однак, важко пов'язати з однією з нодальних площин визначеного в роботі механізму вогнища (рис. 12) через великі кути падіння в обох ( $\sim 50^\circ$  та  $\sim 80^\circ$ ). Утім, як уже зазначено вище, малі варіації глибин можуть бути зумовлені впливом границі між шарами з різними швидкостями на глибині 11 км у моделі MEZ або великими похибками глибин (табл. 2, 3), передусім слабких землетрусів. Якщо, як і під час визначення станційних поправок, враховувати лише сильніші землетруси (2–6, 9, 11–14, табл. 1–3), то площина (рис. 13), до якої тяжіють гіпоцентри, має невеликий кут нахилу саме у тому ж напрямку, що й нодальна площина механізму вогнища (рис. 12) з азимутом простягання  $\sim 150^\circ$ , кутом падіння  $\sim 50^\circ$  і напрямком зсуву по площині  $\sim 20^\circ$ , й невеликий кут нахилу у протилежному до другої з площин напрямку. На цій підставі можна було б вважати, що перша з площин і відповідає розриву у вогнищі, а механізм класифікувати як змішаного типу – лівосторонній зсув із істотною складовою насуву (про переважання механізмів схожого типу у цій частині регіону йдеться, зокрема, і в роботі [Малицький та ін., 2017; Malytskyu et al., 2017]). Окрім того, у близькому до цього напрямку була спрямована і вісь розкиду різницевих епіцентрів (рис. 8) і спостерігалися найбільші варіації запізень вступів *P*-хвилі на станціях щодо станції BMR (рис. 5).



**Рис. 13.** 3D інтерпретація різницевих гіпоцентрів землетрусів поблизу Тросника:

ліворуч – усі 17 гіпоцентрів серії апроксимовано площиною, побудованою за методом кореляційних сіток [Davis, 1986]; праворуч – лише гіпоцентрів дев'яти найсильніших землетрусів. Червоною стрілкою на механізмі вогнища показано найімовірнішу площину розриву

Площину з простяганням  $\sim 150^\circ$  можна пов'язувати і з найближчим розломом донеогенового фундаменту [Хоменко, 1971, 1987], майже саме на ньому опинився епіцентр найсильнішого землетрусу із близькою орієнтацією  $\sim 120^\circ$  (рис. 7–9).

Утім, зовсім поряд, за якихось два кілометри на схід від епіцентра найсильнішого землетрусу, трасують [Хоменко, 1971, 1987] ще один майже перпендикулярний розлом (рис. 7) з напрямком  $\sim 30^\circ$  на пн.-схід, близьким до азимуту  $\sim 60^\circ$  іншої нодальної площини механізму. Враховуючи імовірність великої похибки абсолютних координат епіцентрів серії, неможливо, однак, заперечити її зв'язок і з цим розломом.

Як видно з рис. 1 і 7, різниці епіцентри серії опинилися майже на західному схилі Клиновецької (Юлівської) гори, яка належить до субмеридіональної гілки Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма, і це дає підстави припускати, що серія могла бути пов'язана і з інтрузійними порушеннями, характерними для територій вулканічної діяльності.

Вісь стискання у механізмі вогнища землетрусів у Троснику (рис. 12) орієнтована приблизно у напрямку схід – захід, що не цілком відповідає даним про орієнтацію стискання у західній частині Закарпаття у напрямку на північний схід [Malutskyy et al., 2017]. Однак у таких випадках завжди треба пам'ятати, що загальнорегіональне поле напружень взаємодіє з уже наявною тут місцевою системою розломів і напрямки осей напружень у механізмах окремих землетрусів можуть, з огляду на це, дещо відхилятися. У нашому випадку – з північного сходу на схід, що, утім, цілком природно, якщо враховувати напрямки місцевих розломів донеогенового фундаменту (рис. 1, 7, 8) [Хоменко, 1971, 1987].

### **Висновки**

Слабкі землетруси є дуже цінним матеріалом для сейсмологічних досліджень, особливо у регіонах з невисоким рівнем сейсмічної активності, таких як Закарпаття, де сильні землетруси трапляються рідко. Підвищення точності координат вогнищ таких землетрусів є чи не найважливішою умовою для можливості їх подальшої тектонічної інтерпретації. Визначення різнице-вих вступів схожих між собою землетрусів, як і тих, що належали до серії 2013–2015 рр. поблизу Тросника, є одним зі способів вирішення цього завдання.

У поточній роботі основні зусилля були спрямовані на пошук способів підвищення надійності різнице-вих вступів за умови дуже низького співвідношення сигнал/шум у записах дуже слабких схожих землетрусів. Для зменшення впливу коре-

льованих шумів запропоновано адаптивне фільтрування записів із одночасним контролем його ефективності з використанням таблиць максимумів взаємної кореляції між відрізками записів, що містять тільки шум, або і сигнал, і шум. Запропоновано також модифікований критерій визначення вступів з урахуванням мінімуму зміщення максимуму кореляції відносно обчислених. Для додаткової верифікації вступів використано діаграми запізнені вступів тих самих землетрусів на одних станціях відносно інших. Для урахування дрейфу часу на деяких станціях Карпатської мережі Національної академії наук України розроблено спеціальний алгоритм. Різнице-ві координати вогнищ серії 2013–2015 рр. у Троснику визначено з одночасним обчисленням епіцентрально-специфічних станційних поправок. З урахуванням тривимірної інтерпретації різнице-вих гіпоцентрів у визначеному в роботі спільному для усіх землетрусів механізмі вогнища ототожнено площину розриву. Тектонічна інтерпретація різнице-вих координат і механізму вогнища дає вагомі підстави вважати, що серія у Троснику пов'язана, швидше за все, з розломом донеогенового фундаменту паралельного до Карпат простягання, саме на якому опинився й епіцентр найсильнішого землетрусу. Зрозуміло, однак, що для з'ясування активної тектоніки регіону з використанням повторних землетрусів необхідно обробити набагато більший обсяг сейсмічного матеріалу, що можна розглядати як завдання на майбутнє. Запропоновані ж у роботі підходи можуть збільшити обсяг придатного матеріалу і підвищити надійність отримуваних результатів.

### **Подяка**

Автор висловлює велику подяку завідувачу Відділу сейсмічності Карпатського регіону України Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України С. Т. Вербицькому та провідному інженеру відділу І. М. Ніщіменко за консультації та люб'язне надання даних сейсмологічних спостережень.

Частину рисунків виготовлено з використанням пакета GMT [Wessel et al., 2013].

### **Список літератури**

- Вербицький, С. Т., Пронишин, Р. С., Вербицький, Ю. Т., Чуба, М. В., Келеман, І. Н., Стецків, А. Т. (2014). *Сейсмологічний бюлетень України за 2013 год.* Севастополь, НППЦ “Екоси-Гідрофізика”, 92–158.
- Вербицький, С. Т., Пронишин, Р. С., Прокопишин, В. І., Стецків, А. Т., Чуба, М. В., Нищіменко, І. М., Келеман, І. Н. (2014). Сейсмичность Карпат в 2014 году. *Ученые записки Крымского федерального университета*

- им. В. И. Вернадского. *География. Геология*, 27(66), № 2, 87–151.
- Вербицкий, С. Т., Пронишин, Р. С., Прокопишин, В. И., Стецкив, А. Т., Чуба, М. В., Нищименко, И. М., Келеман, И. Н. (2016). Сейсмичность Карпат в 2015 году. *Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология*, 2(68), № 4, С. 69–219.
- Вербицкий, Ю. Т., Гнип, А. Р., Нарівна, М. М., Новотна, О. М., Ярема, І. І. (2011). Ототожнення вибухів у Карпатському регіоні України за ознакою схожості їхніх хвильових форм. *Геодинаміка*, 10(1), 103–109. <https://doi.org/10.23939/jgd2011.01.103>
- Малицький, Д., Муровська, А., Обідіна, О., Гнип, А., Грицай, О., Павлова, А., Пугач, А. (2017). Визначення полів напружень у земній корі за механізмами вогнищ місцевих землетрусів у Закарпатті. *Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Геологія*, 3(78), 36–45. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.78.05>
- Пронишин, Р. С., Пустовитенко, Б. Г. (1982). Некоторые аспекты сейсмического “климата и погоды” в Закарпатье. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, Т. 18, № 10, 74–81.
- Хоменко В. І. (1971). Глибинна будова Закарпатського прогину. *Наук. думка*.
- Хоменко В. И. (1987). Глубинная структура юго-западного края Восточно-Европейской платформы. *Наук. думка*.
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons, Inc., Second edition.*
- Efron, B. (1982). The Jackknife, the Bootstrap, and Other Resampling Plans. *SIAM*. <https://doi.org/10.1137/1.9781611970319>
- Gnyp, A. (2010). Refining locations of the 2005–2006 recurrent earthquakes in Mukacheve, West Ukraine, and implications for their source mechanism and the local tectonics. *Acta Geophysica*, 58 (4), 587–603. <https://doi.org/10.2478/s11600-010-0006-9>
- Gnyp, A. (2013). Recovering Relative Locations of the 2005-2006 Mukacheve Earthquakes from Similarity of their Waveforms at a Single Station. *Acta Geophysica*, 61 (5), 1074–1087. <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0096-7>
- Gnyp, A. (2014). On Reproducibility of Relative Locations of Recurrent Earthquakes Recovered from Similarity of their Waveforms at a Single Station. *Acta Geophysica*, 62 (6), 1246–1261. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0195-0>
- Gnyp, A., & Malytsky, D. (2021). Differential and source terms locations of the 2015 Teresva (East Carpathians) series and their tectonic implications. *Acta Geophysica*, 69 (6), 2099–2112. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00655-w>, <https://rdcu.be/cyPNh>
- Harris, D. B., & Douglas, A. D. (2021). The geometry of signal space: a case study of direct mapping between seismic signals and event distribution. *Geophys. J. Int.*, 224, 2189–2208. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa572>
- Harris, D. B. (1991). A waveform correlation method for identifying quarry explosions, *Bull. seism. Soc. Am.*, 81(6), 2395–2418. <https://doi.org/10.1785/BSSA0810062395>
- Herrmann, R. B. (1979). FASTHYPO – a hypocenter location program. *Earthquake notes*, 50(2), 25–37. <https://doi.org/10.1785/gssrl.50.2.25>
- Malytsky, D. V., Obidina, O. O., Gnyp, A. R., Pavlova, A. Y., & Grytsai, O. D. (2017). Tectonic stresses in the area of Solotvyno deep, Eastern Carpathians, from focal mechanisms of local earthquakes. *16th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 15–17 May 2017, Kyiv, Ukraine, Conference Paper 11137\_ENG*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701868>
- Nadeau, R. M., & McEvelly, T. V. (1999). Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes. *Science*, 285(5428), 718–721. <https://doi.org/10.1126/science.285.5428.718>
- Poupinet, G., Ellsworth, W.L., & Fréchet, J. (1984). Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California. *J. Geophys. Res.*, 89, B7, 5719–5731. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05719>.
- Robinson, D. J, Sambridge, M., Sneider, R., & Hauser, J. (2013). Relocating a Cluster of Earthquakes Using a Single Seismic Station. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 108(6), 3057–3072. <https://doi.org/10.1785/0120130004>
- Robinson, D. J, Sambridge, M., & Sneider, R. (2007). Constraints on coda wave interferometry estimates of source separation: The acoustic case. *Explor. Geophys.*, 38(3), 189–199. <https://doi.org/10.1071/EG07019>
- Robinson, D. J, Sneider, R., & Sambridge, M. (2007). Using coda wave interferometry for estimating the variation in source mechanism between double couple events. *J. Geophys. Res.*, 112(B12), B12302. <https://doi.org/10.1029/2007JB004925>
- Shearer, P. M. (1997). Improving local earthquake locations using L1 norm and waveform cross correlation: Application to the Whittier Narrows, California, aftershock sequence. *J. Geophys. Res.*, 102(B4), 8269–8283. <https://doi.org/10.1029/96JB03228>
- Shearer, P., Hauksson, E., & Lin, G. (2005). Southern California hypocenter relocation with waveform cross-correlation. Part2: Results using source-specific station terms and cluster analysis. *Bull.*

- Seism. Soc. Am.*, 95(3), 904–915. <https://doi.org/10.1785/0120040168>
- Sibson, R. (1973). SLINK: an optimally efficient algorithm for the single-link cluster method. *The Computer Journal. British Computer Society*, 16 (1): 30–34. <https://doi.org/10.1093/comjnl/16.1.30>
- Starodub, G., & Gnyп, A. (1999). Models of the Earth's Crust Structure in the East Carpathian Region determined from Inversion of Farfield P-waveforms. *Acta Geophysica Polonica*, 47(4), 375–400. Id. YADDA: bwmeta.element.baztech-article-BSL6-0006-0061
- Tibuleac, I. M., & Herrin, E. (1999). Lower mantle heterogeneity beneath the Caribbean Sea. *Science*, 285(5434), 1711–1715. <https://doi.org/10.1126/science.285.5434.1711>
- Waldhauser, F., & Ellsworth, L.W. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90(6), 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J. F., & Wobbe, F. (2013). Generic mapping tools: improved version released. *EOS Trans. AGU*, 94, 409–410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>

Andriy GNYP

Carpathian Branch of Subbotin Institute of Geophysics, National Academy Sciences of Ukraine, 3B, Naukova str., Lviv, 79060, Ukraine, e-mail: agnyp.gm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2612-4234>

ESTIMATION OF DIFFERENTIAL LOCATIONS AND FOCAL MECHANISM  
OF TROSNYK EARTHQUAKES IN THE TRANSCARPATIANS DURING 2013–2015:  
METHODOLOGICAL ASPECTS AND ANALYSIS OF THE RESULTS

The focal coordinates of a series of small ( $1.0 < M_L < 2.5$ ) similar (recurrent) earthquakes that occurred during 2013–2015 near the village of Trosnyk in the south of Transcarpathians were estimated simultaneously with the source-specific station terms using their differential arrivals at Ukrainian, Slovak, Hungarian and Romanian stations. To reduce the effect of correlated noise in records with very low signal-to-noise ratio and to improve the reliability of differential arrivals, adaptive filtering has been proposed, and the maximum correlation criterion was modified to include the minimum departure from the calculated arrival times. For further verification of their reliability, diagrams of intervals between arrivals at pairs of stations were proposed. The sensitivity of the obtained solution to the network configuration was assessed using the jack-knife principle, when the coordinates are calculated with removing one station from the full set each time. The focal mechanism common to all earthquakes in the series was defined using the polarities of P-wave arrivals at 16 stations. Based on the results of the 3D interpretation of the differential hypocenters, the nodal plane with a strike of  $\sim 150^\circ$  was identified as the rupture plane, and the mechanism itself was classified as left-lateral slip with a component of thrust. The epicenter of the strongest earthquake was located almost exactly on the fault of the pre-Neogene basement with a strike parallel to the Carpathian arc, almost the same as the strike of the rupture plane. The axis of compression in the focal mechanism is directed to the east, which is fully consistent with the northeast direction of the general regional field.

*Key words:* recurrent (similar) earthquakes; waveform correlation; differential arrivals; station terms; focal mechanism; fault-block tectonics; tectonic stress.

Надійшла 31.08.2022 р.