

Визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону

© Д. В. Малицький, О. Д. Грицай, О. О. Муйла, О. І. Кутнів,
Е. М. Козловський, 2014

Карпатське відділення Інституту геофізики НАН України, Львів, Україна

Надійшла 2 квітня 2014 р.

Представлено членом регколегії О. В. Кензерею

Рассматривается одна из актуальных проблем — нахождение решения механизма очага землетрясения. На примере нескольких событий, произошедших в Карпатском регионе Украины, предложено решение этой задачи с помощью графического метода. Данный метод основан на определении наилучшего варианта размещения нодальных плоскостей относительно нечетких вступлений P -волн и логарифма отношения амплитуды S -волны к амплитуде P -волны. Приведена последовательность построения диаграммы для определения механизма очага. Установлены механизмы очагов и виды разломов для 6 событий, произошедших в Закарпатье. Отмечено сходство механизмов очагов для повторных землетрясений. По спектрам записей, преобразованных в смещения, восстановлены, согласно модели Брюна, динамические параметры очагов 4 землетрясений, которые произошли в 2012—2013 гг.

Ключевые слова: очаг землетрясения, графический метод, сейсмическая волна, анизотропная среда.

Вступ. На сьогодні однією із головних задач сейсмології є визначення механізмів вогнищ землетрусів. Особливо гостро це питання постає для районів з малою сейсмічною активністю. Такі події реєструє невелика кількість станцій, що ускладнює вирішення завдання. Поряд із класичним визначенням механізму вогнищ, яке ґрунтується на полярності вступу поздовжніх P -хвиль [Балакіна і др., 1972; Касакхара, 1985; Воронина, 2004], слід намагатися знайти нові підходи до розв'язання задачі. Для визначення сімейства нодальних площин застосовують різні методи: 1) знаходження механізму за тензором сейсмічного моменту, визначеного з інверсії хвильових форм трикомпонентних сейсмограм, що записані на локальних сейсмічних станціях [Adamova, 2008]; 2) знаходження амплітуд P -хвиль [Ebel, 1990]; 3) використання логарифма відношення амплітуди S -хвилі до амплітуди P -хвилі [Hardebeck, Shearer, 2003]. Кожен з цих методів має свої переваги і обмеження. Точність розв'язку задачі визначення механізму вогнища за будь-яким підходом залежить від точності визначення гіпоцентру та швидкісної моделі середовища. Однак існують й інші фактори, які слід враховувати при визначенні механізму вогнища. Наприклад, методи, що ґрунтуються на визначенні тензора сейсмічного моменту з хви-

льових форм, потребують інформації про АЧХ приладів, які реєструють події та інформації про середовище під станцією. Використання даних щодо логарифма відношення амплітуди S -хвилі до амплітуди P -хвилі не можна застосовувати для покращення розв'язку задачі визначення вже відомих механізмів, але це може допомогти у виборі найбільш відповідного розв'язку із сімейства розв'язків, знайдених за полярністю вступу поздовжніх P -хвиль [Hardebeck, Shearer, 2003].

Для визначення механізмів вогнищ запропоновано графічний метод [Малицький та ін., 2013], який використовує інформацію як про перші вступу P -хвиль, так і про логарифм відношення амплітуди S -хвилі до амплітуди P -хвилі.

Визначення механізму вогнищ землетрусів. Механізм вогнища землетрусу безпосередньо залежить від полярності вступу P -хвилі. Полярність першого імпульсу P -хвилі, що виступає від джерела землетрусу і яку спостерігають на вертикальній компоненті сейсмограми, приймає два протилежні значення: «+» (рух частинок від джерела — стиск) і «-» (рух частинок до джерела — розтяг). Дані з усіх станцій щодо полярності першого імпульсу розміщені за азимутом довкола епіцентру за певною схемою. Їх умовно можна розділити

на квадранти стиску і розтягу взаємно перпендикулярними прямими [Балакіна и др., 1972; Аки, Ричардс, 1983; Касахара, 1985; Воронина, 2004]. Такий квадрантний розподіл і визначає діаграму напрямленості випромінювання зсувної дислокації для *P*-хвиль (рис. 1, *а*). Діаграму напрямленості найзручніше зображувати на фокальній сфері малого радіуса з центром в джерелі (рис. 1, *б*).

Розміщення точок на фокальній сфері визначають за кутом виходу променя, який відраховують від вертикалі, і за азимутом на станцію, який визначають від напрямку на північ до станції. Щоб показати фокальну сферу на площині, використовують її стереографічну проекцію [Балакіна и др., 1972; Аки, Ричардс, 1983; Касахара, 1985; Воронина, 2004] (рис. 1, *в*). Отже, саме з проекції фокальної сфери і визначають параметри механізму вогнища, тобто орієнтацію площини розриву, напрямок посувань, орієнтацію головних осей (рис. 2) [Балакіна и др., 1972; Аки, Ричардс, 1983; Касахара, 1985, Воронина, 2004; Cronin, 2004].

Відомо, чим слабший землетрус, тим менше станцій його реєструють і тим меншою є кількість вхідних даних для побудови механізму вогнища. Тому, по-перше, важливо на початковому етапі обробки даних виключити похибку, якщо проекція променя на станцію не потрапляє у відповідний квадрант розподілу. Наприклад, на сейсмограмі певної станції зафіксовано на вертикальній компоненті знак «+», а проекція цього променя потрапляє у квадрант розтягу і лежить поряд з проекціями променів на станції, які зареєстрували на вертикальній компоненті знак «-». Подібна похибка може виникнути через інверсію знаків на приладі, який записував подію. Щоб розв'язати цю проблему, на етапі опрацювання даних слід брати до уваги можливу інверсію знаків на кожній станції. Якщо такої інформації немає, потрібно перевірити наявність інверсії знаків за допомогою записів сильних землетрусів. Відомо, що для далеких і сильних землетрусів при визначенні їх механізму вогнища точки, що позначають проекції променів на станції з одного регіо-

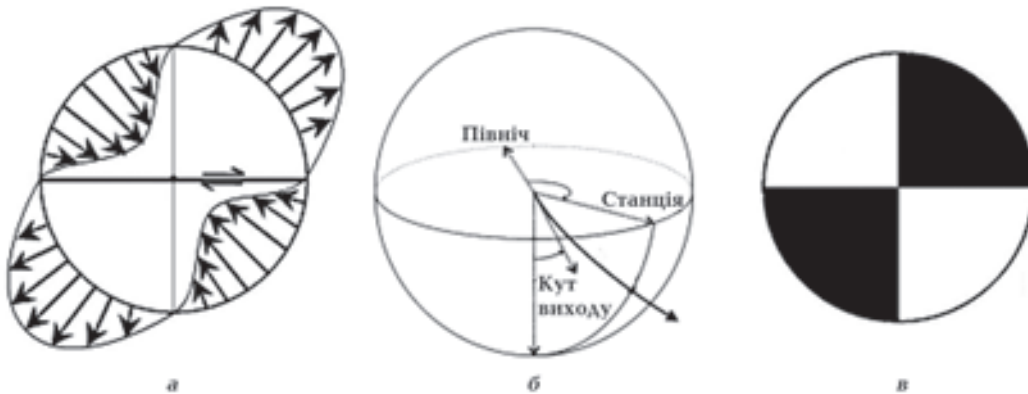


Рис. 1. Квадрантний розподіл даних сейсмічних станцій: *а* — діаграма випромінювання зсувної дислокації для *P*-хвиль; *б* — фокальна сфера; *в* — зображення механізму вогнища за допомогою стереографічної проекції.

Наведену методику визначення механізмів вогнищ використовують успішно протягом багатьох років, зокрема для сильних землетрусів. Точність визначення параметрів вогнищ залежить від кількості і якості вхідних даних: достатньої кількості станцій, які зафіксували подію; точності визначення епіцентральної відстані, глибини вогнища землетрусу, кутів виходу, що, в свою чергу, залежить від варіанта швидкісної моделі середовища; точності визначення знака вступу *P*-хвилі на вертикальній компоненті запису події.

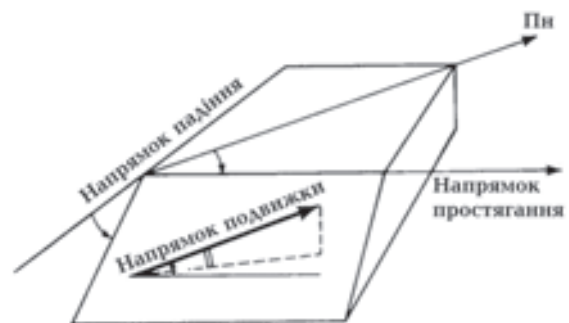


Рис. 2. Орієнтація площини розриву і напрямок посування.

ну, мають дуже близькі значення азимута і кута виходу, а отже, потрапляють в один квадрант. Механізми вогнищ сильних землетрусів відомі із всесвітнього сейсмологічного бюлетеня [ISC Bulletin]. У такий спосіб можна визначити відомий знак, який мають реєструвати сейсмометри на станціях певного регіону. Перевіривши полярності вступу P -хвилі на кожній станції, матимемо інформацію про наявність інверсії знаків на вертикальних компонентах.

По-друге, важливими вхідними даними є нечіткі вступу P -хвилі [Cronin, 2004]. Часто через зашумлені записи також зменшується кількість станцій, дані з яких можна використати для визначення механізму вогнища. Втім існують випадки, коли нечіткий вступ P -хвилі спостерігається лише на вертикальній компоненті, тоді як на іншій компоненті можна побачити чіткий вступ (рис. 3). У такому разі слід говорити не про погану якість запису, а про користь інформації. Адже відомо, що найбільша амплітуда P -хвилі спостерігається біля осей стиску або розтягу, а біля нодальних площин прямує до нуля [Аки, Ричардс, 1983]. Тому проекції променів зі станцій лежатимуть на нодальних лініях [Cronin, 2004]. Іншими словами, за розподілу на зони стиску і розтягу нодальні лінії проходять через точки, що позначають нечіткі вступу P -хвилі на вертикальній компоненті.

По-третє, для регіонів з малою сейсмічною активністю додатковими вхідними даними є величини логарифма відношення амплітуди

S -хвилі до амплітуди P -хвилі на кожній станції [Hardebeck, Shearer, 2003]. З тих самих міркувань, що амплітуда P -хвилі є найбільшою біля осей стиску або розтягу, найменшою — біля нодальних площин, а амплітуда S -хвилі є найбільшою на нодальних площинах, найменшою — біля осей стиску або розтягу, можна зробити висновок, що логарифм відношення буде найменшим біля осей стиску або розтягу, тобто всередині квадранта, а з наближенням до нодальних площин зростатиме. Звісно, такий підхід має і недоліки. Адже не завжди вдається встановити амплітуди, які визначають як піки першого півперіоду після вступу хвилі, тому що іноді важко виявити власне вступ, особливо S -хвилі. Разом з тим логарифм відношення зберігає свою вагу щодо розміщення нодальних ліній навіть після фільтрування запису [Hardebeck, Shearer, 2003]. Крім того, ця величина не залежить від АЧХ приладу, оскільки є відношенням і його можна застосовувати з метою визначення механізму вогнища для подій, якщо інша інформація відсутня. Використання логарифма відношення не дає змоги самостійно однозначно визначити механізм вогнища, інформація про полярність вступу P -хвилі залишається основною. Втім за логарифмом відношення амплітуд можна визначити розміщення нодальних ліній. Логарифм відношення обчислюють для кожної трикомпонентної сейсмограми. І якщо це значення лежить у межах 0—0,5, то проекція променя на певну станцію знаходиться всередині квадранта, а біля

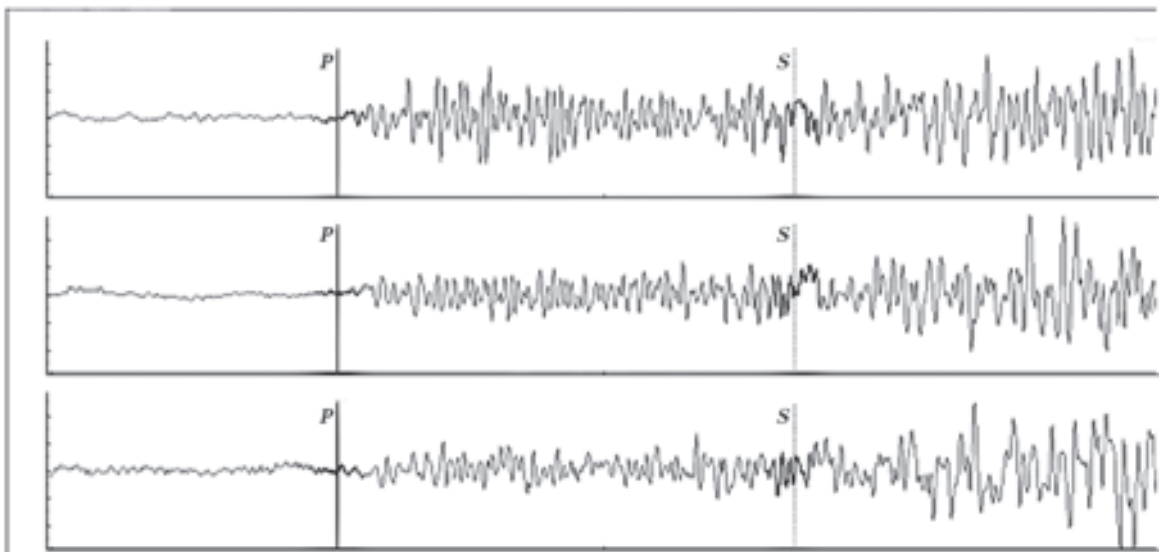


Рис. 3. Запис сейсмограми землетрусу 04.04.2013 біля с. Нижнє Селище ($\varphi_0=48,1977^\circ$, $\lambda_0=23,4663^\circ$, $h=1,73$ км). На вертикальній компоненті спостерігався нечіткий знак вступу P -хвилі.

точок, що є проєкціями променя на станції, де логарифм більший за одиницю, проходитьме ноціальна лінія.

Отже, механізм вогнища для кожної події визначають за певною схемою:

- перевірка наявності інверсії знака на сейсмометрах на кожній станції у певний період;
- визначення знаків вступу P -хвилі на вертикальній компоненті z , в тому числі нечітких вступів («up» або «+» — перший вступ P -хвилі на вертикальній компоненті вгору, «down» або «-» — перший вступ P -хвилі на вертикальній компоненті вниз, нечіткі вступу «e»);
- обчислення логарифма відношення амплітуд S -хвиль до амплітуд P -хвиль на кожній станції ($\lg(S/P)$);
- обчислення азимута на станцію від напрямку на північ (ϕ) і кута виходу променя хвильового фронту з вогнища на станцію (i);
- нанесення на стереографічну сітку точок проєкцій променів стиску та розтягу, а також точок проєкцій нечітких вступів, якщо вони є. Від напрямку на північ уздовж кола відкладають азимут на станцію ϕ , від центру в напрямку позначки про азимут — кут виходу i (рис. 4). Якщо кут виходу більший за 90° (промінь виходить у верхню півплощину), то відкладають точку з азимутом, зміненим на 180° , і кутом виходу $180^\circ - i$;
- визначення розміщення ноціальних ліній відповідно до розподілу полярностей перших вступів (точки одної полярності мають лежати в одному квадранті, нечітких вступів (ноціальні лінії мають проходити через точки нечітких вступів або близько до них), логарифма відношення амплітуд (малі значення всередині квадранта, більші — ближче до ноціальних ліній);
- визначення із стереографічної проєкції орієнтації ноціальних площин (простягання — Strike, падіння — Dip), напрямку посування Slip, орієнтації осей стиску P , розтягу T , нульової N (азимут — Azm , заглиблення — $Plunge$);

Апробація методу визначення механізму вогнища з використанням логарифма відношення амплітуд для землетрусів Карпатського регіону України. Для задачі визначення механізмів вогнищ розглянуто кілька подій:

1) 15.11.2006, 18:09:38.5, $\phi_0=48,22^\circ$, $\lambda_0=22,57^\circ$, $h=8,6$ км, $MD=2,6$ (біля м. Берегове);

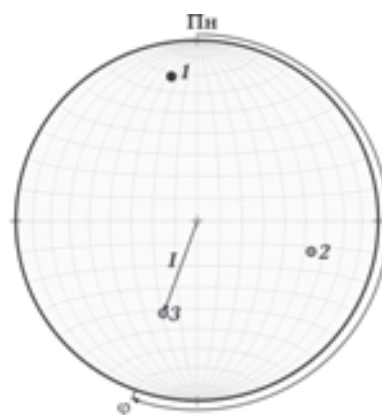


Рис. 4. Нанесення на стереографічну сітку точок — проєкцій променів: 1 — точки, що відповідають за нечіткий знак вступу; 2 — те саме, за полярність вступу P -хвилі зі знаком «+»; 3 — те саме, за полярність вступу P -хвилі зі знаком «-».

2) 23.11.2006, 07:15:18.7, $\phi_0=48,20^\circ$, $\lambda_0=22,52^\circ$, $h=12,3$ км, $MD=4,2$ (біля м. Берегове);

3) 06.01.2012, 04:34:10.46, $\phi_0=48,5309^\circ$, $\lambda_0=23,8365^\circ$, $h=5,1$ км, $ML=2,53$ (район НПП Синевир);

4) 10.01.2012, 12:12:55.58, $\phi_0=48,5367^\circ$, $\lambda_0=23,8378^\circ$, $h=5,7$ км, $ML=2,68$ (район НПП Синевир);

5) 24.10.2012, 03:13:40.50, $\phi_0=48,1676^\circ$, $\lambda_0=23,6525^\circ$, $h=4,5$ км, $ML=2,43$ (біля с. Угля);

6) 04.04.2013, 21:15:14.36, $\phi_0=48,1977^\circ$, $\lambda_0=23,4663^\circ$, $h=1,73$ км, $ML=2,56$ (біля с. Нижнє Селище).

Дані щодо місця локалізації і часу події використано із сейсмологічного бюлетеня України [Сейсмологический ..., 2008] і протоколів про ці землетруси. Дані протоколів і хвильові форми отримано від Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна. Для двох подій 2006 р. з метою збільшення кількості інформації використано також дані з угорського сейсмологічного бюлетеня [Toth et al., 2007], однак з урахуванням того що нема інформації про інверсію знаків на приладах цих станцій, вказані дані вважали другорядними, більшу вагу мали дані із записів сейсмограм. Із хвильових форм для кожної події визначено знак вступу P -хвилі на z -компоненті кожної станції, а також логарифм відношення амплітуд S -хвиль до амплітуд P -хвиль (див. табл. 2, 4, 6, 8, 10, 12). При цьому враховано, що в листопаді 2006 р. інверсію знаків спостерігали на z -компоненті на станціях BERU, BRIU, KORU, MEZ, в 2012 і 2013 рр. — на стаціях NSLU, KORU, TRSU. За допомогою програмного пакета FA обчислено кути виходу та азимуту на станцію (див. табл. 2, 4, 6, 8, 10, 12). Для визначення кута виходу ви-

користано швидкісну модель, наведену в табл. 1. Швидкість в кожному шарі — це середня швидкість, значення якої взято із сейсмогеологічного розрізу земної кори вздовж Закарпатського прогину (рис. 5) [Чекунов и др., 1969].

За вхідними даними для кожної події із табл. 2, 4, 6, 8, 10, 12 побудовано стереографічну проекцію фокальної сфери, за допомогою якої визначено механізм вогнища. На стереографічну сітку нанесено точки стиску і розтягу, згідно з даними щодо азимута на станцію, кута виходу і полярності вступу. Ці точки розділено нодальними лініями на зони стиску і розтягу. Кількість таких розподілів для кожної

події є значною, серед них можна було виділити сімейства (рис. 6), визначити усереднені параметри варіантів розподілів у кожному сімействі та варіанти розподілу для певної події (див. рис. 7, 10, 13, 19, 22). Відповідно до даних щодо нечітких вступів і логарифма відношення амплітуд, з основних варіантів вибирали один, який найкраще б описував механізм вогнища для події (див. рис. 8, 11, 14, 17, 20, 23). Таким чином, для кожної події з наведеного варіанта стереографічної проекції визначено параметри механізму вогнища (див. табл. 3, 5, 7, 9, 11, 13).

Подія 15.11.2006, 18:09:38,5, $\varphi_0=48,22^\circ$, $\lambda_0=22,57^\circ$, $h=8,6$ км, $MD=2,6$ (біля м. Берегове) (табл. 2, 3, рис. 7—9). З наведеного механізму вогнища можна дійти висновку, що видом розлому є насув під дією горизонтальних сил стиску і вертикальних сил розтягу (рис. 9). Однак лише за цими даними важко вказати, яка з площин є площиною розлому.

Подія 23.11.2006, 07:15:18,7, $\varphi_0=48,20^\circ$, $\lambda_0=22,52^\circ$, $h=12,3$ км, $MD=4,2$ (біля м. Берегове), (табл. 4, 5, рис. 10—12). Для досліджуваної події також спостерігався насув під дією горизонтальних сил стиску і вертикальних сил розтягу (рис. 12).

Подія 06.01.2012, 04:34:10,46, $\varphi_0=48,5309^\circ$, $\lambda_0=23,8365^\circ$, $h=5,1$ км, $ML=2,53$, район НПП Суневир (табл. 6, 7, рис. 13—15). Для досліджува-

Таблиця 1. Швидкісна модель середовища вздовж Закарпатського прогину

Шар, км	Швидкість, км/с
0—2,5	4,7
2,5—6,5	5,5
6,5—8	6,3
8—12	6,2
12—17,5	6,7
17,5—21	6,85
21—26,5	6,4
26,5	8,1

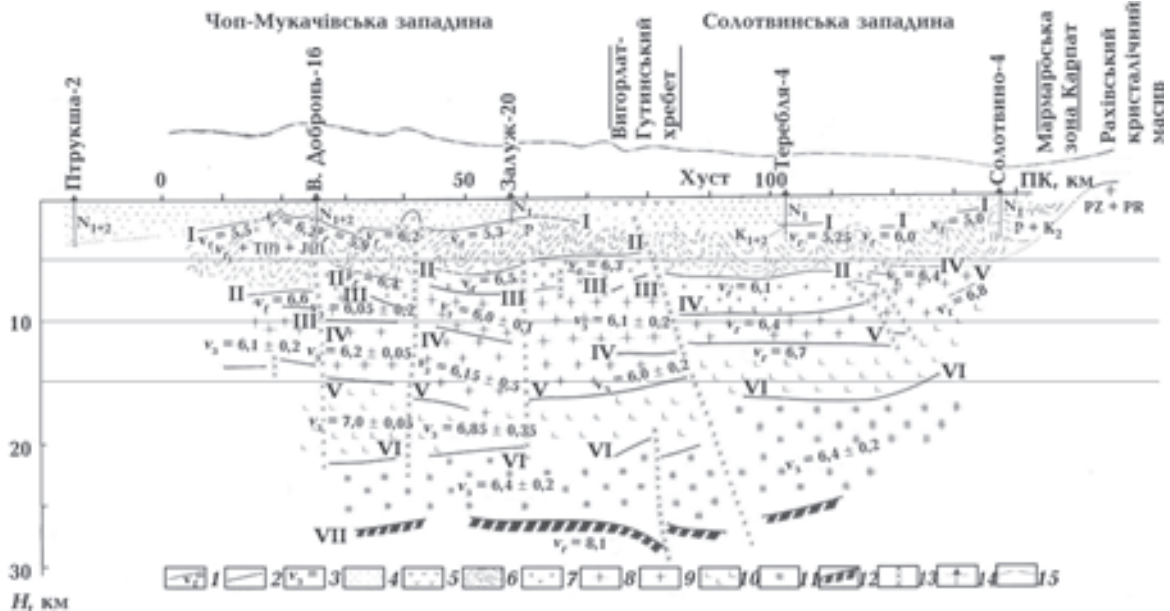


Рис. 5. Сейсмогеологічний розріз земної кори вздовж Закарпатського прогину: 1 — заломлюючі горизонти із зазначеними граничними швидкостями (V_T), 2 — відбиваючі горизонти і їх номери, 3 — пластова швидкість, 4 — неогенова моласа, 5 — вулканіти в осадовому чохла, 6 — мезозойсько-палеогенова складчаста основа прогину, 7 — палеозойський(?) метаморфізований фундамент, 8 — шар пониженої швидкості в середині «граніту», 9 — докембрійський(?) кристалічний комплекс, 10 — «базальтовий» шар, 11 — шар пониженої швидкості в основі земної кори, 12 — розділ Мохоровичича, 13 — розломи, 14 — бурові свердловини, 15 — крива Δg .

ної події механізм вогнища свідчить про насув (рис. 15), що є характерною особливістю цього регіону згідно з його тектонікою.

Подія 10.01.2012, 12:12:55.58, $\varphi_0=48,5367^\circ$, $\lambda_0=23,8378^\circ$, $h=5,7$ км, $ML=2,68$, район НПП Синевир (табл. 8,9, рис. 16—18). Для цієї події

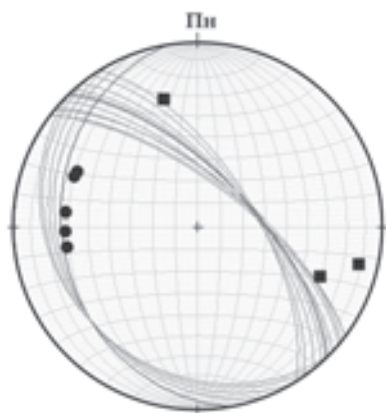


Рис. 6. Приклад сімейства нодальних площин з усередненим варіантом для механізму вогнища події 24.10.2012.

відзначено подібність хвильових форм до хвильових форм для події 06.01.2012, 04:34:10,46, $\varphi_0=48,5309^\circ$, $\lambda_0=23,8365^\circ$, $h=5,1$ км, $ML=2,53$ (район НПП Синевир) (див. рис. 13). Крім того, для обох подій є близькими параметри гіпоцентру. Тому можна дійти висновку, що ці землетруси є повторними. Отже, варіанти розміщення нодальних площин для події 10.01.2012, 12:12:55,58, $\varphi_0=48,5367^\circ$, $\lambda_0=23,8378^\circ$, $h=5,7$ км, $ML=2,68$ (район НПП Синевир) такі самі, як і для події 06.01.2012, 04:34:10,46, $\varphi_0=48,5309^\circ$, $\lambda_0=23,8365^\circ$, $h=5,1$ км, $ML=2,53$ (район НПП Синевир), а їх механізми і, відповідно, види розломів — майже однакові.

Відповідно до цих параметрів, як і для землетрусу 6.01.2012 р., механізм вогнища свідчить про наявність насуву (рис. 18).

Подія 24.10.2012, 03:13:40,50, $\varphi_0=48,1676^\circ$, $\lambda_0=23,6525^\circ$, $h=4,5$ км, $ML=2,43$ біля с. Угля, (табл. 10, 11, рис. 19—21). Згідно з механізмом вогнища, для цього землетрусу характерний насув, що відбувся під дією горизонтальних сил стиску і вертикальних сил розтягу.

Таблиця 2. Вхідні дані для визначення механізму вогнища події 15.11.2006

Станція	Знак вступу Р-хвилі	Епіцентральна відстань, град	Азимут на станцію, град	Кут виходу, град
BERU	up	0,053	74,5	139
TRPA	up	0,091	188,4	121
MUKU	up	0,247	18,3	99
TRSU	down	0,287	115,6	98
BRIU	down	0,322	68,3	97
KORU	down	0,381	99,3	96
UZH	e	0,449	335,7	96
NSLU	down	0,592	91,8	68
MEZ	down	0,691	64,6	68
RAK	e	1,10	98,0	50
MORU	up	1,25	43,2	50
DRGR	down	1,43	176,1	50
KSV	e	1,66	85,8	50
PSZ	down	1,81	261,4	50
PENC	up	2,24	260,2	50
MORC	down	3,65	297,1	50
BEH	down	6,6	356,6	19

Таблиця 3. Параметри механізму вогнища землетрусу 15.11.2006

Нодальна площина						Вісь					
1			2			P		T		N	
Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	Azm	Plunge	Azm	Plunge	Azm	Plunge
215	48	100	20	43	79	298	3	189	82	28	7

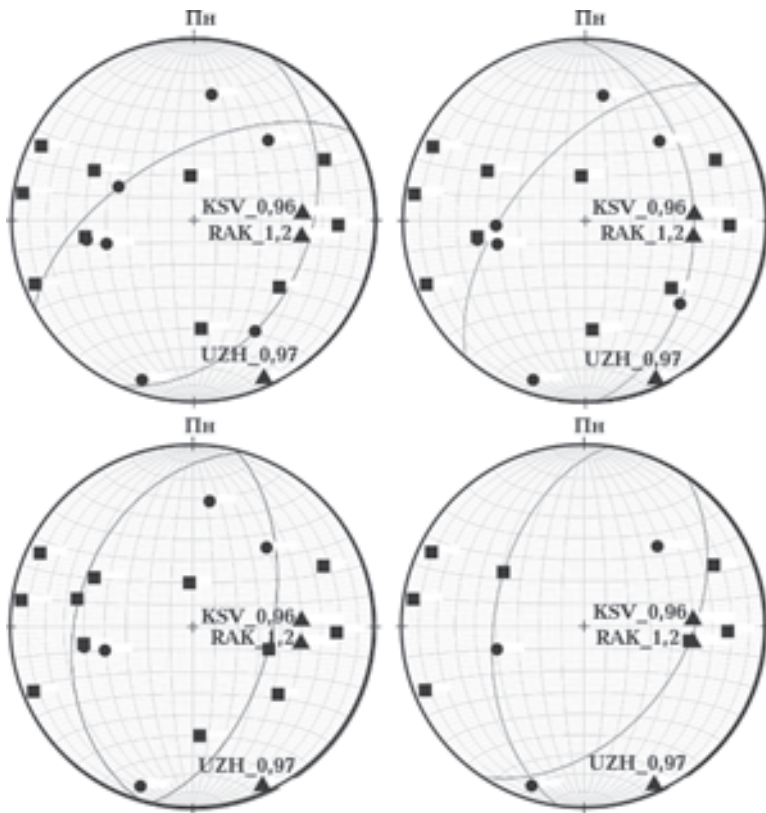


Рис. 7. Варіанти розміщення нодальних площин для події 15.11.2006, 18:09:38,5. Кругок — станції, на яких зафіксовано стиск, квадратик — розтяг, трикутник — нечіткі вступи. Білі станції з нечіткими вступами визначено логарифм відношення амплітуди S -хвилі до амплітуди P -хвилі.

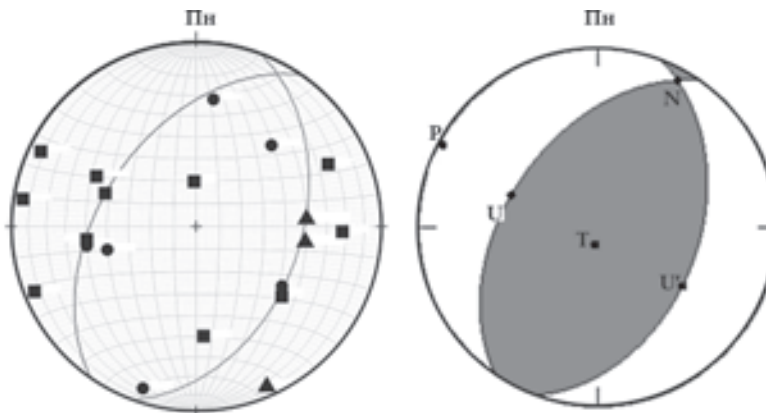


Рис. 8. Механізм вогнища землетрусу 15.11.2006, 18:09:38,5. Точка P — точка проєкції осі стиску, T — точка проєкції осі розтягу, N — точка проєкції нульової осі.

Подія 04.04.2013, 21:15:14,36, $\phi_0=48,1977^\circ$, $\lambda_0=23,4663^\circ$, $h=1,73$ км, $ML=2,56$, біля с. Нижне Селище (табл. 12, 13, рис. 22—24). Цей механізм відрізняється більшою частиною зсуву, і розлом є насuvo-зсувом.

Динамічні параметри вогнищ землетрусів.

Крім механізму вогнища важливими якісними характеристиками джерела є його динамічні параметри: сейсмічний момент M_0 ; розміри

площини розриву (радіус колової дислокації, згідно з моделлю Брюна, — R , площина розлому A); скинене напруження $\Delta\sigma$, середнє посування D . Ці параметри обчислюють, використовуючи значення кутової частоти f_0 і рівня спектральної густини Ω_0 , які визначають із спектрів об'ємних хвиль, переведених в одиниці переміщення за допомогою перетворення Фур'є. Для дислокаційної моделі Брюна спектр пере-

Т а б л и ц я 4. Вхідні дані для визначення механізму вогнища події 23.11.2006

Станція	Знак вступу Р-хвилі	Епіцентрально відстань, град	Азимут на станцію, град	Кут виходу, град
TRPA	up	0,073	164	141
BERU	up	0,091	68	134
MUKU	up	0,277	24	102
BRIU	down	0,360	67	99
KORU	down	0,421	96	98
UZH	e	0,455	341	97
NSLU	down	0,625	90	96
MEZ	down	0,729	64	96
KOLS	down	0,752	347	96
RAK	e	1,13	97	56
MORU	up	1,29	44	56
DRGR	up	1,41	175	56
KWP	up	1,44	5	56
KSV	e	1,7	85	56
PSZ	down	1,78	262	56
LVV	e	1,9	31	56
BUD	up	2,45	254.2	56
VYHS	down	2,47	278	56
OJC	up	2,69	320	56
PKSG	down	2,89	255	56
PKSM	down	3,3	234	56
IAS	down	3,54	105	56
MLR	down	3,58	138	56
ZST	up	3,61	272	56

Т а б л и ц я 5. Параметри механізму вогнища землетрусу 23.11.2006

Нодальна площина						Вісь					
1			2			P		T		N	
Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	Azm	Plunge	Azm	Plunge	Azm	Plunge
211	52	95	25	38	81	299	7	147	82	30	4

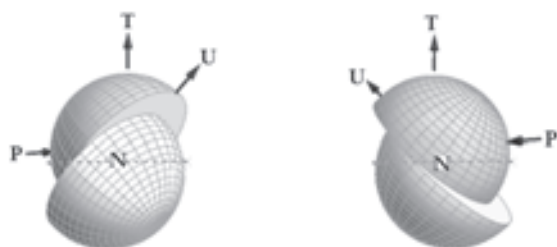


Рис. 9. Варіанти можливих розломів для землетрусу 15.11.2006. P — напрямок осі стиску, T — напрямок осі розтягу, U — напрямок посування по розриву.

міщення матиме такий вигляд [Havskov, Ottomoller, 2010]:

$$S(f) = \frac{M_0}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} 4\pi r v^3$$

де f — частота; v — швидкість хвилі у джерелі; ρ — густина середовища. На низьких частотах спектральний рівень є плоским і пропорційним до M_0 , а на високих частотах він лінійно спадає з нахилом -2° .

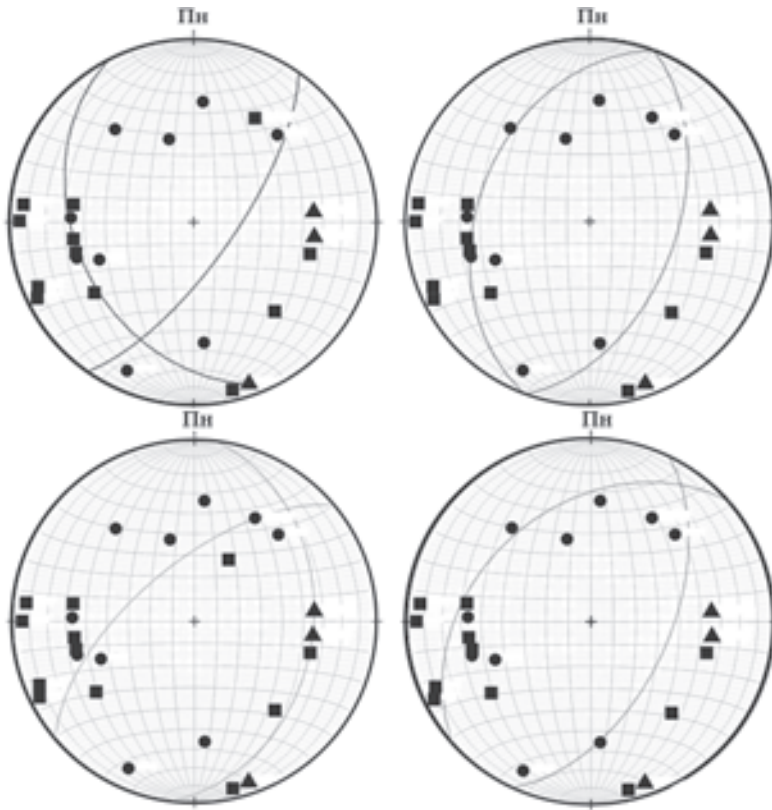


Рис. 10. Варіанти розміщення нодальних площин для події 23.11.2006.

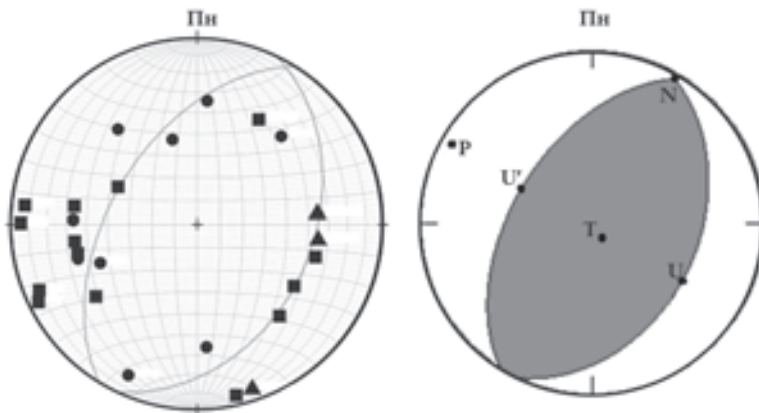


Рис. 11. Механізм вогнища землетрусу для події 23.11.2006.

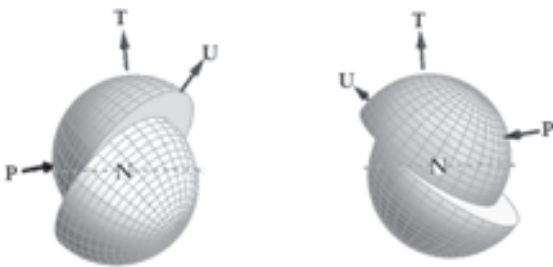


Рис. 12. Варіанти можливих розломів для землетрусу 23.11.2006.

Оскільки спектр запису землетрусу на станції є суперпозицією впливу як джерела, так і характеристик приладу, властивостей глибинної будови середовища на шляху джерело—станція, напрямленості випромінення з джерела, спостережуваний спектр можна виразити так [Пустовітенко та ін., 2013; Havskov, Ottemoller, 2010]:

$$D(f) = \frac{\Omega_0}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)} = \frac{M_0 \cdot R_{\theta\varphi} \cdot C(f)}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right) 4\pi r v^3} G(h),$$

Т а б л и ц я 6. Вхідні дані для визначення механізму вогнища події 06.01.2012

Станція	Вступ <i>P</i> -хвилі	Азимут на станцію ϕ , град	Кут виходу <i>i</i> , град	lg <i>S/P</i>
MEZ	down	265,1	61	0,48
NSLU	up	217,2	61	0,72
RAKU	up	156,4	61	0,33
BRIU	up	250,7	61	1,28
KORU	up	231,6	61	0,53
SHIU	down	335,8	55	0,58
MUKU	down	264,7	55	0,41
BERU	up	249,9	55	0,35
STZU	down	301,7	55	—

Т а б л и ц я 7. Параметри механізму вогнища землетрусу 06.01.2012

Нодальна площина						Вісь					
1			2			P		T		N	
Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	Azm	Plunge	Azm	Plunge	Azm	Plunge
243	72	69	114	27	138	349	24	125	58	250	20

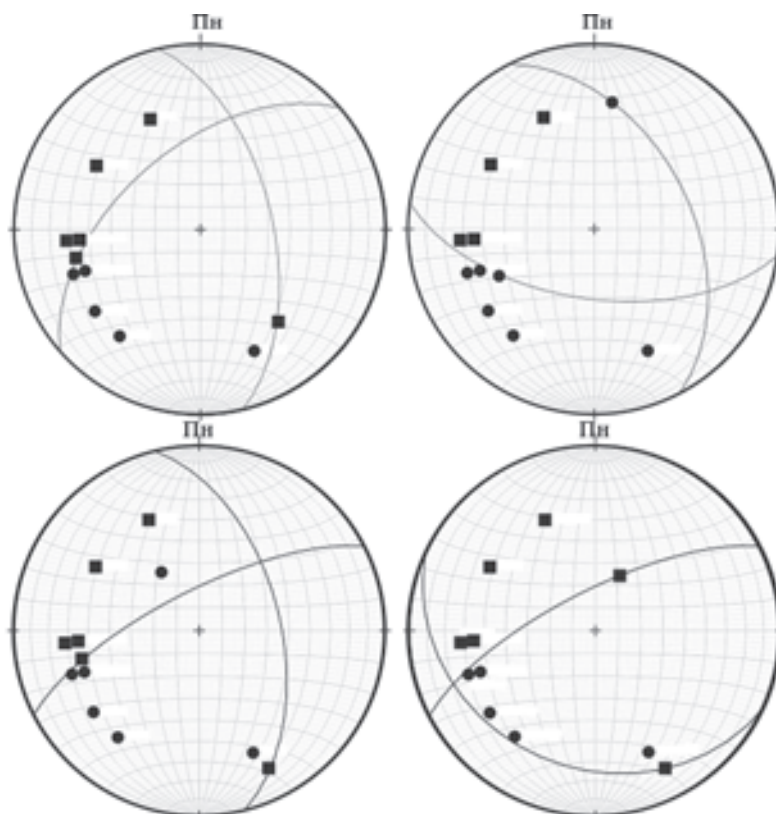


Рис. 13. Варіанти розміщення нодальних площин для події 06.01.2012.

де $R_{\theta\phi}$ — параметр напрямленості променів; $C(f)$ — параметр ефекту вільної поверхні; $G(h)$ — поправка за геометричне розходження; h — гіпоцентрально відстань.

З урахуванням того що для малих сейсмічних відстаней $G(h)=1/h$, сейсмічний момент можна обчислювати, згідно з [Пустовитенко, Пантелеєва, 1990; Navskov, Ottemoller, 2010]:

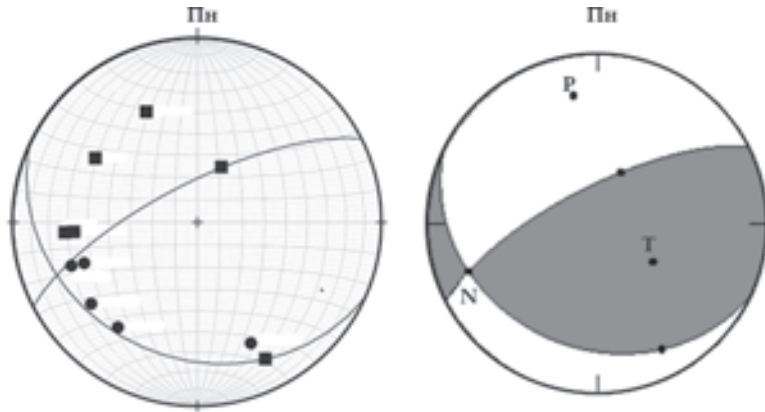


Рис. 14. Механізм вогнища землетрусу для події 06.01.2012.

$$M_0 = \frac{\Omega_0 \cdot 4\pi r v^3 h}{R_{\theta\phi} \cdot C(f)},$$

де параметр ефекту вільної поверхні $C(f)$ залежить від кута падіння і визначається для P -хвилі згідно з графіком, зображеним на рис. 25 [Vambach, Vogmann, 2011] для кожної станції.

Параметр напрямленості променів $R_{\theta\phi}$ для P -хвилі визначають, використовуючи інформацію про механізм вогнища, відповідно до [Аки, Ричардс, 1983]:

$$R_{\theta\phi} = \cos \lambda \sin \delta \sin^2 i \sin 2(\phi - \phi_s) - \cos \lambda \cos \delta \sin 2i \cos(\phi - \phi_s) + \sin \lambda \sin 2\delta (\cos^2 i - \sin^2(\phi - \phi_s)) +$$



Рис. 15. Варіанти можливих розломів для землетрусу 06.01.2012.

$$+ \sin \lambda \cos 2\delta \sin 2i \sin(\phi - \phi_s),$$

де λ — кут напрямку посунання Slip; δ — кут падіння Dip; i — кут виходу; ϕ — кут азимуту на станцію; ϕ_s — кут простягання Strike.

Т а б л и ц я 8. Вхідні дані для визначення механізму вогнища події 10.01.2012

Станція	Вступ P -хвилі	Азимут на станцію ϕ , град	Кут виходу i , град	$\lg S/P$
MEZ	down	263,6	61	0,49
NSLU	up	216,9	61	0,8
BRIU	up	250,2	61	1,32
KORU	up	231,2	61	0,63
SHIU	down	335,6	55	—
MUKU	down	264,2	55	0,5
BERU	up	249,5	55	0,48
STZU	down	301,4	55	0,35

Т а б л и ц я 9. Параметри механізму вогнища землетрусу 10.01.2012

Нодальна площина						Вісь					
1			2			P		T		N	
Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	Azm	Plunge	Azm	Plunge	Azm	Plunge
104	27	129	241	69	72	345	22	125	62	248	17

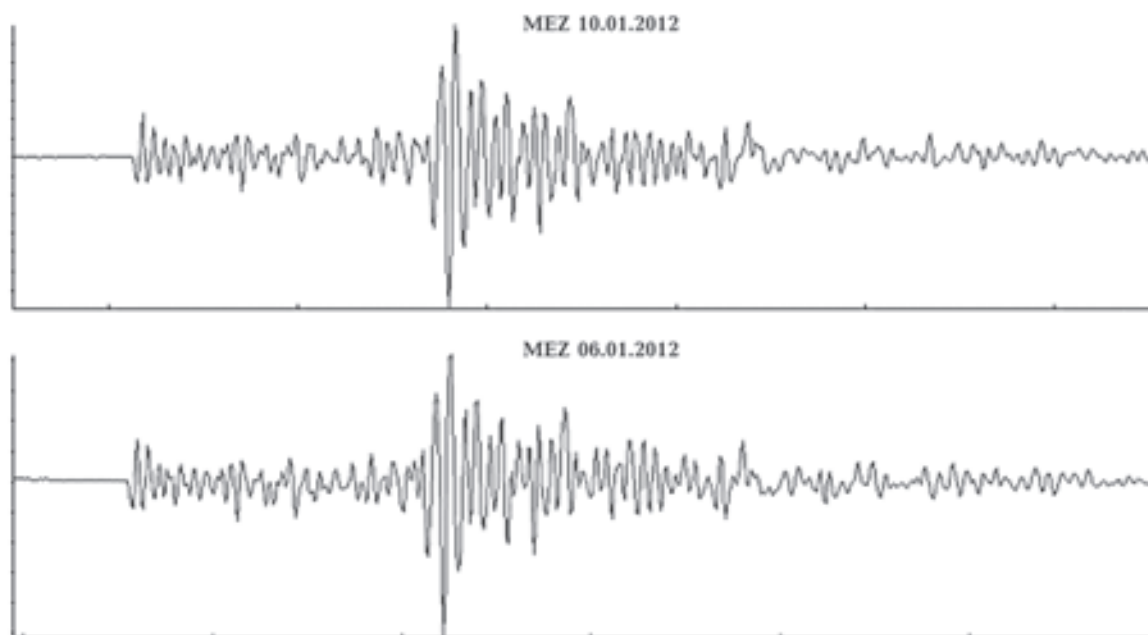


Рис. 16. Порівняння хвильових форм на записах на станції MEZ для подій 6 і 10 січня 2012 р.

Т а б л и ц я 10. Вхідні дані для визначення механізму вогнища події 24.10.2012

Станція	Вступ P -хвилі	Азимут на станцію ϕ , град	Кут виходу i , град	$Lg S/P$
NSLU	down	283	101	0,29
KORU	up	268	61	1,06
MEZ	down	345	61	0,44
RAKU	down	112	61	0,56
BRIU	up	292	61	0,69
TRSU	up	261	61	0,82
BERU	up	276	61	0,75
MUKU	up	294	61	0,72

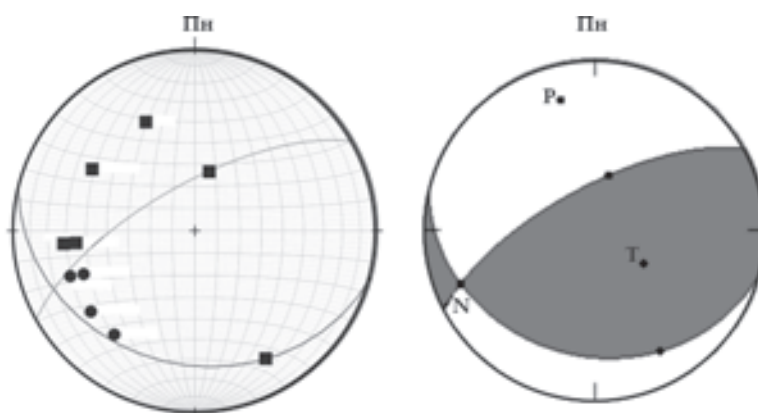


Рис. 17. Механізм вогнища землетрусу для події 10.01.2012.

Середнє значення параметра $R_{\theta\phi}$ для P -хвилі дорівнює 0,51 [Sule, 2010].

Кутову частоту f_0 і рівень спектральної густини Ω_0 визначено із спектра переміщення

P-хвилі відповідно до моделі Брюна, згідно з якою асимптота у високочастотній області спадає, як f^{-2} . Згідно з цією моделлю, розміри розриву визначено як розміри кругової дисло-

кації: радіус R і площа розриву A [Baumbach, Borgmann, 2011]:

$$R = \frac{K_p v_p}{2\sqrt{3}\pi f_0},$$

$$A = \pi R^2,$$

де V_p — швидкість поширення *P*-хвилі у джерелі, взято із швидкісної моделі середовища; $K_p=3,36$ — стала для *P*-хвилі відповідно до моделі Брюна [Baumbach, Borgmann, 2011].

Середнє посування по розриву, згідно з [Аки, Ричардс, 1983], дорівнює:

$$\bar{D} = M_0 / \mu A,$$

де $\mu = v_p^2 \rho / 3$ — модуль зсуву.

Скидання напруження визначено для кругової дислокації, як [Baumbach, Borgmann, 2011]:

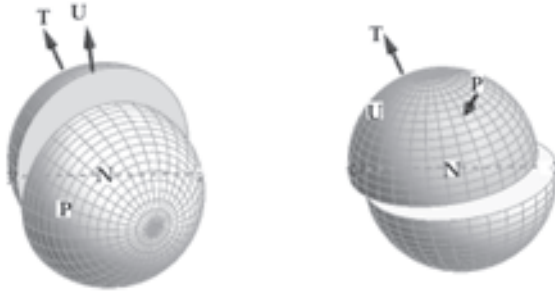


Рис. 18. Варіанти можливих розломів для землетрусу 10.01.2012.

Т а б л и ц я 11. Параметри механізму вогнища землетрусу для події 24.10.2012

Нодальна площина						Вісь					
1			2			P		T		N	
Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	Azm	Plunge	Azm	Plunge	Azm	Plunge
170	27	131	316	67	75	201	65	57	21	322	13

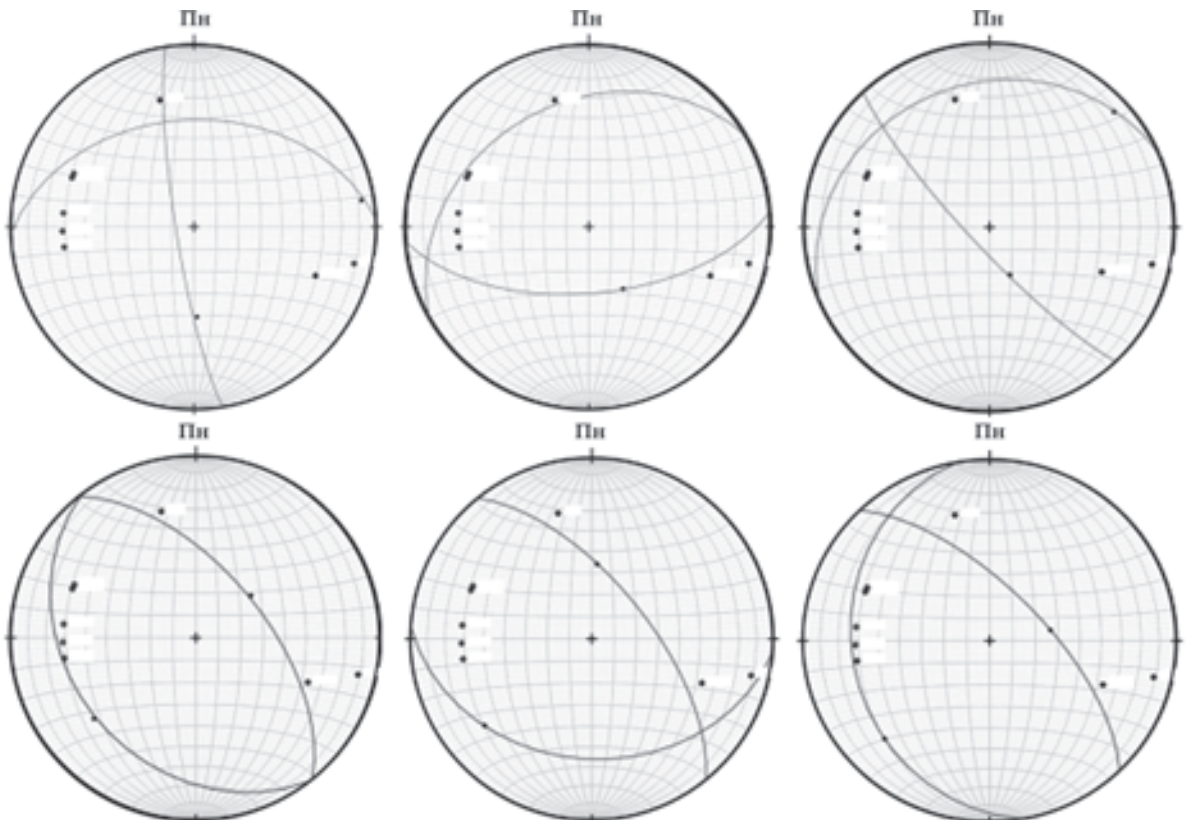


Рис. 19. Варіанти розміщення нодальних площин для події 24.10.2012.

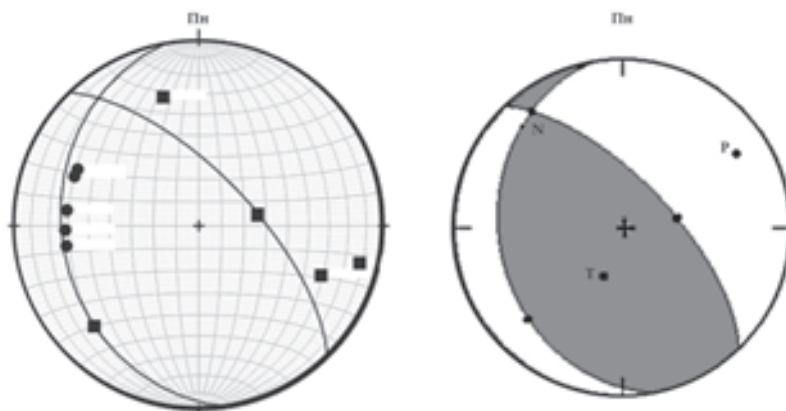


Рис. 20. Механізм вогнища землетрусу для події 24.10.2012.

$$\Delta\sigma = 7M_0/16R^3.$$

Ці динамічні параметри вогнищ для кожної окремої події обчислено, як середні значення відповідних параметрів по кожній станції.

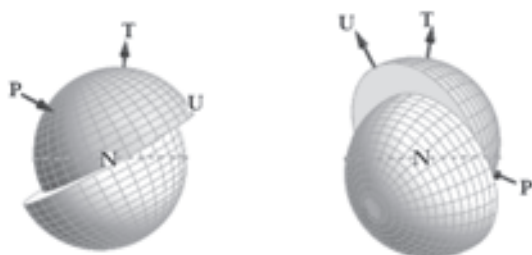


Рис. 21. Варіанти можливих розломів для землетрусу 24.10.2012.

За емпіричними формулами визначено сейсмічну енергію та магнітуду:

$$E_s = M_0 1,6 \cdot 10^{-5}, \quad (1)$$

$$ML = (\lg E_s - 4)/1,8. \quad (2)$$

Результати обчислення спектральних, динамічних і енергетичних параметрів вогнища землетрусу для кожної події наведено в табл. 14.

Для цих подій визначено також клас землетрусу за номограмою Раутіан, його порівняно з класом, визначеним за емпіричною залежністю від M_0 за формулою

$$K = \lg E_s.$$

Таблиця 12. Вхідні дані для визначення механізму вогнища події 04.04.2013

Станція	Вступ P-хвилі	Азимут на станцію ϕ , град	Кут виходу i , град	$\lg S/P$
NSLU	up	269	143	—
KORU	down	260	59	0,43
MEZ	down	6	59	0,084
BRIU	down	295	48	0,65
TRSU	down	253	48	0,57
BERU	e	274	48	2,64
MUKU	down	297	48	0,71
UZH	down	299	45	0,88
KSV	down	83	45	1,05

Таблиця 13. Параметри механізму вогнища землетрусу події 04.04.2013

Нодальна площина						Вісь					
1			2			P		T		N	
Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	Azm	Plunge	Azm	Plunge	Azm	Plunge
174	45	173	269	85	45	33	27	142	34	274	44

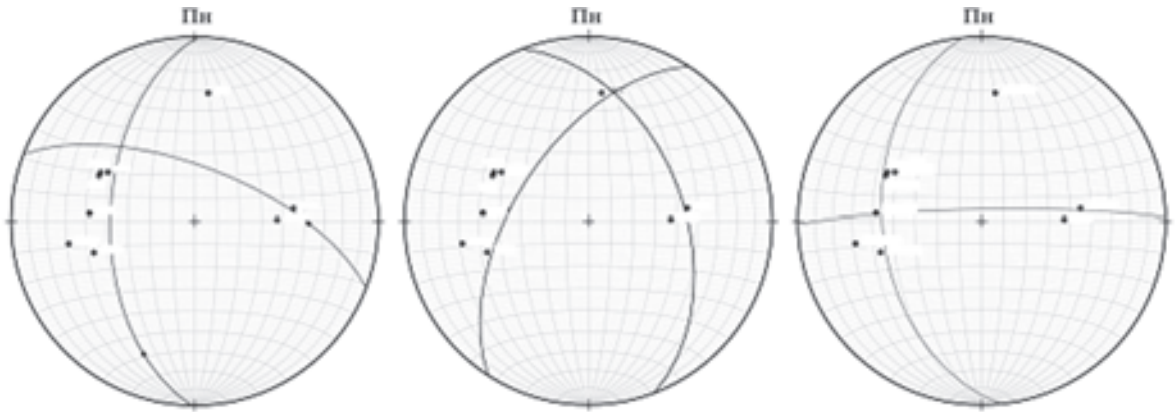


Рис. 22. Варіанти розміщення нодальних площин для події 04.04.2013.

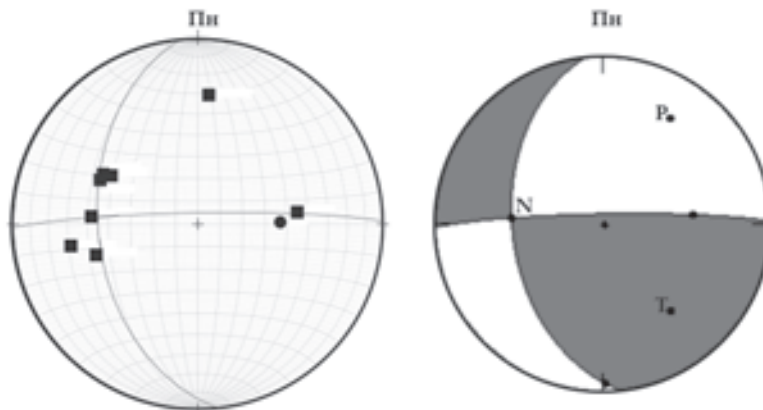


Рис. 23. Механізм вогнища землетрусу для події 04.04.2013.

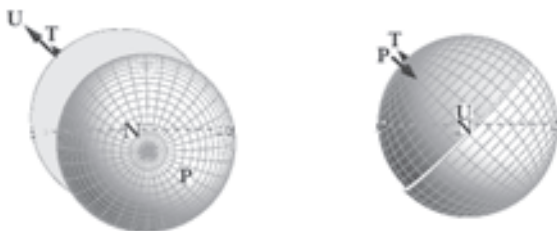


Рис. 24. Варіанти можливих розломів для землетрусу 04.04.2013.

При обчисленні сейсмічного моменту на кожній станції для події 4.04.2013 (с. Нижнє Селище) було відмічено, що для станцій, які розташовані на близькій відстані до нодальних площин, параметр напрямленості променів $R_{\theta\phi}$ (у межах 0,01—0,05) є надто малим і спотворює тим самим значення M_0 і, відповідно, обчисленого за емпіричною формулою значення класу відносно класу, визначеного за номограмою Раутіан. Для таких випадків при визначенні сейсмічного моменту запропоновано використовувати дані станцій, що знаходяться, по-перше, найближче до епіцентру

землетрусу, а по-друге, розміщені на стереографічній проекції не надто близько до нодальних ліній. Водночас параметр напрямленості променів $R_{\theta\phi}$ може бути використаний для уточнення механізмів вогнищ. Таким чином, для події 04.04.2013 (с. Нижнє Селище) сейсмічний момент розраховано за даними лише зі станції KORU, оскільки клас за номограмою збігся з класом, обчисленим за формулою; ця станція знаходиться найближче до епіцентру і на стереографічній проекції розміщена не дуже близько до нодальної лінії.

Висновки. Завданням роботи було визначення механізмів і спектральних параметрів вогнищ землетрусів у Карпатському регіоні України. У процесі опрацювання даних виявлено особливості, які так чи інакше можуть вплинути на кінцевий результат. Очевидно, що задача знаходження розв'язку механізму вогнища сама по собі не проста і неоднозначна й може складатися з інших задач (наприклад, знаходження кута виходу), похибка під час розв'язання яких може суттєво вплинути

на результат. Тому важливо, при визначенні кінцевого варіанта розв'язку враховувати всі можливі похибки та їх сумарний вплив.

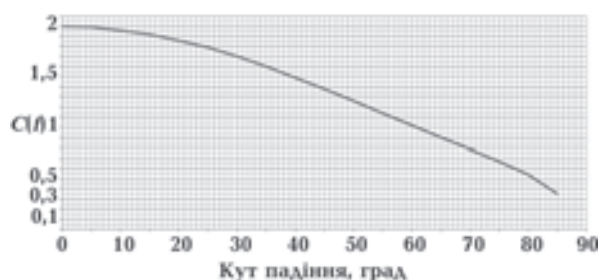


Рис. 25. Залежність параметра ефекту вільної поверхні $C(f)$ від кута падіння.

Запропоновано комплексний підхід до визначення механізму вогнища: графічний метод з використанням додаткової інформації про нечіткі вступі і логарифм відношення амплітуд. Не можна з упевненістю говорити про точність розв'язків механізмів вогнищ, оскільки як такі розглянуто усереднений варіант розв'язку в моделі Брюна. У цілому відшукані механізми для кожної події є єдиним видом розлому незалежно від усереднення та в межах похибки усереднення — параметри орієнтації площин розриву і орієнтації головних осей напружень. Інформацію про параметри механізму вогнищ можна в подальшому застосовувати для визна-

Т а б л и ц я 14. Спектральні параметри вогнища землетрусів

Параметр	Подія			
	6.01.2012	10.01.2012	24.10.2012	4.04.2013
M_0	2,22e+13	4,24e+13	1,5e+13	2,55e+13
f_0 , Гц	7	6,25	8,25	7
R , м	242,5847	212,2616	119,7756	207,3
A , м ²	1,8487e+05	1,4154e+05	1,2538e+05	1,35e+05
\bar{D} , м	5,1e-04	0,0128	0,0051	0,0115
$\Delta\sigma$, Па	6,8e+05	1,94e+06	8,23e+05	1,25e+06
E_s , Дж	3,552e+08	6,7e+08	2,4e+08	4,08e+08
ML	2,53	2,68	2,43	2,56

чення напружено-деформованого стану регіону. Крім того, дані щодо механізму вогнища можна використовувати для визначення динамічних параметрів вогнища, що показано через застосування параметра напрямленості променів. Слід задуматись також над уточненням механізму вогнищ з урахуванням параметра

напряменості променів, що буде показано у подальших роботах.

Отже, незважаючи на малу сейсмічність Карпатського регіону і недостатню кількість сейсмічних станцій, для нього можна визначати механізми вогнищ та їх динамічні параметри, використовуючи запропоновану в статті методику.

Список літератури

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы: в 2 т. Москва: Мир, 1983. 520 с.

Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А, Широкова Е. И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. Москва: Наука, 1972. 198 с.

Воронина Е. В. Механика очага землетрясения. Спецкурс. Москва: Изд. Физ. фак-та МГУ, 2004. 92 с.

Касахара К. Механика землетрясений. Москва: Мир, 1985. 264 с.

Малицький Д. В., Грицай О. Д., Муйла О. О. Особливості побудови механізмів вогнищ місцевих землетрусів на прикладі Берегівської події 23.11.2006 р. ($\varphi=48,2^\circ$, $\lambda=22,52^\circ$, $h=12,3$ км, $MD=4,2$). Вісник Київ. ун-ту. Геологія. 2013. В.1(60). С. 37—42.

Пустовитенко Б. Г., Мерзей Е. А., Пустовитенко А. А. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмостанций. Геофиз. журн. 2013. Т. 35. № 5. С. 172—186.

Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наук. думка, 1990. 252 с.

Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 год. (Ред. Б. Г. Пустовитенко). Севастополь: НПЦ «Экоси-Гидрофизика», 2008. 295 с.

- Чекунов А. В., Ливанова Л. П., Гейко В. С. Глубинное строение земной коры и некоторые особенности тектоники Закарпатского прогиба. *Сов. геология*. 1969. № 10. С. 57—69.
- Adamova P., Sokos E., Zahradnik J., 2009. Problematic non-double-couple mechanism of the 2002 Amfilochia Mw5 earthquake, Western Greece. *J. Seismol.* (13), 1—12.
- Baumbach M., Bormann P., 2011. New Manual of Seismological Observatory Practice. *Determination of source parameters from seismic spectra*. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_EX_3.4
- Cronin V., 2004. A Draft Primer on Focal Mechanism Solutions for Geologists. Baylor University.
- Ebel J. E., Bonjer K. P., 1990. Moment tensor inversion of small earthquakes in southwestern Germany for the fault plane solution. *Geophys. J. Int.* (101), 133—146.
- Hardebeck J. L., Shearer P. M., 2003. Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 93(6), 2434—2444.
- Havskov J., Ottemoller L., 2010. Routine Data Processing in Earthquake Seismology. With Sample Data, Exercises and Software, Springer Science+Business Media B.V., 347 p. doi:10.1007/978-90-481-8697-6_1. ISC Bulletin. <http://www.isc.ac.uk/>
- Sule B., 2010. Spectral source parameters for weak local earthquakes in the Pannonian basin. *Cent. Eur. J. Geosci.* 2(4), 475—480. doi: 10.2478/v10085-010-0018-3.
- Toth L., Monus P., Zsiros T., Bus Z., Kiszely M., Czifra T., 2007. Hungarian Earthquake Bulletin 2006. GeoRisk MTA GGKI, Budapest, 80 p.

Specification of mechanisms of earthquake sources in the Carpathian region

© D. V. Malitskiy, O. D. Gritsay, O. O. Muyla, O. I. Kutniv, E. M. Kozlovskiy, 2014

One of the urgent problems — a solution of the focal mechanism of an earthquake is considered. On the example of several events occurred in the Carpathian region of Ukraine, the solving of this problem with a graphic method is proposed. This method is based on identifying the best location option of nodal planes relatively to both the fuzzy P-wave arrivals and the values of the logarithm of the ratio of the S-wave amplitude to the P-wave amplitude. A sequence of plotting diagrams for determining the focal mechanism is presented. The focal mechanisms and types of faults are determined by using this method for 6 events occurred in the Transcarpathian region. The similarity of the focal mechanisms for repeated earthquakes is shown. The dynamic parameters of the sources of 4 earthquakes occurred in 2012—2013 are retrieved by using data from the spectra of records converted into displacements according to the Brune model.

Key words: earthquake source, graphic method, seismic wave, anisotropic medium.

References

- Aki K., Richards P., 1983. Quantitative Seismology. Theory and Methods. Moscow: Mir, 520 p. (in Russian).
- Balakina L. M., Vvedenskaya A. V., Golubeva N. V., Misharina L. A., Shirokova E. I., 1972. Elastic stress field of the Earth and earthquake focal mechanisms. Moscow: Nauka, 198 p. (in Russian).
- Voronina E. V., 2004. Mechanics of earthquake source. Special course. Moscow: Faculty of Physics MSU Publ., 92 p. (in Russian).
- Kasahara K., 1985. Earthquake mechanism. Moscow: Mir, 264 p. (in Russian).
- Malytskyy D., Hrytsai O., Muyla O., 2013. The features of the construction of the focal mechanisms of local earthquakes using the example of an event near Beregovo 23.11.2006 ($\varphi=48,2^\circ$, $\lambda=22,52^\circ$, $h=12,3$ km, MD=4,2). *Visnik Kyiv. universitetu. Geologiya* B1(60), 37—42 (in Ukrainian).
- Pustovitenko B. G., Merzhey E. A., Pustovitenko A. A., 2013. Dynamic parameters of earthquake sources of the Crimea according to the data of digital seismic stations *Geofizicheskij zhurnal* 35 (5), 172—186 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Panteleyeva T. A., 1990. Spectral and focal parameters of earthquakes in the Crimea. Kiev: Naukova Dumka, 252 p. (in Russian).
- Seismological Bulletin of Ukraine for 2006. (Ed. B. G. Pustovitenko), 2008. Sevastopol: NPC «Ecosy-Hydrophysica», 295 p. (in Russian).

- Chekunov A. V., Livanova L. P., Geyko V. S.*, 1969. Deep structure of the crust and some features of tectonics Transcarpathian deflection. *Sovetskaya geologiya* (10), 57—69 (in Russian).
- Adamova P., Sokos E., Zahradnik J.*, 2009. Problematic non-double-couple mechanism of the 2002 Amfilochia Mw5 earthquake, Western Greece. *J. Seismol.* (13), 1—12.
- Baumbach M., Bormann P.*, 2011. New Manual of Seismological Observatory Practice. *Determination of source parameters from seismic spectra*. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_EX_3.4
- Cronin V.*, 2004. A Draft Primer on Focal Mechanism Solutions for Geologists. Baylor University.
- Ebel J. E., Bonjer K. P.*, 1990. Moment tensor inversion of small earthquakes in southwestern Germany for the fault plane solution. *Geophys. J. Int.* (101), 133—146.
- Hardebeck J. L., Shearer P. M.*, 2003. Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 93(6), 2434—2444.
- Havskov J., Ottemoller L.*, 2010. Routine Data Processing in Earthquake Seismology. With Sample Data, Exercises and Software, Springer Science+Business Media B.V., 347 p. doi:10.1007/978-90-481-8697-6_1. ISC Bulletin. <http://www.isc.ac.uk/>
- Sule B.*, 2010. Spectral source parameters for weak local earthquakes in the Pannonian basin. *Cent. Eur. J. Geosci.* 2(4), 475—480. doi: 10.2478/v10085-010-0018-3.
- Toth L., Monus P., Zsiros T., Bus Z., Kiszely M., Czifra T.*, 2007. Hungarian Earthquake Bulletin 2006. GeoRisk MTA GGKI, Budapest, 80 p.