

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ім. С.І. СУББОТІНА НАН УКРАЇНИ**

**ГРИЦАЙ ОКСАНА ДМИТРІВНА**

УДК 550.344

**Визначення механізмів вогнищ місцевих землетрусів на основі  
кінематичних і динамічних підходів**

04.00.22 – геофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Карпатському відділенні Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

**Науковий керівник** – доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Малицький Дмитро Васильович**,  
Карпатське відділенні інституту геофізики  
ім. С.І.Субботіна НАН України,  
Завідувач відділу сеймотектонічних досліджень

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, доцент  
**Вижва Зоя Олександрівна**,  
КНУ ім. Т.Шевченка, м. Київ  
професор кафедри загальної математики

доктор фізико-математичних наук  
**Маслов Борис Петрович**,  
Інститут механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України, м. Київ  
головний науковий співробітник

Захист відбудеться 12 грудня 2016 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, проспект Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, проспект Палладіна, 32.

Автореферат розісланий «\_\_\_» листопада 2016 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01,  
доктор геологічних наук



М.І. Орлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* Щороку в світі відбувається близько 1 млн. землетрусів різної інтенсивності. Тому вивчення сейсмічності досі залишається актуальною проблемою як в глобальному, так і регіональному масштабі. Щоб краще зрозуміти причини виникнення землетрусу, можливі наслідки і можливість наступних сейсмічних подій у регіоні, необхідно вивчати джерело землетрусу, яке можна розглядати як точкове або розподілене. Актуальність теми дисертаційної роботи пов'язана із потребою пошуку нових підходів для вивчення вогнищ землетрусів в районах із малою сейсмічністю. У цьому аспекті, у даній роботі, розглядається задача визначення механізму вогнища, що представлено як точкове джерело та визначення параметрів розподіленого джерела, а саме розподілу посувки на площині розриву.

Задача визначення механізму вогнища довгий час розглядалася лише для сильних землетрусів і розв'язувалась практично вручну. З появою потужних комп'ютерів розв'язок даної задачі для землетрусів з магнітудою більше 5 отримують автоматично одразу після події. Для землетрусів меншої сили механізми вогнищ землетрусів визначають, використовуючи різні методи, наприклад метод інверсії хвильових форм. Особливо це стосується регіонів з невисокою сейсмічністю. Таким сейсмічно активним регіоном України є Закарпаття. Магнітуда для подій Карпатського регіону, зазвичай, є менша 3, а кількість сейсмологічних станцій, що реєструють подію, є достатньою лише, щоб визначити координати епіцентру та глибину залягання вогнища землетрусу.

Методи для розв'язання задачі визначення механізмів вогнищ землетрусів представлено в роботах Малицького, Пустовійтенко, Кроніна, Хардебєка, Вебера, Заграніка, Тана, Хелбергера, Лі, Накамура, Наталя, Адамової, Бока та інших. У більшості із них, є необхідно використання даних або з великої кількості станцій, або наявності даних записів поверхневих хвиль, що робить їх непридатними для визначення механізмів вогнищ слабких землетрусів. Слід зазначити, що запропоновані методи використовують, коли відома швидкісна модель середовища.

Задача визначення параметрів розподіленого джерела є порівняно новою у сейсмології. Для розв'язання даної проблеми розроблено методи, які описано в роботах Малицького, Лапусти, Ампуєро, Галовіча, Маї, Кесєра та ін. Для порівняння аналізу різних підходів щодо визначення параметрів як точкового, так і розподіленого джерел запропоновано ряд міжнародних проектів, як, наприклад SIV. Отже, задача визначення механізму вогнища землетрусу є основною проблемою як у випадку точкового, так і розподіленого джерела.

Представлена робота є частиною багаторічних теоретичних досліджень, які проводяться у відділі методів сеймотектонічних досліджень Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна для розроблення нових методик розв'язання прямих і обернених задач сейсмології.

Підходи, які запропоновано у даній дисертаційній роботі, дають змогу вирішити актуальні задачі визначення механізмів вогнищ землетрусів, за допомогою графічного методу (кінематичні підходи) і за обмеженою кількістю станцій (динамічні підходи), а також визначити параметри розподіленого джерела.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Робота виконувалась відповідно до планів наукових досліджень Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботтіна НАН України, у відділі сейсмо тектонічних досліджень у рамках таких тем:

1. «Математичне моделювання та експериментальні дослідження пружних полів у земній корі Українських Карпат» (2011-2015 рр. № держреєстрації 0111U000028). Розглянуто методику побудови хвильового поля на вільній поверхні неоднорідного шаруватого середовища з використанням матричного методу. Розвинуто методику визначення механізмів вогнищ землетрусу графічним методом. Визначено динамічні параметри вогнища.

2. «Багатопараметричне моделювання геофізичних полів у геосередовищах для підвищення достовірності прогнозування вуглеводнів» (2012-2016 рр. № держреєстрації 0112U001141). Запропоновано методику визначення параметрів джерела землетрусу з використанням матричного методу та його розвитком у метод визначення механізму вогнища за обмеженою кількістю станцій.

3. «Комплексні геофізичні дослідження для виявлення та прогнозування екобезпечних явищ на локальних та регіональних полігонах Заходу України» (2012-2016 рр. № держреєстрації 0112U001142). Автором запропоновано методику визначення параметрів розподіленого джерела землетрусу.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення та апробація методів визначення механізму вогнища землетрусу, оснований, як на класичних методах (наприклад графічний), так і на розв'язках прямих та обернених задач математичного моделювання поширення сейсмічних хвиль в шаруватому півпросторі, а також визначення параметрів розподіленого джерела.

*Для досягнення цієї мети в дисертації поставлено наступні задачі:*

- 1) визначити механізми вогнищ землетрусів графічним методом;
- 2) визначити тензор сейсмічного моменту за даними обмеженої кількості станцій;
- 3) визначити параметри розподіленого джерела з використанням механізмів вогнищ землетрусів;
- 4) здійснити апробацію методик визначення механізмів вогнищ землетрусу та параметрів розподіленого джерела на реальних подіях.

*Об'єктом дослідження* є моделі точкового та розподіленого джерел землетрусу, механізми вогнищ землетрусу, а також математичні моделі поширення сейсмічних хвиль в шаруватому півпросторі від точкового і розподіленого джерел.

*Предметом дослідження* є визначення механізмів вогнищ землетрусів методами, що дозволяють використовувати дані з обмеженої кількості станцій, моделювання площини розриву для розподіленого джерела, математичне моделювання поширення сейсмічних хвиль в шаруватому півпросторі від точкового і розподіленого джерел за допомогою матричного методу.

**Методи дослідження:**

– застосування модифікованого графічного методу для визначення механізмів вогнищ землетрусів в районі з невисокою сейсмічною активністю;

– метод визначення механізмів вогнищ землетрусів за даними обмеженої кількості станцій, який полягає у знаходженні тензора сейсмічного моменту за даними конкретної станції та перенесені отриманого розв'язку в гіпоцентр події;

– метод визначення параметрів розподіленого джерела з використанням механізму вогнища землетрусів;

***Наукова новизна одержаних результатів:***

- визначено механізми вогнищ землетрусів Карпатського регіону графічним методом;
- розроблено метод визначення механізмів вогнищ землетрусів за даними обмеженої кількості станцій;
- вперше запропоновано метод визначення параметрів площини розриву для розподіленого джерела з використанням механізму вогнища землетрусів;
- апробовано методи визначення вогнищ землетрусів за даними обмеженої кількості станцій та визначення параметрів площини розриву для розподіленого джерела.

*Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.* Достовірність одержаних результатів забезпечується чіткою фізичною постановкою задач, дотримання початкових та граничних умов, строгим виконанням всіх математичних перетворень під час отримання основних аналітичних співвідношень; ретельним тестуванням створених програмних засобів. Кореляція отриманих результатів із результатами, одержаними за допомогою інших методів, стверджує про їхню правильність.

***Практичне застосування отриманих результатів.*** Розвинуті в дисертаційній роботі методи та алгоритми дають змогу визначати механізми вогнищ місцевих землетрусів для вивчення сейсмічності регіону. Отримані розв'язки є основою для аналізу напружено-деформованого стану гірських порід, що є ще однією важливою задачею сейсмології.

Методи визначення параметрів розподіленого джерела на основі сейсмічних записів та отриманих розв'язків механізмів вогнищ землетрусів дозволяють краще зрозуміти процеси, що відбуваються у вогнищі землетрусу. Дані методики можуть застосовуватись для регіонів із слабкою сейсмічністю, що є характерними для сейсмоактивних областей України (Закарпаття, Крим).

***Реалізація та впровадження результатів роботи.*** Розроблені і впроваджені в практику автором метод визначення механізмів вогнищ землетрусів за даними обмеженої кількості станцій та метод визначення параметрів розподіленого джерела можуть успішно використовуватись для вивчення вогнищ землетрусу в регіонах з невисокою сейсмічністю, зокрема, для Карпатського сейсмоактивного регіону України. Визначені автором механізми вогнищ як графічним методом, так і методом за даними обмеженої кількості станцій можуть бути використані для інших актуальних задач сейсмології, в тому числі для інженерної сейсмології. Автором розроблено комплекс прикладних програм для визначення механізмів вогнищ землетрусів за даними обмеженої кількості станцій та представлення розподіленого джерела. Розроблені програми використовуються у відділі методів

сейсмотектонічних досліджень Карпатського відділення Інституту геофізики НАН України в рамках держбюджетних і науково-дослідних тем.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, представлені в дисертації, отримані автором особисто в спільних з іншими авторами публікаціях. Зокрема, у спільній роботі з Д. В. Малицьким та О.О. Муйлою [15] автором запропоновано визначення механізму вогнища землетрусу графічним методом та визначено механізм вогнища для землетрусу, що відбувся у Берегові 23.11.2006р. У роботі [18], опублікованій спільно із Д. В. Малицьким, О. О. Муйлою, Ю.Т. Вербицьким, О.І. Кутнів автором визначено механізмів вогнищ повторних землетрусів в районі НПП Синевир. У роботі [8] у співавторстві з А.Ю.Павловою, Д.В.Малицьким, Е.М.Козловським представлено розв'язок механізму вогнища графічним методом, обговорено результати кореляції реальних і синтетичних сейсмограм. У роботі [78], опублікованій спільно із Д. В. Малицьким, О. О. Муйлою, А.Ю.Павловою представлено результати визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону та визначено спектральні параметри даних вогнищ. У роботі [5] у співавторстві Д.В.Малицьким застосовано розв'язок механізмів вогнищ для визначення напружено-деформованого стану, а саме визначення девіаторного тензора напружень. У спільній роботі [7] з Д.В.Малицьким., С.В.Щербиною, П.І. Пігулевським, О.О.Муйлою, І.Ю.Гуровою, О.А.Калініченко за допомогою графічного методу визначено механізм вогнища Криворізького землетрусу. У роботах [35, 79] у співавторстві з А.Ю.Павловою, Д.В.Малицьким представлено обґрунтування застосування графічного методу для визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону та порівняно отримані результати з результатами, отриманими методом підбору. У роботі [1] у співавторстві з Д.В.Малицьким, О.О.Муйлою, О.І.Кутнів, Е.М.Козловським розвинуто графічний метод для визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону, показано особливості застосування. У роботі [83] у співавторстві з Д.В.Малицьким, О.О.Муйлою, О.І.Кутнів, О.О. Обідіною представлено розв'язок механізму вогнища графічним методом та зроблено порівняльний аналіз з розв'язком, отриманим матричним методом для визначення тензора сейсмічного моменту за даними N станцій. У роботі [24] у співавторстві з Д.В. Малицьким, О.О. Муйлою, А.Ю. Павловою, О.А. Асташкіною, О.О. Обідіною, Е.М. Козловським застосовано графічний метод для визначення механізмів вогнищ землетрусів у районі Середземномор'я. У роботі [28] у співавторстві з Д.В. Малицьким, О.О. Муйлою, А.Ю. Павловою, О.А. Асташкіною, О.О. Обідіною, Е.М. Козловським представлено методику визначення параметрів розподіленого джерела та апробовано її на даних реальної події. У роботі [2] у співавторстві з Д.В. Малицьким, А.Ю. Павловою, О.О. Обідіною визначено механізм вогнища землетрусу в районі Альберти, Канада. У роботі [3] у співавторстві з Д.В. Малицьким, О.О. Муйлою, А.Ю. Павловою, Ю.П. Ковалем О.О. Обідіною представлено методику визначення механізму вогнищ за даними обмеженої кількості станцій та методику визначення параметрів розподіленого джерела, апробовано дані методики на даних реальних подій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні концепції, ідеї, положення і результати досліджень доповідалися і обговорювалися на:

- засіданнях НТШ у Карпатському відділенні інституту геофізики ім. Субботіна (Карпатське відділення інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України, Львів, 2013, 2014, 2015, 2016);

- V-тій міжнародній науковій конференції «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища» (Карпатське відділення інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України, Львів, 2013);

- - III-тій Молодіжній тектоно-фізичній школі-семінарі «Современная тектонофизика. Методы и результаты» (Інститут фізики Землі РАН ім. О.Ю. Шмідта, Москва, 2013);

- Науковій Конференції-Семінару пам'яті Т.З.Вербицького та Ю.Т. Вербицького «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах» (Карпатське відділення інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України, Львів, 2014, 2016).

У повному обсязі робота доповідалась на розширених наукових семінарах Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України; Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України; наукових семінарах відділу методів сейсмотектонічних досліджень Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України.

**Публікації.** Основні результати дисертації викладено в 15 наукових працях: у 8 статтях в наукових журналах і збірниках наукових праць, які входять до Переліку фахових видань ДАК України в галузі фізико-математичних наук, у 2 наукових статтях в інших виданнях, у 2 іноземних наукових журналах, у 3 тезах доповідей вітчизняних і міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків та переліку використаних джерел 120 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 167 стор., основного тексту – 135 стор., ілюстрацій – 70, таблиць – 34.

Автор висловлює вдячність своєму науковому керівникові – професору, д. ф.-м. н., завідувачу відділом сейсмотектонічних досліджень КВ ІГФ НАН України Д. В. Малицькому за постійну підтримку під час виконання цієї роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено загальну характеристику роботи, розкрито стан вивчення наукової проблеми, обґрунтовано доцільність обраного напрямку та актуальність дисертації, сформульовано її мету, основні методи і задачі досліджень, відзначено наукову новизну отриманих результатів.

**Перший розділ** присвячено огляду розвитку методів розв'язку задач, пов'язаних із вивченням джерел сейсмічних хвиль, що призвело до розвитку підходів відтворення механізмів їх виникнення.

На протязі декількох десятиліть механізм вогнища землетрусу визначали за полярностями вступу прямих Р-хвиль. У даному розділі представлено модифікації даного методу. Із появою сучасних комп'ютерів з'явилися нові методи визначення механізмів вогнищ. У дисертаційній роботі представлено огляд одного із сучасних методів, який запрограмовано для автоматичного визначення механізмів вогнищ,

використовуючи сейсмічні записи. Даний метод реалізовано у пакет програм Isola. Розглянуто переваги і недоліки даної програми.

Розподілене джерело розглядається як сукупність точкових джерел. Показано доцільність пошуку нових методів для визначення механізмів вогнищ землетрусів для регіонів із невисокою сейсмічністю.

Визначені механізми вогнищ знаходять своє застосування для розв'язання інших важливих задач сейсмології, зокрема – знаходженні параметрів розподіленого джерела. Протягом останніх 30-років дана задача є актуальною. У даному розділі описано основні підходи до визначення параметрів розподіленого джерела. Останні покращені методи аналізу, збільшення якості обчислювальних ресурсів, а також сейсмологічних і геологічних спостережень дозволяють зображати джерело землетрусу і вивчати процеси в ньому. Однак, одночасний розгляд різних компонент джерела, параметрів моделі середовища, різна якість спостережуваних даних, теоретичні розрахунки хвильового поля і різні способи регуляризації накопичують похибки. Відмінності в аналізі для кожного з цих аспектів може привести до значних розбіжностей між отриманими результатами однієї і тієї ж події. Поліпшення знань складності джерела і різноманітності поведінки розриву веде до нових важливих областей дослідження щодо визначення параметрів вогнища землетрусу.

У **другому розділі** описано математичне моделювання поширення сейсмічних хвиль у шаруватому півпросторі. Оскільки, один з методів визначення механізму вогнища, що описано в дисертаційній роботі опирається на розв'язок поля переміщень від точкового джерела, представленого тензором сейсмічного моменту, то у другому розділі розглянуто задачу математичного моделювання поширення сейсмічних хвиль в шаруватому півпросторі від такого вогнища. Розглянуто моделювання поля переміщень модифікованим матричним методом.

Поле сейсмічних хвиль генерується джерелом і змінюється під впливом середовища в якому воно поширюється. В загальному випадку розглянуто неоднорідне пружне середовище, що задається  $n$  однорідними ізотропними шарами на  $(n+1)$  півпросторі, фізичні властивості, яких змінюються з глибиною. На  $s$ -тій гранці даного середовища діє джерело сейсмічних хвиль, яке представлено тензором сейсмічного моменту. Поле переміщень  $\mathbf{u}_n(x, t)$  для такого джерела є згортокою тензора сейсмічного моменту  $\mathbf{M}_{pq}$  та похідної функції Гріна  $\mathbf{G}_{np}$

$$\mathbf{u}_n(x, t) = \mathbf{M}_{pq} * \frac{\partial}{\partial \xi_q} \mathbf{G}_{np} \quad (1)$$

Використовуючи рівняння руху в  $i$ -тому шарі, початкові і граничні умови, умову випромінювання, теореми представлення поля переміщень через потенціали Гельмгольца та відповідні матричні рівняння за допомогою матричного методу Томаса-Хаскела, у роботі представлено вирази для повного поля переміщень на вільній поверхні, викликаного стрибком переміщень-напружень на  $s$ -тій гранці. Таке джерело описано тензором сейсмічного моменту.

Для визначення тензора сейсмічного моменту у дисертації розглянуто поле переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору викликане тільки прямою



P-хвилею використано. Наприклад, z-компонента виділеної P хвилі представлена у часовій області як

$$\begin{aligned}
 > u_z^p = \int_0^{\infty} \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} \cos \varphi \cdot g_{1z}^p \cdot e^{kt\eta} \cdot M_{xz} d\eta + \int_0^{\infty} \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} \sin \varphi \cdot g_{1z}^p \cdot M_{yz} \cdot e^{kt\eta} d\eta + \\
 + \int_0^{\infty} \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_{zz} \cdot g_{2z}^p \cdot e^{kt\eta} d\eta + \int_0^{\infty} \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} \cos^2 \varphi \cdot g_{3z}^p \cdot M_{xx} \cdot e^{kt\eta} d\eta + \\
 + \int_0^{\infty} \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} \sin^2 \varphi \cdot g_{3z}^p \cdot M_{yy} \cdot e^{kt\eta} d\eta + \int_0^{\infty} \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} \sin 2\varphi \cdot g_{3z}^p \cdot M_{xy} \cdot e^{kt\eta} d\eta
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де  $J_0, J_1$  – функції Бесселя;  $k$  – горизонтальна компонента хвильового числа;  $\eta$  – змінна Мелліна  $M_{xz}, M_{yz}, M_{zz}, M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}$  – компоненти тензора сейсмічного моменту;  $g_{iz}^p$  – функції, що визначаються згідно параметрів середовища;  $r$  – епіцентрально відстань,  $\varphi$  – азимут від епіцентра на станцію.

Дані співвідношення в наступних розділах використано як базові для визначення механізму вогнища за даними обмеженої кількості станцій та розв'язку задач у випадку розподіленого джерела. Зауважено, що особливо важливим є виділення прямих P-хвиль, так як такий підхід застосовано для визначення механізму вогнища за даними обмеженої кількості станцій.

**Третій розділ** присвячено одній з основних задач сейсмології – визначенню механізмів вогнищ землетрусі. Для розв'язку даної задачі запропоновано використати два методи: графічний та метод за даними обмеженої кількості станцій.

Під параметрами механізму вогнища розуміють орієнтацію площини розриву (азимут  $\varphi_s$  і кут падіння  $\delta$ ) та напрямок посувки на ній  $\lambda$  (рис.1).

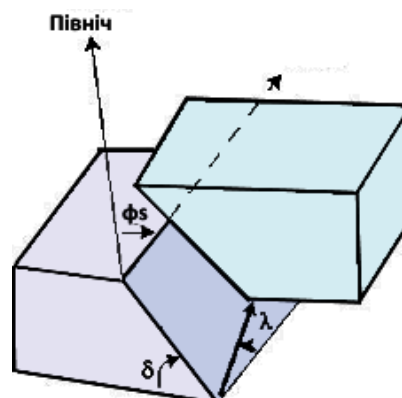


Рис.1. Орієнтацію площини розриву (азимут  $\varphi_s$  і кут падіння  $\delta$ ) та напрямок посувки на ній  $\lambda$

Графічно механізм вогнища землетрусу прийнято зображувати у вигляді так званого *beach ball* – схематичного представлення областей стиску та розтягу на

стереографічній проекції фокальної сфери, тобто сфери малого радіусу, що оточує джерело землетрусу (рис. 2.).

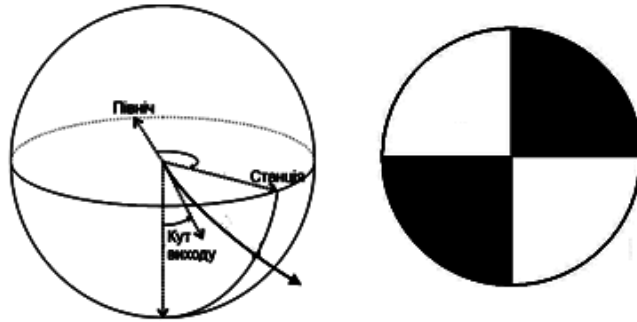


Рис. 2. Зображення фокальної сфери та механізму вогнища у вигляді *beach ball*

Суть графічного методу полягає у розподілі нодальними лініями на квадранти стиску та розтягу точок із відповідними полярностями вступу прямих Р хвиль. Дані точки є проекціями променів Р хвиль на стереографічній сітці. Кожна точка визначається азимутом від епіцентра на станцію та кутом виходу Р хвилі від джерела на станцію. Розподіл на квадранти відбувається згідно полярностей, враховуючи нечіткі вступу та логарифм відношення амплітуд S/P хвиль. Така інформація є важливою у випадку малої кількості станцій. Даний метод використано для визначення механізмів вогнищ Карпатського сейсмоактивного регіону.

У розділі розглянуто особливості застосування графічного методу для різних сейсмоактивних регіонів (Мальта, Італія, Іспанія, Канада). Відзначено вплив швидкісної моделі середовища на визначення механізму вогнища. Показано, що графічний метод, можна використовувати для аналізу та порівняння результатів, які визначено іншими методами.

У роботі представлено метод визначення механізмів вогнищ за даними обмеженої кількості станцій. Даний метод полягає у знаходженні тензора сейсмічного моменту за даними конкретної станції та перенесенні отриманого розв'язку в гіпоцентр події.

Компоненти тензора сейсмічного моменту  $\mathbf{M} = (M_{xz}, M_{yz}, M_{zz}, M_{xx}, M_{yy}, M_{xy})^T$  визначають за допомогою матричного методу, виділяючи поле переміщень прямої Р хвилі на кожній станції  $\mathbf{U}_s^{(0)P} = (U_x^{(0)P}, U_y^{(0)P}, U_z^{(0)P})^T$ . У спектральній області розв'язується рівняння:

$$\mathbf{M} = (\tilde{\mathbf{K}}^P \mathbf{K}^P)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}^P \mathbf{U}_s^{(0)P} \quad (3)$$

розв'язок якого мінімізується нормою

$$\left| \mathbf{U}_s^{(0)P} - \mathbf{K}^P \mathbf{M} \right|^2, \quad (4)$$

де  $\mathbf{K}^P$  – матриця середовища, визначена для Р хвилі для певної станції. Додатково задається умова на горизонтальну компоненту хвильового числа

$$k_{\max}^2 \leq \frac{1}{L^2} + \frac{1}{W^2}, \quad (5)$$

де  $L$ ,  $W$  – довжина і ширина площини розлому. Отримані розв'язки у спектральній області перетворено у часову область, використавши перетворення Фур'є та визначено з них механізм вогнища (рис.3).

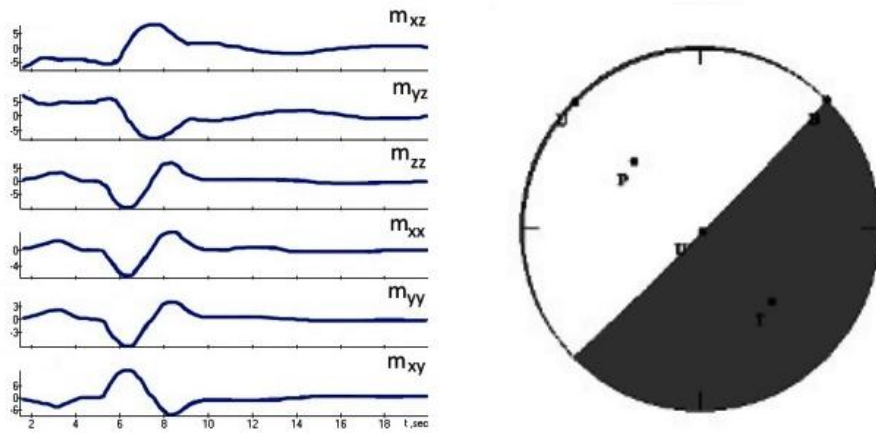


Рис.3. Компоненти тензора сейсмічного моменту та відповідний йому механізм вогнища

Застосувавши дану методику для визначення механізму вогнища землетрусу заданого в проекті SIV (задача inv2a), отримано різні розв'язки за даними різних станцій. Зауважено вплив азимуту на станцію та кут виходу на отримані розв'язки. Для зведення механізмів, отриманих на кожній станції, в один запропоновано перенести отриманий розв'язок у спільну точку, а саме перенести систему координат в гіпоцентр.

Систему координат визначено через параметри механізму вогнища. Осями даної системи є одиничний вектор нормалі до площини  $\bar{n}$ , одиничний вектор напрямку посувки  $\bar{u}$ , та векторний добуток цих векторів  $\bar{n} \times \bar{u}$ . Відомо представлення цих векторів у декартовій системі координат  $(x, y, z)$  через параметри механізму вогнища, де  $x$  – одиничний вектор напрямку на північ,  $y$  – одиничний вектор напрямку на схід,  $z$  – одиничний вектор напрямку вниз.

$$\bar{u} = (\cos\lambda \cos\varphi_S + \cos\delta \sin\lambda \sin\varphi_S) \bar{x} + (\cos\lambda \sin\varphi_S - \cos\delta \sin\lambda \cos\varphi_S) \bar{y} - \sin\lambda \sin\delta \bar{z} \quad (6)$$

$$\bar{n} = -\sin\delta \sin\varphi_S \bar{x} + \sin\delta \cos\varphi_S \bar{y} - \cos\delta \bar{z} \quad (7)$$

У цій системі координат також визначено вектор напрямку променя хвилі через кут виходу променя  $i_\xi$  та азимут на станцію  $\varphi$ :

$$\bar{\gamma} = \sin i_\xi \cos\varphi \bar{x} + \sin i_\xi \sin\varphi \bar{y} + \cos i_\xi \bar{z} \quad (8)$$

та скалярні добутки векторів:

$$\bar{u} \bar{\gamma} = (\cos\lambda \cos(\varphi - \varphi_S) - \cos\delta \sin\lambda \sin(\varphi - \varphi_S)) \sin i_\xi - \sin\lambda \sin\delta \cos i_\xi \quad (9)$$

$$\bar{n} \bar{\gamma} = \sin\delta \sin(\varphi - \varphi_S) \sin i_\xi - \cos\delta \cos i_\xi \quad (10)$$

Для того, щоб отримати параметри механізму вогнища в гіпоцентрі, необхідно перенести систему координат  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})_1$ , представлену через параметри  $\varphi_{s1}, \delta_1, \lambda_1$  в точці на станції, які визначено з тензора сейсмічного моменту, в систему  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})_2$ , представлену через параметри  $\varphi_{s2}, \delta_2, \lambda_2$  в точці гіпоцентру. Точка на станції описується двома параметрами – азимутом  $\varphi_1$  та кутом виходу  $i_{\xi_1}$ . Для точки гіпоцентру ці параметри дорівнюють нулю, а саме  $\varphi_2 = 0, i_{\xi_2} = 0$ .

Таке перенесення механізму із станції в гіпоцентр є обертанням системи координат  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})$  спочатку на кут  $\varphi_1$ , а потім на кут  $i_{\xi_1}$ , і для нього виконується умова збереження скалярних добутоків:

$$\bar{\mathbf{u}}_1 \bar{\gamma}_1 = \bar{\mathbf{u}}_2 \bar{\gamma}_2 \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{n}}_1 \bar{\gamma}_1 = \bar{\mathbf{n}}_2 \bar{\gamma}_2 \quad (12)$$

Обертання площини розриву на кут  $\varphi_1$  здійснено довкола осі  $z$  на площині  $(x, y)$ . У такому випадку кути  $\delta_1$  та  $\lambda_1$  не змінюються, а кут  $\varphi_{s1}$  приймає нове значення  $\varphi'_{s1}$  в залежності від умов:

$$\varphi'_{s1} = \begin{cases} \varphi_{s1} - \varphi_1, & \text{якщо } \varphi_{s1} > \varphi_1 \\ \varphi_{s1} - \varphi_1 + 360, & \text{якщо } \varphi_{s1} < \varphi_1 \end{cases} \quad (13)$$

Тоді, система  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})_1$  переходить у систему  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})'_1$ , що визначається через параметри  $\varphi'_{s1}, \delta_1, \lambda_1$ , для механізму вогнища в точці, для якої азимут  $\varphi_1$  стає  $\varphi'_1 = 0$ , а кут виходу залишається рівним  $i_{\xi_1}$ . Обертання на кут виходу  $i_{\xi_1}$  здійснено у площині  $z$  довкола осі  $y$ . У такому випадку змінюються усі параметри  $\varphi_s, \delta, \lambda$ . Дане обертання також має свої обмеження: кут падіння  $\delta$  не може перевищувати  $90^\circ$ , кут  $\lambda$  повинен знаходитися в межах  $(-180^\circ, 0^\circ)$  або  $(0^\circ, 180^\circ)$ , а кут  $\varphi_s - (0, 360^\circ)$ . Для того, щоб накласти додаткові умови для визначення параметрів  $\varphi_s, \delta, \lambda$  введено ще один параметр  $i_{kr}$ . Даний параметр  $i_{kr}$  характеризує точку перетину нодальної лінії та осі  $x$  у системі  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})'_1$ .

Згідно (11-12), у якому ліва частина записана для системи  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})'_1$ , а права – для системи  $(\bar{\mathbf{n}}, \bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{u}})_2$  одержано параметри  $\varphi_{s2}, \delta_2, \lambda_2$  для визначення механізму вогнища в гіпоцентрі:

$$\delta_2 = \arccos(\sin \delta_1 \sin i_{\xi_1} \sin \varphi'_{s1} + \cos i_{\xi_1} \cos \delta_1) \quad (14)$$

$$\lambda_2 = \arcsin\left(-\frac{(\cos \lambda_1 \cos \varphi'_{s1} - \cos \delta_1 \sin \lambda_1 \sin \varphi'_{s1}) \sin i_{\xi_1} - \sin \lambda_1 \sin \delta_1 \cos i_{\xi_1}}{\sin \delta_2}\right) \quad (15)$$

$$\varphi_{s2} = \arcsin\left(\frac{\sin \delta_1 \sin \varphi'_{s1} \sin i_{kr} + \cos \delta_1 \cos i_{kr} - \cos \delta_2 \cos(i_{kr} - i_{\xi 1})}{\sin \delta_2 \sin(i_{kr} - i_{\xi 1})}\right) \quad (16)$$

Формули (14-16) використано для тестового прикладу задачі inv2a, проекту SIV. Наприклад, у випадку станції I20 отримано наступні розв'язки:

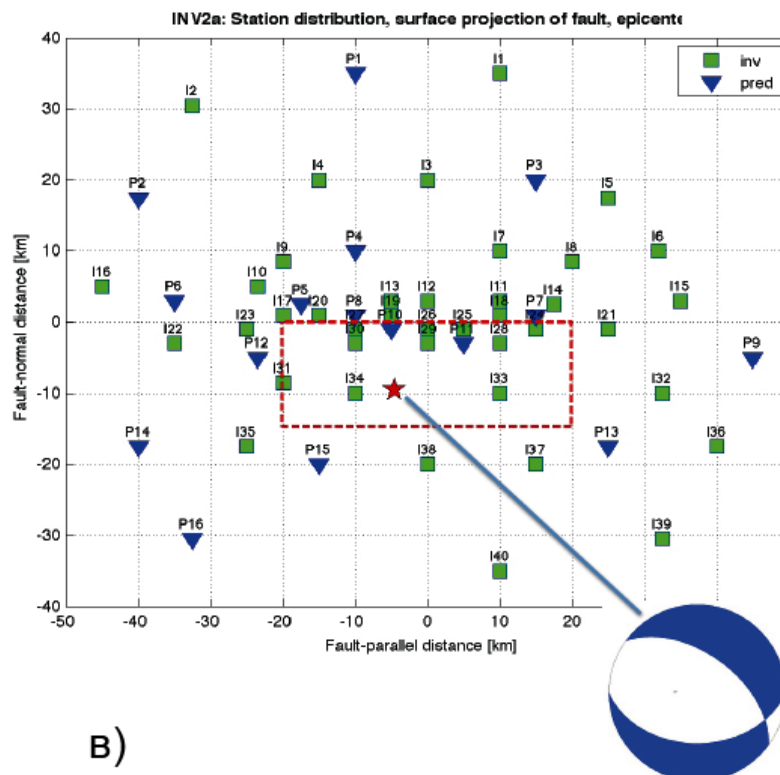
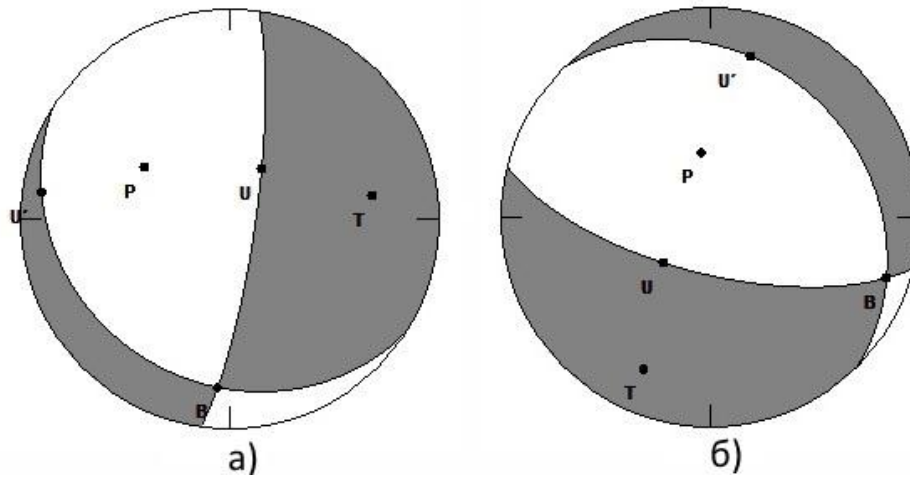


Рис.4. Механізм вогнища, визначений за даними станції I34: а) з тензора згідно (3-5), б) перенесений в гіпоцентр згідно (13-16), в) Розподілення станцій та механізм вогнища для задачі inv2a SIV

Для даної задачі отримано схожі механізми вогнищ визначені за даними кожної станцій (рис. 5) та схожі з механізмом заданим у проекті та визначеним графічним методом.

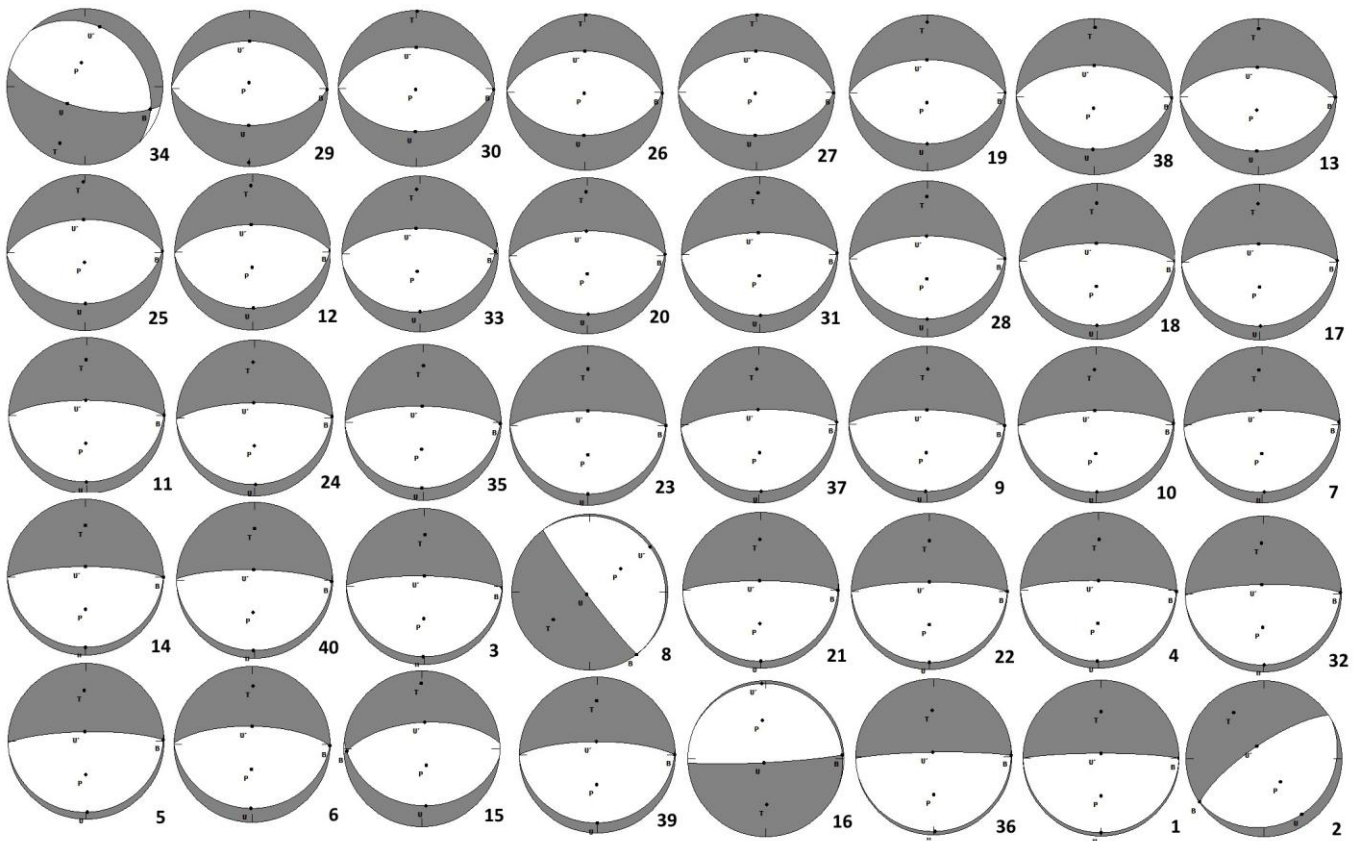


Рис. 5. Механізми вогнищ для задачі inv2a, визначенні за даними 40 станцій (inv2a SIV)

У четвертому розділі описано методіку розв'язання оберненої задачі сейсмології щодо визначення параметрів розподіленого джерела.

Джерело сейсмічних хвиль представлено площиною розриву, яка розміщена в однорідному ізотропному шарі, де знаходиться гіпоцентр землетрусу. Кути орієнтації площини розриву та напрямок посування є заданими параметрами механізму вогнища, визначеного, наприклад, одним із методів: графічним або методом за обмеженою кількістю станцій. Площину розриву довжиною  $L$  та шириною  $W$  розбиваємо на  $N$  підплощин однакової площі, кожна з яких є точковим джерелом та має таку ж орієнтацію, як і уся площина розриву (рис. 6).

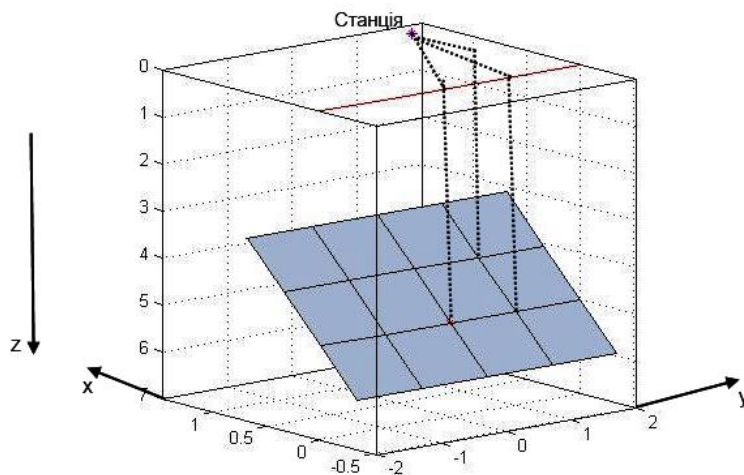


Рис.6. Представлення площини розриву для розподіленого джерела

Дані підплощини, що розглядаються як точкові джерела, мають різні епіцентрально відстані  $r_l$  та різний азимут та станцію  $\varphi_l$ , різні глибини, а, отже, різні матриці середовища  $K_l$ , де  $l$  – індекс підплощини. Для кожного елементарного джерела, представленого підплощиною визначено сейсмічний момент:

$$M_{0l} = \mu A u_l, \quad (17)$$

де  $\mu$  – модуль зсуву для однорідного шару, в якому розглядається площина розриву для розподіленого джерела (є однаковим для різних підплощин);  $A$  – площа підплощини, яка також задається однаковою для кожного точкового джерела,  $u_l$  – посувка для кожного точкового джерела.

У випадку простої моделі розрив поширюється вздовж площини розлому із певною швидкістю. Крім того, для кожної точки розлому посувка триває протягом скінченного часу. Час протягом якого посувка набирає своє максимальне значення називається часом наростання, так званий «rise time»  $t_r$ . Час поширення посувки вздовж розлому називають часом розриву «rupture time»  $t_d$ .

Таким чином, постановка прямої задачі полягає у визначенні хвильового поля на вільній поверхні шаруватого півпростору, коли вогнище землетрусу представлено як розподілене джерело у просторі та часі. Середнє значення посувки, час наростання, час розриву – параметри розподіленого джерела, які необхідно визначити в оберненій задачі.

Розглянуто реєстрацію поля переміщень на вільній поверхні однією станцією від розподіленого джерела, що є сумою  $N$  елементарних (точкових) джерел. Для  $l$ -того точкового джерела хвильове поле  $u_l^{(0)} = (U_x^{(0)P}, U_x^{(0)S}, U_y^{(0)P}, U_y^{(0)S}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S})^T$ , викликане прямими  $P$  та  $S$  хвилями, у спектральній області має вигляд:

$$u_l^{(0)} = K_l M_l \quad (18)$$

де  $M_l = (M_{xz}^l, M_{yz}^l, M_{zz}^l, M_{xx}^l, M_{yy}^l, M_{xy}^l)^T$  – вектор компонент тензора сейсмічного моменту для  $l$ -того точкового джерела; матриця  $K_l$  – матриця середовища для  $l$ -того точкового джерела.

У даній роботі параметри розподіленого джерела визначено виділенням поля переміщень тільки для прямої  $P$ -хвилі. Рівняння (18) переписано у вигляді:

$$u_l^{(0)P} = (U_x^{(0)P}, U_y^{(0)P}, U_z^{(0)P}) = K_l^P M_l \quad (19)$$

де матриця  $K_l^P$  – матриця середовища визначена для  $P$  хвилі для  $l$ -того джерела.

У випадку розподіленого джерела поле переміщень у спектральній області, зареєстроване на одній станції і викликане прямими  $P$ - хвилями від  $N$  точкових джерел буде мати вигляд:

$$u_N^{(0)P} = K_1^P M_1 + K_2^P M_2 + \dots + K_N^P M_N \quad (20)$$

Рівняння (20) можна переписати, використовуючи визначення сейсмічного моменту  $M_0$  для кожного точкового джерела (17) та формули для компонент тензора сейсмічного моменту для кожного точкового джерела через кути, які визначають геометричну орієнтацію площини розриву:

$$\mathbf{U}_N^{(0)P} = K_1^P \mu A u_1 f(\delta, \varphi_s, \lambda) + K_2^P \mu A u_2 f(\delta, \varphi_s, \lambda) + \dots + K_N^P \mu A u_N f(\delta, \varphi_s, \lambda) \quad (21)$$

Вектор  $f(\delta, \lambda, \varphi_s)$  визначається через залежності компонент тензора сейсмічного моменту і є розмірністю  $1 \times 6$ :

$$f(\delta, \lambda, \varphi_s) = \begin{pmatrix} M_{xz} \cos \varphi + M_{yz} \sin \varphi \\ M_{zz} \\ \cos^2 \varphi \cdot M_{xx} + \sin^2 \varphi \cdot M_{yy} + \sin 2\varphi \cdot M_{xy} \\ -\cos 2\varphi \cdot M_{xx} + \cos 2\varphi \cdot M_{yy} - 2 \sin 2\varphi \cdot M_{xy} \\ M_{yz} \cos \varphi - M_{xz} \sin \varphi \\ \sin 2\varphi \cdot M_{xx} - \sin 2\varphi \cdot M_{yy} - 2 \cos 2\varphi \cdot M_{xy} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Використовуючи значення для вектора  $f(\delta, \varphi_s, \lambda)$ , матриці  $K_l^P$ , отримано матрицю  $\mathbf{G}$ , елементи якої визначено як:

$$g_{il} = \mu A \sum_{j=1}^6 K_{ij}^{Pl} f_j, \quad (23)$$

де  $i=1,2,3; j=1,\dots,6; l=1,\dots,N$ .

Таким чином, визначено поле переміщень для розподіленого джерела, яке викликане лише прямими  $P$ -хвилями на вільній поверхні середовища у вигляді:

$$\mathbf{U}_N^{(0)P} = \left( U_x^{(0)P}, U_y^{(0)P}, U_z^{(0)P} \right)^T = \mathbf{G} \mathbf{u} \quad (24)$$

де вектор  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_N)^T$  визначає посувки по розриву для кожного точкового джерела.

Приведемо перевизначену систему лінійних рівнянь (24) до наступного вигляду, помноживши зліва і справа на матрицю  $\tilde{\mathbf{G}}^*$ , яка по відношенню до матриці  $\mathbf{G}$  є комплексно-спряженою і транспонованою, тобто:

$$\tilde{\mathbf{G}}^* \mathbf{G} \mathbf{u} = \tilde{\mathbf{G}}^* \mathbf{U}_N^{(0)P}. \quad (25)$$

Тоді вектор посувки для розподіленого джерела визначено як:

$$\mathbf{u} = (\tilde{\mathbf{G}}^* \mathbf{G})^{-1} \tilde{\mathbf{G}}^* \mathbf{U}_N^{(0)P}. \quad (26)$$

Даний розв'язок мінімізується нормою:



$$\left| \mathbf{U}_N^{(0)P} - \mathbf{G}\mathbf{u} \right|^2. \quad (27)$$

Розв'язок (26) знайдено в частотній області. Застосувавши обернене перетворення Фур'є, отримано розв'язки для вектора пошуку у часовій області.

Апробацію даної методики для розподіленого джерела здійснено на тестовому прикладі задачі inv2a проекту SIV. Параметри механізму вогнища, які задано у проекті, представлено в табл.1.

Таблиця 1

Параметри площини розриву для задачі inv2a (SIV)

$\varphi_s, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$
90	45	-120

Дану площину, розміри якої  $L=40$  км,  $W=14$  км, розбито на 140 підплощин розмірами  $L_i=2$  км,  $W_i=2$  км, тобто розподілене джерело є суперпозицією 140 елементарних точкових джерел.

Для кожної станції вибрано спостережуване поле переміщень для Р-хвилі. Використовуючи рівняння (26) для визначення  $\mathbf{u}$  та, застосувавши до розв'язку обернене перетворення Фур'є, отримано часові функції пошуку для кожного джерела.

Таким чином, для даної задачі отримано наступні результати, що показано на рис. 7:

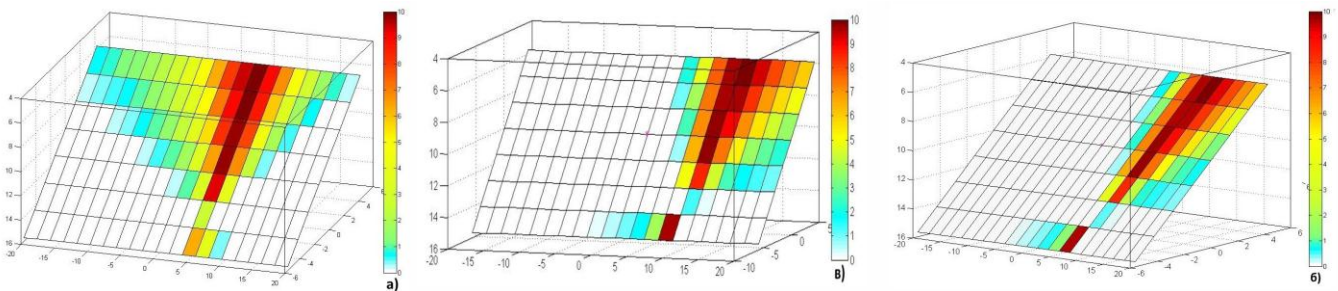


Рис.7 Розподілене джерело для задачі inv2a (SIV) за даними станцій: а) I29 (епіцентральна відстань  $r=7.98$ , азимут  $\varphi=36^\circ$ ), б) I26 (епіцентральна відстань  $r=9.68$ , азимут  $\varphi=29^\circ$ ), в) I12 (епіцентральна відстань  $r=13.35$ , азимут  $\varphi=21^\circ$ )

Зауважено, що область з більшими значеннями пошуку знаходиться в середині площини розриву, а максимальна пошука знаходиться над гіпоцентром. Отримані розв'язки, хоч не є цілковито однаковими, проте узгоджуються з розв'язками, визначеними іншими методами

## ВИСНОВКИ

Проведені в дисертаційній роботі дослідження дають можливість розв'язувати важливі задачі сейсмології, що полягають у створенні нових методик для визначення механізмів вогнищ землетрусів та для визначення параметрів розподіленого

джерела. Основні отримані результати представлено у коротких підсумках після кожного розділу та на їх основі викладено нижче висновки.

1. Показано, що застосування графічного методу та його модифікацій дозволяють визначати механізми вогнищ землетрусів у регіонах із малою сейсмічністю, в тому числі, в Карпатському регіоні.

2. Показано, що використання достовірних даних стосовно швидкісної моделі, епіцентрії та глибини залягання вогнища землетрусу є важливими для визначення механізму вогнища землетрусу

3. Показано, що матричний метод дає можливість розв'язати обернену задачу стосовно визначення тензора сейсмічного моменту за даними обмеженої кількості сейсмічних станцій.

4. Розв'язано низку задач для визначення механізмів вогнищ землетрусів як для подій Закарпаття, так і для інших сейсмоактивних регіонів

5. Запропоновано методіку для визначення параметрів розподіленого джерела, використовуючи дані проекту SIV

6. На основі порівняльного аналізу різних методів для визначення механізму вогнища землетрусу показано, що запропоновані в роботі методи дозволяють визначати параметри джерела, що є суттєвим для сейсмічних регіонів України

Розроблені та модифіковані методіки, та пакети програм, що їх реалізують, можуть бути використанні для вирішення кінематичних і динамічних задач сейсмології для сейсмоактивних регіонів України.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті в наукових виданнях.*

1. Малицький Д.В. Особливості побудови механізмів вогнищ місцевих землетрусів на прикладі Берегівської події 23.11.2006р. ( $\varphi=48.2^\circ$ ,  $\lambda= 22.52^\circ$ ,  $h=12.3$ км,  $MD=4.2$ ) / Д. В. Малицький, **О. Д. Грицай**, О. О. Муйла // Вісник КНУ, Геологія. – 2013. – Вип. 1(60). – С. 37-42

2. Порівняльний аналіз повторних землетрусів в Закарпатті 06.01.2012р. і 10.01.2012р./ Д.В.Малицький, **О.Д. Грицай**, О.О.Муйла та ін. // Геодинаміка–2013.– № 2 (15). – С. 225 – 227.

3. Застосування матричного методу в обернених задачах з використанням реальних записів / А.Ю. Павлова, Д.В. Малицький, **О.Д. Грицай**, Е.М.Козловський, // Геодинаміка. – 2013. – № 2 (15). – С. 265 – 267

4. Determining the focal mechanism of an earthquake in the Transcarpathian region of Ukraine / D. Malytskyy, O. Muyla, A. Pavlova, **O. Hrytsai** // Visnyk KNU, Geology. – 2013. – vol.4(63). – P. 38-44.

5. . Pavlova A. Ways of Determining the Focal Mechanisms in the Carpathian Region of Ukraine / A. Pavlova, **O. Hrytsai**, D. Malytskyy // Journal of Earth Science and Engineering. – 2014. – vol. 4. – № 1. – P. 54-71

6. Визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону/ Д. В. Малицький, **О. Д. Грицай**, О. О. Муйла та ін...// Геофизический журнал.– №4, Т.36.– 2014.– С. 118 – 135

7. Pavlova A. Determining the focal mechanisms of the events in the Carpathian region of Ukraine/ A. Pavlova, **O. Hrytsai**, D. Malyskyy // Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems. – 2014. – Vol. 3. – P. 229–239

8. Moment tensor inversion of wave forms/ D. Malyskyy, O. Muyla, **O. Hrytsai**, etc. //Visnyk KNU, Geology. – 2015. –Vol.1(68). – P. 80-86.

9. Особливості визначення механізмів вогнищ землетрусів графічним методом у районі Середземномор'я/ Д.В. Малицький, , **О.Д. Грицай**, О.О. Муйла та ін. //Геоінформатика. – 2015.–Т.4(56). – С. 43-51

10. Розподілене джерело: результати моделювання та перспективи використання для задач сейсмології/ Д.В. Малицький, О.О. Муйла, **О.Д. Грицай** та ін. // Вісник КНУ, серія Геологія – 2015.–Т. 2(69) – С. 96-101.

11. Визначення механізму вогнища землетрусу в районі Альберти, Канада ( $\varphi = 58.16^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = -115.25^\circ\text{E}$ ,  $M_w=3.98$ )/ Д.В. Малицький, **О.Д. Грицай**, О.О.Обідіна, А.Ю. Павлова.//Вісник КНУ, серія Геологія – 2015.–Т.3(70) – С.30-35

12. Вогнище землетрусу: моделювання, визначення параметрів і використання/ Д.В. Малицький, О.О. Муйла, **О.Д. Грицай** та ін...// Геоінформатика – 2016.– Т.1(57) ) – С. 66-78

*Тези доповідей і матеріали конференцій.*

13. Определение та інтерпретація механізмів источников землетрясений Карпатского региона графическим методом / Д.В.Малицкий, **О.Д. Грицай**, О.И.Кутнив та ін.// Современная тектонофизика. Методы и результаты, 13-18 октября 2013.: материалы докладов. – М., 2013. – Т. 1. – С. 67 – 76

14. Малицький Д.В. Про деякі параметри тензора напружень для сейсмічних подій Карпатського регіону: матеріали наукової конференції-семінару [«Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах»]/ Д. В. Малицький., **О.Д. Грицай** – Львів: Сполом – 2014.– С. 162-163

15. Исследование природы криворожского землетрясения 23 июня 2013г.: материалы наукової конференції-семінару [«Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах»]/ Д. В. Малицький., **О.Д. Грицай**, Щербина С.В та ін.– Львів: Сполом – 2014, С. 164-170.

## АНОТАЦІЯ

**Грицай О. Д. Визначення механізмів вогнищ місцевих землетрусів на основі кінематичних і динамічних підходів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика. – Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена визначенню механізмів вогнищ землетрусів на основі комплексу кінематичних і динамічних підходів. Кінематичний підхід реалізовано у вигляді т.зв. модифікованого графічного методу, у якому окрім полярностей перших вступів Р-хвиль, враховуються також і нечіткі вступи та логарифми співвідношення амплітуд вступів S-хвиль та Р-хвиль. Розглянуто

особливості застосування цього методу для визначення механізмів вогнищ слабких землетрусів у різних сейсмоактивних регіонах.

Динамічний підхід полягає в оберненні хвильових форм перших вступів Р-хвиль з метою визначення компонент тензора сейсмічного моменту. Повне хвильове поле, збуджене джерелом на вільній поверхні горизонтально-шаруватого півпростору, усі характеристики якого заздалегідь відомі, обчислюється з використанням матричного методу. Розроблений у роботі метод обернення хвильових форм доповнено процедурою перетворення координат, яка дозволяє порівнювати розв'язки механізму вогнища, отримані за даними різних станцій, і визначати, таким чином, механізм із використанням невеликої кількості станцій.

Запропоновано метод визначення параметрів розподіленого джерела, яке моделюється як сукупність точкових джерел, розташованих на площині розриву, орієнтація якої визначається за допомогою графічного методу, або методу обернення хвильових форм.

Запропоновані методи реалізовано у вигляді пакетів прикладних програм та апробовано на тестових та реальних прикладах. Зроблено порівняльний аналіз методів, запропонованих для визначення фокальних механізмів та параметрів розподіленого джерела.

**Ключові слова:** вогнище землетрусу, точкове джерело, механізм вогнища, площина розриву, тензор сейсмічного моменту, розподілене джерело.

## АННОТАЦІЯ

**Грицай О.Д. Определение механизмов очагов местных землетрясений на основе кинематических и динамических подходов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика. – Институт геофизики им. С. И. Субботина, Киев, 2016 .

Диссертационная работа посвящена определению механизмов очагов землетрясений на основе комплекса кинематических и динамических подходов. С целью применения в динамических подходах изучены и проанализированы матричный метод определения поля перемещений на свободной поверхности слоистого полупространства.

Диссертация посвящена определению механизмов очагов землетрясений на основе комплекса кинематических и динамических подходов. Кинематический подход реализован в виде т.н. модифицированного графического метода, в котором кроме полярностей первых поступлений Р-волн, учитываются также и нечеткие вступления и логарифмы соотношения амплитуд поступлений S-волн и Р-волн. С помощью графического метода определены механизмы очагов землетрясений для Карпатского сейсмоактивного региона Украины. Рассмотрены особенности применения этого метода для определения механизмов очагов слабых землетрясений в различных сейсмоактивных регионах.

Динамический подход заключается в обращении волновых форм первых вступлений Р-волн с целью определения компонент тензора сейсмического момента.

Полное волновое поле, возбужденное источником на свободной поверхности горизонтально-слоистого полупространства, все характеристики которого заранее известны, исчисляется с использованием матричного метода. Разработанный в работе метод обращения волновых форм дополнен процедурой преобразования координат, которая позволяет сравнивать решения механизма очага, полученные по данным различных станций, и определять, таким образом, механизм с использованием небольшого количества станций.

Предложен метод определения параметров распределенного источника, моделируется как совокупность точечных источников, расположенных на плоскости разрыва, ориентация которой определяется с помощью графического метода, или метода обращения волновых форм.

Предложенные методы реализованы в виде пакетов прикладных программ и апробированы на тестовых (проект SIV, задача inv2a) и реальных примерах. Сделан сравнительный анализ методов, предложенных для определения фокальных механизмов и параметров распределенного источника.

**Ключевые слова:** очаг землетрясения, точечный источник, механизм очага, плоскость разрыва, тензор сейсмического момента, распределенный источник.

## SUMMARY

**Hrytsai O. Determining of focal mechanisms of local earthquakes based on kinematic and dynamic approaches.** – Manuscript.

The thesis for a Ph.D. degree in physical and mathematical sciences, speciality 04.00.22 – geophysics. – Subbotin Institute of Geophysics, Kyiv, 2016.

In the thesis, the focal mechanisms of earthquakes are determined based on a complex of kinematic and dynamic approaches. The kinematic approach consists in using of a so called modified graphic method where in addition to polarities of first arrivals of P-waves information on fuzzy arrivals and logarithm of amplitude ratio of S- and P-waves also is accounted for. The difficulties are analyzed of using the method for determination of mechanisms of small earthquakes in different seismically active regions.

The dynamic approach consists in inversion of waveforms of first arrivals of P-waves for components of seismic moment tensor. The full wave field generated by source on the free surface of horizontally uniform layered medium, parameters of which are known in advance, is calculated using the matrix method. A method developed in the thesis for the inversion of waveforms is supplemented with a procedure for transformation of coordinates enabling a correct comparing of source mechanisms determined from data of different stations, and determination, in such a way, of mechanism based on a small number of stations.

A method also is proposed for the determination of parameters of extended source, modeled as a number of point sources distributed over a surface of rupture plane, whose orientation is determined using the graphic method or the method for the inversion of waveforms.

Based on the methods developed in the thesis applied programs have been designed and tested using the synthetic and real data. A comparative analysis has been conducted

between different methods developed for determination of the focal mechanisms and parameters of extended source.

**Key words:** earthquake source, point source, source mechanism, rupture plane, seismic moment tensor, extended source.