

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

МИХАЙЛОВА ОЛЬГА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 550.334

**ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІВ НАПРУЖЕНЬ У ЗАКАРПАТТІ
ЧЕРЕЗ МЕХАНІЗМИ ВОГНИЩ ЗЕМЛЕТРУСІВ**

04.00.22 – геофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник

доктор фізико-математичних наук, професор,

Малицький Дмитро Васильович,

Карпатське відділення інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Завідувач відділу методів сеймотектонічних досліджень

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор

Стародуб Юрій Петрович,

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності МОН України, м. Львів, завідувач кафедри цивільного захисту і комп'ютерного моделювання екогеофізичних процесів

доктор фізико-математичних наук

Маслов Борис Петрович,

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, головний науковий співробітник, м.Київ

Захист відбудеться 17 жовтня 2019 року о 14.00 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. Fax: +380(44)450-25-20; e-mail: rada-igph@igph.kiev.ua

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, проспект Палладіна, 32 та на електронному ресурсі <http://www.igph.kiev.ua>

Автореферат розісланий «___» _____ 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.200.01,
доктор геол. наук, професор



Т. К. Бурахович

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Визначення сучасного напруженого стану земної кори на основі даних про механізми вогнищ землетрусів є важливою задачею, яку намагалися розв'язати раніше і яка досі перебуває в полі наукових інтересів багатьох дослідників, таких як: Гінтов О., Муровська А., Шевчук В., Іванік О., Малицький Д., Ребецький Ю., Вавричук В., Анжелє Д. та інші. Такі дослідники як Введенська А., Балакіна Л., Кейліс-Борок В., Костров Б. у своїх роботах, зазвичай, виходили з того, що орієнтація головних осей напружень збігається з орієнтацією осей стиску (P) і розтягу (T) у фокальних механізмах. Ще в середині минулого століття це припущення активно обговорювалося як механіками (Костров Б.), так і сейсмологами (Кейліс-Борок В.; Введенська А.). Такий підхід заздалегідь передбачає збіг зсувного розриву з площиною максимальних дотичних напружень це ще доведено Костровим Б.. Для металів придатна теорія максимальних дотичних напружень, де розрив відбувається у зонах їх максимальних значень. Стан гірських порід визначається не лише рівнем зсувних напружень і нормальних напружень, визначається критичний стан гірських порід, які створюють сили тертя на площині розриву (Ребецький Ю.). Роботи, в яких закладено всі основні положення сучасних підходів до вивчення природних напружень і сеймотектонічних деформацій з'являються у середині 70-х років минулого століття. Основне твердження відповідає гіпотезі Волеса і Бота. В якій стверджується, що вектор зсуву на розриві спрямований у напрямку дотичного напруження на ньому. У роботах Зобака М. закладено початки підходу, для якого орієнтації головних осей напружень ідентифікують з осями P і T механізмів вогнищ окремих землетрусів або із сукупностями таких осей. Згодом з'являються праці, у яких автори визначають головні осі напружень, використовуючи осі P і T окремих механізмів вогнищ різного діапазону магнітуд. Результуючі напруження отримують шляхом усереднення з подальшою інтерполяцією фокальних механізмів із осями, які ототожнено як головні осі визначених головних напружень.

Актуальними в наш час є вивчення як сейсмічності, так і визначення напружено – деформованого стану порід для регіонів України. Закарпаття є територією з найвищим рівнем сейсмічної активності в межах Карпатського регіону України. Важливою задачею для даного регіону є визначення сучасного напруженого стану земної кори на основі даних про механізми вогнищ землетрусів. Враховуючи той факт, що сейсмічність є невисокою і число сейсмічних станцій є обмеженим, вирішення проблеми визначення та інтерпретації параметрів вогнищ землетрусів на сучасному етапі сейсмологічних досліджень вимагає нових підходів, які базуються як на теоретичному, так і на експериментальному аналізі да-

них. Досліджуючи сейсмічність сейсмоактивних зон, вітчизняні вчені (Кендзера О., Пронишин Р., Вербицький Т., Кутас В., Гнип А., Малицький Д., Стародуб Ю. та інші) приділяли значну увагу задачам, які пов'язані із складною геологічною структурою досліджуваних регіонів і інтерпретацією хвильових полів з метою визначення механізмів вогнищ землетрусів та полів напружень.

Актуальність теми дисертаційної роботи пов'язана з визначенням сучасного напруженого стану земної кори на основі даних про механізми вогнищ землетрусів у районах із невисокою сейсмічною активністю. До таких регіонів відноситься Закарпаття, яке є найактивнішим на території Українських Карпат і характеризується повторними землетрусами. У цьому аспекті, у даній роботі визначають головні осі напружень, використовуючи параметри механізмів вогнищ землетрусів різного діапазону магнітуд.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота виконувалась відповідно до планів наукових досліджень Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, у відділі методів сейсмотектонічних досліджень у рамках таких тем: 1) «Математичне моделювання та експериментальні дослідження пружних полів у земній корі Українських Карпат» (2011–2015 рр. № держреєстрації 0111U000028); 2) «Багатопараметричне моделювання геофізичних полів у геосередовищах для підвищення достовірності прогнозування вуглеводнів» (2012–2016 рр. № держреєстрації 0112U001141); 3) «Комплексні геофізичні дослідження для виявлення та прогнозування еконебезпечних явищ на локальних та регіональних полігонах Заходу України» (2012–2016 рр. № держреєстрації 0112U001142); 4) «Теоритико-експериментальні дослідження полів напружень деформацій та їхнього зв'язку з розломно-блоковою тектонікою і сейсмічністю Закарпаття» (2016–2020 рр. № держреєстрації 01162U00075).

Мета та задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є визначення сучасного напруженого стану полів напружень через механізми вогнищ землетрусів для сейсмічних подій Закарпаття.

Для досягнення цієї мети в дисертації поставлено наступні задачі:

- 1) обчислити механізми вогнищ землетрусів графічним методом;
- 2) розрахувати тензор сейсмічного моменту за даними обмеженої кількості станцій методом інверсії хвильових форм;
- 3) знайти поля напружень за фокальними механізми для сейсмічних подій Закарпаття;
- 4) здійснити порівняльний аналіз визначення полів напружень на реальних подіях Закарпаття за механізмами вогнищ із використанням методів Майкла та Р-Т осей.

Об'єктом дослідження є механізми вогнищ землетрусів та поля напружень.

Предметом дослідження є визначення сучасного напруженого стану земної кори Закарпаття на основі даних про механізми вогнищ землетрусів.

Методи досліджень. При виконанні роботи було застосовано графічний метод і метод інверсії хвильових форм для побудови механізмів вогнищ землетрусів. Застосовані методи для визначення поля напружень через фокальні механізми для подій Закарпаття: метод Майкла і метод Р-Т осей.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше визначено механізми вогнищ більше 50 землетрусів Закарпаття графічним методом та методом інверсії хвильових форм;

2. Вперше знайдено поля напружень у земній корі Закарпаття за фокальними механізмами вогнищ місцевих землетрусів;

3. Вперше здійснено порівняльний аналіз полів напружень, обчислених за фокальними механізмами із використанням методів Майкла та Р-Т осей для сейсмічних подій Закарпаття.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій. Достовірність одержаних результатів забезпечується чіткою фізичною постановкою задач, дотримання початкових та граничних умов, строгим виконанням математичних перетворень під час отримання основних аналітичних співвідношень; ретельним тестуванням створених програмних засобів.

Практичне застосування отриманих результатів. Враховуючи сейсмічність Закарпаття, застосовані в дисертаційній роботі алгоритми дають змогу визначати механізми вогнищ місцевих землетрусів як графічним методом, так і методом інверсії хвильових форм. Отримані розв'язки для полів напружень є основою для аналізу напружено-деформованого стану гірських порід Закарпаття.

Визначення головних напружень за графічним методом для досліджуваного регіону дозволяє краще зрозуміти процеси, що відбуваються у вогнищі землетрусу. Запропоновані в дисертаційній роботі алгоритми та комп'ютерні розрахунки можуть застосовуватись для аналізу напружено-деформованого стану регіонів із малою сейсмічністю. Отримані результати можуть використовуватись у навчальному процесі. (наприклад: на геологічному факультеті в ЛНУ ім. І. Франка)

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати та висновки, викладені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто або у співпраці та опубліковані в журналах, які входять до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук або іноземних видань. За темою дисертації автором опубліковано 12 нау-

кових праць: статей – 9 (5 входять до наукометричної бази *Web of Science*), 3 – тез доповідей вітчизняних і міжнародних конференцій.

Здобувачем особисто: визначено механізми вогнищ більше 50 землетрусів Закарпаття графічним методом та методом інверсії хвильових форм; вперше використано метод визначення поля напружень через фокальні механізми для подій Закарпаття та здійснено порівняльний аналіз, використовуючи методи Майкла та Р-Т осей.

Особистий внесок автора в основні роботи, виконані в співавторстві, визначаються наступним чином: у роботі [1] запропоновано постановку задачі, участь в аналізі та інтерпретації вхідних даних, автором визначено механізм вогнища землетрусу графічним методом для землетрусу, що відбувся у районі Альберта (Канада), обробка результатів та виконання комп'ютерних розрахунків; у роботі [2] здійснено збір та обробку сейсмологічних даних, побудовано механізм вогнища землетрусу, який відбувся біля с. Угля; у роботі [3] запропоновано постановку задачі, використано графічний метод для визначення механізмів вогнищ землетрусів у районі Середземномор'я, обробка результатів та виконання комп'ютерних розрахунків; у роботі [4] здійснено збір та обробку сейсмологічних даних, побудовано механізм вогнища для події біля о. Мальти; у роботі [5] запропоновано постановку задачі, здійснено збір та обробку сейсмологічних даних для визначення механізму вогнищ 30 повторних тячівських землетрусів, автором визначено поле напружень Солотвинської западини Закарпаття і зроблено основні висновки; у роботі [6,7] здійснено збір та обробку сейсмологічних даних; у роботі [8] визначено механізми вогнищ землетрусів, пораховано поля напружень методом Майкла і зроблено основні висновки; у роботі [9] здійснено збір та обробку сейсмологічних даних для визначення механізму вогнищ методом інверсії хвильових форм; у роботі [10] здійснено збір та обробку сейсмологічних даних, побудовано фокальні механізми; у роботі [11] визначено поле напружень для Солотвинської западини Закарпаття методом Майкла; у роботі [12] визначено механізм вогнища Криворізького землетрусу за допомогою графічного методу.

Апробація результатів дисертації. Основні концепції, ідеї, положення і результати досліджень доповідалися і обговорювалися на: засіданнях НТШ у Карпатському відділенні інституту геофізики ім. С. І. Субботіна (Карпатське відділення інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Львів, 2015, 2016, 2017 усна доповідь); 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, 2015, 2016; 2017 усна доповідь). XVI міжнародній конференції «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (2017, усна і стендова доповідь); XIth міжнародній конференції: Proceedings of XIth International Conference “Monitoring 2017”; науковій конференції ЛНУ ім. І. Франка «Геофізичні дослідження та моделювання фізичних полів Землі», Львів-Верхнє Синьовидне. – 2016.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, трьох розділів основної частини, висновків та переліку використаних джерел 126 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 140 стор., рисунків – 47, таблиць – 23.

Подяка. Автор висловлює щирю подяку науковому керівникові доктору фізико-математичних наук, професору, Карпатського відділення інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, завідувач відділу методів сейсотектонічних досліджень Малицькому Дмитру Васильовичу за всебічне сприяння та підтримку. Автор вдячна – кандидату геологічних наук, науковій співробітниці Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України Муровській Анні Валеріївні. Особлива вдячність кандидату фізико-математичних наук, старшому науковому співробітнику Карпатського відділення інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Гнипу Андрію Романовичу за допомогу та поради.

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 дисертації присвячено математичному моделюванню поширення сейсмічних хвиль в шаруватому півпросторі. Автором відзначено, що для визначення механізмів вогнищ землетрусів графічним методом необхідні сейсмологічні дані з великої кількості станцій. У випадку обмеженої кількості станцій, які зареєстрували сейсмічну подію (наприклад, для подій Закарпаття), у роботі пропонується використання методу інверсії хвильових форм для визначення механізмів вогнищ сейсмічних подій. Це підхід побудований на розв’язанні оберненої задачі з використанням матричного методу.

У процесі аналізу сейсмологічних даних, які отримано на сейсмічних станціях і порівняльного аналізу синтетичних сейсмограм із реальними записами доводиться використовувати математичне моделювання для розв’язування прямої задачі, тобто визначати хвильові поля за відомими параметрами джерела сейсмічних хвиль і середовища. У даному

розділі викладено основи матричного методу для розв'язування динамічних задач сейсмології. Матричний метод є одним із багатьох підходів, який використовується для розв'язання прямої динамічної задачі у шаруватому півпросторі. Основна увага приділяється матричному методу у модифікації Молоткова Л. яка розвинута в роботах Малицького Д.

Перейдемо до постановки прямої задачі та шляхів її вирішення. Постановка прямої задачі полягає у визначенні хвильового поля на вільній поверхні шаруватого півпростору. Важливо, що вогнище землетрусу має бути представлене, як точкове джерело у однорідному шарі. Таким чином, кожна компонента тензора сейсмічного моменту буде визначається як функція часу, а поле переміщень є згортокою, так званої часової функції вогнища STF(t) і функції Гріна. [4]

Отже, спершу, розглянемо поширення сейсмічних хвиль у вертикально неоднорідному середовищі, яке створено системою однорідних ізотропних n шарів на $(n+1)$ півпросторі. В однорідному ізотропному шарі на глибині H_s діє джерело, яке представлено тензором сейсмічного моменту M_{ij} (силовий еквівалент дев'яти пар або так звана ефективно-точкова дислокація). Вважаємо, що границі між шарами паралельні, а на кожній границі виконуються умови жорсткого контакту (неперервність переміщень і напружень). У роботах Малицького Д. з використанням методу Томсона-Хаскела та інтегральних перетворень Фур'є-Бесселя-Мелліна отримано строгі аналітичні співвідношення для хвильового поля на вільній поверхні, коли джерело сейсмічних хвиль розташоване в однорідному ізотропному шарі і представлено тензором сейсмічного моменту. Крім того, слід відзначити, що пряма задача, а саме визначення поля переміщень, розбивається на P - SV та SH задачі. Таким чином, у випадку шаруватого середовища отримано значення для потенціалів хвиль $\varphi_i, \psi_i, \chi_i$ в i -тому шарі, які збуджені джерелом, що представлено силовим еквівалентом дев'яти пар сил.[4]

Перейдемо до запису основних результатів математичного моделювання поширення сейсмічних хвиль у шаруватому півпросторі для джерела у вигляді сейсмічного тензора. Як результат, поле переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору отримано у вигляді (пряма задача) [2,4,6,7,9]:

$$u_z^{(0)}(r, \varphi_a, t) = \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_1(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{1z} \cdot e^{k\eta} d\eta +$$

$$+ \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_2(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{2z} e^{k\eta} d\eta + \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_3(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{3z} \cdot e^{k\eta} d\eta,$$

$$\begin{aligned}
u_r^{(0)}(r, \varphi_a, t) &= \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_1(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{1r} \cdot e^{k\eta} d\eta + \\
&+ \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_2(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{2r} e^{k\eta} d\eta + \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_3(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{3r} \cdot e^{k\eta} d\eta, \\
u_\varphi^{(0)}(r, \varphi_a, t) &= \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_5(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{5\varphi} \cdot e^{k\eta} d\eta + \\
&+ \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_6(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{6\varphi} e^{k\eta} d\eta, \tag{1}
\end{aligned}$$

Параметри $g_{1z}, g_{2z}, \dots, g_{6\varphi}$, які входять у (1) визначено через елементи характеристичної матриці всього середовища \mathbf{D} (P - SV випадок) і \mathbf{D}^* (SH -випадок) та характеристичної матриці всього середовища над джерелом $\mathbf{D}_{s,1}^{-1}$ і $\mathbf{D}_{s,1}^{*-1}$:

$$\begin{aligned}
\mathbf{D} &= \mathbf{A}_{n+1}^{-1} \mathbf{A}_n \mathbf{L}_n \mathbf{A}_n^{-1} \mathbf{A}_{n-1} \mathbf{L}_{n-1} \dots \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{A}_1 \mathbf{L}_1 \mathbf{A}_1^{-1}, \\
\mathbf{D}^* &= \mathbf{A}_{n+1}^{*-1} \mathbf{A}_n^* \mathbf{L}_n^* \mathbf{A}_n^{*-1} \mathbf{A}_{n-1}^* \mathbf{L}_{n-1}^* \dots \mathbf{A}_2^{*-1} \mathbf{A}_1^* \mathbf{L}_1^* \mathbf{A}_1^{*-1}, \\
\mathbf{D}_{s,1}^{-1} &= (d_{ij}^*) = \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{\Gamma}_s^{-1} \mathbf{A}_s \mathbf{A}_{s-1}^{-1} \mathbf{L}_{s-1}^{-1} \mathbf{A}_{s-1} \dots \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{L}_1^{-1} \mathbf{A}_1, \\
\tilde{\mathbf{F}}^{(0)} &= \mathbf{D}_{s,1}^{-1} \cdot \mathbf{F}^{(0)} = (\tilde{F}_1^{(0)}, \tilde{F}_2^{(0)}, \tilde{F}_3^{(0)}, \tilde{F}_4^{(0)})^T \tag{2}
\end{aligned}$$

У даному розділі зроблено опис сейсмічного джерела як ефективно-точкової дислокації. Зроблено аналіз розривів переміщень-напружень для математичного моделювання хвильових процесів в шаруватому півпросторі. Показано, що ефективно-точкова дислокація, як силовий еквівалент для довільно-орієнтованого розриву є найбільш оптимальним типом джерела, який слід використовувати в сучасній сейсмології. Приведено алгоритм знаходження поля переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору для джерела у вигляді тензора сейсмічного моменту у випадку поширення тільки прямих P хвиль. Показано отримання узагальненого розв'язку оберненої задачі для тензора сейсмічного моменту.

У **другому розділі** описано визначення механізмів вогнищ землетрусів як однієї з найважливіших характеристик землетрусу. Визначення фокальних механізмів землетрусів для подій Карпатського регіону України є однією з найактуальніших проблем для місцевих сейсмологічних досліджень. Закарпаття є найактивнішим, в плані сейсмічності, регіоном на території Українських Карпат. На його сейсмічність впливають землетруси як своїх сейсмоактивних зон, так і зон суміжних держав.

У роботі розглянуто два методи для визначення фокальних механізмів. Як основний, використано т.зв. графічний метод, який вважається стандартним у визначенні фокальних механізмів. Цей метод базується на використанні полярностей перших вступів *P*-хвиль на сейсмічних станціях із урахуванням інформації про неточні вступу та величину співвідношення між амплітудами поперечних і повздовжних хвиль. Таким чином, у графічному методі використовується інформація (сейсмічні записи, азимути, епіцентральної відстані, швидкісна модель) із сейсмічних станцій, які зареєстрували подію. [2,6]

Другий метод – це визначення фокального механізму за допомогою інверсії хвильових форм, використовуючи дані лише із однієї станції або обмеженої кількості станцій, а саме: хвильові форми прямої *P* хвилі, епіцентральної відстані, глибину залягання вогнища та азимути станцій. Процедура визначення фокального механізму за інверсією хвильових форм – це обернена задача. Цей метод розроблено Малицьким Д..[1,3,2,4,9]

У даному розділі представлено результати визначення 50 механізмів вогнищ землетрусів Закарпаття з використанням графічного методу та методу інверсії хвильових форм. Як приклад, розглянемо визначення механізму вогнища землетрусу з серії повторних тячівських сейсмічних подій із найбільшим значенням магнітуди $M_L=3.7$. На рис.1. показано розташування сейсмічних станцій та епіцентр події, а на рис.2. – механізм вогнища землетрусу для даної події, який визначено графічним методом.[1,5,8,9]



Рис.1. Карта розташування сейсмічних станцій в Карпатському регіоні [2]

Після відповідного аналізу хвильових форм виявилось, що повторні землетруси є істотною рисою сейсмічності регіону – їхня кількість становить значну частку від усіх зареєстрованих на його території. Карпатською мережею сейсмічних станцій було зареєстровано, зокрема, мукачівську серію 2005-2006 років, яка складалася з близько 40 неглибоких слабких землетрусів.[2]

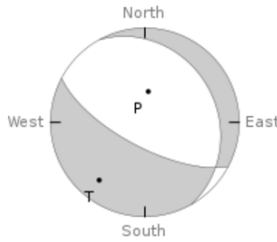


Рис.2. Визначення механізму вогнища для події 19.07.2015,11:30:47.4, $\phi_0=48.04^\circ$, $\lambda_0=23.67^\circ$, $h=7.7$ км, $MD=3.7$, $ML=3.7$ [5,11]

У третьому розділі показано визначення полів напружень через механізми вогнищ землетрусів, використовуючи методи Майкла та Р-Т осей та здійснено їх порівняльний аналіз.

На сьогоднішній день існує декілька методів для визначення поля напружень через фокальні механізми. Ці методи, як правило, припускають, що 1) тектонічне напруження є однакове (однорідне) в досліджуваному регіоні, 2) землетруси відбуваються в існуючих розломах з різною орієнтацією, 3) вектор пошукки по розриву спрямований у напрямі дотичного напруження на розриві: так звана гіпотеза Волеса-Бота. Якщо згадані припущення задовольняються, то методи для визначення напруження шляхом розв'язання оберненої задачі визначають три параметри тензора напружень: три кути, що визначають напрями головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, а також четвертий параметр: співвідношення форми R: [5,8,11]

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (3)$$

У методі Майкла тензор прийнято девіаторним, тобто

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0 \quad (4)$$

Тоді тривимірна задача перетворюється у двовимірну, в якій об'ємна деформація не враховується, а дотичні напруження залишаються незмінними.

Для визначення головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ через механізми вогнищ землетрусів у представленій роботі використано дані серії повторних сейсмічних. в епіцентральної зоні м.Тячева Закарпатської області, а також дані 18 подій з 2012 р. по 2015 р., що дало можливість винайти характерні риси для напружено-деформованого стану всього регіону. Відзначимо, що особлива увага до повторних землетрусів Закарпаття є тому, що такі дослідження можуть виявитися особливо корисними при

аналізі форшокових та афтершокових послідовностей подій та їх просторово-часового розподілу.

У методі для визначення тензора напружень за фокальними механізмами, який розвинутий Майклом (1984), використано співвідношення для нормальних і дотичних напружень на розриві σ_n і τ : [5,8,11]

$$\sigma_n = T_j n_j = \tau_{ij} n_i n_j \quad (5)$$

$$\tau_{ij} N_i = \tau_{kj} n_j (\delta_{ik} - n_j n_k) \quad (6)$$

де δ_{ik} – дельта функція, \mathbf{T} – вектор напруження на розриві, який має компоненти σ_n і τ , \mathbf{n} – вектор нормалі до площини розриву, \mathbf{N} – одиничний вектор зсувного напруження τ вздовж розриву, τ_{ij} – тензор напружень, який містить шість незалежних компонент.

Дотичне напруження τ у рівнянні (6) є нормалізованим до 1, так як у методі не визначаються абсолютні значення напружень. У результаті таких припущень рівняння (6) приведено до матричного вигляду:

$$\mathbf{A} \mathbf{t} = \mathbf{s} \quad (7)$$

Де \mathbf{t} – вектор незалежних компонент тензора напружень τ_{ij} :

$$\mathbf{t} = [\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{22}, \tau_{23}, \tau_{33}]^T \quad (8)$$

Матриця \mathbf{A} у рівнянні (7) розмірністю 3×6 розраховується через компоненти вектора нормалі \mathbf{n} до площини розриву наступним чином: [5,8,11]

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} n_1(1-n_1^2) & -n_2 n_1^2 & -n_3 n_1^2 \\ -n_1 n_2^2 & n_2(1-2n_2^2) & -n_3 n_2^2 \\ -n_1 n_3^2 & -n_2 n_3^2 & n_3(1-2n_3^2) \\ -2n_1 n_2 n_3 & n_3(1-2n_2^2) & n_2(1-2n_3^2) \\ n_3(1-2n_1^2) & -2n_1 n_2 n_3 & n_1(1-2n_3^2) \\ n_2(1-2n_1^2) & n_1(1-2n_2^2) & -2n_1 n_2 n_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

\mathbf{s} – одичний вектор посувки по розриву:

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, s_3]^T$$

Розглянувши вираз (9) для матриці \mathbf{A} у випадку визначених фокальних механізмів для K сейсмічних подій з відомими векторами нормалей \mathbf{n}_i та напрямками посувок \mathbf{s} для кожного з них, отримаємо систему $3K$ лінійних рівнянь для шести невідомих значень вектора \mathbf{t} :

$$\mathbf{A}^g \mathbf{t} = \mathbf{s}^g \quad (10)$$

де у матриці \mathbf{A}^g і векторі \mathbf{s}^g включені відомі вектори нормалей \mathbf{n}_i напрямки посувок \mathbf{s} для всіх K сейсмічних подій.

Відомо, що розв’язок такого матричного рівняння (10) зводиться до визначення так званого узагальненого розв’язку оберненої задачі:

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}^{-g} \mathbf{s}^g \quad (11)$$

Перехід від тензора напружень, який отримується із (11) до головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – це задача на власні значення і власні вектори стосовно тензора напружень τ_{ij} . Приведення матриці τ_{ij} до діагонального вигляду, діагональними елементами (власними значеннями) якого є головні напруження $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, дозволяє визначати напружений стан через визначені фокальні механізми вогнищ землетрусів, які відбулися в досліджуваному регіоні. Для порівняльного аналізу визначення поля напружень різними методами для конкретного регіону Закарпаття у роботі представлено також результати за методом Р-Т осей.[5,8,11]

На рис.3 показано визначені механізми вогнищ 30 повторних тячівських землетрусів які відбулися у період з 19.07.2015 по 06.08.2015 р. з магнітудами від 1 до 3.7, і які визначалися за допомогою графічного методу. Всі отримані механізми є подібними між собою.[5,11]

В межах Солотвинської западини розміщені гіпоцентри серії тячівських землетрусів.

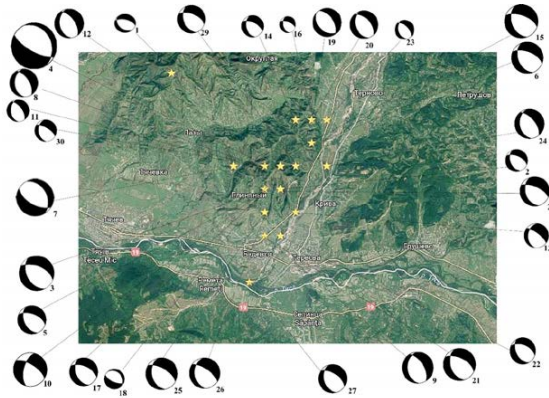


Рис.3. Механізми вогнищ 30 подій із серії тячівських землетрусів, які відбулися у період з 19.07 по 06.08.2015р. з магнітудами від 1 до 3.7, і які визначалися за допомогою графічного методу[5,11]

Тектонічне напруження в даній сейсмоактивній зоні обчислювалося за 30 фокальними механізмами, використовуючи метод Майкла. Як результат автором визначено головні напруження $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ через фокальні

механізми для 30 подій із серії тячівських землетрусів, які відбулися у період з 19.07 по 06.08.2015р. з магнітудами від 1 до 3.7 (рис.4).[5,11]

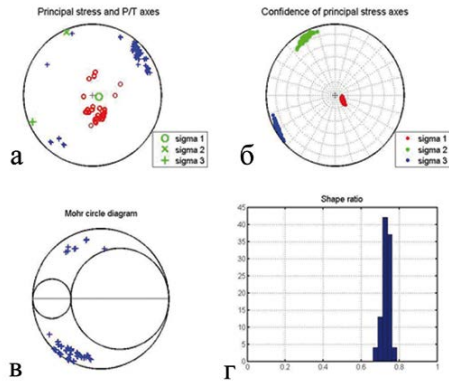


Рис. 4. Визначення головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ через фокальні механізми (рис. 3) за методом Майкла для 30 подій із серії тячівських землетрусів: а) орієнтації головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ у комбінації осей стиску P (червоні кола) і розтягу T (сині хрестики); б) довірчі інтервали для напрямків головних осей напружень, в) діаграма Мора, г) гістограма розподілу коефіцієнта R . [5,11]

У даному розділі показано визначення головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ через механізми вогнищ землетрусів із використанням 21 сейсмічної події (рис.5), 20 із яких відбулися у Закарпатті у період з 1.06.2012 р. по 06.08.2015 р. з магнітудами від 1 до 3.7, для яких визначено механізми вогнищ за допомогою графічного методу та методом інверсії хвильових форм. Параметри механізму вогнища 21 події (у дисертаційній роботі – це подія №49, табл.1), яка відбулася 23.10.2006 року (магнітуда 3.7, біля м.Берегово). [8]

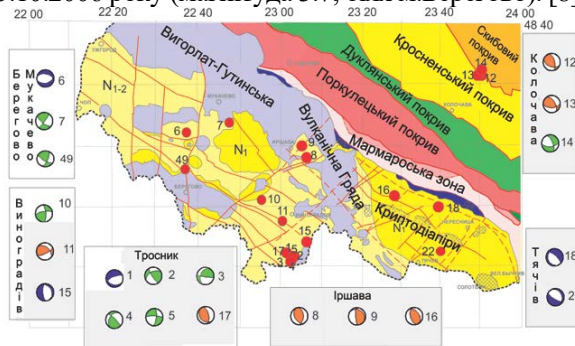


Рис.5. Групування механізмів вогнищ у компактні кластери на основі їх компактного географічного розміщення для подальшого розрахунку поля напружень окремо для кожної групи.[8]

На Рис. 5 представлено тектонічну схему Закарпатського прогину, складену шляхом об'єднання та спрощення тектонічних схем двох листів державної геологічної карти масштабу 1:500 000 із винесеними на неї епіцентрами та механізмами вогнищ землетрусів. Це дозволило пов'язати сейсмічні події з конкретними розломами та проаналізувати їх сучасну кінематику. У роботі здійснено групування механізмів вогнищ 21 події у кластери на основі компактного географічного розміщення епіцентрів землетрусів.[8]

ВИСНОВКИ

Проведені в дисертаційній роботі дослідження дають можливість розв'язувати актуальні наукові задачі для визначення механізмів вогнищ землетрусів та головних напружень через фокальні механізми для Закарпаття. Основні отримані результати представлено у коротких висновках після кожного розділу та на їх основі викладено нижче остаточні висновки.

1. Показано, що ефективно-точкова дислокація, як силовий еквівалент для довільно-орієнтованого розриву є найбільш оптимальним типом джерела, який слід використовувати в сучасній сейсмології. Приведено алгоритм знаходження поля переміщень на вільній поверхні шаруватого півпростору від джерела у вигляді тензора сейсмічного моменту, використовуючи матричний метод.

2. Зроблено опис та застосування графічного методу, а також методу інверсії хвильових форм для подій Закарпаття. Використовуючи графічний метод, показано визначення фокальних механізмів для 30 повторних тячівських землетрусів. Всі сейсмічні події для даного регіону погруповано в залежності від глибини залягання вогнища землетрусу.

3. Вперше виявлено основні типи та риси, характерні для напружено-деформованого стану всього регіону у результаті загального статистичного аналізу 50 фокальних механізмів вогнищ закарпатських землетрусів. Залежно від орієнтації кінематичних осей фокальні механізми поділено на три групи, що відповідають насувному, зсувному та скидовому типам. Для розглянутих землетрусів найбільш характерні механізми зсувного та насувного типів, майже в усіх зсувних механізмах наявна і насувна компонента переміщення. Отримані результати свідчать про переважання режиму стиску у межах досліджуваної території. Статистичний аналіз векторів переміщень свідчить про найбільшу поширеність насувзсувів з переважанням зсувної компоненти. Розв'язано низку задач з визначення головних напружень через механізми вогнищ місцевих землетрусів Закарпаття.

4. Вперше на основі порівняльного аналізу різних методів для визначення полів напружень показано, що запропоновані в роботі методи

дозволяють визначати напружено-деформований стан регіону, що є суттєвим для вивчення сейсмічності Закарпаття.

Апробовані та модифіковані методики, та пакети програм, що їх реалізують, можуть бути використанні для вирішення важливих задач сейсмології для сейсмоактивних регіонів України

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Малицький Д. 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. Малицький, О. Грицай, **О. Обідіна**, А. Павлова // Вісник КНУ, серія Геологія – 2015. – №3(70). – С.30-35.
2. Малицький Д. Вогнище землетрусу: моделювання, визначення параметрів і використання / Д. Малицький, О. Муйла, А. Павлова, О. Грицай, Ю. Коваль, **О. Обідіна** // Геоінформатика. – 2016. – №1(57). – С. 1–12.
3. Малицький Д. Особливості визначення механізмів вогнищ землетрусів графічним методом у районі Середземномор'я / Д. Малицький, О. Грицай, О. Муйла, О. Кутнів, **О. Обідіна**, О. Асташкіна, А. Павлова, Е. Козловський // Геоінформатика. – 2015. – №4(56). – С. 43-51
4. Малицький Д. Розподілене джерело: результати моделювання та перспективи використання для задач сейсмології / Д. Малицький, О. Муйла, О. Грицай, А. Павлова, О. Асташкіна, **О. Обідіна**, Е. Козловський // Вісник КНУ, серія Геологія. – 2015. – №2(69). – С. 96-101.
5. Малицький Д. Механізми вогнищ землетрусів та поле напружень Солотвинської западини Закарпаття / Малицький Д., Муровська А., Гінтов О., Гнип А., **Обідіна О.**, Мичак С., Грицай О., Павлова А. // Вісник КНУ, серія Геологія. – 2017. – №2(77). – С. 43-51.
6. Малицький Д. Методика визначення параметрів джерела (точкового та розподіленого) за даними обмеженої кількості сейсмічних станцій / Д. Малицький, О. Грицай, А. Павлова, О. Муйла, О. Асташкіна, **О. Обідіна** / Геоінформатика. – 2016. – №4(60). – С. 20–28.
7. Малицький Д. Моделі сейсмічних джерел / Д. Малицький, А. Павлова, О. Грицай, О. Асташкіна, **О. Обідіна**, М. Махніцький, Е. Козловський // Геоінформатика. – 2017. – №2(62). – С. 14–23.
8. Малицький Д. Визначення полів напружень у земній корі за механізмами вогнищ місцевих землетрусів у Закарпатті / Д. Малицький, А. Муровська, **О. Обідіна О.**, А. Гнип, О. Грицай, А. Павлова, А. Пугач // Вісник КНУ, серія Геологія. – 2017. – №3(78). – С. 36-45.

9. Malytskyy D. Moment tensor inversion of wave forms /D. Malytskyy, O. Muyla, O. Grytsai, O. Kutniv, **O.Obidina** // Visnyk KNU. – 2015. – vol.1(68). –P.53–58.

Тези доповідей і матеріали конференцій:

10. Малицький Д. Фокальні механізми сейсмічних подій в Закарпатті / Д. Малицький, О. **Обідина**, А. Павлова, О. Грицай, О. Муйла // Матеріали III наукової конференції «Геофізичні дослідження та моделювання фізичних полів Землі», Львів-Верхнє Сіньовидне. – 2016. – С. 53–58.
11. Malytskyy D. Tectonic stresses in the area of Solotvyno deep, Eastern Carpathians from focal mechanisms of local earthquakes / **O.Obidina**, A. // Proceedings of XVIth International Conference “Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects”, 15-18 May 2017 (CD)
12. Malytskyy D. Models of seismic source / D. Malytskyy, A. Gnyp, A. Parfeniuk, O. Grytsai, **O. Mykhailova** // Proceedings of XIth International Conference “Monitoring2017”, 11 – 14 October (CD), Kyiv, Ukraine, 11137_ENG

АНОТАЦІЯ

Михайлова О.О. Визначення полів напружень у Закарпатті через механізми вогнищ землетрусів . –

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика. – Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена визначенню полів напружень через механізми вогнищ землетрусів для подій Закарпаття. У роботі вперше проведено дослідження з визначення поля напружень за механізмами вогнищ землетрусів у сейсмоактивному регіоні Закарпаття. Для визначення головних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ використано 51 землетрус, які відбулися у Закарпатті у період з 1.06.2012 р. по 06.08.2015р. з магнітудами від 1 до 3,7. У запропонованій роботі продемонстровано використання методики визначення механізмів слабких землетрусів у сейсмоактивному регіоні Закарпаття. Проведено кореляцію механізмів з активними розломами та визначено поля напружень двома різними методами – методом Р-Т осей і методом Майкла у модифікації Вавричука – що дозволило уточнити їх сучасну кінематику. Як результат, зроблено загальну статистику та типізацію, що дозволило винайти характерні риси для напружено-деформованого стану всього регіону. У

залежності від орієнтації кінематичних осей у роботі фокальні механізми розділено на три групи, які відповідають насувному, зсувному та скидovому типам. Для вивчених землетрусів найбільш характерними є механізми зсувного та насувного типів, причому майже для всіх зсувних механізмів присутня, крім зсувної, насувна компонента переміщення.

Ключові слова: вогнище землетрусу, поле напружень, головні напруження, Р-Т метод, метод Майкла, типізація механізмів, нодальні площини.

АННОТАЦІЯ

Михайлова А.А. Определение полей напряжений в Закарпатье через механизмы очагов землетрясений. – Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика. – Институт геофизики им. С.И. Субботина, Киев, 2019.

Диссертация посвящена определению полей напряжений через механизмы очагов землетрясений для событий Закарпатья. В работе впервые проведено исследование по определению поля напряжений по механизмам очагов землетрясений в сейсмоактивном регионе Закарпатья. Для определения главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ использовано 51 землетрясение, которое состоялось в Закарпатья в период с 1.06.2012 г. по 06.08.2015 г. с магнитудами от 1 до 3,7. В предлагаемой работе продемонстрировано использование методики определения механизмов слабых землетрясений в сейсмоактивном регионе Закарпатья. Проведено корреляцию механизмов с активными разломами и определены поля напряжений двумя различными методами - методом Р-Т осей и методом Майкла в модификации Вавричук - что позволило уточнить их современную кинематику. Как результат, сделано общую статистику и типизацию, что позволило изобрести характерные черты для напряженно-деформированного состояния всего региона. В зависимости от ориентации кинематических осей в работе фокальные механизмы разделены на три группы, соответствующие надвижные, сдвижном и скидovому типам. Для изученных землетрясений наиболее характерны механизмы сдвига и надвижного типов, причем почти для всех оползневых механизмов присутствует, кроме оползневой, надвижная компонента перемещения.

Ключевые слова: вогнище землетрясения, поле напряжений, главные напряжения, Р-Т метод, метод Майкла, типизация механизмов, нодальни плоскости.

Ключевые слова: очаг землетрясения, поле напряжений, главные напряжения, Р-Т метод, метод Майкл, типизация механизмов, нодальни плоскости.

SUMMARY

Mykhailova O. Determining the stress field in the earth's crust from source mechanisms of local earthquakes in the Transcarpatians – Manuscript.

The thesis for a Ph.D. degree in physical and mathematical sciences, speciality 04.00.22 – geophysics. – Subbotin Institute of Geophysics, Kyiv, 2019.

The objective of the thesis consisted in development and verification of the methods for determination of earthquake source mechanisms and stress field from earthquake focal mechanisms in the Transcarpathian region of Ukraine.

Determination of present-day stress state of earth's crust based on data on earthquake mechanisms is considered important and actual problem, remaining in the focus of scientific interest of many researchers for a long time now.

At the current stage of seismological investigations, the solution to the problem of determination and interpretation of earthquake source parameters demands introduction of novel approaches, based on theoretical as well as experimental analysis of data. This especially relates to the region of Ukrainian Transcarpathians, with its relatively low level of local seismic activity and small number of seismic stations.

Basic data on the earthquakes (time, coordinates, depth) were acquired in the thesis from the seismological bulletin of Ukraine and reports provided by Department of Seismicity of Carpathian Region, Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. Two methods were employed for determination of focal mechanisms. In the most part, the mechanisms were determined by graphic method from polarities of first motions of P-waves at the stations, a method although considered as traditional but still as the most reliable one. When data on polarities of first motion proved insufficient, it was proposed to employ the inversion of waveforms. In total, focal mechanisms of 50 earthquakes were determined which occurred in the region during a period from 2012 to 2015. Mechanism parameters of the 23.10.2006 MS3.7 Berehove earthquake were taken from literature data.

Analysis of waveforms had shown that 30 out of 50 earthquakes belonged to a category of the so called recurrent (or similar) earthquakes and a conclusion was drawn out that since they comprise such a significant fraction of all earthquakes recorded in the region they may be considered as a significant feature of local seismicity.

Comparative analysis of source mechanisms determined by graphic method and by inversion of waveforms was performed. Subsequently, the data on mechanisms were used in determination of stress field.

Further in the thesis, analysis of present methods for determination of stress field from focal mechanisms of earthquakes was done. The conclusion was drawn out that there was much in common between them. In particular, these methods usually assume that (1) tectonic stress is uniform (homogeneous) in the study area, (2) earthquakes occur on pre-existing faults with varying orientations and (3) the slip vector points in the direction of shear stress on the fault (the so called Wallace-Bott hypothesis).

In the thesis, Michael's method was employed for determination of stress tensor. To resolve the ambiguity of which of the nodal planes corresponds to real rupture it was proposed to apply a so called fault instability constraint. Stresses were no longer calculated in one step as in Michael's original method but in iterations. The iterations were needed to identify the fault planes and thus to determine a more accurate stress field. The susceptibility of a fault plane to failure was estimated using a Mohr-Coulomb failure criterion, describing a relation between shear and normal stresses that will cause a fracture. According to this criterion, shear traction τ on an activated fault must exceed a critical value τ_c . At the same time, it also was proposed to use the fault instability coefficient I (the fault plane instability criterion) for identification of the fault plane.

In the thesis, for the first time a study was conducted in which the stress field in the seismically active region of Transcarpathians was determined from local earthquake source mechanisms. Principal stresses $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ were determined using more than 50 earthquakes with magnitudes between 1 and 3.7 which had occurred in the Transcarpathians during a period between 1.06.2012 and 06.08.2015. Correlation of mechanisms was conducted with active faults and stress fields were determined by two methods – method of P-T axes and Vavrycuk's modification of Michael's method – which has enabled to validate their present day kinematics. General statistics and typification has been performed enabling to identify the characteristic features of stress-strained state of earth's crust across the whole region. Depending on orientation of kinematics axes the focal mechanisms have been attributed to three groups, corresponding to thrust, and strike and fault types. Mechanisms of strike and thrust type have appeared as the most common, although thrust component of slip was present in almost all strike mechanisms.

Key words: earthquake source, focal mechanism, nodal plane, stress field, principal stress, Mohr-Coulomb criterion, method of P-T axes, Michael's method, typification of mechanisms.