

УДК 550.34.

Д. Малицький¹, д-р фіз.-мат. наук, проф., А. Муровська², канд. геол. наук,
О. Обідина¹, асп., А. Гнип¹, канд. фіз.-мат. наук,
О. Грицай¹, канд. фіз.-мат. наук, А. Павлова¹, канд. фіз.-мат. наук, А. Пугач³, асп.
¹Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України
вул. Наукова, 3, б, м. Львів, 79060, Україна
²Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України
пр. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна
³Донецький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІВ НАПРУЖЕНЬ У ЗЕМНІЙ КОРИ ЗА МЕХАНІЗМАМИ ВОГНИЩ МІСЦЕВИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ У ЗАКАРПАТТІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. І. М. Корчагіним)

У роботі вперше визначено 20 механізмів вогнищ місцевих землетрусів у Закарпатті, що становить дуже важливу передумову для подальших геодинамічних побудов. Фокальні механізми землетрусів за період з 2012 р. по 2015 р. визначалися за допомогою графічного методу. Крім того, з літературних джерел використано параметри механізму вогнища землетрусу, що відбувся 23.10.06 поблизу м. Берегове (магнітуда MSH 3,7). У результаті загального статистичного аналізу 21 механізму виявлено їхні основні типи та риси, характерні для напружено-деформованого стану всього регіону. 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, причому майже в усіх зсувних механізмах наявна і насувна компонента переміщення. Для визначення поля напружень за механізмами вогнищ землетрусів у Закарпатті використовувалися два методи. Перший – метод визначення тензора напружень за фокальними механізмами, запропонований Майклом у 1984 р. і модифікований в роботах Ваєричука, другий – т. зв. метод РТ-осей. У цих методах, як правило, припускають, що 1) тектонічні напруження однакові (однорідні) у досліджуваному регіоні; 2) землетруси відбуваються на існуючих розломах з різною орієнтацією; 3) вектор зсуву на розриві спрямований в напрямку дотичного напруження на розриві (т. зв. гіпотеза Волеса – Бота). Обчислення поля напружень методом РТ-осей здійснювався з використанням програми WIN-TENSOR. Наведені результати свідчать про переважання режиму стиску в межах досліджуваної території. У полі стиску пд.-зх. 230° – 250° , що переважає в межах території, виділено дві аномальні зони: перша розташована в пд.-сх. частині Чоп-Мукачівської западини, стиск у межах якої характеризується двома напрямками; друга аномальна зона – у східній частині Солотвинської западини – відзначається умовами розтягу в пд.-зх. 220° напрямку, тоді як для переважної частини Закарпатського прогину (ЗП) у цьому напрямку характерний стиск. Найбільш активними в сучасному сейсмотектонічному процесі є розриви карпатського простягання, про що свідчить аналіз орієнтації 42 нодальних площин. Ще одна особливість вивчених вогнищ полягає в тому, що в межах тієї самої території відбуваються землетруси протилежних типів (напр., насувного та скидового), що досить логічно з урахуванням того, що в тилловій зоні насувів формуються умови розтягу в тому самому напрямку, що й стиснення в їхній фронтальній частині.

Ключові слова: вогнище землетрусу, механізм вогнища, нодальні площини, поле напружень, головні напруження, метод РТ-осей, метод Майкла, програма WIN-TENSOR, типізація механізмів.

Вступ. Тектонофізичній та геодинамічній інтерпретації механізмів вогнищ землетрусів на основі відновлення сучасного напружено-деформованого стану сейсмогенного середовища в сейсмоактивних регіонах в українській геофізиці присвячено чимало праць. Відновлення напружено-деформованого стану може здійснюватись як лише з використанням фокальних механізмів землетрусів (як, напр., у зоні Загросу [21] та зоні Вранча [5]), так і на базі комплексної інтерпретації польових тектонофізичних і сейсмологічних даних (зокрема, у Південнокримській сейсмогенній зоні [7], Солотвинській западині [12] та зоні Пеннінських скель [9]).

Прив'язка механізмів до тектонічних структур та аналіз орієнтації нодальних площин, які відповідають площинам розривів, дозволяють аналізувати локалізацію та динаміку сейсмотектонічного процесу, як, наприклад, у зоні Загросу [21].

На сьогодні, на жаль, майже відсутні наукові праці, присвячені визначенню поля напружень через механізми вогнищ землетрусів у сейсмоактивному регіоні українського Закарпаття. Це пов'язано з тим, що механізми землетрусів на території Закарпаття досі у великій кількості практично не визначали, тоді як на основі масового визначення механізмів землетрусів на прилеглих територіях Угорщини, Словаччини та Румунії здійснено реконструкцію сучасного поля напружень та його геодинамічну інтерпретацію [1–3, 8, 10, 13]. У даній роботі вперше визначено 20 вогнищ місцевих землетрусів у межах Закарпаття і прилеглої частини Українських Карпат і здійснено спробу їхньої тектонофізичної інтерпретації.

Закарпаття є територією з найвищим рівнем сейсмічної активності в межах Карпатського регіону України. Найбільш відчутні землетруси тут відбувалися в районі Сваляви (1908, 1924, 1935), Тересви (1926), Довгого

(1910), Хуста (1910), Берегова (1931) та ін. Інструментальні дослідження сейсмічної активності в Карпатському регіоні започатковано ще наприкінці XIX ст. [19]. Щороку в Закарпатті відбуваються десятки відносно слабких землетрусів, гіпоцентри яких розташовані переважно у верхніх шарах земної кори на глибинах від 2 до 10 км. Максимальна інтенсивність сейсмічних подій тут сягає 7 балів за шкалою МСК-64, що відповідає енергетичному класу $K = 12$ – 13 за шкалою Раутіан [19]. За особливостями сейсмічного режиму (кількість та інтенсивність подій, глибина залягання та просторове групування гіпоцентрів) Закарпаття та прилеглі до нього території поділено на три зони: А, В і С [14]. До зони А, що охоплює захід Закарпаття, належать передгір'я Карпат з прилеглою частиною Закарпатського прогину і Чоп-Мукачівською западиною (тектонічна карта Українських Карпат за ред. В. В. Глушка та С. С. Круглова, 1986), до зони В на сході – передгір'я з прилеглою частиною прогину і Солотвинською западиною. Приблизно по 40 % із загальної кількості місцевих землетрусів припадає на зони А і В, решта 20 % – на зону С (північ Румунії).

Визначення сучасного напруженого стану земної кори на основі даних про механізми вогнищ землетрусів є важливим завданням, яке намагалися розв'язати раніше і яке досі перебуває в полі наукових інтересів багатьох дослідників [1–3, 8, 10, 13]. У своїх роботах вони 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, 1975) [10], так і сейсмологами (Кейліс-Борок, 1950; Введенська, 1956, 1961) [2–3, 8]. Зокрема, Б. В. Костров довів, що такий підхід заздале-

гідь передбачає збіг зсувного розриву з площиною максимальних дотичних напружень. Теорія максимальних дотичних напружень придатна для металів, де розрив дійсно відбувається в зонах їхніх максимальних значень. Критичний же стан гірських порід визначається не лише рівнем зсувних напружень, але й напружень нормальних, які створюють сили тертя на площині розриву [16]. У середині 70-х рр. минулого століття і пізніше з'являються роботи, в яких закладено всі основні положення сучасних підходів до вивчення природних напружень і сейсмотектонічних деформацій. Основне положення відповідає гіпотезі Волеса і Бота [16, 34], яка полягає в тому, що вектор зсуву на розриві спрямований в напрямку дотичного напруження на ньому. Сьогодні напрямком, в якому орієнтацію головних осей напружень ідентифікують з осями P і T механізмів вогнищ окремих землетрусів або із сукупностями таких осей, найпоширеніший. Початки цього підходу закладено в роботах М. Л. Зобак [35]. Пізніше з'являються праці, в яких автори визначають головні осі напружень, використовуючи осі P і T окремих механізмів вогнищ різного діапазону магнітуд [17]. Результуючі напруження

отримують шляхом усереднення з подальшою інтерполяцією фокальних механізмів з осями, які ототожнено як головні осі визначених головних напружень.

У запропонованій роботі, за допомогою графічного методу визначено механізми вогнищ 20 слабких землетрусів у різних частинах сейсмоактивного регіону Закарпаття. З їхнім використанням і з урахуванням раніше визначених механізмів місцевих землетрусів [12, 15] знайдено поля напружень як для окремих компактних просторових груп подій, так і для всієї української частини Закарпатського прогину. З цією метою використовувалися два незалежні методи: 1) метод PT -осей [18, 28] та 2) метод Майкла в модифікації Вавричука [33]. Здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів і складено тектонічну схему з розподілом напружень у межах досліджуваного регіону.

1. Тектонічна будова Закарпатського прогину та механізми вогнищ місцевих землетрусів

Географічно Закарпатський прогин (ЗП) – це рівнина південно-західної окраїни Українських Карпат, яка на південному заході переходить у Велику Угорську (рис. 1).

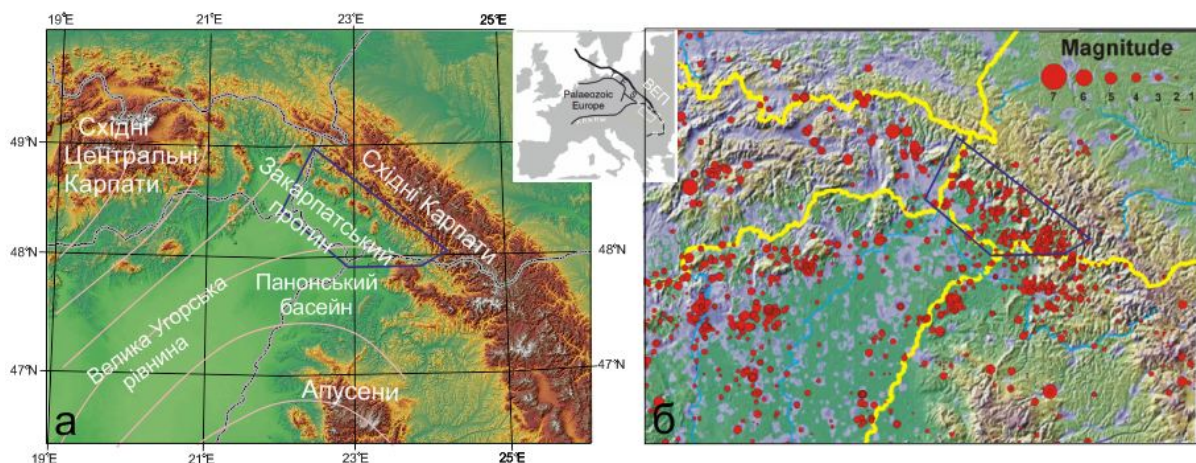


Рис. 1. Географічне розташування (а) та сейсмічність (б) Закарпатського прогину. Лінії на рисунку (а) відповідають траєкторіям максимальних горизонтальних напружень [32]

На північному сході ЗП контактує з Пеннінською зоною, що відокремлює ЗП від Зовнішніх Карпат (рис. 2). Орографічно у складі ЗП виділяються три відносно відокремлені западини: Східнословачька, Чоп-Мукачівська (ЧМЗ) та Солотвинська (СЗ). ЧМЗ та переважна частина СЗ розташовані в межах України і відокремлені субмеридіональною гілкою Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма. На заході Східнословачька западина контактує із центральними масивами Західних Карпат, а на сході, у Румунії, СЗ продовжується басейном Марамуреш. На півдні ЗП переходить у Паннонський басейн, який географічно відповідає Великій Угорській рівнині.

У тектонічному плані ЗП є неогеновою депресією, закладеною на гетерогенному фундаменті Внутрішніх Карпат [20]. ЗП заповнений моласовими відкладами міоцену-голоцену, представленими глинистими та піщано-глинистими породами (товщиною до 3 км), до складу яких входять туфогенні та соленосні товщі [4]. Моласові відклади ЗП формувались у результаті підняття та ерозії Карпатських гір у міоцені-пліоцені. ЗП характеризується як поздовжньою, так і поперечною зональністю, що відображається існуванням поздовжньої та поперечної системи розломів в його межах (рис. 2). Моласові відклади ЗП формують пологі складчастість. Куполоподібні складки пов'язані із соляними діпірами, що можуть мати істотні розміри (напр., Залузька складка, що досягає розміру 20 x 15 км). Дуже поширені також складки, пов'язані

з похованими стратовулканами. Проте соляні діпіри, поховані вулкани та дайкові поля простежуються вздовж прямолінійних зон, які, мабуть, відповідають розломам як осадового чохла, так і фундаменту [4, 20].

У даній роботі головні осі напружень σ_1 , σ_2 , σ_3 визначаються за механізмами вогнищ 21 землетрусу (рис. 2), 20 з яких (з магнітудами MSH від 1,0 до 3,7) відбулися в Закарпатті за період з 01.06.12 по 06.08.15. Механізми вогнищ визначали за допомогою графічного методу [11, 27]. Параметри механізму вогнища 21-го землетрусу (подія 49 в табл. 1), який стався 23.10.06 поблизу м. Берегове (магнітуда MSH 3,7), узяті з роботи [15]. Варто відзначити, що Закарпатський регіон характеризується відносно невисоким рівнем сейсмічної активності – основна кількість місцевих землетрусів невеликої сили. Це до останнього часу було основною причиною труднощів з визначенням їхніх механізмів традиційними методами, і як наслідок – браку дуже важливого сейсмологічного сегмента даних, необхідних для повноцінного геодинамічного вивчення Українських Карпат. Вхідними даними графічного методу є знаки вступів P -хвиль, кути виходу (або кути падіння) P -хвиль для кожної зі станцій та азимути станцій. Зауважмо, що важливою додатковою інформацією за умови малої кількості станцій є дані про неточні знаки вступів P -хвиль, урахування яких у нашій роботі дозволило зменшити ступінь невизначеності нодальних ліній на фокальній сфері.

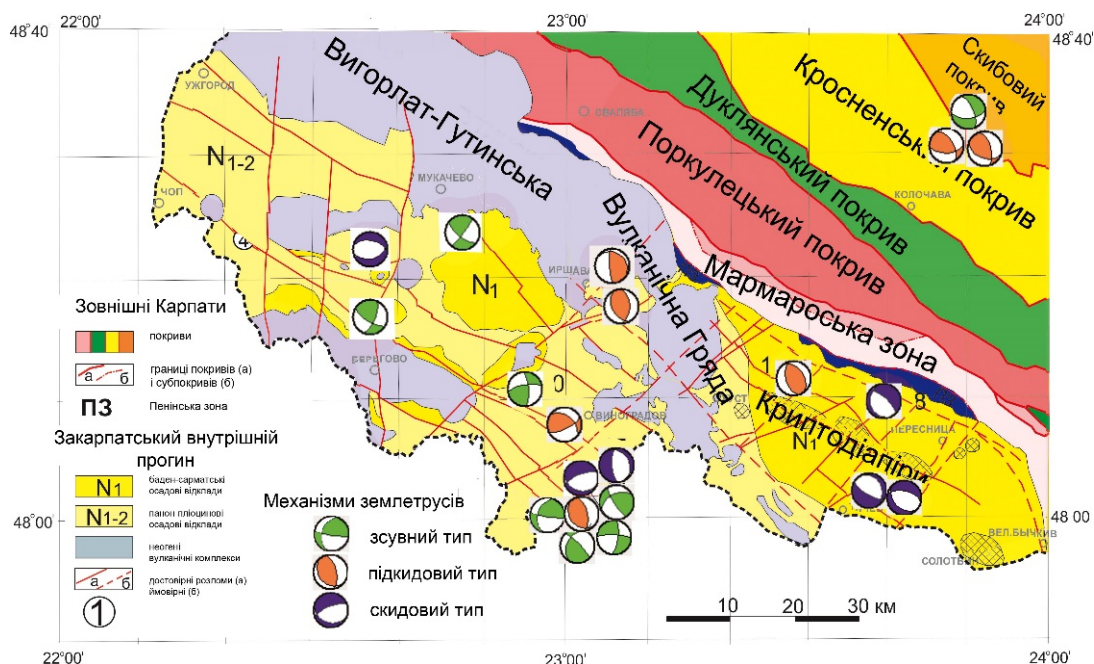


Рис. 2. Тектонічна схема Закарпатського прогину масштабу 1:500 000 (за ДНВП "ГЕОІНФОРМ УКРАЇНИ") і механізми вогнищ 21 землетрусу. Розломи позначені цифрами в кружках: 1 – Гажинсько-Мукачівський; 2 – Стретава – Геївці; 3 – Ремітський; 4 – Іванівський

На рис. 2 наведено тектонічну схему ЗП, складену шляхом об'єднання та спрощення тектонічних схем двох листів державної геологічної карти масштабу 1:500 000, з винесеними на неї епіцентрами та механізмами вогнищ землетрусів. Це дозволило пов'язати сейсмічні події з конкретними розломами та проаналізувати їхню сучасну кінематику. У роботі здійснено групування механізмів вогнищ 21 події в кластери (рис. 3) на основі компактного геогра-

фічного розташування епіцентрів землетрусів і з урахуванням подібності їхніх механізмів. Наприклад, механізм 16 включено до групи Іршавських землетрусів за ознакою кінематичної подібності, незважаючи на те, що він розташований на певній відстані від вогнищ 8 та 9. Механізми 10, 11 і 15 об'єднані в окрему групу "Виноградів" тому, що їхні епіцентри локалізовані в зоні одного розлому, а кінематичні P -осі мають майже однакову орієнтацію.

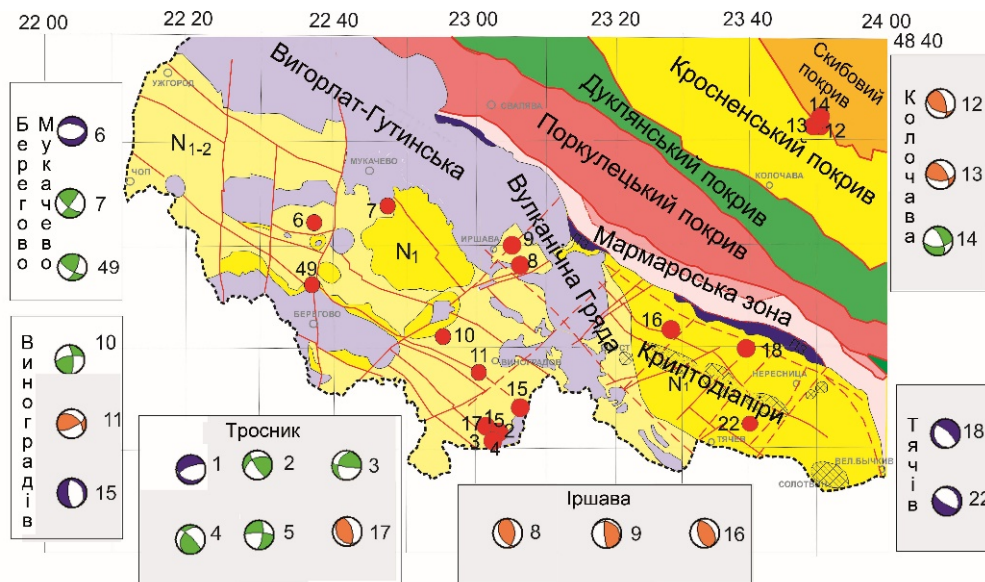


Рис. 3. Групування механізмів вогнищ у кластери за ознакою компактного їхнього географічного розташування для подальшого обчислення поля напружень окремо для кожної групи

2. Методика та вхідні дані для визначення поля напружень за фокальними механізмами

На сьогодні існує декілька методів для визначення поля напружень через фокальні механізми [6, 31]. Характерні спільні особливості й припущення, а також відмінності між ними аналізуються в роботах [33] і [24] з модифікаціями і розширенням їхнього використання [25, 29, 30, 31]

та ін. У цих методах, як правило, припускають, що 1) тектонічні напруження в досліджуваному регіоні однакові (однорідні); 2) землетруси відбуваються на існуючих розломах з різною орієнтацією; 3) вектор зсуву на розриві спрямований в напрямку дотичного напруження на ньому (т. зв. гіпотеза Волеса – Бота) [26, 34]. Якщо зазначені

припущення дійсні, то метод Майкла зводиться до розв'язування оберненої задачі, у результаті чого отримуються напрямки головних напружень σ_1 , σ_2 , σ_3 , і четвертий параметр R – співвідношення їхніх абсолютних значень.

У роботі використано два методи визначення поля напружень за фокальними механізмами. Перший – метод визначення тензора напружень, запропонований Майклом у 1984 р. [23] і модифікований в роботі Вавричука [33]. Другий – метод PT -осей, реалізований в програмі Win-Tensor [28]. У представлений роботі проведено

типізацію механізмів землетрусів за критерієм Андерсона, аналогічну типізації в роботі [7], а також статистичний аналіз орієнтувань 42 нодальних площин та 42 векторів зсувів (рис. 4).

Вхідними даними в методі PT -осей є координати осей стиску P та розтягу T , а в методі Майкла – кути ϕ , δ і λ нодальних площин кожної події. У табл. 1 наведено дані щодо землетрусів, використаних у роботі: координати епіцентру, час у вогнищі, магнітуду та глибину вогнища, а також кути нодальних площин (ϕ – простягання, δ – падіння і λ – між напрямком зсуву на розриві й простяганням) та осей стиску P та розтягу T .

Таблиця 1. Параметри механізмів вогнищ землетрусів

№	Район епіцентру. Координати	Дата Час	ML	h, км	ϕ , °	δ , °	λ , °	P		T	
								Az, °	Pl, °	Az, °	Pl, °
1	Тросник (48.04, 23.02)	6.02.2015 2:11:39.4	1,8	15,1	115 245	27 71	-44 -110	128	59	351	24
2	Тросник (48.03, 23.05)	13.01.2015 9:05:12.3	1,8	8,9	243 144	50 80	13 139	200	19	96	35
3	Тросник (48.01, 23.04)	26.11.2014 10:49:52.4	2,4	13,0	198 99	42 82	11 131	158	26	46	38
4	Тросник (48.00, 23.04)	15.11.2014 3:15:7.4	2,5	9,8	315 211	80 37	54 163	73	26	190	43
5	Тросник (48.03, 23.04)	15.11.2014 2:42:24.8	2,5	13,9	8 273	71 77	-167 -19	230	22	322	5
6	Мукачеве (48.37, 22.59)	14.06.2015 11:43:41.6	1,8	5,0	280 77	47 45	-74 -106	265	78	359	1
7	Мукачеве (48.39, 22.8)	7.06.2014 19:41:14.6	2,3	5,6	129 37	68 86	4 157	85	13	351	18
8	Іршава (48.30, 23.09)	31.10.2014 16:03:32.4	1,6	10,1	360 152	48 45	109 70	77	1	341	76
9	Іршава (48.33, 23.07)	5.08.2013 00:34:45.2	1,5	6,9	301 176	23 76	37 108	251	29	109	55
10	Виноградів (48.18, 22.92)	17.12.2015 10:50:27.0	1,6	2,0	356 259	73 69	21 61	127	2	218	27
11	Виноградів (48.12, 23.0)	8.01.2012 4:03:7.6	1,7	5,6	63 310	67 47	47 148	182	12	286	49
12	Колочава (48.53, 23.84)	1.06.2012 4:34:10.5	1,6	5,7	110 345	44 61	44 124	51	10	305	58
13	Колочава (48.53, 23.83)	1.06.2012 6:30:50.6	1,5	5,7	87 324	53 56	43 134	28	2	295	54
14	Колочава (48.54, 23.84)	10.01.2012 12:12:55.6	1,9	5,8	84 335	57 64	-149 -37	297	44	31	5
15	Королево (48.06, 23.1)	13.02.2013 6:19:35.5	1,8	9,3	176 328	68 24	-79 -115	105	65	258	22
16	Нижнє Селище (48.20, 23.46)	4.04.2013 21:15:14.5	1,9	1,7	325 165	39 52	74 102	246	7	122	78
17	Тросник (48.03, 23.04)	13.07.2013 12:18:18	1,6	13,8	347 138	63 30	104 64	67	17	285	69
18	Угľa (48.16, 23.65)	24.10.2012 3:13:40.5	1,6	4,5	311 161	71 21	-101 -61	204	62	50	25
19	Тячів (48.08, 23.61)	13.07.2015 16:40:18.0	1,7	4,3	134 284	37 56	-66 -107	151	72	27	10
20	Тячів (48.04, 23.67)	19.07.2015 11:30:47.4	3,7	7,7	333 118	24 69	-58 -103	8	65	219	24
21	Берегове (48.23, 22.62)	23.11.2006 7:15:20.3	3,7	9	122 22	67 67	25 155	252	1	342	34

3. Типізація механізмів вогнищ землетрусів Закарпаття

Проведено загальний статистичний аналіз усіх фокальних механізмів та їхню типізацію, що дозволило виявити риси, характерні для напружено-деформованого стану всього регіону (рис. 4).

Залежно від орієнтації кінематичних осей фокальні механізми поділили на три групи, які відповідають насувному, зсувному та скидовому типам і зафарбовано оранжевим, зеленим і синім кольором відповідно (рис. 4). Типізацію здійснено за методом Андерсона [22], який до-

вів, що для верхньої частини земної кори одне з головних напружень практично вертикальне, а решта два – горизонтальні. Формально типи визначали за найбільш стрімкою кінематичною віссю. Якщо субвертикальним спрямуванням характеризуються осі розтягу T – маємо насувний тип, якщо близькою до субвертикальної є нормальна вісь N – маємо зсувний тип, для скидового ж типу субвертикальною є вісь P . Віднесення реального механізму до насувного, зсувного і скидового типів залишається правомірним при відхиленні відповідних кінематичних осей від вертикалі на кут не більш 45°.

Для досліджуваних землетрусів найбільш характерними виявилися механізми зсувного та насувного типів (рис. 4), причому майже в усіх зсувних механізмах наявна, крім зсувної, і насувна компонента переміщення. Наведені результати свідчать про переважання режиму стиску в межах досліджуваної території.

Найактивнішими в сучасному сейсмотектонічному процесі є розриви карпатського простягання, про що свідчить аналіз орієнтації 42 нодальних площин, наведений на рис. 4. Характер домінуючих переміщень – насуво-зсуви, що ілюструється статистичним аналізом векторів переміщень. Присутні як ліві, так і праві, насуво-зсуви по нодальних площинах, що мають карпатський напрямок. Таким чином, завдяки насувним компонентам переміщення відбувається горизонтальне скорочення Закарпатського прогину та Зовнішніх Карпат у пн.-сх. напрямку, а право- та лівозсувні компоненти переміщення компенсують одна одну.

4. Визначення регіонального та локальних полів напружень за фокальними механізмами

Для окремих груп механізмів було визначено поля напружень, які відповідають локальним особливостям напруженого стану, а також проаналізовано, де це було можливо, зв'язок окремих механізмів із зонами розломів та їхню сучасну кінематику. Поля напружень визначалися двома незалежними методами (методом Майкла та методом *PT*-осей) і порівнювалися між собою.

Для двох груп землетрусів, які названо "Тросник" та "Виноградів" (рис. 5), характерні досить різноманітні фокальні механізми, що відрізняються між собою орієнтуванням кінематичних осей. Більшість із них є насуво-зсувами і, відповідно, мають дві компоненти переміщення – горизонтальну (зсувну) та вертикальну (насувну). Для зазначених областей, де перетинаються розриви пн.-зх. та пн.-

сх. простягання було відновлено два поля напружень, що відповідають стиску в пд.-сх. 150° та пд.-зх. 200° напрямках (рис. 5). Поля напружень за методом Майкла та *PT*-методом давали збіжні результати для групи "Тросник" і практично однакові результати для групи "Виноградів".

Група механізмів "Берегове – Мукачеве" представлена трьома землетрусами (рис. 5). Берегівський землетрус (№ 49, табл. 1) з механізмом зсувного типу потрапляє в зону розломів пн.-зх. простягання, що збігається зі смугою виходів вулканітів і підняття фундаменту. Одна з нодальних площин механізму № 49 збігається з напрямком Іванівського розлому (рис. 2, № 4). У роботі Пустовітенко [15] ця зона належить до імовірного Припаннонського глибинного розлому. Механізм зсувного типу № 7 такий самий, як і механізм № 49 і пов'язаний з Гажинсько-Мукачівським розломом (№ 1 на рис. 2), паралельним Іванівському розлому. Одна з нодальних площин механізму № 7 збігається за напрямком із цим розломом. Механізм скидового типу № 6 (рис. 4) потрапляє на невеликий за довжиною субширотний розлом, що є продовженням Ремітського розлому № 3. Поле напружень для групи "Берегове – Мукачеве", визначене за методом *PT*-осей, належить до зсувного типу з пд.-зх. 250° субгоризонтальною віссю стиску та субгоризонтальною віссю розтягу. Переміщення в такому полі напруження вздовж розломів пд.-зх. простягання визначається як лівий зсув. Поле напружень для групи механізмів "Берегове – Мукачеве" за методом Майкла (рис. 5) належить до скидового типу, проте вісь розтягу орієнтована так само, як і в полі, отриманому методом *PT*-осей. Результати розрахунку поля напружень за двома представленими методами дещо відрізняються з огляду на малу кількість використаних механізмів.

Типізація механізмів 21 землетрусу

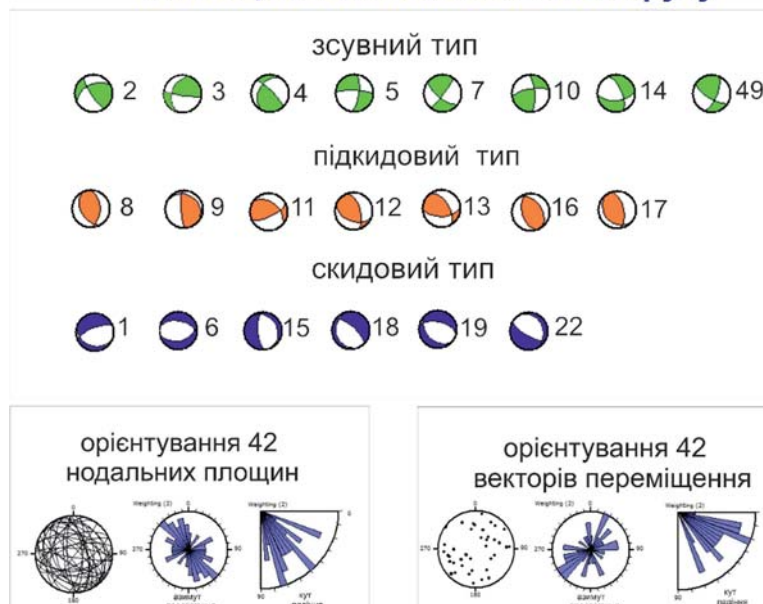


Рис. 4. Типізація фокальних механізмів землетрусів за методом Андерсона та статистичний аналіз орієнтувань нодальних площин і векторів переміщення

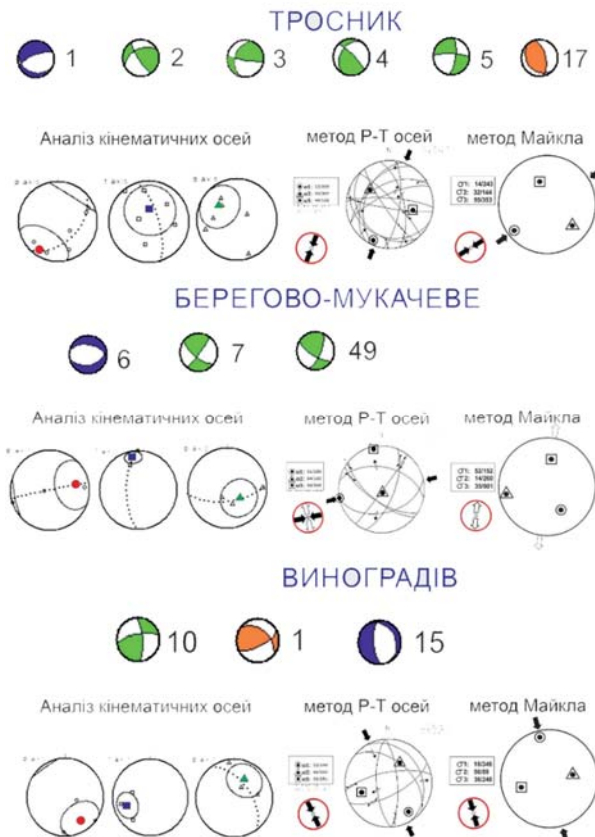


Рис. 5. Визначення поля напружень для груп фокальних механізмів: "Тросник", "Берегове – Мукачеве" та "Виноградів" (відповідно до рис. 3)

Фокальні механізми № 8, 9 та 16 групи "Іршава" майже ідентичні й мають насувний тип. Поля напружень, визначені двома методами, однакові (рис. 6). Орієнтація осі стиску визначеного для них поля напружень на рис. 6, збігається з віссю стиску, визначеною за механізмами зони

"Берегове – Мукачеве" (рис. 5). Зважаючи на цей факт, механізми № 8, 9 та 16 віднесено до розломів пн.-зх. 310° простягання, з яким вони просторово пов'язані.

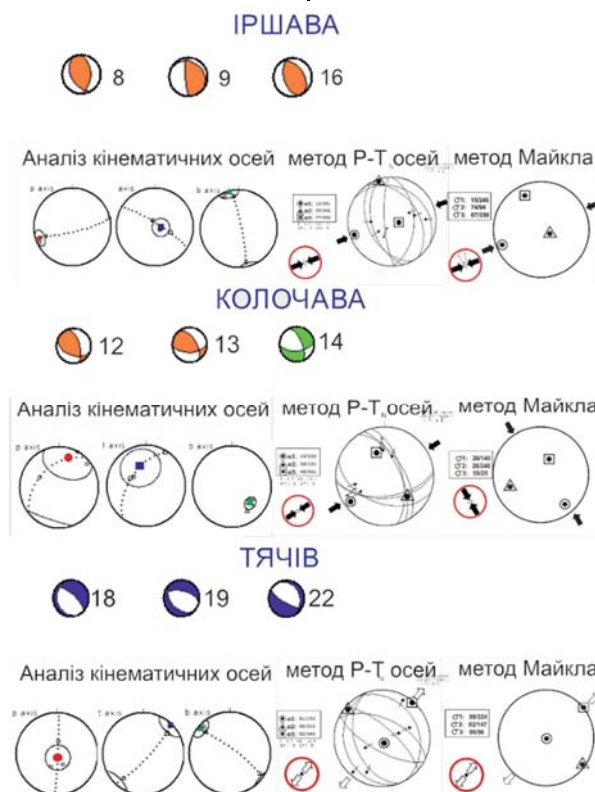


Рис. 6. Визначення поля напружень для груп фокальних механізмів "Іршава", "Колочава" і "Тячів" (відповідно до рис. 3)

Механізми № 12, 13 та 14 групи "Колочава" потрапляють до зони контакту Скибового та Кросненського покривів Зовнішніх Карпат (рис. 2) і відповідають полю стиску пд.-зх. напрямку (рис. 6), характерного для переважної частини території ЗП (рис. 8). Звідси можна зробити припущення, що українські Зовнішні Карпати та Закарпатський прогин характеризуються аналогічним сучасним режимом стиску в пд.-зх. 230° – 250° напрямку.

До групи "Тячів" віднесено три фокальні механізми землетрусів № 18, 19 і 22, у межах Солотвинської западини. За даними сейсмологічних спостережень поблизу епіцентру землетрусу № 22 протягом 19.07.15 – 06.08.15 зареєстровано ще більше сотні слабших повторних сейсмічних подій з майже однаковими механізмами скидового типу. У

роботі [12] поле напружень Солотвинської западини визначали за механізмами тячівської групи землетрусів і польовими тектонофізичними дослідженнями. Вогнище землетрусу № 18 з механізмом скидового типу розташовано на певній відстані від епіцентральної зони тячівської серії, але за кінематикою дуже схоже на неї. Це дозволило об'єднати групу механізмів "Тячів" і механізми тячівської серії повторних землетрусів у Солотвинській западині (СЗ) і зробити висновок, що східна частина Солотвинської западини характеризується умовами пд.-зх. розтягу. Відзначимо, що визначення поля напружень для групи "Тячів" як за методом Майкла, так і за методом *PT*-осей давало однакові результати (рис. 6).

Усі поля напружень, визначені методом *PT*-осей для окремих груп, винесено на тектонічну схему (рис. 7).

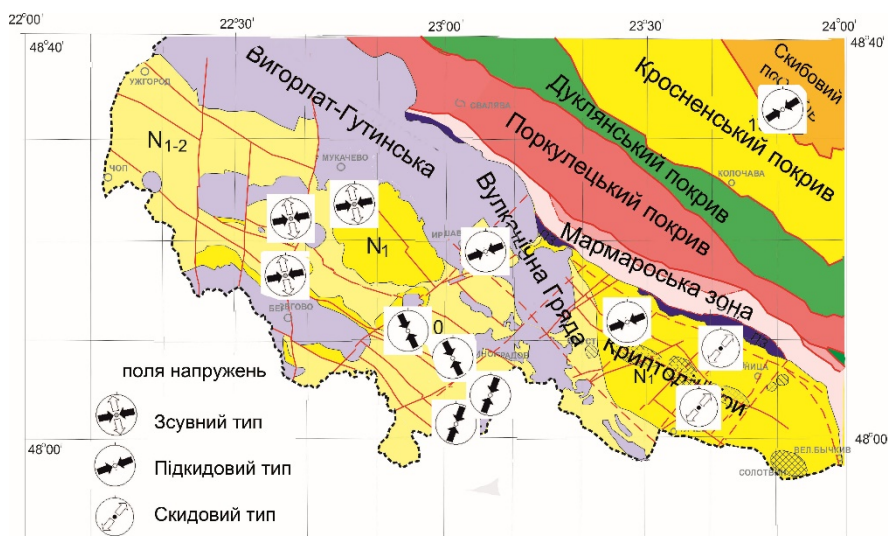


Рис. 7. Орієнтація і типи полів напружень у межах Закарпатського прогину, визначені для окремих груп вогнищ землетрусів (розташування вогнищ і груп показано на рис. 3)

Також з використанням зазначених двох методів визначено загальне поле напружень для всіх розглянутих землетрусів (21), що відповідає регіональному полю напружень (рис. 8). Це поле належить до насупного типу з пд.-зх. 230° – 260° орієнтацією субгоризонтальної осі стиску. Відповідно до просторового розподілу напружень (рис. 7) у межах ЗП виділяються дві аномальні зони: перша – у пд.-сх. частині Чоп-Мукачівської западини, стиск у межах якої характеризується двома напрямками; друга

– у східній частині Солотвинської западини – відзначається умовами розтягу в пд.-зх. 220° напрямку, тоді як для переважної частини ЗП майже в тому самому напрямку (230° – 250°) характерний стиск. Цей цікавий, що до напрямку розтягу в західній частині Солотвинської западини, результат не заперечує ідеї зміни орієнтації траєкторії стиску з пд.-зх. на пд.-сх. поблизу південної границі Закарпатського прогину (рис. 1) [8].

Визначення загального поля напружень для 21 механізму

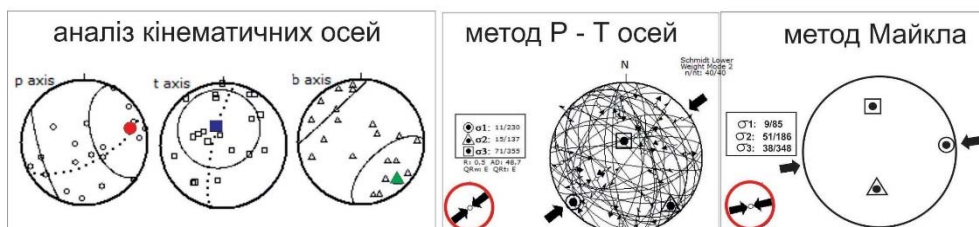


Рис. 8. Визначення регіонального поля напружень у ЗП за методом *PT*-осей (з використанням програми WIN-TENSOR) [28] та методом Майкла

Висновки. 1. У результаті загального статистичного аналізу 21 фокального механізму вогнищ закарпатських землетрусів виявлено їхні основні типи та риси, характерні для напружено-деформованого стану всього регіону.

Залежно від орієнтації кінематичних осей фокальні механізми поділено на три групи, що відповідають насупному, зсувному та скидовому типам (рис. 4).

2. Для розглянутих землетрусів найбільш характерні механізми зсувного та насупного типів, причому, майже

в усіх зсувних механізмах наявна і насувна компонента переміщення. Отримані результати свідчать про переважання режиму стиску в межах досліджуваної території.

3. Найбільш активними в сучасному сейсмотектонічному процесі є розриви карпатського простягання, про що свідчить аналіз орієнтації 42 нодальних площин, наведених на рис. 4.

4. Статистичний аналіз векторів переміщень свідчить про найбільшу поширеність насув-зсувів із переважанням зсувної компоненти. Наявні як ліві, так і праві насуво-зсуви вздовж нодальних площин карпатського напрямку. Таким чином, завдяки насувним компонентам переміщень відбувається горизонтальне скорочення Закарпатського прогину та Зовнішніх Карпат в пн.-сх. напрямку, а право- та лівозсувні компоненти переміщень компенсують одна одну.

5. У полі стиску пд.-зх. 250° – 230° , що переважає на досліджуваній території, виявлено дві аномальні зони: перша – у пд.-сх. частині Чоп-Мукачівської западини, стиск у межах якої характеризується двома напрямками – пд.-зх. 200° та пд.-сх. 150° ; друга – у східній частині Солотвинської западини – відзначається умовами розтягу в пд.-зх. 220° напрямку.

6. Ще одна особливість вивчених вогнищ полягає в тому, що в межах тієї самої території відбуваються землетруси протилежних типів (напр., насувного та скидового), що, на нашу думку, досить логічно з урахуванням того, що в тилловій зоні насувів формуються умови розтягу в тому самому напрямку, що й стиснення в їхній фронтальній частині.

7. Результати визначення полів напружень двома незалежними методами (Майкла та *PT*-осей) схожі, а невеликі розбіжності пов'язані передусім з недостатньою кількістю механізмів у групах, а також із засадничою некоректністю відповідних обернених задач.

Список використаних джерел

1. Балакіна Л. М. Общие закономерности в направлениях главных напряжений, действующих в очагах землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса / Л. М. Балакіна // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1962. – № 1. – С. 1471–1483.
2. Введенская А. В. К дискуссии по поводу теоретической модели очага землетрясения / А. В. Введенская // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1961. – № 2. – С. 261–263.
3. Введенская А. В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций / А. В. Введенская // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1956. – № 3. – С. 123–127.
4. Геологическое строение и горючие ископаемые Украинских Карпат / под ред. В. В. Глушко, С. С. Круглова. – М.: Недра, 1971. – 389 с.
5. Глубинная сейсмогенная зона Вранча как индикатор геодинамического процесса / О. Б. Гинтов, А. В. Муровская, Т. П. Егорова и др. // Геофиз. журн. – 2015. – № 3(37). – С. 22–49.
6. Гущенко О. И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений / О. И. Гущенко // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М.: Наука, 1979. – С. 7–25.
7. Деформационные структуры и поля напряжений юго-западного Крыма в контексте эволюции Западно-Черноморского бассейна / А. Муровская, Ж.-К. Ипполит, Е. Шеремет и др. // Геодинамика. – 2015. – № 1. – С. 10–29.
8. Кейлис-Борок В. И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений / В. И. Кейлис-Борок // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. – 1950. – № 9. – С. 23–47.
9. Кинематическая эволюция Зоны Пеннинских утесов в кайнозой (Украинские Карпаты) / А. Муровская, М. Накапелюх, Ю. Вихоть и др. // Геофиз. журн. – 2016. – № 5(38). – С. 119–136.
10. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения / Б. В. Костров. – М.: Наука, 1975. – 176 с.
11. Малицкий Д. В. Визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону / Д. В. Малицкий, О. Д. Грицай, О. О. Муїла // Геофиз. журн. – 2014. – № 4(36). – С. 118–135.
12. Механізми вогнищ землетрусів та поле напружень Солотвинської западини Закарпаття / Д. В. Малицкий, А. В. Муровська, О. Б. Гинтов та ін. // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – № 77. – 2017. – С. 43–51.

13. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений / Л. М. Балакіна, А. В. Введенская, И. В. Голубева и др.. – М.: Наука, 1972. – 192 с.

14. Пронишин Р. С. Некоторые аспекты сейсмического "климата и погоды" в Закарпатье / Р. С. Пронишин, Б. Г. Пустовитенко // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1982. – № 10. – С. 74–81.

15. Пустовитенко А. А. Механизм очага Береговского землетрясения 23 ноября 2006 г. / А. А. Пустовитенко, Р. С. Пронишин // Геодинамика. – 2011. – Т. 2 (11). – С. 260–262.

16. Ребецкий Ю. Л. Современное поле напряжений Восточного Средиземноморья по данным о механизмах очагов коровых землетрясений / Ю. Л. Ребецкий, Е. С. Фурсова // Тектоника и Геодинамика: Общие и региональные аспекты: материалы совещ. – М., 1998. – Т. 2. – С. 107–109.

17. Ребецкий Ю. Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов / Ю. Л. Ребецкий. – М.: Академкнига, 2007. – 406 с.

18. Современные геодинамические процессы на Северной окраине Черного моря / В. С. Гобаренко, А. В. Муровская, Т. Е. Егорова, Е. Е. Шеремет // Геотектоника. – 2016. – Т. 4. – С. 68–87.

19. Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій / за ред. К. П. Третьяка, В. Ю. Максимчука, Р. І. Кутаса. – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2015. – 418 с.

20. Тектоника Украины / ред. С. С. Круглов, А. К. Цыпко. – М.: Недра, 1988. – 254 с.

21. Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений системы Загрос / О. Б. Гинтов, Ю. М. Вольфман, Е. Я. Колесникова, А. В. Муровская // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – № 5 (1). – С. 305–319.

22. Anderson E. M. The dynamics of faulting / E. Anderson. – Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951. – 206 p.

23. Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets / J. Angelier // J. Geophys. Res. – 1984. – № 8 (B7). – P. 5835–5848.

24. Angelier J. Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV – a new method free of choice among nodal lines / J. Angelier // Geophys. J. Int. – 2002. – Vol. 150. – P. 588–609.

25. Arnold R. A Bayesian approach to estimating tectonic stress from seismological data / R. Arnold, J. Townend // Geophys. J. Int. – 2007. – Vol. 170. – P. 1336–1356.

26. Bott M. H. P. The mechanics of oblique slip faulting / M. H. P. Bott // Geol. Mag. – 1959. – Vol. 96. – P. 109–117.

27. Determining the focal mechanism of an earthquake in the Transcarpathian region of Ukraine / D. Malytskyy, O. Muyla, A. Pavlova, O. Hrytsai // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2013. – № 4(63). – С. 38–44.

28. Devlaux D. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program / D. Devlaux, B. Sperner // New insights into Structural interpretation and Modelling. Geological Society. London: Special Publications. – 2003. – Vol. 212. – P. 75–100.

29. Hardebeck J. L. Damped regional-scale stress inversions: methodology and examples for southern California and Coalinga aftershock sequence / J. L. Hardebeck, A. J. Michael // J. geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – B11310. doi: 10.1029/2005JB004144.

30. Lund B. Stress tensor inversion using detailed microearthquake information and stability constraints: application to Olfus in southwest Iceland / B. Lund, R. Slunga // J. geophys. Res. – 1999. – Vol. 104. – P. 14947–14964.

31. Maury J. A review of methods for determining stress fields from earthquake focal mechanisms: application to the Sierentz 1980 seismic crisis (Upper Rhine graben) / J. Maury, F. H. Cornet, L. Dorbath // Bull. Soc. Geol. France. – 2013. – Vol. 184(4–5). – P. 319–334.

32. Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin / G. Bada, F. Horvath, P. D'ov'enyi, P. Szafi'an, G. Windhoffer, S. Cloetingh // Glob. Planet. Change. – 2007. – Vol. 58. – P. 165–180.

33. Vavrychuk V. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms / V. Vavrychuk // Geophys. J. Int. – 2014. – Vol. 199. – P. 69–67.

34. Wallace R. E. Geometry of shearing stress and relation to faulting / R. E. Wallace // J. Geol. – 1951. – Vol. 59. – P. 118–130.

35. Zobak M. L. State of stress and modern deformation of the Northern Basib and Rang Province / M. L. Zobak // J. Geophys. Res. – 1989. – Vol. 94, № B6. – P. 7105–7128.

References

1. Balakina, L. M. (1962). Obschie zakonomernosti v napravleniyah glavnykh napryazheniy, deystvuyuschih v ochagah zemletryasenyi Tihookeanskogo seysmicheskogo poyasa. *Izv. AN SSSR. Ser. geofiz.*, 1, 1471–1483. [in Russian].
2. Vvedenskaya, A. V. (1961). K diskussii po povodu teoreticheskoy modeli ochaga zemletryaseniya. *Izv. AN SSSR. Ser. geofiz.*, 2, 261–263. [in Russian].
3. Vvedenskaya, A. V. (1956). Opredelenie poley smescheniy pri zemletryasenyiyah s pomoshchyu teorii dislokatsiy. *Izv. AN SSSR. Ser. geofiz.*, 3, 123–127. [in Russian].
4. Glushko, V. V., Kруглова, S. S. (Ed.). (1971). *Geologicheskoe stroenie i goryuchie iskopaemye Ukrainskih Karpat*. M.: Nedra, 389 p. [in Russian].

5. Gintov, O. B., Murovskaya, A. V., Egorova, T. P., Volfman, Yu. M., Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., Kolesnikova, E. E., Ostrovnoy, A. M., Bubnyak, I. N., Farfulyak, L. V., Amashukeli, T. A. (2015). Glubinnaya seysmognennaya zona Vrancha kak indikator geodinamicheskogo protsessa. *Geofizicheskiy zhurnal*, 3(37), 22–49. [in Russian].
6. Gushchenko, O. I. (1979). Metod kinematicheskogo analiza struktur razrusheniya pri rekonstruktsii poley tektonicheskikh napryazheniy. *Polya napryazheniy i deformatsiy v litosfere*. M.: Nauka, 1979, 7–25. [in Russian].
7. Murovskaya, A., Ippolit. ZH.-K., Sheremet, E., Egorova, T., Volfman, Yu., Kolesnikova, K. (2015). Deformatsionnye struktury i polya napryazheniy yugo-zapadnogo Kryma v kontekste evolyutsiy Zapadno-Chernomorskogo basseyana. *Geodinamika*, 1, s. 10–29. [in Russian].
8. Keylis-Borok, V. I. (1950). Issledovanie istochnikov, priblizhenno ekvivalentnykh ochagom zemletryaseniy. *Trudy Geofiz. In-ta. AN SSSR*. 9. 23–47. [in Russian].
9. Murovskaya, A., Nakapelyuh, M., Vihot, Yu., Shlapinskiy, E., Bubnyak, I. N., Mychak, S. V. (2016). Kinematicheskaya evolyutsiya Zony Penninskikh otsov v kaynozoe (Ukrainskie Karpaty). *Geofizicheskiy zhurnal*, 5(38), 119–13. [in Russian].
10. Kostrov, B. V. (1975). *Mehanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya*. M.: Nauka, 176 p. [in Russian].
11. Malitskiy, D. V., Hrytsai, O. D., Muyla, O. O. (2014). Vyznachennya mehanizmlv vognish zemletruslv Karpat'skogo regionu. *Geofizicheskiy zhurnal*, 4(36), 118–135. [in Ukrainian].
12. Malitskiy, D.V., Murovska, A. V., Gintov, O. B., Gnip, A. R., Obldna, O. O., Michak, S. V., Hrytsai, O. D., Pavlova, A. Yu. (2017). *Mehanizmi vognish zemletruslv ta pole napruzhen SolotvinskoYi zapadini Zakarpattya. Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 43–51. [in Ukrainian].
13. Balakina, L. M., Vvedenskaya, A. V., Golubeva, I.V., Misharina, L. A., Shirokova, E. I. (1972). Pole uprugih napryazheniy Zemli i mehanizm ochagov zemletryaseniy. M.: Nauka, 192 p. [in Russian].
14. Pronyshyn, R. S., Pustovitenko, B. H. (1982). Nekotorye aspekty seysmicheskogo "klimata i pogody" v Zakarpatt'e. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 10, 74–81. [in Russian].
15. Pustovitenko, A. A., Pronishin, R. S. (2011). *Mehanizm ochaga Beregovskogo zemletryaseniya 23 noyabrya 2006 g. Geodinamika*, 2(11), 260–262. [in Russian].
16. Rebetskiy, Yu. L. (2007). Tektonicheskie napryazheniya i prochnost gorniyh massivov. M.: Akademkniga, 406 p. [in Russian].
17. Rebetskiy, Yu. L., Fursova, E. S. (1998). Sovremennoe pole napryazheniy Vostochnnogo Sredizemnomorya po dannym o mehanizmah ochagov korovyih zemletryaseniy. *Materialy soveshaniya "Tektonika i Geodinamika: Obschie i regionalnye aspekty"*. M., 2, 107–109. [in Russian].
18. Gobarenko, V. S., Murovskaya, A. V., Egorova, T. E., Sheremet, E. E. (2016). Sovremennyye geodinamicheskie protsessy na Severnoy okraine Chernogo morya. *Geotektonika*, 4, 68–87. [in Russian].
19. Tretiak, K. P., Maksymchuk, V. Iu., Kutas R. I. (Ed.). (2015). *Suchasna heodynamika ta heofizichni polia Karpat i sumizhnykh terytorii*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 418 p. [in Ukrainian].
20. Kruglov, S. S., Tsypko, A.K. (Ed.). (1988). *Tektonika Ukrainy*. Moskva: Nedra, 254 p. [in Russian].
21. Gintov, O. B., Volfman, Yu. M., Kolesnikova, E. Ya., Murovskaya, A. V. (2014). Tektonofizicheskaya interpretatsiya mekhanizmov ochagov zemletryaseniy sistemy Zagros. *Geodinamika i tektonofizika*, 5 (1), 305–319. [in Russian].
22. Anderson, E. M. (1951). The dynamics of faulting. *Edinburg: Oliver and Boyd*, 206 p.
23. Angelier, J. (2002). Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV – a new method free of choice among nodal lines. *Geophys. J. Int.*, 150, 588–609.
24. Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *J. Geophys. Res.*, 8 (B7), 5835–5848.
25. Arnold, R., Townend, J. (2007). A Bayesian approach to estimating tectonic stress from seismological data. *Geophys. J. Int.*, 170, 1336–1356.
26. Bott, M.H.P. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag*, 96, 109–117.
27. Malyskiy, D., Muyla, O., Pavlova, A., Hrytsai, O. (2013). Determining the focal mechanism of an earthquake in the Transcarpathian region of Ukraine. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(63), 38–44.
28. Devlaux, D., Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *New insights into Structural interpretation and Modelling*. Geological Society. London. Special Publications, 212, 75–100.
29. Hardebeck, J. L., Michael, A. J. (2006). Damped regional-scale stress inversions: methodology and examples for southern California and Coalinga aftershock sequence. *J. geophys. Res.*, 111, B11310. doi: 10.1029/2005JB004144.
30. Lund, B., Slunga, R. (1999). Stress tensor inversion using detailed microearthquake information and stability constraints: application to Olfus in southwest Iceland. *J. geophys. Res.*, 104, 14947–14964.
31. Maury, J., Cornet, F. H., Dorbath, L. (2013). A review of methods for determining stress fields from earthquake focal mechanisms: application to the Sierentz 1980 seismic crisis (Upper Rhine graben). *Bull. Soc. Geol. France*, 184(4–5), 319–334.
32. Bada, G., Horvath, F., D'ovenyi, P., Szaffian, P., Windhoffer, G., Cloetingh, S. (2007). Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. *Glob. Planet. Change*, 58, 165–180.
33. Vavrychuk, V. (2014). Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms. *Geophys. J. Int.*, 199, 69–67.
34. Wallace, R. E. (1951). Geometry of shearing stress and relation to faulting. *J. Geol.*, 59, 118–130.
35. Zobak, M. L. (1989). State of stress and modern deformation of the Northern Basib and Rang Province. *J. Geophys. Res.*, 94, B6, 7105–7128.

Надійшла до редколегії 11.07.17

D. Malyskiy¹, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., A. Murovska², PhD (Geol.), O. Obidina¹, Postgraduate student, A. Gnyp¹, PhD (Phys.-Math.), O. Grytsai¹, PhD (Phys.-Math.), A. Pavlova¹, PhD (Phys.-Math.), A. Pugach³, Postgraduate student
¹Carpathian Branch of the Subbotin Institute of Geophysics NAS of Ukraine
 3-b Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine
²Subbotin Institute of Geophysics NAS of Ukraine
 32 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine
³Donetsk National Technical University

DETERMINING THE STRESS FIELD IN EARTH'S CRUST FROM SOURCE MECHANISMS OF LOCAL EARTHQUAKES IN THE TRANSCARPATIANS

In the paper, 20 source mechanisms of local earthquakes in the Transcarpathians were determined for the first time, which is very important for further geodynamic modeling. Focal mechanisms of earthquakes for the period from 2012 to 2015 were determined using a graphic method. The parameters of source mechanism of 23.10.06 earthquake near the city of Berehove (magnitude MSH 3.7) were also taken from earlier publications. Subsequently, after a general statistical and typification analysis of 21 mechanisms the characteristics of stress-strained state were identified, prevalent in the entire region. Depended on orientation of cinematic axes, the focal mechanisms were separated into three groups corresponding to thrusting, normal faulting and strike-slip types. The majority of the studied mechanisms belonged to strike-slip and thrusting types, almost all strike-slip mechanisms containing a component of thrusting. Two methods were employed in our work to determine stress field from mechanisms of local earthquakes in the Transcarpathians. In the first one, suggested by Michael (1984) and further developed in works of Vavrychuk, stress tensor was determined from focal mechanisms. The other one was a so called method of PT-axes. It is usually assumed in both methods that: 1) tectonic stress is uniform (homogeneous) in the region, 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). To calculate the stress field by method of PT-axes program WIN-TENSOR was used. Results, presented in the paper, definitely indicate prevalence of contraction in the study region. In the contraction field SW 250, prevailing in almost entire study region, two anomalous zones were identified: the first one, extended along the SW boundary of Chop-Mukacheve depression, with two directions of contraction in it; the second one, in the eastern part of Solotvyno depression, with extension conditions in the SW direction, contraction prevailing at the same time in SW direction in the most part of the Transcarpathian through (TT). Analysis of 42 nodal plain orientations confirmed the most active role of ruptures parallel to the Carpathian extension in present seismotectonic process. Another distinction of the local sources consists in a fact that earthquakes of adverse types (thrusting and faulting, for instance) often occur in the same area, very close to each other, which can be considered logical since extension conditions arise in the rear zone of thrusts in the same direction as contraction in their frontal part.

Keywords: earthquake source, source mechanism, nodal planes, stress field, principal stresses, method of PT-axes, Michael's method, program WIN-TENSOR, typification of mechanisms.

Д. Малицкий¹, д-р физ.-мат. наук, проф., А. Муровская², канд. геол. наук, О. Обидина¹, асп.,
А. Гнып¹, канд. физ.-мат. наук, О. Грыцай¹, канд. физ.-мат. наук, А. Павлова¹, канд. физ.-мат. наук, А. Пугач³, асп.

¹Карпатское отделение Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины

ул. Научная, 3-б, г. Львов, 79060, Украина

²Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины

пр. Акад. Палладина, 32, г. Киев, 03680, Украина

³Донецкий национальный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ПО МЕХАНИЗМАМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ЗАКАРПАТЬЕ

Впервые определены 20 механизмов очагов местных землетрясений на Закарпатье, что является очень важной предпосылкой для дальнейших геодинамических построений. Фокальные механизмы землетрясений за период с 2012 г. по 2015 г. определялись с использованием графического метода. Кроме того, по литературным данным были определены параметры механизма очага землетрясения 23.10.06 в районе г. Берегово (магнитуда MSH 3,7). В результате общего статистического анализа 21 механизма определены их основные типы и черты, свойственные для напряженно-деформированного состояния всего региона. По ориентации кинематических осей фокальные механизмы разделены на три группы, соответствующие надвиговому, сдвиговому и сбросовому типам. Для рассмотренных землетрясений наиболее характерными являются механизмы сдвигового и надвигового типа, причем почти во всех сдвиговых механизмах присутствует и надвиговая компонента подвижки. Для определения поля напряжений по механизмам очагов землетрясений на Закарпатье использовались два метода. Первый – метод определения тензора напряжений по фокальным механизмам, предложенный Майклом в 1984 г. и модифицированный в работах Вавричука, второй – так называемый метод РТ-осей. В этих методах как правило предполагают, что 1) тектонические напряжения одинаковы (однородны) во всем исследуемом регионе; 2) землетрясения происходят на существующих разломах разной ориентации; 3) направление вектора подвижки по разрыву совпадает с направлением касательного напряжения на разрыве (так называемая гипотеза Уоллеса – Ботта). Расчет поля напряжений методом РТ-осей осуществлялся с использованием программы WIN-TENSOR. Приведенные результаты свидетельствуют о преобладании режима сжатия в границах исследуемой территории. В поле сжатия 230° – 250° ю.-зап., преобладающего в границах территории, выделены две аномальные зоны: первая находится в ю.-зап. части Чоп-Мукачевской впадины, сжатие в пределах которой характеризуется двумя направлениями; вторая аномальная зона – в восточной части Солотвинской впадины – характеризуется условиями растяжения в ю.-зап. направлении, тогда как в большей части Закарпатского прогиба (ЗП) в этом направлении преобладает сжатие. Наиболее активными в современном сейсмотектоническом процессе являются разрывы карпатского простирания, о чем свидетельствует анализ ориентации 42 нодальных плоскостей. Еще одна особенность исследуемых очагов состоит в том, что в пределах одной и той же территории происходят землетрясения противоположных типов (напр., надвигового и сбросового), что довольно логично с учетом того, что в тыловой зоне надвигов формируются условия растяжения в том же направлении, что и сжатие в их фронтальной части.

Ключевые слова: очаг землетрясения, механизм очага, нодальные плоскости, поле напряжений, главные напряжения, метод РТ-осей, метод Майкла, программа WIN-TENSOR, типизация механизмов.