

СУЧАСНІ ГОРИЗОНТАЛЬНІ ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЄВРОПИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ GPS-КАМПАНІЇ SERGOP

О.В.Серант, К.Р.Третяк

(Національний університет "Львівська політехніка")

Резюме. За результатами GPS-кампанії SERGOP обчислені сучасні горизонтальні компоненти деформації земної поверхні Центральної Європи. Наведені схеми розподілу компонент деформації на території досліджуваної мережі. Значення компонент знаходяться в межах $(-1,28 \Leftrightarrow 1,28) \cdot 10^{-7}$ рік⁻¹. Виконано співставлення значень і розподілів компонент сучасних деформацій з аналогічними дослідженнями території Центральної Європи та іншими геофізичними полями.

Зовнішня оболонка Землі наприкінці цього століття зазнає суттєвих змін, які відображаються в загальному потеплінні клімату, підвищеній сейсмічній напруженості, появи геофізичних аномалій. Відомо, що сейсмічна активність тісно пов'язана з повільними просторовими деформаціями земної поверхні. Аналізуючи ці деформації можна прогнозувати землетруси та інші техногенні процеси.

В наш час спостерігається підвищена сейсмічна активність Альпійського поясу Європейського континенту, що підтверджують руйнівні землетруси в Туреччині, Греції, Румунії. Схеми сучасних варіацій деформацій і нахилу земної поверхні разом з іншими геологогеофізичними матеріалами доцільно використовувати для мікросейсморайонування та визначення найбільш сейсмічно активних ділянок земної поверхні.

Сьогодні стало можливим створення високо-точних геодезичних мереж які охоплюють значні території й цілі материка. Проведення повторних прецизійних геодезичних спостережень на таких мережах дозволяє надійно визначити та оцінити структуру та інтенсивність сучасних деформацій земної поверхні. Відомо, що геодезичні визначення є прямими методами визначення напруженості тектонічних плит та найбільш ефективні для прогнозу сейсмічної активності регіону.

На території Центральної Європи країнами Центральної Європейської ініціативи (Central European Initiative, CEI) в 1989 р. розпочато систематичні геодинамічні дослідження. Комплексні дослідження проводяться за трьома напрямками: секція А – геологія, секція В – геофізика і секція С – геодезія. В рамках цих досліджень систематично проводяться GPS-

кампанії EUREF, EXTENDED SAGET і CERGOP. Головною метою кампанії EUREF було створення загальноєвропейської геодезичної GPS- мережі з подальшим її використанням для геодинамічних досліджень. Кампанія EXTENDED SAGET була спрямована на вивчення методами GPS геодинамічних явищ на території країн Східної Європи. Метою кампанії CERGOP є систематичний моніторинг деформацій земної поверхні Центральної Європи на пунктах мережі CEGRN і комплексне опрацювання геодезичних та геолого-геофізичних досліджень для прогнозу сейсмічної небезпеки.

Мережа CEGRN охоплює Центральну Європу. До неї входять 57 пунктів 11 Європейських країн, включаючи Україну. Території цих країн охоплюють три геологічні плити: Східноєвропейську Прекембрійську платформу, Палеозойську платформу Центральної та Східної Європи, Південно-Європейський Альпійський ороген (рис 1). Це дає можливість детально дослідити сучасні деформації земної поверхні Центральної Європи, та встановити їх зв'язок з тектонікою, геологічною будовою, техногенними процесами та геофізичними полями іншої природи.

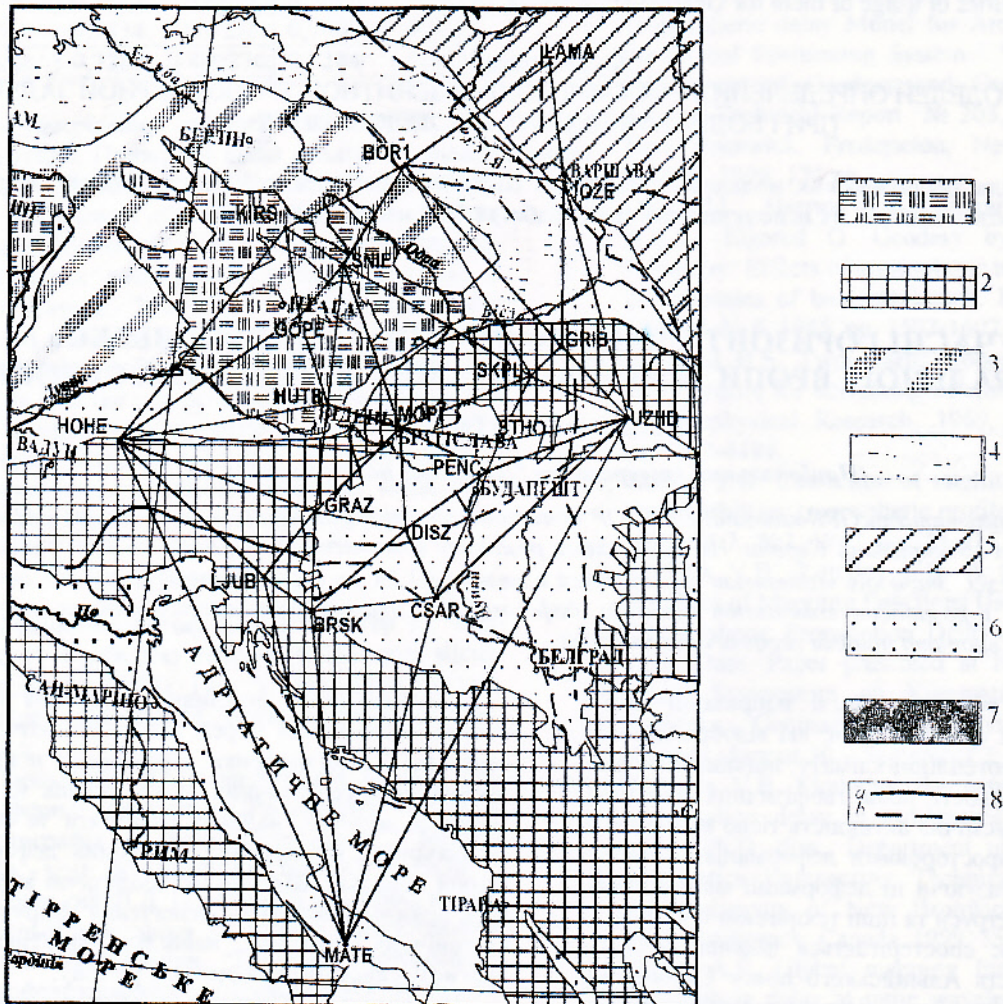


Рис. 1. Схема мережі і тектонічна будова регіону

1 – області герцинської складчастості; 2 – області альпійської складчастості; 3 – плити молодих платформ; 4 – плити платформ з дальсландським, байкальським і частково більш давнім або більш молодим фундаментом; 5 – плити давніх платформ; 6 – альпійські міжгірні впадини; 7 – виступи докембрійського складчастого фундаменту; 8 – тектонічні розломи, а – що виходять на поверхню, б – приховані[4]

З цією метою для визначення параметрів деформацій використано результати спостережень першого та останнього циклу проведених на 20 пунктах. Мережа CEGRN охоплює Карпатську Дугу, Судети, Східні Альпи, Дінаріді, Татри. Спостереження охоплюють період 1994-1999 рр. Цикл безперервних спостережень тривав п'ять діб. Спостереження виконувались прецизійними дво-частотними GPS приймачами. Обробка спостережень проводилась за допомогою програмного забезпечення BERNIS з використанням точних ефемерид GPS – супутників. [6]

Для визначення компонент деформацій мережа розбита на 31 елементарний трикутник (рис 1). Деформації земної поверхні можна описати наступними параметрами: відносне обертання ω – воно характеризує розворот трикутного елемента як єдиного цілого по відношенню до системи координат першої епохи; відносний зсув γ_1, γ_2 по осях координат X, Y, γ – загальний зсув, що характеризує горизонтальну неоднорідність деформованої території; дилатацію Δ – відносне розширення або стиснення площі території; максимальний стиск, або розтяг E_1, E_2 , (Θ – азимут головної осі деформації E_{max})

Всі компоненти деформацій визначаються для цих трикутників, відносяться до їх центрів ваги є безрозмірними величинами і функціонально пов'язані з координатами пунктів X, Y та різницями проекцій векторів зміщень пунктів U, V на відповідні координатні осі.

Для обчислень $\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega$ використовуються формули [1]:

$$\gamma_1 = \frac{x_j v_k + y_j u_k - x_k v_j - y_k u_j}{-x_j y_k + x_k y_j} \quad (1)$$

$$\gamma_2 = \frac{x_j u_k - y_j v_k - x_k u_j - y_k v_j}{x_j y_k - x_k y_j} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{x_j v_k - y_j u_k - x_k v_j + y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{-x_j u_k - y_j v_k + x_k u_j + y_k v_j}{-2(x_j y_k - x_k y_j)} \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 - \gamma_2^2} \quad (5)$$

В написаних рівняннях величини x_j і y_j є приростками координат вершин трикутників 2 і 3 відносно вершини 1, тобто $x_j = X_j - X_1, y_j = Y_j - Y_1$, і т.д. Аналогічно: $u_j = U_j - U_1, v_j = V_j - V_1, \dots$, де

$$U = \frac{(B_2^* - B_1^*)}{\rho} M, \quad V = \frac{(L_2^* - L_1^*)}{\rho} N, \quad M, N - \text{радіус кривини меридіана і першого вертикала відповідно.}$$

За результатами обробки спостережень в таблиці наведено швидкості зміни компонент деформацій за рік. В кінці таблиці наведено мінімальні та максимальні значення компонент деформацій.

Точність компонент деформацій, обчислених на основі векторів зміщень знаходиться в межах від $0,26 \cdot 10^{-8}$ до $10,61 \cdot 10^{-8}$. Для визначення точності було використано формули для оцінки точності компонент деформації [1].

На рисунках 2 - 4 представлено розподіл компоненти дилатації, загальний зсув γ на території охопленій мережею. З аналізу представлених компонент деформацій охопленій мережею регіон можна умовно поділити на три блоки (рис.5). Перший блок охоплює район Судетів та південну частину Польської низовини. А територіально – південний Захід Польщі, Чехії і частково Південний схід Німеччини. З геологічної точки зору ним охоплюється в значній мірі область герцинської складчастості та тектонічні блоки молодих платформ. Цей блок є витягнутий з південного заходу на північний схід. На цьому блоці проявляються від'ємні значення компоненти дилатації які зростають в північному напрямку і швидкість їх накопичення перевищує 10^{-7} . Швидкість відносного зміщення блоку теж зростає в північному напрямку і досягає до $1,2 \cdot 10^{-7}$ за рік і спрямована в західному і північно-західному напрямках. Аналізуючи головні осі деформації необхідно зазначити що вісь стиснення є орієнтована з заходу на схід і значно переважає розтяг який відповідно орієнтований по напрямку південь – північ. Швидкість стиснення по абсолютній величині зростає в північному напрямку та досягає $-1 \cdot 10^{-7}$ за рік, а швидкість розтягу навпаки – в південному до $0,9 \cdot 10^{-7}$ за рік. Другий блок, охоплює центральну частину території мережі і її південно-західну частину. Ним охоплюються територія Південної Польщі, Західної України, Словаччини, Західної Австрії, Південно-Західної Угорщини, Хорватії, Боснії Герцоговини. До нього входять наступні гірські системи: Східні Карпати, Татри, Східні Альпи, Дінаріді. В значній мірі він охоплює область герцинської складчастості і Альпійських міжгірних впадин. Для нього характерні додатні компоненти деформацій, які рівномірно покривають північну частину і знаходяться в межах $5 \cdot 10^{-8}$ за рік і нерівномірно розподіляються в південній частині цього блоку і

Таблиця. Значення швидкостей компонент деформацій земної поверхні Центральної Європи за результатами кампанії CERGOP

№	Трикутник	Компоненти деформацій							
		$\gamma_1 \cdot 10^{-8}$ /рік	$\gamma_2 \cdot 10^{-8}$ /рік	$\gamma \cdot 10^{-8}$ /рік	$\Delta \cdot 10^{-8}$ /рік	$\omega \cdot 10^{-8}$ /рік	$E_1 \cdot 10^{-8}$ /рік	$E_2 \cdot 10^{-8}$ /рік	Θ°
1	ljub/brsk/mate	3,36	-6,02	6,89	9,08	-2,05	7,98	1,09	210,42
2	hohe/ljub/mate	-2,17	-2,14	3,05	4,15	0,26	3,60	0,55	-22,29
3	snie/kirs/borl	0,56	-12,78	12,79	-10,45	-0,37	1,17	-11,62	223,74
4	borl/lama/joze	0,18	0,65	0,68	0,10	0,15	0,39	-0,29	142,65
5	gope/snie/hutb	-4,56	0,02	4,56	4,09	5,04	4,33	-0,23	90,14
6	borl/joze/grib	-0,63	0,44	0,77	0,68	-0,15	0,72	-0,05	107,57
7	skpl/borl/grib	1,18	-3,91	4,08	2,25	-2,37	3,17	-0,91	126,60
8	hutb/snie/mopi	-5,22	5,46	7,55	1,23	2,70	4,39	-3,16	113,14
9	mopi/snie/skpl	0,31	4,15	4,16	2,42	-0,07	3,29	-0,87	137,16
10	gope/kirs/snie	-9,21	-5,33	10,64	-2,91	4,48	3,87	-6,78	-15,02
11	skpl/borl/snie	4,61	-2,12	5,08	-0,90	-3,49	2,09	-2,99	192,33
12	ljub/hohe/graz	0,52	-2,84	2,89	2,20	-0,73	2,55	-0,35	219,80
13	graz/hohe/hutb	0,47	-2,07	2,12	2,34	-0,35	2,23	0,11	218,62
14	hohe/gope/hutb	2,60	0,97	2,78	3,31	1,44	3,05	0,27	169,77
15	hohe/kirs/gope	-0,32	-3,22	3,23	-0,93	0,02	1,15	-2,08	-42,15
16	skpl/grib/uzhd	2,22	-7,51	7,83	-0,62	-1,16	3,60	-4,23	126,76
17	grib/joze/uzhd	-2,95	-3,31	4,43	1,22	2,04	2,83	-1,61	65,88
18	stho/skpl/uzhd	2,95	-1,40	3,26	-0,52	1,92	1,37	-1,89	192,67
19	mopi/skpl/stho	1,69	1,78	2,46	-0,25	0,21	1,10	-1,35	156,72
20	graz/hutb/mopi	-3,42	-0,74	3,50	-1,75	-0,16	0,87	-2,62	-6,14
21	ljub/graz/brsk	4,56	-0,65	4,61	6,28	0,32	5,44	0,84	184,06
22	brsk/graz/disz	-0,31	0,77	0,83	1,52	1,21	1,18	0,35	123,95
23	graz/mopi/disz	0,30	0,76	0,82	0,95	1,32	0,89	0,07	55,68
24	disz/mopi/penc	0,23	0,97	1,00	0,75	1,28	0,88	-0,12	51,78
25	mopi/stho/penc	7,47	-0,68	7,50	-6,51	0,51	0,50	-7,01	92,60
26	penc/stho/uzhd	8,36	-5,65	10,09	-7,04	3,02	1,52	-8,56	107,02
27	csar/penc/uzhd	-3,58	-2,61	4,43	-0,48	-2,20	1,98	-2,46	72,00
28	csar/disz/penc	-7,30	-3,56	8,12	-4,31	-2,32	1,91	-6,21	77,00
29	brsk/disz/csar	-7,92	-3,39	8,61	-4,31	-2,00	2,15	-6,46	78,41
30	mate/brsk/csar	-6,17	1,31	6,31	-2,04	0,24	2,13	-4,18	96,01
31	Mate/csar/uzhd	2,03	2,46	3,19	6,15	-0,38	4,67	1,48	64,82
	Min	-9,21	-12,78	0,68	-10,45	-3,49	0,39	-11,62	
	Max	8,36	5,46	12,79	9,08	5,04	7,98	1,48	

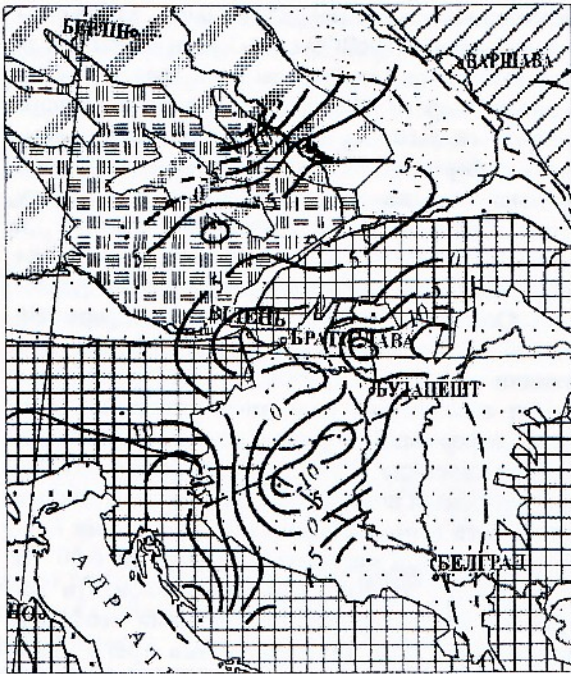


Рис. 2. Розподіл дилатації на території охопленою мережею

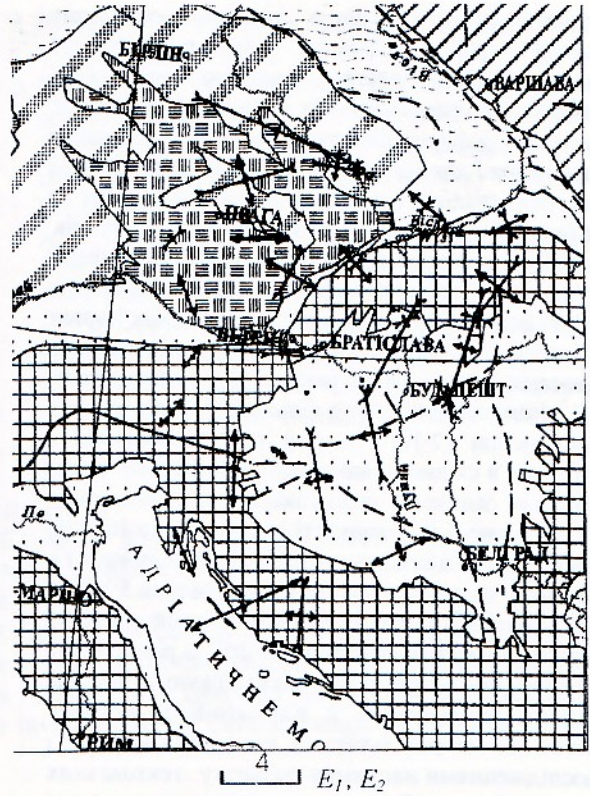


Рис. 3. Головні осі деформації E_1 та E_2 на території охопленою мережею

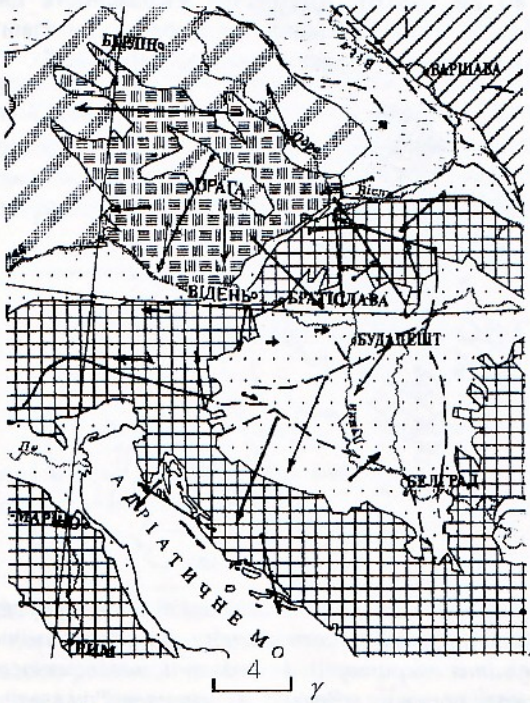


Рис. 4. Загальний зсув γ на території охопленою мережею

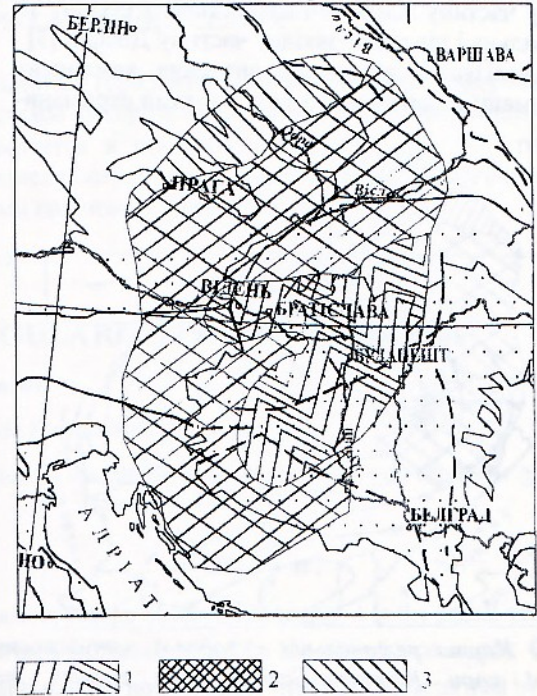


Рис. 5. Поділ території охопленою мережею на умовні блоки

зростають до 10^{-7} за рік в південно-західному напрямку (район Дінарид). За компонентною відносного зсуву вектори зміщень не мають характерної направленості і їх розподіл є хаотичним. Головні осі деформацій розтягу мають дугоподібне орієнтування і для них переважають північно-західна і південно-східна орієнтація, а їх величина є постійною і знаходиться в межах $4-6 \cdot 10^{-8}$ за рік. Третій блок охоплює територію Західної і Північної Румунії та Угорщини. Він охоплює Альпійські міжгірні впадини і простягається від Східних Карпат до Дінарид. Для нього характерні від'ємні дилатація яка досягає екстремумів в центральній частині блоку до 10^{-7} . Компоненти зсуву в північній частині блоку є значно менші ($2 \cdot 10^{-8}$ за рік) ніж в південній і орієнтовані в східному напрямку. В південній частині відносні зміщення орієнтовані в південно-західному напрямку і їх швидкості досягають до 10^{-7} . На даному блоці осі стиску орієнтовані в північному і в південному напрямках і досягають величини $5 \cdot 10^{-8}$ за рік, осі розтягу є перпендикулярні до осей стиску, а швидкість розтягу не перевищує $2 \cdot 10^{-8}$ за рік.

Отримані результати підтверджують раніше проведені дослідження в Карпато-Балканському регіоні. Так за результатами кампанії CERGOP і за дослідженнями напрямку розвитку тектонічних структур Карпато-Балканського регіону отримані додатні значення дилатації охоплюють північно-східну частину Карпато-Балканського регіону та центральну і південно-західну частину Дінарид [3].

Аналізуючи абсолютні значення компонент деформації в порівнянні з результатами отримани-

ми на просторовій мережі Карпатського геодинамічного полігону слід зауважити що швидкості накопичення компонент деформацій за результатами кампанії CERGOP є в 2-3 рази менші ніж за результатами світловіддалемірних спостережень еталонної мережі Карпатського геодинамічного полігону і в 5-10 раз менші ніж швидкості компонент деформацій на території локальної мережі. Локальна мережа охоплює виключно гірську частину Закарпатського глибинного розлому, а еталонна - охоплює рівнинну частину Закарпаття і гірські масиви Закарпатського глибинного розлому [5]. Оскільки швидкості компонент деформацій є найбільш інтенсивні в гірських районах, а в рівнинних навпаки - стабілізуються, то отримані різні за абсолютною величиною швидкості компонент деформацій, в різних мережах, мають логічну узгодженість. Крім цього інтенсивність деформацій земної поверхні підтверджується даними геологічного картографування флішової зони Карпат, ці деформації знаходяться в межах від $6 \cdot 10^{-8}$ за рік до $1,1 \cdot 10^{-7}$ за рік. Отримані компоненти деформацій добре корелюють з іншими геофізичними полями. Так виділений нами третій блок охоплює територію з мінімальною товщиною земної кори до 28 км. Розташування другого блоку узгоджується з радіальним розподілом зростання товщини земної кори на території від 30 до 40 км (рис.6). Аналогічна узгодженість цих блоків є з регіональною складовою теплового потоку Карпато - Балканського регіону (рис.7).

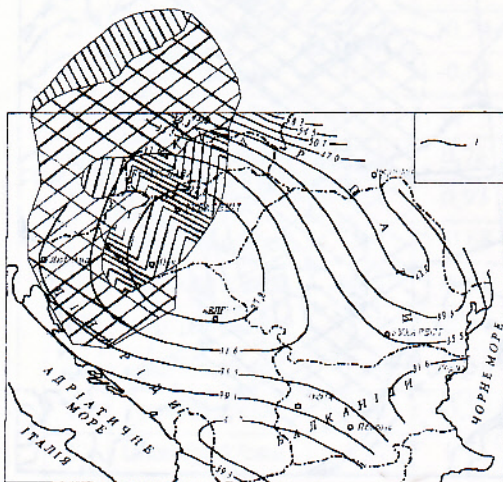


Рис.6. Карта регіональної складової потужності земної кори Карпато-Балканського регіону та геодинамічне районування території: 1 - ізолінії потужності земної кори. [2]

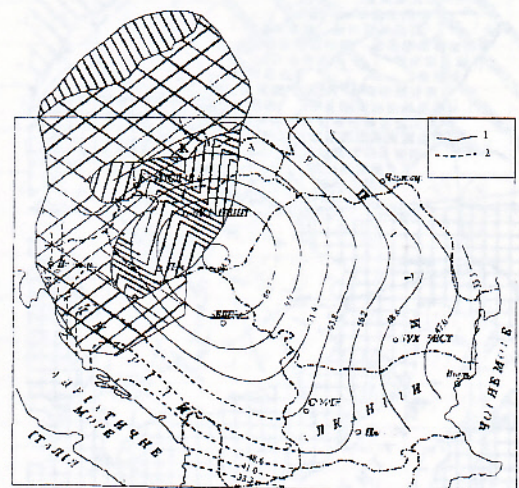


Рис.7. Карта регіональної складової теплового потоку Карпато-Балканського регіону та геодинамічне районування території: 1 - ізолінії інтенсивності теплового потоку, mW/m^2 ; 2 - гіпотетичні ізолінії інтенсивності теплового потоку, mW/m^2 . [2]

Література

1. Изотов А.А. и др. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах (методическое руководство). ЦНИИГАиК Москва 1985.
2. Сомов В.И. Современная направленность развития тектонических структур Карпато-Балканского региона. Геофизический журнал, 1990, т. 12, №6, с.39-47.
3. Друмя А.В., Степанова Н.Я., Симонова Н.А., Шумилова В.И. Сейсмотектоническая деформация земной коры Карпато-Балканского региона. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. №4. с.3-10.
4. Руттен М.Г. Геология Западной Европы. Изд. «Мир», Москва 1972.
5. М.Демедюк, Ф.Заблоцкий, В.Колунов, А.Островский, І.Сідоров, К.Третяк. Результати дослідження горизонтальних деформацій земної кори на Карпатському геодинамічному полігоні Геодинаміка. 1998, №1, ст.3-13.
6. Jerzy B. Rogowski, Jan Hefty. Final Report of the CERGOP Study Group CSG-3 "CERGOP Reference Frame". Reports on geodesy. 1998, №10 (40), st. 169-183. Warsaw University of technology Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy Proceedings of the 9th CEI CERGOP Working Conference. Wetzell, Germany, 5-7 may 1998.

O.V.Serant, K.R.Tretyak

RECENT HORIZONTAL DEFORMATIONS OF THE EARTH'S SURFACE IN CENTRAL EUROPE
FROM GPS-CAMPAIGN CERGOP

Summary

Recent horizontal components of deformation of the Earth's surface in Central Europe were computed from the results of GPS-campaign CERGOP. Charts are presented for distribution of the deformation components within the studied network. The values of the components are $(-1,28 \Rightarrow 1,28) \cdot 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$. Obtained values and distribution of the deformation components were compared with some similar investigations of Central Europe area as well as with other geophysical fields.

О.В.Серант, К.Р.Третяк

СОВРЕМЕННЫЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ
ЕВРОПЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ GPS-КАМПАНИИ CERGOP

Резюме

По результатам GPS-кампании CERGOP вычислены современные горизонтальные компоненты деформации земной поверхности Центральной Европы. Приведены схемы распределения компонент деформации на территории исследуемой сети. Значения компонент находятся в пределах $(-1,28 \Rightarrow 1,28) \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$. Проведено сопоставление значений и распределений компонент современных деформаций с аналогичными исследованиями территории Центральной Европы и другими геофизическими полями.