

УДК 528.22

К.Р. ТРЕТЯК¹, А.І. ВОВК^{2*}

¹Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013.

^{2*}Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, ел. пошта vovk.andriy@outlook.com

РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ КОРИ ЄВРОПИ ЗА ДАНИМИ ГНСС-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА ЇХ ЗВ'ЯЗОК З ТЕКТОНІЧНОЮ БУДОВОЮ

Мета. Метою цього дослідження є: обчислення параметрів горизонтальної деформації земної кори Європи на основі щорічних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних ГНСС-станцій, обчислених за даними супутникових ГНСС-спостережень протягом 2000–2010 рр.; дослідження розподілу і змін горизонтальних деформацій та змін земної кори Європи за період з 2000 по 2010 рр. та встановлення їх взаємозв'язку з тектонічною будовою та проявом сейсмічної активності цього регіону. **Методика.** Для дослідження деформаційних параметрів земної кори були використані раніше обчислені щорічні вектори швидкостей горизонтального зміщення перманентних станцій Європи, отриманих за результатами ГНСС-спостережень за період з 2000 по 2010 рр. Для дослідження параметрів горизонтальної деформації земної кори територія Європи, використовуючи триангуляцію Делоне, була розбита на мережі трикутників з вершинами у перманентних ГНСС-станціях. Отримавши мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій, за допомогою лінійної інтерполяції в межах кожного трикутника по трьох його вершинах обчислюємо параметри деформації для точок відносно кожного трикутника мережі, так, щоб для кожного набору точок у кожному трикутнику були свої обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори. **Результати.** Результатами цього дослідження є: побудовані схеми розподілу території Європи на мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій; обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори для кожного трикутника у кожній мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій Європи за весь період дослідження (2000–2010 рр.); побудовані карти-схеми щорічного розподілу швидкостей дилатації земної кори Європи в період з 2000 по 2010 рр.; встановлені місця прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори Європи у кожному році періоду дослідження; побудована карта-схема прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори (стиску та розтягу) Європи за весь період дослідження; побудовані карти-схеми прояву максимальних та мінімальних значень загального зсуву земної кори γ та максимального та мінімального значень мінімальної та максимальної осей деформації земної кори Європи (E_1 та E_2) за період з 2000 по 2010 рр.; проведено аналіз отриманих карт-схем на встановлення взаємозв'язку з тектонічною будовою Європи. **Наукова новизна.** Аналізуючи побудовані в результаті дослідження карти-схеми, встановлено: місця прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори Європи у кожному році періоду дослідження; їх зв'язок із основними тектонічними розломами, геологічними зонами та місцями підвищеної сейсмічної активності на території Європи і їх прояв у місцях з малою товщиною земної кори протягом досліджуваного періоду з 2000 по 2010 роки; мінімальні значення загального зсуву земної кори γ (менше ніж $0,2 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$), зосереджені на території Великої європейської рівнини в той час, коли максимальні значення (більше ніж $20,0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$) проявляються на території таких основних геологічних зон, як: Дінариди, Апенніни, Піреней, Іберійський масив, Альпійсько-Гімалайський та Середземноморський пояс; місця прояву значних (більше ніж $10 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$) максимальних значень мінімальної та максимальної осей деформації земної кори (E_1 та E_2), зосереджені на території тих же основних геологічних зон, на яких зосереджені прояви максимальних значень загального зсуву земної кори γ , на території Великої європейської рівнини таких місць проявів або немає або їх значення є незначними ($-0,1 - -0,9 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$). Отримані в ході дослідження параметри горизонтальної деформації земної кори Європи та побудовані карти-схеми засвідчують значні деформаційні процеси досліджуваного регіону, які пов'язані як з основними геологічними розломами та зонами, так і з проявом сейсмічної активності на території Європи протягом усього періоду дослідження (2000–2010 рр.). Самі ж екстремальні деформаційні процеси в певних ареалах доволі добре відображають прояв тектонічної будови території Європи. **Практична значущість.** Обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори Європи в період з 2000 по 2010 рр. та побудовані за ними карти-схеми прояву цих параметрів, виявлений зв'язок горизонтальної деформації земної кори з тектонічною будовою Європи та проявом сейсмічної активності у цьому регіоні слугуватимуть для подальшого поглибленого дослідження території Європи загалом, а за необхідності її окремих частин. Запропонована методика може бути використана для аналогічного дослідження інших регіонів світу.

Ключові слова: ГНСС, ГНСС спостереження, горизонтальна деформація, землетруси, земна кора, параметри деформації, перманентні станції, сейсмічність.

Вступ

Основним методом вивчення горизонтальних рухів земної поверхні донедавна слугувало використання повторної триангуляції, яка спочатку проводилася не в цілях виявлення тектонічних зсувів і лише потім її почали використовувати в цьому напрямку. Проте традиційні геодезичні способи моніторингу цих рухів вельми трудомісткі і вимагають для проведення вимірювань значних витрат часу. У силу обставин вони не завжди дозволяють своєчасно фіксувати, а потім спостерігати за ходом деформаційних процесів, зумовлених, як підземними виробками, так і природною активністю.

Тому одним з методів, який набув нині значного поширення у світі, є метод, заснований на технологіях глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

Сучасні ГНСС-технології, розроблені для точного визначення положення будь-якої точки на місцевості, дозволяють збільшити відстані між базовими станціями вимірів на 20 і більше кілометрів. Це означає, що вони в безперервному режимі вимірювань можуть охопити практично весь масштабний спектр геодинамічних процесів, спостережуваних на локальному рівні.

Сьогодні за допомогою мережі перманентних ГНСС-станцій, що охоплює практично всі материки, можна безперервно у часі надійно визначити сучасні деформації земної кори, їх структуру та інтенсивність.

Також супутникові спостереження можна використовувати під час аналізу пост-сейсмічних та ко-сейсмічних рухів земної кори, спричинених землетрусами.

До прикладу, за безперервними GPS-вимірами на 10 постійних станціях (IGPS) з 1994р. вивчають сучасний режим напружень і руху Адриатичної мікроплити (АМП). Результати показали, що відносно стабільної Європи залишкові горизонтальні рухи АМП мають швидкості 2 мм/рік . Центральна частина гірської системи зазнає зх.-сх. розтягу, а в південній частині відбувається стиск в напрямку від пн.-пд. до пн.-зх. – пд.-сх. [Calais E., 2002].

Інше дослідження, в основу якого були взяті дані чотирирічного GPS спостереження за рухом тектонічних плит, показало, що кутові швидкості руху плит, отримані за результатами GPS даних, незначно відрізняються від кутових швидкостей в глобальній моделі руху плит NUVEL-1A, [Argus D.F., 2012] що ще раз доводить ефективність застосування ГНСС технологій для моніторингу за геодинамічними процесами. Саме тому геодинамічний моніторинг на основі ГНСС-вимірів ефективно використовується в місцях підвищеної сейсмічності, на наддовгих лініях для дослідження глобальних переміщень земної поверхні та уточнення наземної геоцентричної системи референції для дослідження як горизонтальних, так і вертикальних рухів земної кори [Serpelloni E., 2013].

Окрім цього, ГНСС-спостереження можна використовувати і для побудови різноманітних моделей земної поверхні. Так, побудована модель швидкості деформації земної кори території Фенноскандії, отримана за результатами GPS вимірів, була використана, щоб інвертувати результати для побудови відповідних моделей товщини літосфери і в'язкості мантії [Zhao S., 2012].

ГНСС-спостереження використовуються і для дослідження горизонтальних та вертикальних деформацій земної кори. Так, у Великобританії для такого моніторингу використовують 40 GPS станцій. Похибки визначення горизонтальних деформацій за даними цих станцій становить 1 мм/рік [Teferle F.N., 2009].

Сучасні ГНСС-методи дозволяють здійснювати моніторинг деформації внутрішніх континентальних плит з високим просторовим і часовим охопленням. До прикладу, такий моніторинг ведеться для комплексної оцінки сейсмічної небезпеки і ризику на території Німеччини, особливо в регіонах, де відбуваються високі за магнітудою землетруси. Для такого моніторингу використовують дані спостережень на 150 GPS станціях Німеччини. Щільність цієї мережі забезпечує визначення швидкостей горизонтальних деформацій на рівні $1-2 \text{ мм/рік}$, але кількість станцій та їхня щільність постійно збільшуються, щоб забезпечити основну мету цього дослідження, а саме: забезпечення високоточними даними про деформації у найактивніших тектонічних регіонах Німеччини (Рейн-Грабен, Швабський Альб, Альпійський мис і Фогтланд) [Sibylle G., 2006].

Схоже дослідження впроваджувалось також і для території в регіоні Піренеїв, де за даними GPS-спостереження протягом 3,5 років на 35 станціях в цьому регіоні було встановлено, що зосередження вищих швидкостей деформацій відбувається у західній частині ареалу [E. Asensio, 2012].

Причинами деформації земної кори можуть бути не лише геологічні чи геодинамічні (розробка корисних копалин, рухи літосферних плит). Вони можуть бути пов'язані з впливом на планету Місяця чи Сонця, з сейсмічністю, як окремих локальних зон (Зона Вранча, Альпійсько-Гімалайська дуга), так і проявом сейсмічності на глобальному рівні. Не останнім фактором впливу на деформації земної кори виступає і товщина земної кори, її потужність [Müller B., 2012].

Наслідки деформації земної кори та її зміщення, горизонтального чи вертикального, ми можемо бачити, як на регіональному, так і на глобальному рівнях. Руйнування інженерних споруд, екологічні катастрофи, спричинені розривами нафто- та газопроводів, зміна рівня Світового океану все це спонукає нас до високоточного моніторингу за деформаціями земної кори та проявом сейсмічної активності. Постійний моніторинг геодинамічних процесів дозволить забезпечити нас від їх руйнівних наслідків.

Мета

Метою роботи є дослідження розподілу та змін горизонтальних деформацій та змін земної кори Європи за період з 2000 по 2010 рр. та встановлення їх взаємозв'язку з тектонічною будовою Європи.

Методика

Для дослідження деформаційних параметрів земної кори були використані обчислені раніше щорічні вектори швидкостей горизонтального зміщення перманентних станцій Європи, отриманих за результатами ГНСС-спостережень за період з 2000 по 2010 рр. [Третяк К., 2012].

Використовуючи дані ГНСС-спостереження, було проведене схоже дослідження з визначення напружено-деформованого поля Центральної Європи та Карпатського регіону і встановленню зв'язку між тектонічними процесами та горизонтальними рухами і деформаціями земної кори. Мережі, для яких відбувалось дослідження, включали невелику кількість перманентних ГНСС-станцій та проводились для окремо взятого періоду часу. Для побудови схем розподілу деформаційних параметрів використано результати опрацювання річних спостережень на ГНСС-станціях EPN-мережі (1992, 1993, 1994, 1996, 1997, 2000, 2005 та 2008 років) [Серант О., 2012].

Запропонована в цьому дослідженні методика охоплює більшу кількість ГНСС-станцій мережі EUREF, результати опрацювання яких стали основою для аналізу стану щорічних горизонтальних зміщень та деформацій земної кори на території Європи за період з 2000 по 2010 рр.

Деформацію земної кори можна описати такими 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 та Y;
- загальний зсув γ , 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} ;

Для обчислень $\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega, \gamma, E_1, E_2$ використовуємо відомі вирази [Есиков Н., 1979, Изотов А., 1985]:

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

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

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

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

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

$$\left. \begin{matrix} E_1 \\ E_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left[\Delta \pm \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \right] \quad (6)$$

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

де $U = \frac{(B_2'' - B_1'')}{\rho} M$, а $V = \frac{(L_2'' - L_1'')}{\rho} N$,

M, N – радіус кривини меридіана і першого вертикала відповідно.

Азимуты напрямків осей головних деформацій визначаються за формулою

$$\operatorname{tg} 2\theta_0 = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \quad (7)$$

Для однозначного визначення Θ за цією формулою потрібно врахувати таку умову:

$$\text{якщо } \gamma_1 > 0 \text{ то } \theta_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) + 90^\circ,$$

$$\text{якщо } \gamma_2 < 0 \text{ то } \theta_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right).$$

Параметри деформації земної кори можуть бути обчислені для центрів елементарних трикутників, на які розбито досліджуваний регіон. $\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \gamma$ є безрозмірними величинами, тому обчислені за ними зміни куткових елементів будуть виражені в радіанах, а лінійних – відносною мірою.

Оскільки мережа перманентних ГНСС-станцій на території Європи за весь період нашого дослідження згущується, то для дослідження параметрів горизонтальної деформації земної кори територія Європи, використовуючи триангуляцію Делоне, була розбита на мережі трикутників з вершинами у перманентних ГНСС-станціях (рис. 1).

Оскільки кількість перманентних ГНСС-станцій з року в рік збільшується, то отримані мережі трикутників на території Європи згущуються (рис. 2), що дає змогу поглибленіше досліджувати цей регіон.

Отримавши мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій, використовуючи вирази 1–7, за допомогою лінійної інтерполяції в межах кожного трикутника по трьох його вершинах обчислюємо параметри деформації для точок відносно кожного трикутника мережі, так, щоб для кожного набору точок у кожному трикутнику були свої обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори. Самі ж точки були обмежені полігоном мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій.

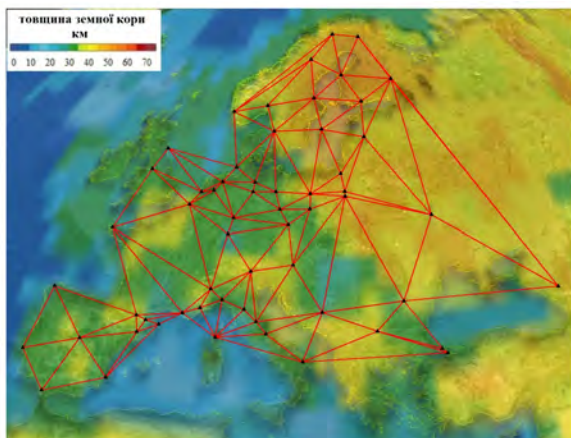


Рис. 1. Схема мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій на території Європи у 2000 р.

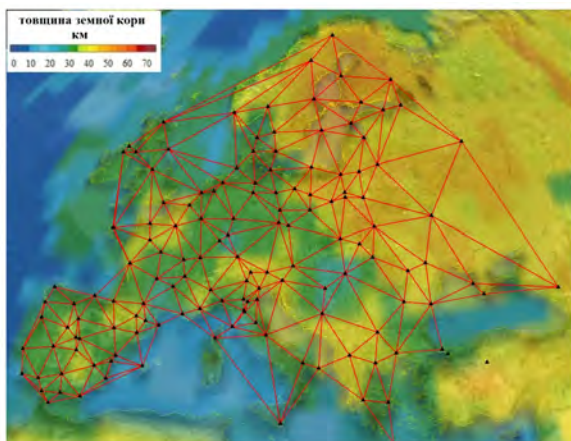


Рис. 2. Схема мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій на території Європи у 2010 р.

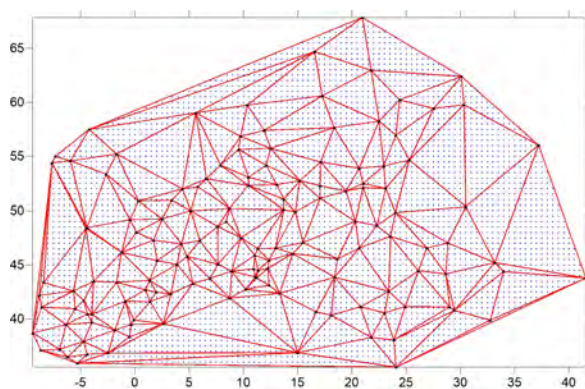


Рис. 3. Схема мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій з точками, в яких були обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори (• – точки, для яких обчислені параметри деформації земної кори)

Схему мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій з набором точок, в яких були обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори, наведено на рис. 3.

Отримані результати використовуємо для побудови карт-схем щорічного розподілу швидкостей дилатації земної кори Європи в період з 2000 по 2010 рр., карт-схем прояву максимальних та мінімальних значень загального зсуву земної кори та максимального та мінімального значень E_1 , E_2 за період з 2000 по 2010 рр. на території Європи.

Для подальшого аналізу отримані результати та побудовані карти-схеми порівнюємо з геологічними та тектонічними картами території Європи.

Результати

Використовуючи результати попереднього дослідження [Третяк К., 2012], в основу якого були взяті дані перманентних ГНСС-станцій, спостереження на яких проводили більше ніж три роки, для дослідження параметрів горизонтальної деформації земної кори територію Європи було поділено на мережі трикутників ГНСС-станцій.

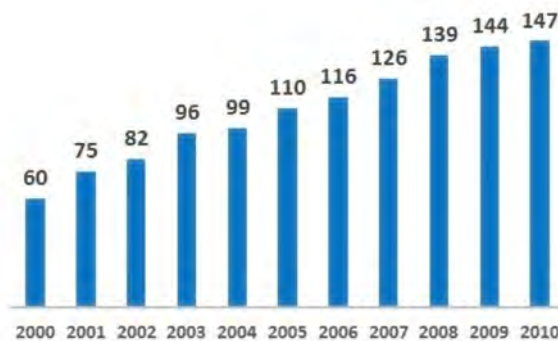


Рис. 4. Річна кількість перманентних ГНСС-станцій, використаних у дослідженні в період з 2000 по 2010 рр.

(■ – кількість перманентних станцій)

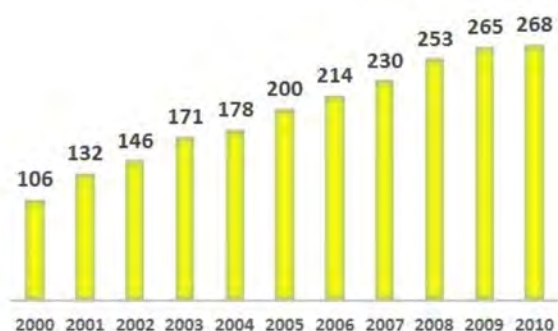


Рис. 5. Річна кількість трикутників у мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій, використаних у дослідженні (■ – кількість трикутників)

Оскільки з кожним роком кількість використаних у дослідженні станцій, на яких ведеться спостереження, збільшується (рис. 4), то кількість трикутників, для яких були обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори, також збільшується (рис. 5).

Використовуючи загальновідомі вирази (1–7), для кожної мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій на території Європи були обраховані параметри горизонтальної деформації

земної кори для кожного року періоду дослідження (2000 – 2010 рр.).

Приклад фрагменту каталогу обчислених параметрів горизонтальної деформації земної кори для трикутників мережі трикутників ГНСС-станцій наведено в табл. 1.

Також були визначені максимальні та мінімальні значення параметрів горизонтальної деформації земної кори Європи за період з 2000 по 2010 рр. (табл. 2).

Таблиця 1

Фрагмент каталогу обчислених параметрів горизонтальної деформації земної кори (10^{-8} /рік) для мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій Європи у 2003 р.

№	верш 1	верш 2	верш 3	B град	L град	ω 10^{-8} /рік	γ_1 10^{-8} /рік	γ_2 10^{-8} /рік	γ 10^{-8} /рік	A γ град	E ₁ 10^{-8} /рік	E ₂ 10^{-8} /рік	Θ град
1	CASC	HUEL	CACE	38,46	-7,56	-0,04	-1,86	-1,68	2,51	222	1,23	-1,27	21
2	VIGO	CASC	GAIA	40,66	-8,94	-5,48	6,22	-1,03	6,31	350	0,42	-5,89	175
3	GAIA	ACOR	VIGO	42,21	-8,60	-0,03	-1,52	-7,54	7,69	258	3,83	-3,86	39
4	HUEL	SFER	MALA	36,79	-5,83	-9,54	-17,10	18,43	25,10	132	7,80	-17,30	156
5	CACE	GAIA	CASC	39,75	-8,11	0,50	-0,68	-0,95	1,17	234	0,83	-0,33	27
6	CACE	ACOR	GAIA	41,31	-7,77	1,81	-4,36	0,49	4,39	173	3,10	-1,29	176
7	CACE	VILL	CANT	41,13	-4,69	2,27	-0,09	-1,42	1,43	266	1,85	0,42	43
8	CACE	CANT	ACOR	42,10	-6,17	-1,77	2,04	2,06	2,90	45	0,56	-2,34	22
9	SFER	NOT1	ALME	36,73	2,10	-24,80	-25,30	28,20	37,90	131	6,54	-31,40	155

Таблиця 2

Максимальні та мінімальні значення параметрів деформації земної кори для мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій Європи на увесь період дослідження (2000 – 2010 рр.)

значення \ рік		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
ω 10^{-8} /рік	max	18.8	17.7	9.6	21.3	20.5	30.6	21.5	22.0	15.1	25.5	24.0
	min	-19.3	-16.0	-16.3	-24.8	-22.6	-10.6	-13.2	-16.3	-19.4	-17.5	-27.9
γ_1 10^{-8} /рік	max	9.5	17.7	16.1	17.5	17.9	33.6	25.4	21.5	15.5	18.1	19.6
	min	-25.1	-19.0	-9.6	-63.0	-33.0	-29.7	-12.1	-24.0	-25.1	-23.0	-17.8
γ_2 10^{-8} /рік	max	21.1	12.6	9.3	38.3	25.8	26.7	70.3	15.1	28.5	13.3	22.7
	min	-16.5	-13.8	-11.2	-20.7	-15.8	-10.9	-17.6	-37.5	-20.8	-25.2	-33.0
γ 10^{-8} /рік	max	26.5	21.8	19.3	73.7	37.0	33.8	74.7	37.7	29.1	30.1	34.5
	min	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1
A γ град	max	359	358	356	352	356	358	353	358	353	358	360
	min	11	5	5	2	2	2	2	4	2	0	0
E ₁ 10^{-8} /рік	max	22.6	19.7	10.5	47.5	22.2	32.2	36.7	22.1	20.3	27.7	24.8
	min	-1.6	-3.3	-0.2	-0.9	-1.3	-0.8	-4.2	-1.1	-1.3	-1.4	-1.8
E ₂ 10^{-8} /рік	max	1.0	3.7	0.1	1.2	2.9	1.6	2.6	2.5	1.6	2.4	3.1
	min	-20.6	-16.9	-17.8	-31.4	-22.1	-10.2	-38.0	-23.8	-21.9	-18.6	-31.2
Θ град	max	179	179	178	180	178	179	179	179	180	180	180
	min	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0

Для подальшого дослідження поставленого питання, використовуючи обчислені значення параметрів горизонтальної деформації земної кори Європи, були побудовані карти-схеми щорічного розподілу швидкостей дилатації земної кори 10^{-8} /рік на території Європи за весь період дослідження з 2000 по 2010 рік. Для прикладу наведено карти-схеми щорічного розподілу швид-

костей дилатації земної кори 10^{-8} /рік на території Європи (рис. 6–9). Аналізуючи часовий розподіл щорічної зміни швидкостей дилатації земної кори Європи за кожен рік спостереження (2000 – 2010 рр.), бачимо, що на території Європи щорічно встановлюються місця прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори, як додатні (розтяг), так і від’ємні (стиск).

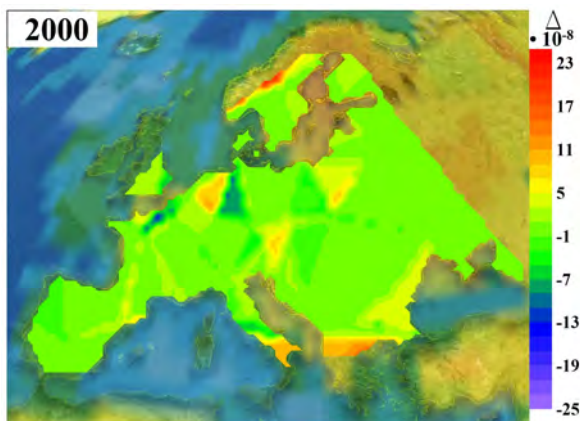


Рис. 6. Карта-схема розподілу швидкостей дилатації земної кори $10^{-8} 1/рік$ на території Європи у 2000 р.

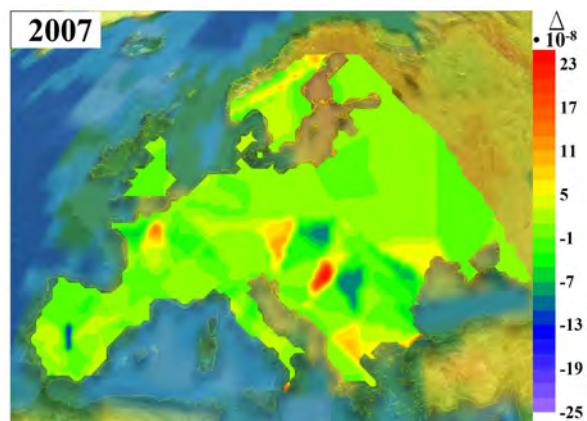


Рис. 8. Карта-схема розподілу швидкостей дилатації земної кори $10^{-8} 1/рік$ на території Європи у 2007 р.

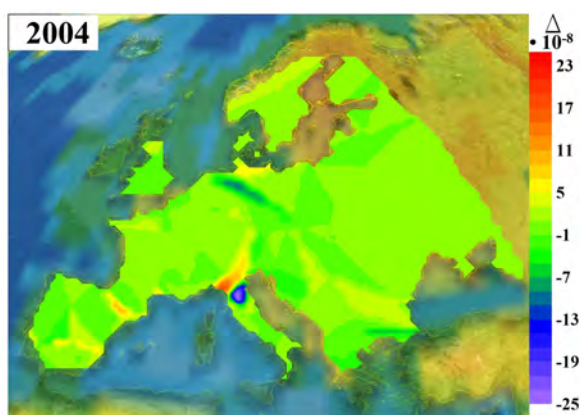


Рис. 7. Карта-схема розподілу швидкостей дилатації земної кори $10^{-8} 1/рік$ на території Європи у 2004 р.

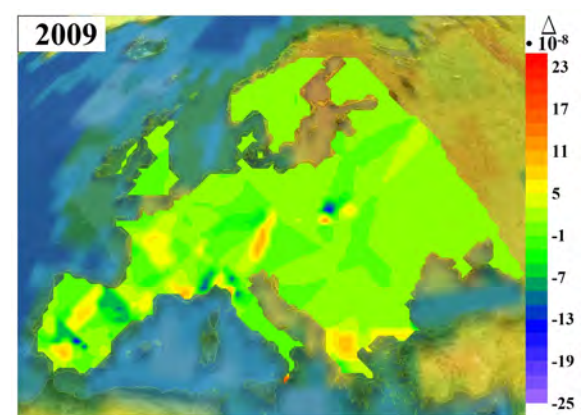


Рис. 9. Карта-схема розподілу швидкостей дилатації земної кори $10^{-8} 1/рік$ на території Європи у 2009 р.

Для подальшого дослідження отриманих результатів була побудована карта-схема прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори на території Європи за період з 2000 по 2010 рр. (рис. 10).

Також на цю карту-схему були нанесені основні тектонічні розломи та геологічні зони, які є на території Європи та, використовуючи інформацію про стан сейсмічної активності на території Європи за період з 2000 по 2010 рр., були нанесені місця прояву сейсмічної активності даного регіону.

Аналізуючи побудовану карту-схему прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори, було встановлено, що прояви значень швидкостей дилатації земної кори стиску (більше ніж $15 \cdot 10^{-8} 1/рік$), а також розтягу (менше $-15 \cdot 10^{-8} 1/рік$), на території Європи протягом досліджуваного періоду (2000 – 2010 рр.) пов'язані з основними тектонічними розломами, що проходять через Апенніни, Дінаріди, Піреней, такими геологічними зонами, як Іберійський масив, Альпійсько-Гімалайський пояс, а також

виникають у місцях з малою товщиною земної кори менше ніж 25 км (Центральний масив, Угорська западина). Окрім того, місця проявів цих екстремальних значень збігаються з місцями підвищеної сейсмічної активності на території Європи.

Також можна побачити, що на території Великої європейської рівнини місць прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори менше, також менше і місць прояву сейсмічної активності, що свідчить про низьку, порівняно з іншими регіонами, геологічну активність цього ареалу.

Також за величинами щорічних максимальних та мінімальних значень загального зсуву земної кори в межах трикутників, мереж трикутників перманентних ГНСС-станцій, та обчисленим для цих значень азимутом γ , була побудована карта-схема розподілу максимальних та мінімальних значень загального зсуву γ земної кори ($10^{-8} 1/рік$) на території Європи за період з 2000 по 2010 рр. (рис. 11).

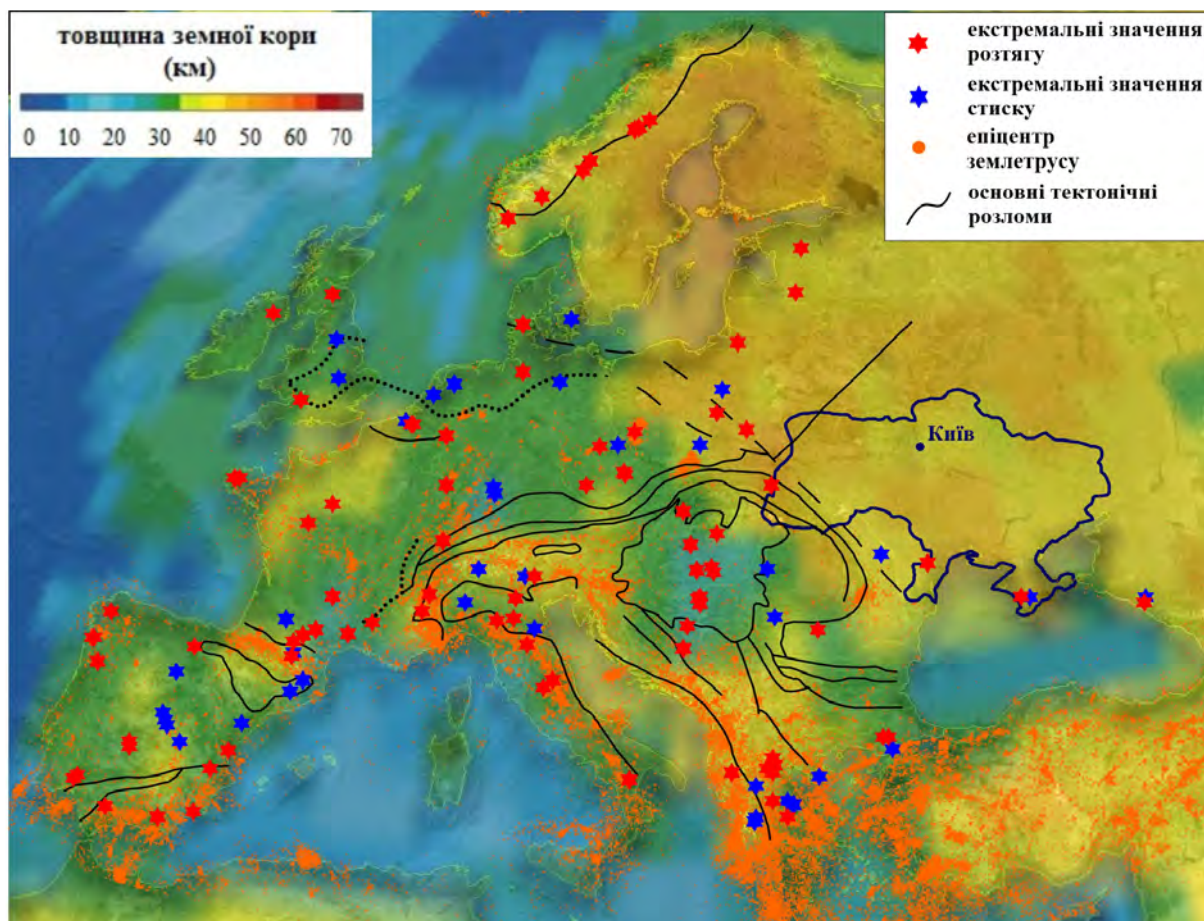


Рис. 10. Карта-схема розподілу екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори 10^{-8} 1/рік та прояву сейсмічної активності на території Європи за період з 2000 по 2010 роки

Аналізуючи побудовану за результатами дослідження карту-схему прояву максимальних та мінімальних значень загального зсуву γ земної кори (рис. 11), бачимо, що мінімальні значення загального зсуву земної кори в межах від $0,0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$ до $0,2 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$ зосереджені на території Великої європейської рівнини в той час, коли максимальні значення загального зсуву земної кори (більше $20 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$) проявляються на території таких основних геологічних зон, як Дінариди, Апенніни, Піренеї, Іберійський масив, Альпійсько-Гімалайський складчастий пояс, Середземноморський пояс.

Також бачимо, що вектори загального зсуву земної кори в цих зонах не є орієнтовані в одному напрямку, що свідчить про відповідні значні геодинамічні деформаційні процеси цього ареалу на протигагу процесам в зоні Великої європейської рівнини, які характеризуються малими за значенням величинами загального зсуву земної кори протягом усього досліджуваного періоду з 2000 по 2010 рр.

Значні геодинамічні процеси, які відбуваються в цих зонах, також підтверджуються і підвищенням в них проявом сейсмічної активності за період з 2000 по 2010 рр. (рис. 10).

За обчисленими, з використанням цієї методики, в межах трикутників, мереж трикутників перманентних ГНСС-станцій, щорічними значеннями осей мінімальних та максимальних деформацій земної кори Європи (E_1 та E_2) та обчисленим для цих значень азимутом головної осі деформації земної кори протягом 2000–2010 рр., була побудована карта-схема розподілу максимальних та мінімальних значень осей мінімальних та максимальних деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 (10^{-8} 1/рік) на території Європи за період з 2000 по 2010 рр.

На рис. 12 наведено карту-схему розподілу максимальних значень осей мінімальних та максимальних деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 (10^{-8} 1/рік) на території Європи за період з 2000 по 2010 рр.

Аналізуючи отриману карту-схему прояву максимальних значень осей мінімальних та максимальних деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 (10^{-8} 1/рік) (рис. 12), бачимо, що місця прояву значних (більше ніж $10 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$) максимальних значень E_1 та E_2 зосереджені на території таких основних геологічних зон, як Дінариди, Апенніни, Піренеї, Іберійський масив, Альпійсько-Гімалайський складчастий пояс, Середземноморський пояс.

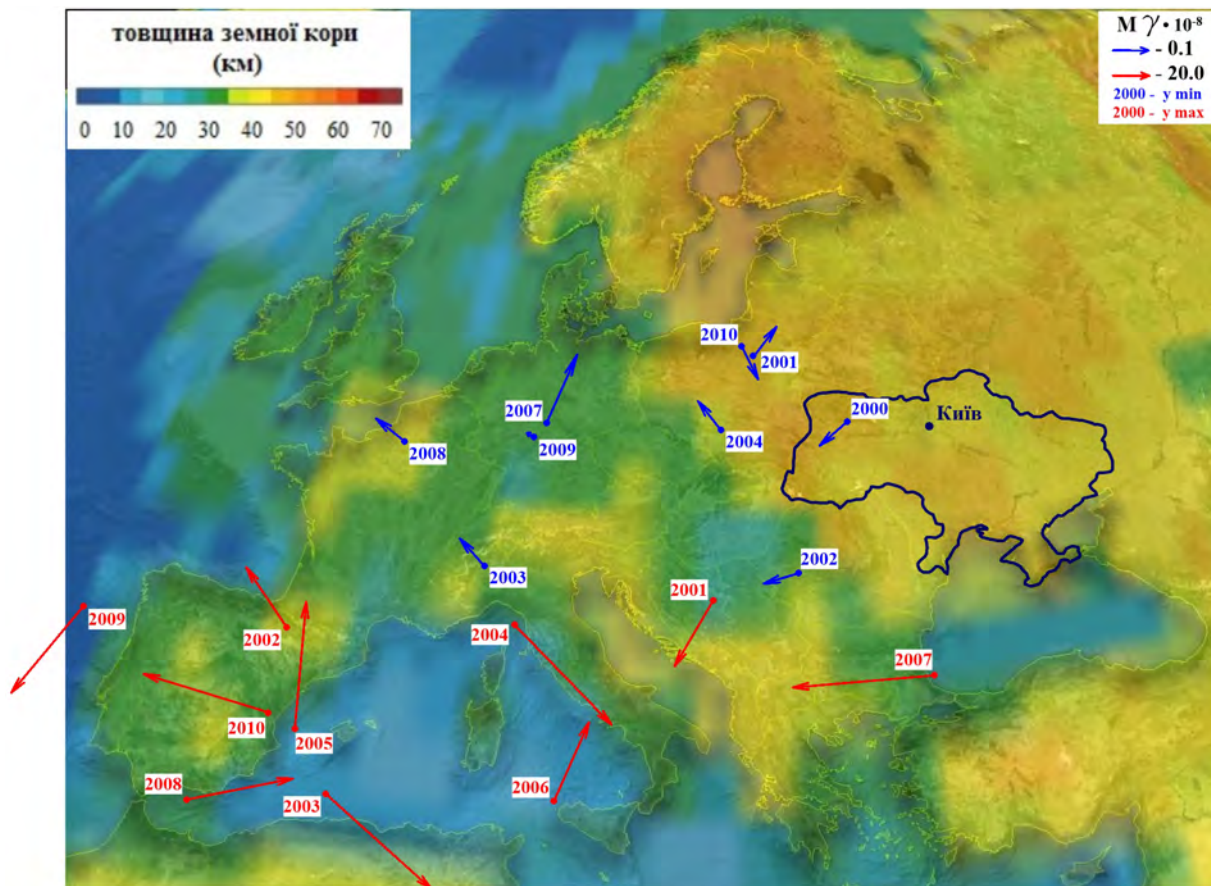


Рис. 11. Карта-схема розподілу мінімальних та максимальних значень загального зсуву γ земної кори (10^{-8} 1/рік) на території Європи за період з 2000 по 2010 рр.

На території Великої європейської рівнини таких місць проявів або немає, або значення максимальних осей деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 є незначними (від $-0,01 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$ до $-0,09 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$).

Також з аналізу рис. 12 бачимо, що самі ж осі мінімальних та максимальних деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 орієнтовані з півночі на південь і відображають розширення усього Середньоморського поясу, Іберійської плити, Дінарид, Піреней та Зони Вранча.

Отримані під час дослідження параметри горизонтальної деформації земної кори Європи та побудовані карти-схеми (рис. 10 – 12) засвідчують значні деформаційні процеси досліджуваного регіону, які пов'язані, як з основними геологічними розломами та зонами на території Європи, так і з проявом сейсмічної активності на території Європи за період з 2000 по 2010 рр.

Самі ж екстремальні деформаційні процеси в певних ареалах доволі добре відображають прояв тектонічної будови території Європи.

Наукова новизна і практична значущість

Отримані в ході дослідження параметри горизонтальної деформації земної кори Європи та побудовані карти-схеми засвідчують значні деформа-

ційні процеси досліджуваного регіону, які пов'язані, як з основними геологічними розломами та зонами на території Європи, так і з проявом сейсмічної активності на території Європи за період з 2000 по 2010 рр. Самі ж екстремальні деформаційні процеси в певних ареалах доволі добре відображають прояв тектонічної будови території Європи.

Отримані результати слугуватимуть для подальшого поглибленого дослідження цього регіону території Європи, а за необхідності його окремих частин. Запропоновану методику можна використовувати для аналогічного дослідження інших геодинамічно-активних регіонів світу.

Висновки

Під час виконаного дослідження горизонтальних деформацій земної кори можемо зробити висновки, а саме:

- використовуючи триангуляцію Делоне, територія Європи була розбита на мережі трикутників перманентних ГНСС-станцій. Отримані мережі впродовж досліджуваного періоду (2000–2010 рр.) постійно згущуються, а кількість трикутників збільшується, що зумовлено зростанням кількості задіяних у дослідженнях перманентних ГНСС-станцій;

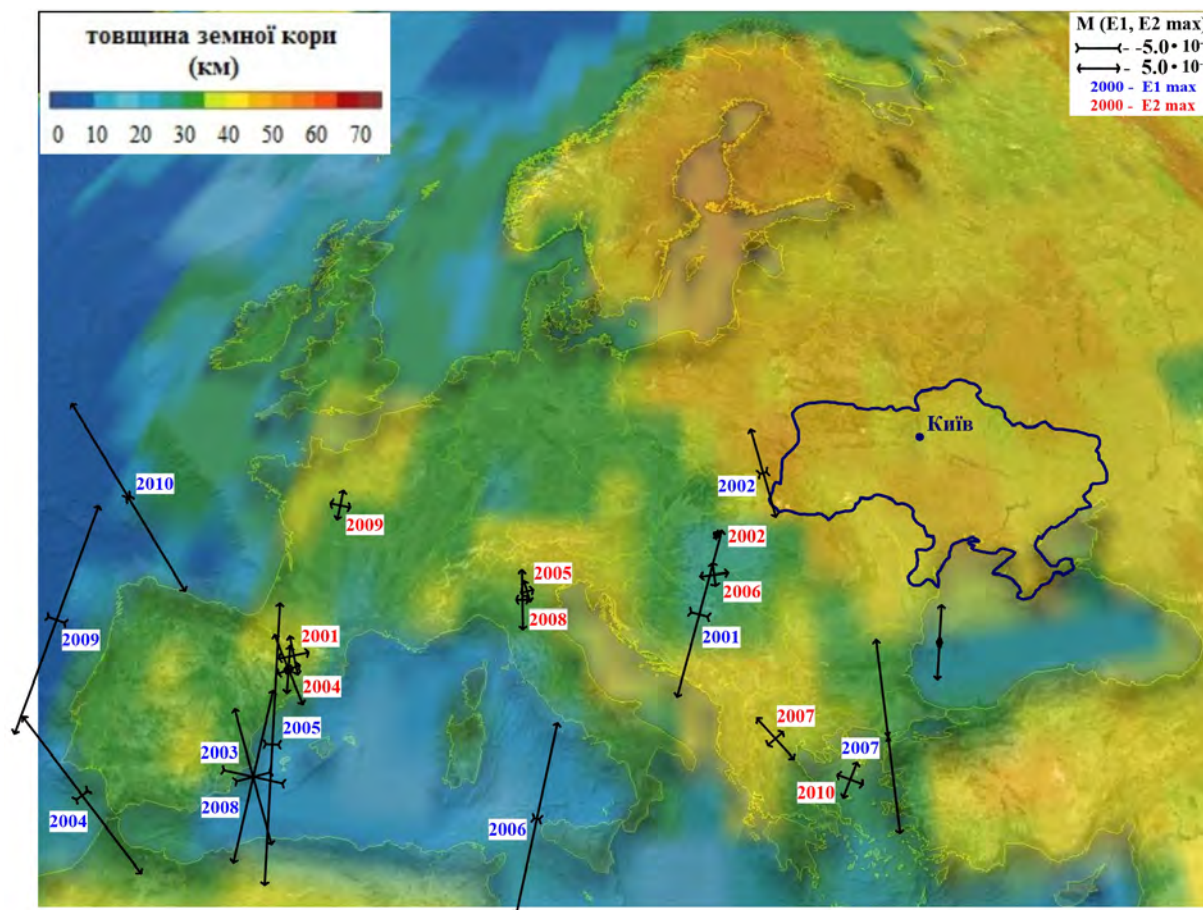


Рис. 12. Карта-схема розподілу максимальних значень E_1 та E_2 (10^{-8} 1/рік) на території Європи за період з 2000 по 2010 рр.

- для кожного трикутника відповідної мережі на кожен рік періоду дослідження були обчислені параметри горизонтальної деформації земної кори: дилатацію, відносні зсуви земної кори, загальний зсув, азимут γ , осі максимальних та мінімальних деформацій та азимут головної осі деформації;

- за отриманими результатами були побудовані карти-схеми щорічного розподілу швидкостей дилатації земної кори Європи в період з 2000 по 2010 рр., побудовані карти-схеми прояву максимальних та мінімальних значень загального зсуву земної кори та максимального та мінімального значень E_1 , E_2 за період з 2000 по 2010 рр.;

- встановлені місця прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори Європи у кожному році періоду дослідження;

- аналізуючи побудовану карту-схему прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори, було встановлено екстремальні зони стиску (більше ніж $15 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$), а також розтягу (менше $-15 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$) земної кори, на території Європи пов'язані з основними тектонічними розломами, геологічними зонами та

розломами, а також виникають у місцях з малою товщиною земної кори менше ніж 25 км (Центральний масив, Угорська западина). Окрім цього, місця проявів цих екстремальних значень збігаються з місцями підвищеної сейсмічної активності на території Європи (Дінариди, Апенніни, Піренеї, Іберійський масив). Також можна побачити, що на території Великої європейської рівнини місць прояву екстремальних значень швидкостей дилатації земної кори менше, також менше і місць прояву сейсмічної активності, що свідчить про низьку, порівняно з Альпійсько-Гімалайським складчастим поясом, геологічну активність цього ареалу;

- аналізуючи побудовані за результатами дослідження карти-схеми прояву максимальних та мінімальних значень загального зсуву γ земної кори, встановлено, що мінімальні значення загального зсуву земної кори в межах від $0,0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$ до $0,2 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$ зосереджені на території Великої європейської рівнини в той час, коли максимальні значення загального зсуву земної кори (більше $20 \cdot 10^{-8} \text{ 1/рік}$) проявляються на території таких основних геологічних зон, як Дінариди, Апенніни, Піренеї, Іберійський масив, Альпійсько-

Гімалайський складчастий пояс, Середземноморський пояс. Також бачимо, що вектори загального зсуву земної кори в цих зонах не є орієнтовані в одному напрямку, що свідчить про відповідні значні геодинамічні деформаційні процеси даного ареалу на протигагу процесам в зоні Великої європейської рівнини, які характеризуються малими за значенням величинами загального зсуву земної кори протягом усього досліджуваного періоду з 2000 по 2010 рр. Значні геодинамічні процеси, які відбуваються в цих зонах, також підтверджуються і підвищенням в них проявом сейсмічної активності за період з 2000 по 2010 рр.

- Аналізуючи отриману карту-схему прояву максимальних значень осей мінімальних та максимальних деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 (10^{-8} $1/рік$), бачимо, що місця прояву значних (більше $10 \cdot 10^{-8}$ $1/рік$) максимальних значень E_1 та E_2 зосереджені на території таких основних геологічних зон, як Дінаріди, Апенніни, Піреней, Іберійський масив, Альпійсько-Гімалайський складчастий пояс, Середземноморський пояс. На території Великої європейської рівнини таких місць проявів або немає, або значення максимальних осей деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 є незначними (від $-0,01 \cdot 10^{-8}$ $1/рік$ до $-0,09 \cdot 10^{-8}$ $1/рік$). Також з аналізу рис. 19 бачимо, що самі ж осі мінімальних та максимальних деформацій земної кори Європи E_1 та E_2 орієнтовані з півночі на південь і відображають розширення усього Середземноморського поясу, Іберійської плити, Дінарід, Піреней та Зони Вранча;

- Отримані в ході дослідження параметри горизонтальної деформації земної кори Європи та побудовані карти-схеми засвідчують значні деформаційні процеси досліджуваного регіону, які пов'язані з основними геологічними розломами, зонами на території Європи та з проявом сейсмічної активності на території Європи за період з 2000 по 2010 рр. Самі ж екстремальні деформаційні процеси доволі добре відображають прояв тектонічної будови території Європи

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Есиков Н. П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности. – Новосибирск: Изд. «Наука», Сибирское отделение, 1979.

Изотов А.А. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических

полигонах (методическое руководство) Изотов А.А. и др. – М.: ЦНИИГАиК, 1985.

Серант О.В., Автореферат, Д217.9(4)б, Деформації земної кори Європи за даними GPS-вимірів і їх взаємозв'язок з сейсмічною активністю: автореф. дис., к.т.н: 05.24.01 / – Львів: Б.в., 2012. – 21 с.

Третяк К.Р., Вовк А.І., Дослідження динаміки горизонтальних рухів земної кори Європи за даними GNSS спостережень (2000–2010) // *Наук. журн. «Геодинаміка»* Вип. 2(13)/2012. – С. 5–17.

Argus D.F., Heflin M.B., Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters* 22: doi: 10.1029/95GL02006.

Asensio E., Khazaradze G., Echeverria A., King R. W. and Vilajosana I., GPS studies of active deformation in the Pyrenees, *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue 2, pages 913–921, August 2012.

Calais E., Nocquet J.-M., Tardy M., Current strain regime in the Western Alps from continuous Global Positioning System measurements, 1996–2001 // *Geology*. – 2002. – 30. – №7. – P. 651–654.

Müller B, Zoback M.L., Fuchs K., Mastin L., Gregersen S., Pavoni N., Stephansson O., Ljunggren C., Regional patterns of tectonic stress in Europe Regional patterns of tectonic stress in Europe, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Article first published online: 20 SEP 2012.

Serpelloni E., Faccenna C., Spada G., Dong D., Williams S., Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Volume 118, Issue 11, pages 6003–6024, November 2013.

Sibylle G., Hans-Ulrich W., Natural Hazards., Contributions to the Deformation Analysis in Germany Based on Precise and Continuous GPS Measurements, Volume 38, Issue 1-2, pp 177-197, May 2006.

Teferle F.N., Bingley R.M., Orliac E.J., Williams S.D.P., Woodworth P.L., McLaughlin D., Baker T.F., Shennan I., Milne G.A., Bradley S.L. and Hansen D.N., Crustal motions in Great Britain: evidence from continuous GPS, absolute gravity and Holocene sea level data., *Geophysical Journal International*, c 178, Issue 1, pages 23–46, July 2009.

Zhao S, Lambeck K, Lidberg M., Lithosphere thickness and mantle viscosity inverted from GPS-derived deformation rates in Fennoscandia. *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue 1, pages 278–292, July 2012.

К.Р. ТРЕТЯК¹, А.И. ВОВК^{2*}

¹Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет «Львовська политехника», ул. С. Бандеры 12, Львов, Украина, 79013

^{2*}Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет «Львовська политехника», ул. С. Бандеры 12, Львов, Украина, 79013, ел. почта vovk.andriy@outlook.com

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЕВРОПЫ ПО ДАННЫМ ГНСС - НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ СВЯЗЬ С ТЕКТОНИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ

Цель. Целью данного исследования установлено: вычисление параметров горизонтальной деформации земной коры Европы на основе ежегодных векторов скоростей горизонтального смещения перманентных ГНСС-станций, рассчитанных по данным спутниковых ГНСС-наблюдений на протяжении 2000–2010 годов, исследования распределения и изменений горизонтальных деформаций и изменений земной коры Европы за период с 2000 по 2010 год и установление их взаимосвязи с тектоническим строением и проявлением сейсмической активности данного региона. **Методика.** Для исследования деформационных параметров земной коры были использованы ранее вычисленные ежегодные векторы скоростей горизонтального смещения перманентных станций Европы, полученных по результатам ГНСС-наблюдений за период с 2000 по 2010 годы. Для исследования параметров горизонтальной деформации земной коры территория Европы, используя триангуляцию Делоне, была разбита на сети треугольников с вершинами в перманентных ГНСС-станциях. Получив сети треугольников перманентных ГНСС-станций, с помощью линейной интерполяции в пределах каждого треугольника по трем его вершинам вычисляем параметры деформации для точек относительно каждого треугольника сети, так, чтобы для каждого набора точек в каждом треугольнике были свои вычисленные параметры горизонтальной деформации земной коры. **Результаты.** Результатами данного исследования являются: построены схемы распределения территории Европы в сети треугольников перманентных ГНСС-станций; вычисленные параметры горизонтальной деформации земной коры для каждого треугольника в каждой сети треугольников перманентных ГНСС-станций Европы за всё время исследования (2000–2010); построены карты-схемы ежегодного распределения скоростей дилатации земной коры Европы в период с 2000 по 2010 год; установлены места проявления экстремальных значений скоростей дилатации земной коры Европы в каждом году периода исследования; построена карта-схема проявления экстремальных значений скоростей дилатации земной коры (сжатия и растяжения) Европы за все время исследования; построены карты-схемы проявления максимальных и минимальных значений общего смещения земной коры γ и максимального и минимального значений минимальной и максимальной осей деформации земной коры Европы (E1 и E2) за период с 2000 по 2010 год; проведен анализ полученных карт-схем на установление взаимосвязи с тектоническим строением Европы. **Научная новизна.** Анализируя построенные в результате исследования карты-схемы, установлено: места проявления экстремальных значений скоростей дилатации земной коры Европы в каждом году периода исследования; их связь с основными тектоническими разломами, геологическими зонами и местами повышенной сейсмической активности на территории Европы и их проявление в местах с малой толщиной земной коры на протяжении всего исследуемого периода с 2000 по 2010 год; минимальные значения общего смещения земной коры γ (менее $0,2 \cdot 10^{-8} \text{ 1/год}$), сосредоточены на территории Большой европейской равнины в то время, когда максимальные значения (более $20,0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/год}$) проявляются на территории таких основных геологических зон, как: Динариды, Апеннины, Пиренеи, Иберийский массив, Альпийско-Гималайский и Средиземноморский пояс; места проявления значительных (более $10 \cdot 10^{-8} \text{ 1/год}$) максимальных значений минимальной и максимальной осей деформации земной коры (E1 и E2), сосредоточены на территории тех же основных геологических зон, на которых сосредоточены проявления максимальных значений общего смещения земной коры γ , на территории Великой европейской равнины таких мест проявлений или нет или их значения незначительны ($-0,1 - 0,9 \cdot 10^{-8} \text{ 1/год}$). Полученные в ходе исследования параметры горизонтальной деформации земной коры Европы и построены карты-схемы свидетельствуют о значительных деформационных процессах исследуемого региона, которые связаны как с основными геологическими разломами и зонами, так и с проявлением сейсмической активности на территории Европы на протяжении всего периода исследования (2000–2010). Сами же экстремальные деформационные процессы в определенных ареалах достаточно хорошо отражают проявление тектонического строения территории Европы. **Практическая значимость.** Рассчитаны параметры горизонтальной деформации земной коры Европы в период с 2000 по 2010 год и построены за ними карты-схемы проявления этих параметров; выявлена связь горизонтальной деформации земной коры с тектоническим строением Европы и проявлением сейсмической активности в данном регионе послужит для дальнейшего углубленного исследования территории Европы в целом, а при необходимости ее отдельных частей. Предложенная методика может быть использована для аналогичного исследования других регионов мира.

Ключевые слова: ГНСС, ГНСС-наблюдения, горизонтальная деформация, землетрясения, земная кора, параметры деформации, перманентные станции, сейсмичность.

K.R. TRETIAK¹, A.I. VOVK^{2*}

¹Department «Higher geodesy and astronomy» of National university Lviv polytechnic, 12 Bandera street, Lviv, Ukraine, 79013

^{2*}Department «Higher geodesy and astronomy» of National university Lviv polytechnic, 12 Bandera street, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail vovk.andriy@outlook.com

RESULTS OF DETERMINATION OF HORIZONTAL DEFORMATIONS OF THE EARTH'S CRUST OF EUROPE ACCORDING TO THE DATA OF GNSS - OBSERVATIONS AND THEIR RELATION WITH THE TECTONIC STRUCTURE

The aim. The aims of this study were: to calculate the parameters of horizontal deformation of Earth's crust of Europe on the basis of annual velocity vectors of the horizontal displacement of permanent GNSS - stations, calculated according to the GNSS - observations during 2000 – 2010; to study the distribution and changes of horizontal deformations and earth's crust in Europe changes from 2000 to 2010 and to establish their relationship with the tectonic structure and the manifestation of seismic activity in the actual region. **Methods.** Previously calculated annual horizontal displacement velocity vectors of permanent stations in Europe have been used to study the deformation parameters of the crust. Using Delaunay triangulation, the territory of Europe was divided into a network of triangles with vertices in permanent GNSS - stations. for permanent GNSS network of triangles - stations, using linear interpolation within each triangle by its three vertices calculates deformations for points relative to each triangle network, so that for each set of points in each triangle there was provided with its calculated parameters of horizontal crustal deformation. **The results.** The results of this study are: schemes of distribution of Europe territory into networks of triangles of permanent GNSS - stations were constructed; parameters of horizontal deformation of earth crust for each triangle in each network of triangles of permanent GNSS - stations of Europe for the entire study period (2000 - 2010) were calculated; schemes of annual distribution velocity dilatation of the earth's crust of Europe from 2000 to 2010 were built; places of the manifestation of the extreme values of dilatation's velocities of the earth's crust of Europe in each year of the study period were established; scheme of the manifestation of the extreme values of dilatation's velocities of the earth's crust of Europe (compression and tension) for all period of study was constructed; schemes of the manifestation of maximum and minimum values of the total earth crustal shear γ and maximum and minimum values of the minimum and maximum axis of the earth's crust of Europe deformation (E_1 and E_2) for the period from 2000 to 2010 were built; analysis of the obtained schemes to establish a relationship with the tectonic structure of Europe was done. **The science novelty.** Analyzing schemes, built as study result, it was established: places of the manifestation of extreme values of dilatation's velocities of the earth's crust of Europe in each year of study period; relationship between the expression of extreme values of velocity crust dilatation in Europe and major tectonic faults and geological zones, their display in locations with low thickness of the crust (below 25 km), and the relationship of these manifestations of the extreme values of the high places seismic activity in Europe during all period of studied (2000 – 2010); minimum values of the total displacement of the crust γ (less than $0,2 \cdot 10^{-8} \text{ 1/year}$) are concentrated in the Great European Plains while the maximum value of the total crustal shear γ (more than $20,0 \cdot 10^{-8} \text{ 1/year}$) are shown in the following main geological zones, as Dinaridy, Appennins, Pyrenees, Iberian massif, Alpine-Himalayan folded belt and the Mediterranean belt; manifestations of large (over $10 \cdot 10^{-8} \text{ 1/year}$) the maximum values the minimum and maximum axis crust deformation (E_1 and E_2) concentrated in areas the same major geological zones where are concentrated maximum values of total crust shear γ , in the Great European Plain the manifestations of maximum value of the minimum and maximum axis crustal deformation in Europe (E_1 and E_2) are small (from $-0,1 \cdot 10^{-8} \text{ 1/year}$ to $-0,9 \cdot 10^{-8} \text{ 1/year}$) or absent. Calculated parameters of horizontal crustal deformation in Europe and built by these parameters schemes prove significant deformation processes in studied region which connected with the major geological faults and zones and the manifestation of seismic activity in Europe during the whole study period (2000 – 2010). Extreme deformation processes in certain areas quite well reflect the tectonic structure of expression in Europe. **Practical significance.** Parameters of horizontal crust deformation in Europe from 2000 to 2010 were calculated and the schemes of manifestation of these parameters were built. It was detected the relation between these parameters of horizontal crustal deformation with the tectonic structure of Europe and the manifestation of seismic activity in this region will help for further in-depth research in Europe in general or its separate parts. The proposed method can be used for similar studies of other geodynamic active regions.

Keywords: crust deformation, earthquakes, GNSS, GNSS observations, horizontal deformation, permanent stations, seismicity.

REFERENCES

- Esikov N. P. *Tektonofizicheskie aspekty analiza sovremennyh dvizhenij zemnoj poverhnosti*. [Tectonophysical aspects of the analysis of contemporary movements of the earth surface]. Novosibirsk: Izd. «Nauka» [Science] Sibirskoe otdelenie, 1979.
- Izotov A.A. and other *Geodezicheskie metody izuchenija deformacij zemnoj kory na geodinamicheskikh poligonah* (metodicheskoe rukovodstvo) [Geodetic methods for studying crustal deformation on the geodynamic polygons (guidance)]. Moskva: CNIIGAiK, 1985.
- Serant O.V., Avtoreferat, D217.9(4)b, Deformaciji zemnoji kory Jevropy za danymy GPS-vymiriv i jikh vzajemozv'jazok z sejsmichnoju aktyvnistju: avtoref. dys., k.t.n: 05.24.01.[Would crustal deformation in Europe according to the GPS-measurements and their correlation with seismic activity]: Abstract, D217.9 (4). Thesis Lviv: B.v., 2012. 21 p.
- Tretjak K.R., Vovk A.I. *Doslidzhennja dynamiky ghorizontaljnykh rukhiv zemnoji kory Jevropy za danymy GNSS sposterezhenj (2000 – 2010)* [Study of dynamics of horizontal crustal movements in Europe according to GNSS observation (2000–2010)]. Naukovyj zhurnal «Gheodynamika» [Scientific journal «*Geodynamics*»]. Vypusk 2(13)/2012, pp. 5–17.
- Argus D.F., Heflin M.B., Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters* 22: doi: 10.1029/95GL02006.
- Asensio E., Khazaradze G., Echeverria A., King R. W. and I. Vilajosana., GPS studies of active deformation in the Pyrenees, *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue 2, pp. 913–921, August 2012.
- Calais E., Nocquet J.-M., Tardy M., Current strain regime in the Western Alps from continuous Global Positioning System measurements, 1996-2001, *Geology*, 2002, 30, no.7, pp. 651–654.
- Müller B, Zoback M.L., Fuchs K., Mastin L., Gregersen S., Pavoni N., Stephansson O., Ljunggren C., Regional patterns of tectonic stress in Europe Regional patterns of tectonic stress in Europe, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Article first published online: 20 SEP 2012.
- Serpelloni E., Faccenna C., Spada G., Dong D., Williams S., Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Volume 118, Issue 11, pp. 6003–6024, November 2013.
- Sibylle G., Hans-Ulrich W., Contributions to the Deformation Analysis in Germany Based on Precise and Continuous GPS Measurements, *Natural Hazards*, Volume 38, Issue 1-2, pp 177–197, May 2006.
- Teferle F.N., Bingley R.M., Orliac E.J., Williams S.D.P., Woodworth P.L., McLaughlin D., Baker T.F., Shennan I., Milne G.A., Bradley S.L. and Hansen D.N., Crustal motions in Great Britain: evidence from continuous GPS, absolute gravity and Holocene sea level data., *Geophysical Journal International*, Volume 178, Issue 1, pp. 23–46, July 2009.
- Zhao S, Lambeck K, Lidberg M., Lithosphere thickness and mantle viscosity inverted from GPS-derived deformation rates in Fennoscandia. *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue 1, pp. 278–292, July 2012.

Надійшла 7.05.2014 р.