

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ ЄВРОПИ ЗА ДАНИМИ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ (2000–2010 рр.)

Основна мета роботи – дослідження динаміки рухів земної кори Європи за період 2000–2010 рр. Визначено абсолютні та регіональні річні вектори швидкостей зміщень перманентних станцій і побудовано карти-схеми річних векторів швидкостей горизонтальних зміщень, виділено умовні блоки земної кори (УБЗК), в межах яких спостерігається стала кінематика горизонтальних зміщень перманентних станцій. Визначено середню річну швидкість та напрям руху цих блоків. Отримані результати надалі будуть використані для вивчення деформації земної кори досліджуваного регіону.

Ключові слова: Global Navigation Satellite System (GNSS); Global Positioning System (GPS); деформація; горизонтальна деформація; перманентна станція; умовний блок земної кори (УБЗК).

Вступ

Завдяки швидкому розвитку науково-технічного прогресу, впровадженню різноманітних новітніх супутникових систем та методів спостережень під час дослідження деформації земної кори уже не виникає великих труднощів.

Одну з перших класифікацій тектонічних рухів розробили американський геолог Г.К. Гілберт (1890 р.) і німецьк Г. Штілле (1913 р.). Вона передбачала їх поділ на епейрогенічні – повільні підняття і опускання земної кори (ті, які створюють континенти) й орогенічні – стискання шарів до складок, утворення розривів (ті, які створюють гори).

Динаміка літосфери, одне з найважливіших питань геодинаміки, була впродовж багатьох років предметом геологічних і геофізичних досліджень, основаних на різних підходах, іноді взаємовиключних. У міру нагромадження даних у різний час переважали різні концепції про походження сучасної конфігурації земної поверхні, історію її розвитку та про рушійні сили її еволюції. Спочатку більша частина даних була отримана геологічними методами, що різняться за ступенем детальності та масштабами охопленої частини земної поверхні [Терещук, 2009].

До перших спостережень, що викликали широкі дискусії про можливі глобальні горизонтальні переміщення літосферних плит, належать виявлені смугові магнітні аномалії, що простягаються уздовж серединних океанічних хребтів, які в тектоніці плит пояснюються розсовуванням (спредингом) дна океанів і періодичними змінами орієнтації глобального магнітного поля [Гатинський, Рундквист, 2004]. Приблизно в той самий час сейсмологія зробила свій внесок у розуміння динаміки літосфери на основі такої інформації, як глобальний розподіл сейсмічних поясів, фокальні механізми землетрусів у трансформних розломах, азимути векторів зсувів по розривах під час землетрусів у зонах субдукції.

Вивчення сучасних рухів і деформацій, що відбуваються в земній корі, вимагає проведення в моніторинговому режимі високоточних геодезичних вимірів зміщень реперів мережі спеціально обладнаних спостережних станцій – геодинамічних полігонів. Жорсткі вимоги до виконання таких геодезичних робіт – великі території, охоплені вимірами, високий рівень точності визначення величин зміщень і деформацій, короткі періоди між серіями інструментальних вимірів – визначають загалом необхідність використання під час проведення досліджень сучасного високоточного та оперативного обладнання, що ґрунтується на супутникових технологіях.

Постійно згущуються мережі перманентних станцій IGS (International GNSS Service) та EPN (EUREF Permanent Network), їхні координати ретельно визначають, уточнюють та проводиться їх безперервний моніторинг. Мережі обслуговуються центрами опрацювання даних.

З початком використання новітніх супутникових методів та GNSS систем значно спростилася процедура визначення параметрів деформації земної кори та підвищилась їх точність.

Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Дослідження деформації земної кори має вагомe значення для вивчення сейсмічності та її прогнозу у часі. Адже прогноз сейсмічної активності та визначення провісників землетрусів дасть змогу уникнути як людських, так і матеріальних втрат. Оскільки деформація земної поверхні тісно пов'язана з землетрусами, то якісний її моніторинг має велике значення для економіки. Інформація про рухи земної кори використовується під час проектування великих гідротехнічних споруд: дамб, ГЕС, портів тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених вирішенню цієї проблеми

Дослідження деформацій земної кори, як горизонтальних, так і вертикальних, проводиться на

усіх континентах з використанням різних геодезичних методів: нівелювання, високоточного нівелювання, вимірювання горизонтальних ліній світловіддалемірами, повторного GPS-вимірювання координат чи безпосередньо за допомогою безперервного GNSS-моніторингу. Результати таких досліджень формують у великі бази даних [The Scripps...; The Nevada...], які забезпечують дослідників матеріалом для їх подальшого опрацювання.

Нині уже немає сумнівів, що горизонтальний рух літосферних плит відбувається за рахунок мантийних теплогравітаційних течій – конвекції. Джерелом енергії для цих течій є різниця температур глибинних областей Землі, де вони дуже високі, і температури земної кори. Нагріті в центральних зонах Землі породи розширюються, густина їх зменшується, і вони спливають, поступаючи місцем більш холодним і тому важчим масам, які вже віддали частину тепла земній корі. Цей процес перенесення тепла безперервний, в результаті чого виникають конвективні потоки. Ці потоки – течії замикаються самі на себе і утворюють стійкі конвективні комірки, потоки в яких узгоджуються з напрямками потоків у сусідніх комірках. При цьому у верхній частині комірки рух речовини відбувається майже у горизонтальній площині, і саме ця частина течії захоплює плити в горизонтальному напрямку з велетенською силою за рахунок величезної в'язкості мантийної речовини.

Горизонтальні рухи визначались методом повторних триангуляцій. Вони виявлені після великих землетрусів, причому амплітуда одноразових зміщень досягає кількох метрів (21 м, Аляскінський землетрус, 1964 р. [Сучасні...]).

Як правило, за величиною переміщень горизонтальні рухи перевищують вертикальні, крім цього, вони мають спрямований, а не коливальний характер. Так, за даними досліджень на Гармському полігоні на стику Паміру і Тянь-Шаню за останні 50 років горизонтальні зміщення Паміру в бік Тянь-Шаню відбувалися з середньою швидкістю близько 2 см/рік [Dang Ya-Min et al., 2002].

GNSS-системи використано також для вивчення постгляціальних рухів і деформацій земної кори. Зокрема, за проектом із вивчення рівня Балтійського моря проводились повторні GPS-спостереження (у 1993 і 1997 роках) з метою вивчення післяльодовикового підняття Фенноскандії. Попередні результати вказували, що швидкість підняття змінювалась від 1 до 11 мм/рік, а стандартна помилка становила 1–3 мм. Встановлено, що Балтійська плита рухається в північно-східному напрямку зі швидкістю 21 ± 1 мм/рік [Pan Ming, Sjoberg Lars E, 1999].

Геодезичний інститут у м. Хельсінкі, Фінляндія, провів огляд робіт з визначення горизонтальних і вертикальних рухів земної кори Фенноскан-

дії, виконаних у 90-ті роки. Значення швидкостей горизонтальних зміщень, отриманих у результаті опрацювання вимірів координат GPS-станцій, становлять 0,1–4,5 мм/рік [Kakkuri, Chen, 1996].

У 1992 р. країни Центральної Європи розпочали вивчення динаміки земної кори супутниковими методами. Програма CERGOP об'єднала 11 країн. До 1994 р. була побудована GPS-мережа, яка охоплювала територію від границі Євразійсько-Африканської плити на півдні до Східноєвропейської докембрійської платформи. Аналіз результатів показав, що точність визначення швидкості горизонтальних рухів – 2 мм/рік, а вертикальних – 5–6 мм/рік у кожній серії вимірювань [Grenerczy, Kenyeres, 2000].

GNSS-методи використовують також для визначення деформації земної поверхні в місцях будівництва великих інженерних споруд. З метою вибору оптимального місця для будівництва сховища відпрацьованого ядерного палива у Фінляндії було створено мережу з 10 геодезичних пунктів, на яких проводились періодичні спостереження з 1995 р. у весняні та осінні сезони. За опрацьованими даними швидкості вертикального підняття суші в регіоні становлять 1,9 мм/рік, що узгоджується з даними, отриманими на репері припливних станцій (3,2 мм/рік), і даними точного нівелювання (2,8 мм/рік) [Ahola, Finn, 2002].

Методи GPS-моніторингу також допомагають у визначенні постсейсмічних деформацій. Наприклад, у червні 2000 р. відбулися два сильні землетруси на південному заході Ісландії. Порівнюючи результати GPS-вимірів 1995, 1997 та 2000 років (2000 р. – після землетрусу), виявили великі (55 см) постсейсмічні переміщення поверхні в епіцентрі землетрусу [Amadttir et al., 2000].

Період експлуатації перманентних GPS-мереж триває вже майже 20 років і є порівняно коротким. Для вивчення регіональних геодинамічних процесів просторова неоднорідність та густина розташування перманентних GPS-станцій нині є недостатніми. Проте обчислювальні центри, які обслуговують мережі перманентних станцій, вже накопичили значний обсяг інформації, на основі якого можна достовірно визначати напрям та швидкості річних зміщень літосферних плит. Достовірність цих визначень підтверджена незалежними вимірами, які виконуються за допомогою лазерної локації ШСЗ, радіоінтерферометрії з наддовгою базою та системи DORIS.

Глобальний моніторинг земної кори засобами GPS здійснює міжнародна GPS-служба *International GPS Service* (IGS). До європейської мережі перманентних станцій EUREF Permanent Network (EPN) входить 27 операційних центрів, один з яких розміщений у Головній астрономічній обсерваторії НАНУ у Києві. На лютий 2013 року мережа EPN об'єднувала 245 перманентних GNSS-станцій.

Постановка завдання

Основна мета роботи полягає у дослідженні динаміки горизонтальних рухів земної кори Європи.

Найважливіші завдання роботи: на основі результатів спостережень перманентних GNSS-станцій – бази даних GNSS-вимірів SOPAC [The Scripps...] та бази даних NGL [The Nevada...] дослідити горизонтальні зміщення земної кори Європи за період 2000–2010 років. Визначити середні річні швидкості цих зміщень та їх напрям.

Виявити блоки з однотипними кінематичними характеристиками, обчислити їх кінематичні параметри. Зіставити границі цих блоків з основними тектонічними структурами.

Виклад основного матеріалу дослідження

Під час наших досліджень використано базу даних GNSS-вимірів SOPAC [The Scripps...] та базу даних Геодезичної лабораторії Невади (NGL) [The Nevada], а саме дані перманентних станцій, розташованих на території Європи.

Первинна наукова роль SOPAC полягає в тому, щоб забезпечувати високу точність геодезичних і геофізичних вимірювань за допомогою системи глобального позиціонування супутників (GPS), зокрема для вивчення землетрусів, тектонічних рухів плит, деформацій їх границь і метеорологічних процесів. Дослідження SOPAC також передбачають інтеграцію даних безперервного моніторингу GPS і Synthetic Aperture Radar (SAR) інтерферометрії [The Scripps...].

Геодезична лабораторія Невади (NGL) проводить дослідження в галузі космічної геодезії для вивчення наукових проблем, що мають регіональне і глобальне значення. За допомогою глобальної системи позиціонування (GPS) досліджується тектонічна і геотермальна активність в штаті Невада. NGL також використовує GPS для вивчення глобальних структур у поверхневому навантаженні мас і проблем глобального масштабу, пов'язаних з тектонічними плитами [The Nevada...].

Спостереження на станціях проводяться безперервно впродовж значних проміжків часу, що забезпечує високу точність отриманих результатів.

Для наших досліджень взято дані перманентних GNSS-станцій, спостереження на яких тривали більше від трьох років. З кожним роком кількість використаних у дослідженні станцій, на яких ведеться спостереження, зростає (рис. 1), що дає змогу охопити спостереженнями більшу площу та збільшити детальність досліджень (рис. 2).

Опрацювання результатів спостережень перманентних GNSS-станцій проводилось за допомогою програмного забезпечення Mathcad, алгоритм опрацювання даних представлено на рис. 3.

Результатами неперервних вимірів на перманентній станції впродовж тривалого періоду є часові серії біжучих значень її координат. Для прикладу, за результатами часових серій побудо-

вано графіки, які показують загальну величину зміщення перманентної станції в напрямку на північ V_B та на схід V_L за 1998–2012 рр. (рис. 4).

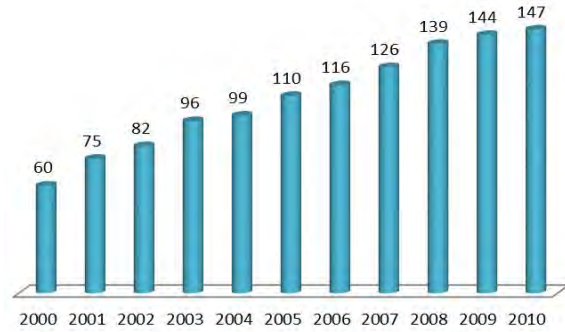


Рис. 1. Річна кількість перманентних GNSS-станцій, використаних у дослідженні

В результаті опрацювання часових серій для усіх GNSS-станцій (рис. 2) отримано вектори абсолютних швидкостей горизонтальних рухів та їх складові.

Величину горизонтального зміщення перманентної GNSS-станції за заданий період часу по широті та довготі обчислюємо так:

$$V_{B_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_i - B_0}{t_i - t_0} \quad (1)$$

$$V_{L_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{L_i - L_0}{t_i - t_0} \quad (2)$$

Середню квадратичну похибку вектора абсолютних швидкостей горизонтальних зміщень по V_B та V_L обчислюємо за виразами:

$$m_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{B_i - B_0}{t_i - t_0} - V_B \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$m_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i - L_0}{t_i - t_0} - V_L \right)^2}{n-1}} \quad (4)$$

Довжину вектора S знайдемо за формулою:

$$S = \sqrt{V_B^2 + V_L^2} \quad (5)$$

За формулою (6) визначаємо азимут вектора горизонтальних зміщень A :

$$A = \arctg \frac{V_B}{V_L} \quad (6)$$

Максимальні та мінімальні значення векторів абсолютних швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій по широті та довготі за 2000–2010 рр. наведено в табл. 1.

Для вивчення зміни в часі кінематичних характеристик досліджуваного регіону за складеними каталогами даних за допомогою програмного забезпечення Surfer побудовано карти-схеми абсолютних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій за кожен рік періоду спостереження (2000–2010 рр.). Як приклад наведено карту-схему абсолютних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій за 2000 р. (рис. 5).

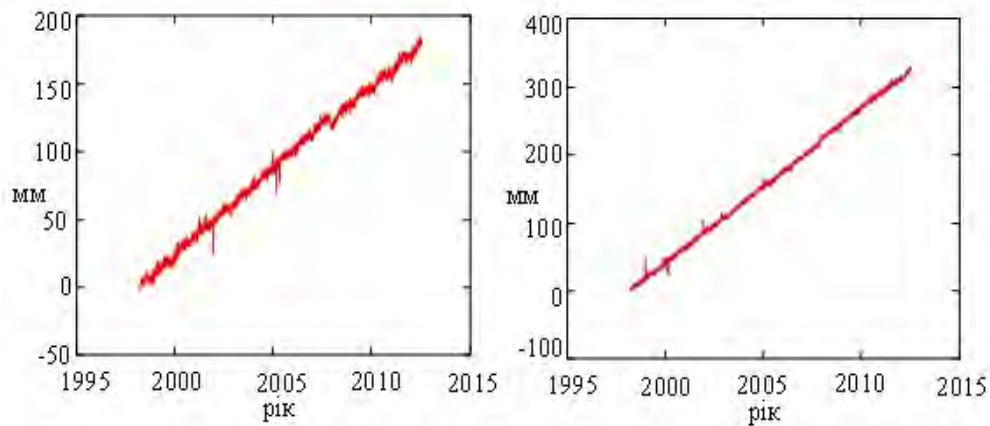


Рис. 4. Часовий ряд розрахованих компонент зміщень V_B та V_L перманентної GNSS-станції GLSV (за 1998–2012 рр.)

Таблиця 1

Максимальні та мінімальні значення векторів абсолютних швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій по широті та довготі, довжин вектора S та оцінка їх точності за 2000–2010 рр. на території Європи

роки	<i>min</i>						<i>max</i>					
	V_n	M_{VB}	V_e	M_{VL}	S	M_S	V_n	M_{VB}	V_e	M_{VL}	S	M_S
	мм/рік						мм/рік					
2000	1,2	1,5	0,6	0,5	10,0	0,9	29,4	4,8	35,9	1,5	35,9	1,5
2001	4,2	1,7	2,4	0,3	7,3	0,6	36,0	6,5	41,0	2,4	43,5	2,4
2002	1,1	1,7	0,5	0,2	13,1	0,8	29,8	12,7	29,7	3,7	36,2	12,7
2003	-2,5	1,2	5,2	0,4	7,9	0,6	25,1	1,5	28,4	1,6	30,0	1,7
2004	6,9	3,9	2,4	0,3	11,6	0,8	22,9	1,9	42,1	4,8	43,2	4,8
2005	-15,1	1,0	1,0	0,3	9,2	1,2	25	3,0	41,3	3,0	48,3	3,0
2006	-13,7	1,0	4,6	0,5	11,5	1,1	28,0	1,9	28,0	1,0	35,5	1,0
2007	-14,7	1,0	2,6	0,3	8,9	0,7	25	3,0	42,7	2,5	48,3	3,0
2008	-14,4	0,9	-0,5	0,4	11,6	0,9	25,4	2,7	44,8	2,9	50,6	2,9
2009	-16,3	1,1	7,5	0,5	8,9	0,6	24,1	4,3	34,0	2,2	37,4	2,2
2010	-19,9	1,6	-16,1	1,5	7,9	0,6	28,3	2,0	28,5	1,4	36,2	2,1

Представлені вектори абсолютних швидкостей горизонтальних зміщень ускладнюють розгляд кінематичних процесів, бо їх величини і напрями мало відрізняються між собою. Для регіонального аналізу ми виключаємо систематичну складову усіх векторів i , отже, переходимо до регіональних швидкостей горизонтальних зміщень.

Перехід від абсолютних значень швидкостей горизонтальних зміщень $V_{B_i}^{abc}$ та $V_{L_i}^{abc}$ до регіональних $V_{B_i}^{pez}$ та $V_{L_i}^{pez}$ здійснюємо, використавши вирази:

$$V_{B_i}^{pez} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{B_i}^{abc}}{n} - V_{B_i}^{abc}, \quad (7)$$

$$V_{L_i}^{pez} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{L_i}^{abc}}{n} - V_{L_i}^{abc}, \quad (8)$$

де $V_{B_i}^{abc}, V_{L_i}^{abc}$ – абсолютна складова вектора швидкості руху i -ї перманентної станції по широті та

довготі; $\sum_{i=1}^n V_{B_i}^{abc}, \sum_{i=1}^n V_{L_i}^{abc}$ – сума значень $V_{B_i}^{abc},$

$V_{L_i}^{abc}$ на усіх перманентних станціях; n – кількість перманентних станцій. В результаті обчислень отримано значення швидкостей горизонтальних зміщень $V_{B_{рег}}, V_{L_{рег}}$ та їх складові на кожен рік періоду спостереження.

Максимальні та мінімальні значення векторів регіональних швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій по широті та довготі за 2000–2010 рр. подано в табл. 2. За цими даними були побудовані карти-схеми регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій на кожен рік періоду спостереження.

На рис. 6–16 наведено карти-схеми регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій за період з 2000 до 2010 р.

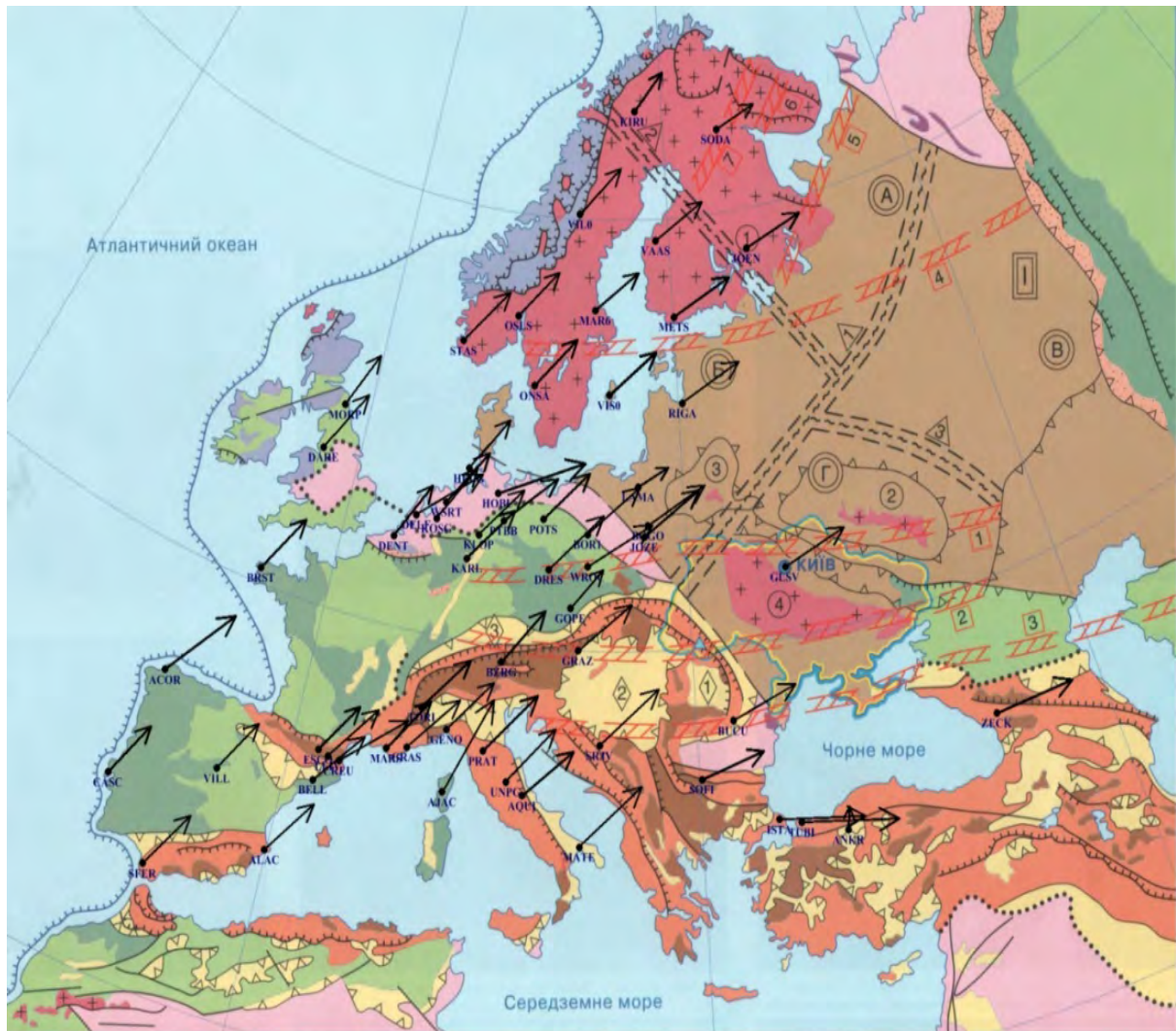


Рис. 5. Карта-схема абсолютних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи за 2000 р.

Таблиця 2

Максимальні та мінімальні значення векторів регіональних швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій по широті та довготі, довжин вектора S та оцінка їх точності за 2000–2010 рр. на території Європи

роки	<i>min</i>						<i>max</i>					
	V_B	M_{VB}	V_L	M_{VL}	S	M_S	V_B	M_{VB}	V_L	M_{VL}	S	M_S
	mm/рік						mm/рік					
2000	-13,2	1,2	-19,1	0,5	0,5	1,5	15,0	4,8	16,2	1,5	20,9	1,5
2001	-11,1	1,7	-18,1	0,3	0,6	1,4	20,7	6,5	20,5	2,4	20,8	2,4
2002	0,1	1,7	-19,8	0,2	1	1,5	2,1	1,7	9,4	3,0	19,9	0,8
2003	-16,7	0,6	-14,8	0,4	0,2	0,9	10,9	1,0	8,4	1,7	19,1	1,5
2004	-9,9	2,2	-17,0	0,3	0,7	1,4	6,1	1,3	22,7	4,5	23,7	4,8
2005	-29,0	0,9	-18,5	0,3	0,4	1,3	11,1	2,9	21,8	0,7	31,7	1,0
2006	-28,7	0,8	-14,1	0,5	0,1	1,4	13,0	1,7	9,3	0,4	30,6	1,0
2007	-28,8	0,8	-16,9	0,3	0,2	1,4	10,9	2,9	23,2	2,5	31,1	1,0
2008	-28,9	0,8	-20,0	0,4	0,2	1,3	10,9	2,1	25,3	2,6	32,1	0,9
2009	-29,3	0,9	-12,5	0,5	0,2	1,3	11,1	3,2	14,0	2,0	31,9	1,1
2010	-34,3	1,2	-35,3	1,5	0,3	1,3	13,9	1,8	9,3	1,7	38,2	1,5

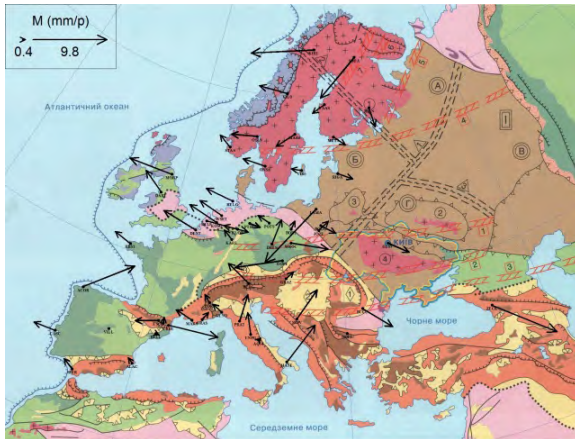


Рис. 6. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2000 р.

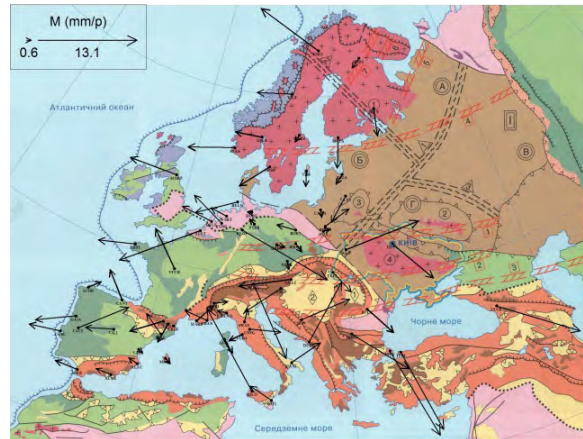


Рис. 7. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2001 р.

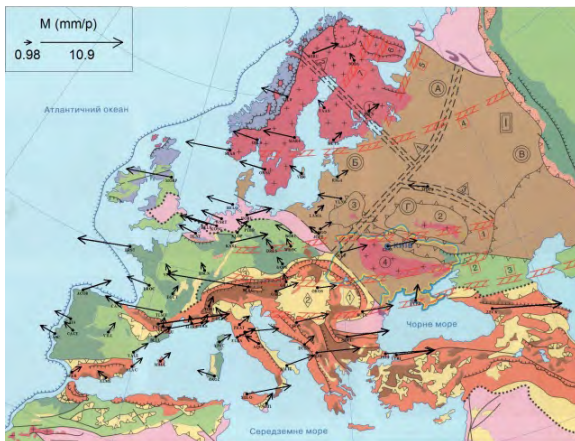


Рис. 8. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2002 р.

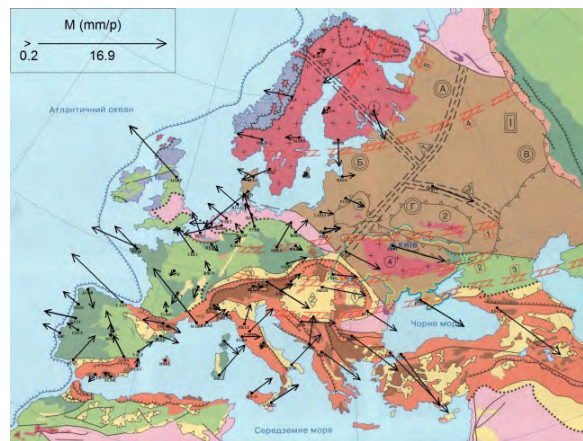


Рис. 9. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2003 р.

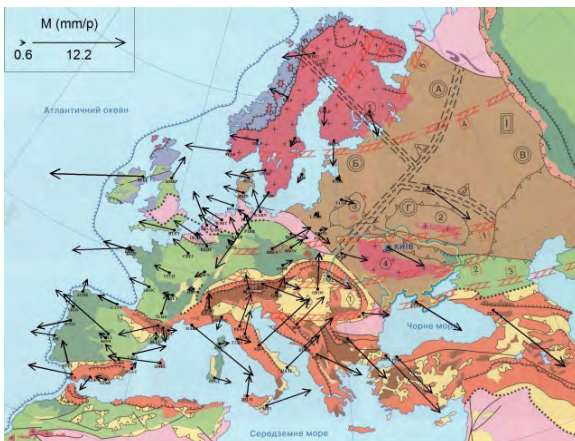


Рис. 10. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2004 р.

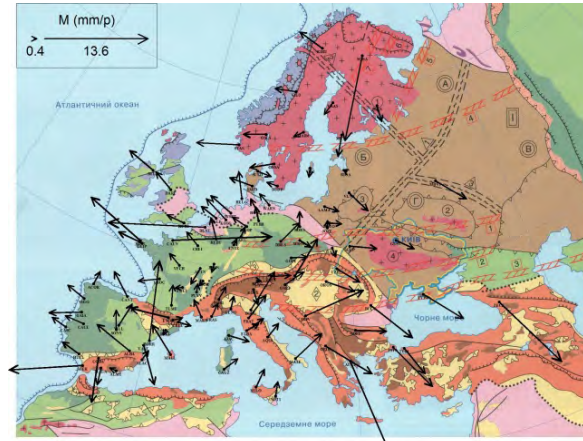


Рис. 11. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2005 р.

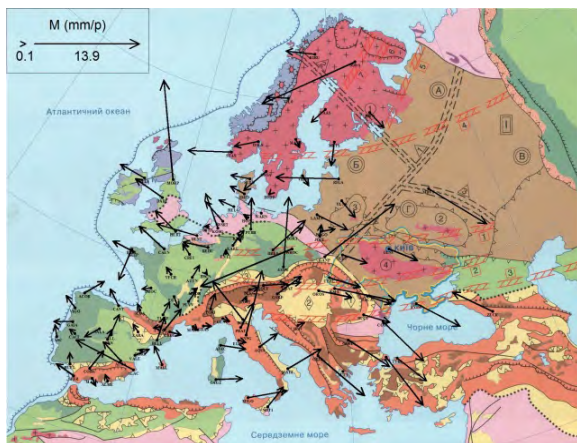


Рис. 12. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2006 р.

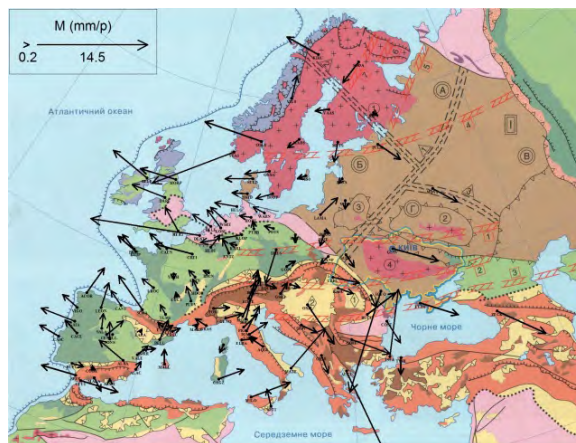


Рис. 13. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2007 р.

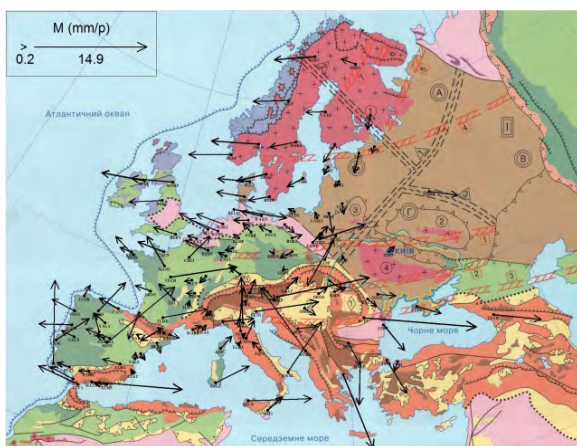


Рис. 14. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2008 р.

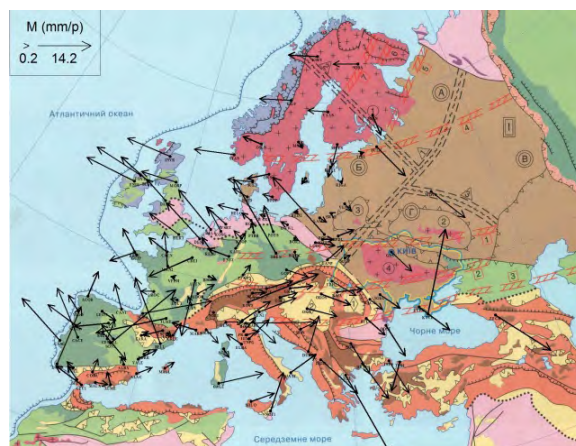


Рис. 15. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій й на території Європи у 2009 р.

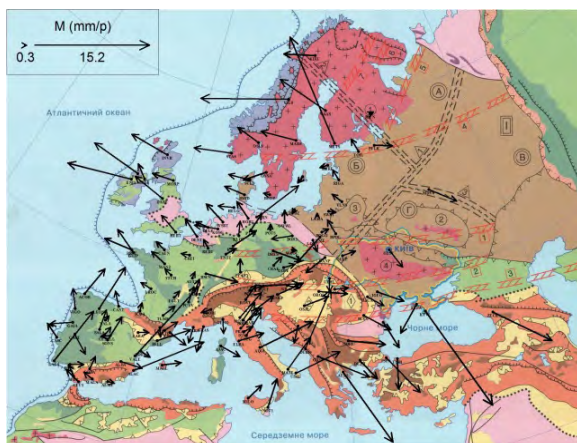
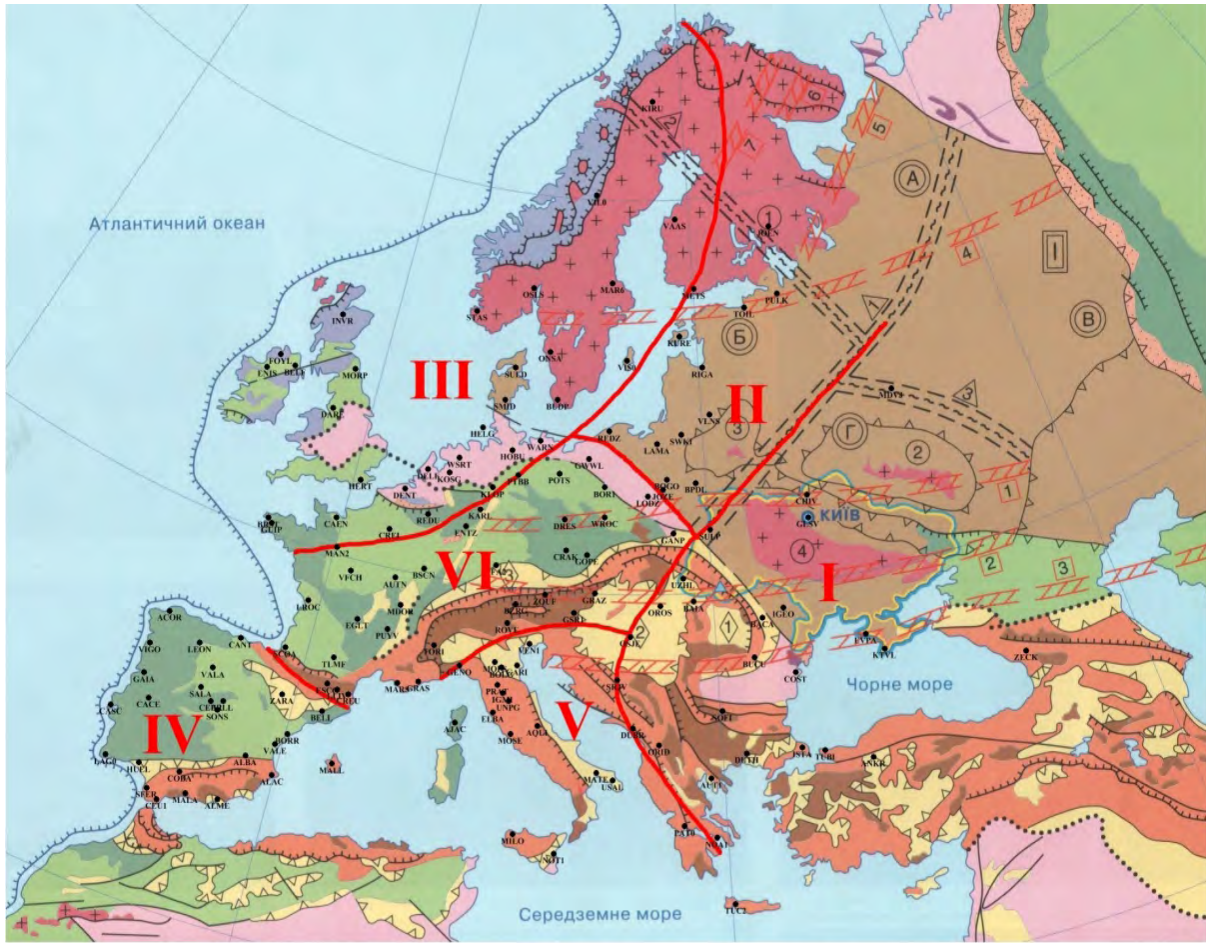


Рис. 16. Карта-схема регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень перманентних GNSS-станцій на території Європи у 2010 р.

Аналізуючи наведені карти-схеми з метою узагальнення отриманих результатів на території Європи, візуально ми виділили шість умовних блоків земної кори (УБЗК) (рис. 17). Такий поділ ми зробили тому, що кінематичні характеристики перманентних GNSS-станцій у межах цих територій загалом збігаються.

Для того, щоб підтвердити сталі кінематичні характеристики виділених умовних блоків земної кори, проведено такі дослідження. Обчислено в межах кожного УБЗК середні значення зміщення вектора швидкості руху перманентних GNSS-станцій по широті та довготі ($V_{\text{всер}}$, $V_{\text{Lсер}}$) та середні значення довжини вектора $S_{\text{сер}}$ й азимута вектора горизонтальних зміщень $A_{\text{сер}}$, а також за наведеними нижче виразами обчислено величину середньоквадратичного відхилення ($\Delta V_{\text{в}}$, ΔV_{L} , ΔV_{S} , ΔA) для цих станцій від середніх значень у межах відповідних УБЗК.



— межа умовного блоку земної кори IV номер умовного блоку земної кори

Рис. 17. Схема поділу території Європи на умовні блоки земної кори

$$\Delta V_{B_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{B_{сеп}} - V_{B_i})^2}{n-1}} \quad (9)$$

$$\Delta V_{L_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{L_{сеп}} - V_{L_i})^2}{n-1}} \quad (10)$$

$$\Delta V_{S_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{S_{сеп}} - V_{S_i})^2}{n-1}} \quad (11)$$

$$\Delta A_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{сеп} - A_i)^2}{n-1}} \quad (12)$$

Результати обчислень узагальнених параметрів регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій шести виділених УБЗК за весь період спостережень (2002–2010 рр.) представлено в табл. 3–8.

Перший УБЗК за період спостережень зазнає прямолінійного руху в загальному по азимуту 118° з середньою лінійною швидкістю 5,4 мм/рік, річне середньоквадратичне відхилення по азимуту в межах від 5° до 25° , а величина річного середньоквадратичного відхилення від значення довжини вектора S становить 2,3 мм/рік.

Другий УБЗК за період спостережень зазнає поступового обертового руху по азимуту від 54° до 266° з середньою лінійною швидкістю 1,4 мм/рік, річне середньоквадратичне відхилення

по азимуту в межах від 6° до 61° , а величина річного середньоквадратичного відхилення від значення довжини вектора S становить 0,9 мм/рік.

Третій УБЗК за період спостережень зазнає прямолінійного руху в загальному по азимуту 298° з середньою лінійною швидкістю 3,2 мм/рік, річне середньоквадратичне відхилення по азимуту в межах від 18° до 31° , а величина річного середньоквадратичного відхилення від значення довжини вектора S становить 1,6 мм/рік

Четвертий УБЗК за період спостережень зазнає прямолінійного руху в загальному по азимуту 245° з середньою лінійною швидкістю 2,4 мм/рік, річне середньоквадратичне відхилення по азимуту в межах від 9° до 56° , а величина річного середньоквадратичного відхилення від значення довжини вектора S становить 1,6 мм/рік.

П'ятий УБЗК за період спостережень зазнає прямолінійного руху по азимуту 51° з середньою лінійною швидкістю 3,0 мм/рік, річне середньоквадратичне відхилення по азимуту в межах від 17° до 27° , а величина річного середньоквадратичного відхилення від значення довжини вектора S становить 1,5 мм/рік.

Шостий УБЗК за період спостережень зазнає криволінійного руху з середньою лінійною швидкістю 2,5 мм/рік, річне середньоквадратичне від-

хилення по азимуту в межах від 5^0 до 53^0 , а величина річного середньоквадратичного відхилення від значення довжини вектора S становить 1,9 мм/рік.

Отримані результати свідчать, що виділені нами на території Європи УБЗК з року в рік мають свої практично сталі кінематичні характеристики.

Річні рухи виділених на території Європи УБЗК за 2002–2010 рр. наведено на рис. 18.

На підставі порівняльного аналізу виділених нами на території Європи УБЗК з тектонічною картою Європи [Атлас..., 2001] можна стверджувати, що межі цих блоків збігаються з тектонічними структурами земної кори (рис. 18). Зокрема: границя

першого та другого УБЗК проходить по Волинсько-Двінській міжгеоблоковій рухомій зоні, границею другого та третього УБЗК є границя Східноєвропейської платформи та Балтійського щита, границя другого та шостого УБЗК проходить по зоні Тейсейре–Торнквіста, границею п'ятого та шостого УБЗК є Альпійсько-Гімалайський складчастий пояс, четвертий УБЗК розміщений на Західноєвропейській плиті й охоплює Піренейський півострів, границею цього блока є Піреней.

Отже, можна стверджувати, що виділені на території Європи УБЗК безпосередньо зв'язані з тектонічними структурами Європи.

Таблиця 3

Основні параметри регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій у межах I УБЗК

Рік	$V_{B(сep)}$, мм/рік	ΔV_B , мм/рік	$V_{L(сep)}$, мм/рік	ΔV_L , мм/рік	$S_{(сep)}$, мм/рік	ΔS , мм/рік	$A_{(сep)}$, град	ΔA , град
2002	0,8	0,3	4,4	1,3	4,5	1,2	79	5
2003	-3,9	2,2	5,9	1,3	7,1	2,1	122	13
2004	-4,0	2,3	5,5	1,9	6,8	2,7	124	10
2005	-3,4	2,1	5,0	1,8	5,6	2,6	125	10
2006	-2,8	1,9	5,0	1,6	5,7	2,0	117	13
2007	-2,1	1,3	3,8	1,8	4,3	1,8	120	18
2008	-1,7	1,6	3,0	1,6	3,5	1,5	120	25
2009	-3,4	2,2	3,7	1,5	5,0	2,4	131	13
2010	-4,0	3,6	4,3	2,4	5,8	4,1	129	16
<i>сep.</i>	-2,7	1,9	4,5	1,7	5,4	2,3	118	14

Таблиця 4

Основні параметри регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій у межах II УБЗК

Рік	$V_{B(сep)}$, мм/рік	ΔV_B , мм/рік	$V_{L(сep)}$, мм/рік	ΔV_L , мм/рік	$S_{(сep)}$, мм/рік	ΔS , мм/рік	$A_{(сep)}$, град	ΔA , град
2002	0,9	0,1	1,2	0,2	1,5	0,1	54	6
2003	0,0	0,7	1,8	0,6	1,8	0,6	86	19
2004	-1,6	1,3	0,7	0,7	1,8	1,1	149	28
2005	-1,4	1,2	1,1	1,3	1,8	1,0	143	45
2006	-1,4	1,2	1,2	1,5	1,8	1,5	151	47
2007	-1,0	0,7	-0,9	0,6	1,3	0,6	220	29
2008	-0,9	1,1	-0,6	0,6	1,1	0,9	228	50
2009	-0,5	1,1	-0,5	0,5	0,7	0,9	234	56
2010	0,2	1,2	-0,9	0,9	1,0	0,9	266	61
<i>сep.</i>	-0,6	0,9	0,4	0,8	1,4	0,9	170	38

Таблиця 5

Основні параметри регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій у межах III УБЗК

Рік	$V_{B(сep)}$, мм/рік	ΔV_B , мм/рік	$V_{L(сep)}$, мм/рік	ΔV_L , мм/рік	$S_{(сep)}$, мм/рік	ΔS , мм/рік	$A_{(сep)}$, град	ΔA , град
2002	1,0	0,1	-2,7	1,9	2,9	1,7	300	20
2003	1,8	1,3	-2,4	1,3	2,9	1,3	307	24
2004	1,2	1,1	-2,8	1,7	3,0	1,5	300	24
2005	1,6	1,0	-2,2	1,2	2,7	1,0	307	26
2006	1,1	1,5	-2,6	1,4	2,9	2,6	294	26
2007	1,3	1,2	-2,7	1,5	3,0	1,3	298	31
2008	0,6	1,1	-3,5	1,4	3,5	1,3	280	18
2009	1,8	1,5	-3,5	1,8	3,5	1,7	299	22
2010	1,7	1,2	-3,6	2,5	3,9	2,4	298	19
<i>сep.</i>	1,3	1,1	-2,9	1,6	3,2	1,6	298	23

Таблиця 6

Основні параметри регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій у межах IV УБЗК

Рік	$V_{B(сеп)}$, мм/рік	ΔV_B , мм/рік	$V_{L(сеп)}$, мм/рік	ΔV_L , мм/рік	$S_{(сеп)}$, мм/рік	ΔS , мм/рік	$A_{(сеп)}$, град	ΔA , град
2002	1,1	0,2	1,5	0,4	1,8	0,4	53	9
2003	1,1	1,2	-1,8	1,1	2,2	1,0	297	35
2004	1,1	1,4	-1,8	2,1	2,2	1,8	287	33
2005	0,8	2,8	-2,2	1,2	2,3	1,9	284	49
2006	1,0	1,2	-1,2	1,0	1,5	0,9	301	56
2007	2,1	1,0	-2,8	1,2	3,5	1,3	309	15
2008	0,6	1,4	-2,1	1,3	2,2	1,4	288	31
2009	2,4	2,8	-2,0	1,4	3,1	2,6	317	30
2010	1,5	2,5	2,0	2,1	2,6	2,8	69	40
сеп.	1,3	1,6	-1,2	1,3	2,4	1,6	245	33

Таблиця 7

Основні параметри регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій у межах V УБЗК

Рік	$V_{B(сеп)}$, мм/рік	ΔV_B , мм/рік	$V_{L(сеп)}$, мм/рік	ΔV_L , мм/рік	$S_{(сеп)}$, мм/рік	ΔS , мм/рік	$A_{(сеп)}$, град	ΔA , град
2002	1,1	0,1	1,3	0,7	1,7	0,5	46	17
2003	1,5	1,2	1,9	0,7	2,4	1,0	56	24
2004	3,0	1,4	2,3	1,9	3,8	1,7	36	27
2005	1,9	1,2	2,6	2,3	3,2	2,2	48	24
2006	1,4	1,3	2,8	1,3	3,1	1,3	65	22
2007	2,2	2,1	2,0	1,1	3,0	2,0	48	24
2008	1,5	1,2	2,4	2,4	2,9	2,2	53	25
2009	2,6	1,8	2,9	1,7	3,9	1,5	50	26
2010	1,5	1,1	2,2	1,0	2,7	1,0	56	21
сеп.	1,9	1,3	2,3	1,5	3,0	1,5	51	24

Таблиця 8

Основні параметри регіональних векторів швидкостей горизонтального зміщення перманентних GNSS-станцій у межах VI УБЗК

Рік	$V_{B(сеп)}$, мм/рік	ΔV_B , мм/рік	$V_{L(сеп)}$, мм/рік	ΔV_L , мм/рік	$S_{(сеп)}$, мм/рік	ΔS , мм/рік	$A_{(сеп)}$, град	ΔA , град
2002	1,2	0,2	6,1	2,9	6,2	2,9	78	5
2003	2,8	1,1	3,2	0,5	4,3	0,9	50	9
2004	0,5	1,7	2,5	1,8	2,5	1,9	77	33
2005	1,5	1,8	1,6	1,0	2,2	1,6	55	39
2006	0,9	1,1	1,1	0,7	1,4	1,0	60	38
2007	0,4	1,6	-0,7	0,5	0,8	1,2	302	53
2008	0,4	0,8	-1,1	0,5	1,2	0,6	282	33
2009	1,0	1,8	-1,6	1,6	1,9	1,9	302	35
2010	1,5	1,0	1,4	1,4	2,1	5,0	43	26
сеп.	1,1	1,2	1,4	1,2	2,5	1,9	139	30

Висновки

На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки.

1. За результатами спостережень на 147 перманентних GNSS-станціях, розміщених на території Європи, за період з 2000 до 2010 р. побудовано карти-схеми абсолютних та регіональних векторів швидкостей горизонтальних зміщень цих станцій за кожен рік періоду спостережень.

2. З метою узагальнення отриманих результатів на території Європи ми виділили шість

умовних блоків земної кори (УБЗК), які в межах блока мають практично сталі кінематичні характеристики. Перший УБЗК за період спостережень зазнає прямолінійного руху в загальному по азимуту 118⁰ з середньою лінійною швидкістю 5,4 мм/рік; другий УБЗК – поступового обертового руху по азимуту від 54⁰ до 266⁰ з середньою лінійною швидкістю 1,4 мм/рік; третій УБЗК – прямолінійного руху в загальному по азимуту 298⁰ з середньою лінійною швидкістю 3,2 мм/рік; четвертий УБЗК – прямолінійного руху в загальному

по азимуту 245° з середньою лінійною швидкістю 2,4 мм/рік; п'ятий УБЗК – прямолінійного руху по азимуту 51° з середньою лінійною швидкістю 3,0 мм/рік; шостий УБЗК – криволінійного руху з середньою лінійною швидкістю 2,5 мм/рік.

3. Виділені на території Європи УБЗК збігаються з тектонічними структурами земної кори. Зокрема: границя першого та другого УБЗК проходить по Волинсько-Двінській міжгеоб-

локовій мобільній зоні, границею другого та третього УБЗК є границя Східноєвропейської платформи та Балтійського щита, границя другого та шостого УБЗК проходить по зоні Тейсейре-Торнквіста, границею п'ятого та шостого УБЗК є Альпійсько-Гімалайський складчастий пояс, четвертий УБЗК розміщений на Західноєвропейській плиті і охоплює Піренейський півострів, границею цього блока є Піреней.

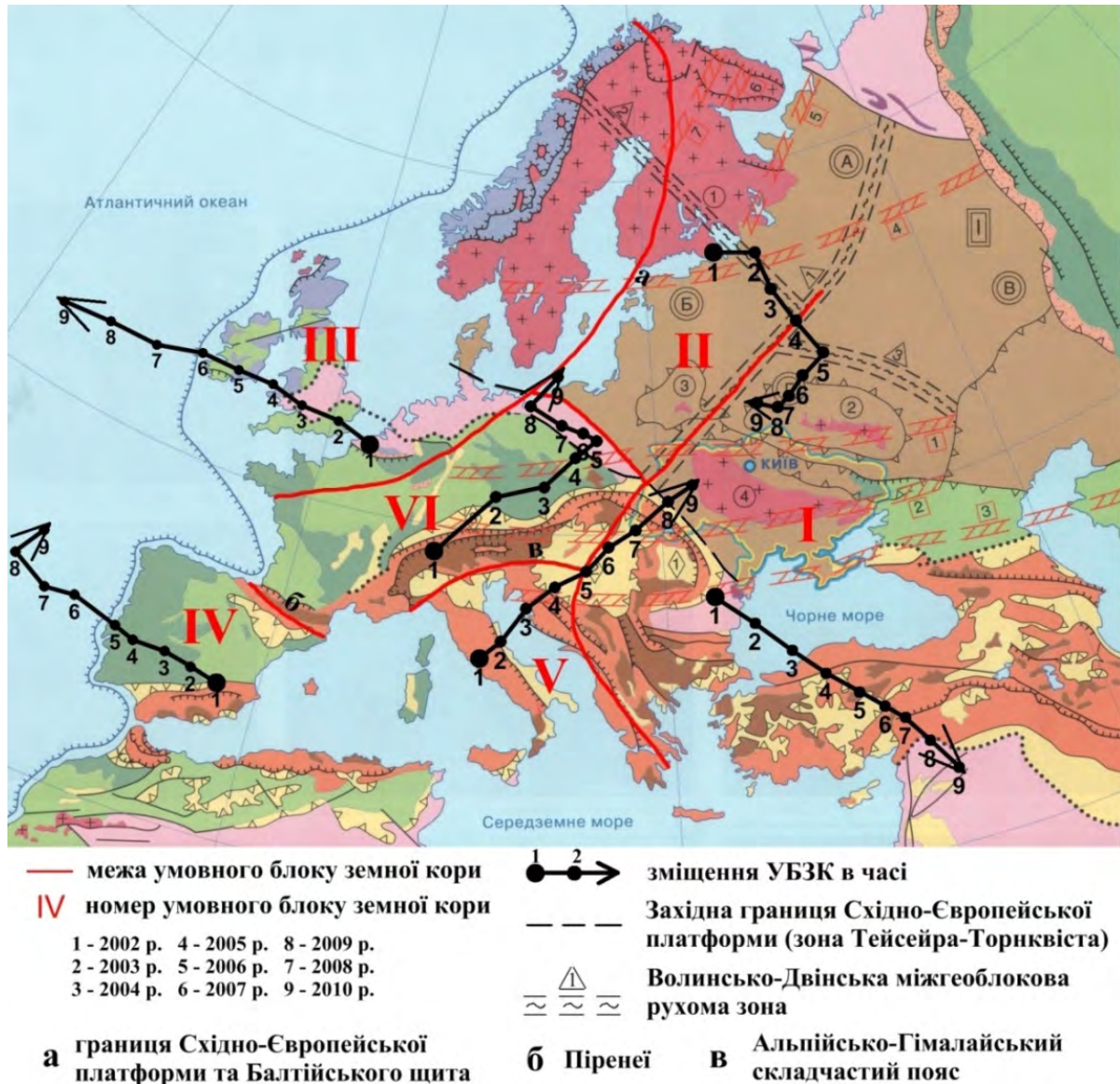


Рис. 18. Схема зміщення умовних блоків земної кори (УБЗК) в часі за 2002–2010 рр.

Література

Атлас. Геологія і корисні копалини України. – К.: ІГН НАНУ, 2001. – С. 15.
 Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. – 2004. – № 1. – С. 3–20.
 Терещук. О. Сучасні супутникові технології у дослідженні геодинамічних процесів // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2009. – № 72. – С. 4953.

Ahola Joel., Finn J. Suru. High precision GPS network for deformation studies // Sei. – 2002. – 20, № 1–2. – С. 3–11.
 Amadttir Thora, Hreinsdottir Sigrun, Gudmundsson Gunnar, Einarsson Pall, Heinert Michael, Volksen Christof. Crustal deformation measured by GPS in the South Iceland Seismic Zone due to two large earthquakes in June 2000 // Geophys. Res. Lett. – 2001. – 28, № 21. – P. 4031–4033.

- Dang Ya-Min, Chen Jun-Yong, Zhang Yan-Ping. Contemporary crustal motion in southern Tien Shan by global positioning system measurements // *Surv. and Mapping*. – 2002. – С. 13–15.
- Grenerczy Gyula, Kenyeres Ambrus. Present crustal movement and strain distribution in Central Europe inferred from GPS measurements // *Geophys. Res.* – B. 2000. – 105. № 9. – 21835–21846.
- Kakkuri Juhani, Chen Ruizhi. Postglacial deformation of the Fennoscandian crust. Latest results from the geodetic measurements // *LAG Reg. Symp. Deform, and Crustal Mov. Invest Using Geod Techn. Szecsesfehervar, Aug. 31 – Sept. 5, 1996: Proc.* – 1996. – P. 8–15.
- Pan Ming, Sjoberg Lars E. Estimating present-day postglacial rebound and horizontal movements in Fennoscandia by repeated GPS campaigns in 1993 and 1997 // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – 26. № 6. – P. 771–774.
- The Nevada Geodetic Laboratory (NGL). – <http://geodesy.unr.edu/>
- The Scripps Orbit and Permanent Array Center. – <http://sopac.ucsd.edu/>

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЕВРОПЫ ПО ДАННЫМ GNSS-НАБЛЮДЕНИЙ (2000–2010 гг.)

К.Р. Третьяк, А.И. Вовк

Основная цель работы – исследование динамики движений земной коры Европы за период 2000-2010 гг. Определены абсолютные и региональные годовые векторы скоростей смещений перманентных станций и построены карты-схемы годовых векторов скоростей смещения, выделены условные блоки земной коры (УБЗК), в пределах которых наблюдается постоянная кинематика горизонтальных смещений перманентных станций. Определены средние годовые скорости и направления движения этих блоков. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для изучения деформации земной коры исследуемого региона.

Ключевые слова: Global Navigation Satellite System (GNSS); Global Positioning System (GPS); деформация; горизонтальная деформация; перманентная станция; условный блок земной коры (УБЗК).

STUDY OF DYNAMICS OF HORIZONTAL CRUSTAL MOVEMENTS IN EUROPE ACCORDING TO GNSS OBSERVATION (2000–2010)

K.R. Tretyak, A.I. Vovk

The main aim of this work is the study of dynamics of crustal movements in Europe for the period from 2000 to 2010. Absolute and regional annual vectors of velocity of displacement of permanent stations are estimated and schematic maps of annual rate of displacement vectors are created, conditional crustal blocks (CCB) which stable kinematics of horizontal displacements of permanent stations are selected. Average annual velocities and directions of movement of these blocks are estimated. These results will be further used to study the crustal deformation in surveying region.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS); Global Positioning System (GPS); deformation; horizontal deformation; a permanent station; conditional crustal block (CCB).