

УДК 528.22

К.Р. ТРЕТЯК¹, В.В. РОМАНЮК^{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, тел. 258-26-98, ел. пошта volodymyromaniuk@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ СУЧАСНИМИ ВЕРТИКАЛЬНИМИ ЗМІЩЕННЯМИ ЗЕМНОЇ КОРИ І СЕЙСМІЧНОЮ АКТИВНІСТЮ ЄВРОПИ

Мета. Основною метою роботи є пошук взаємозв'язку між узагальненими параметрами вертикальних зміщень земної поверхні і фонову сейсмічною активністю Європейського континенту за допомогою GNSS-технологій. Встановлення взаємозв'язку між цими двома явищами є одним з шляхів прогнозування ступеня загальної сейсмічної активності території. **Методика.** Одним із способів визначення вертикальних рухів земної кори є GNSS-вимірювання. Ґрунтується цей метод на результатах зібраної інформації з перманентних GNSS-станцій, які входять в глобальну систему IGS (International GNSS Service). За вихідні дані для дослідження геодинаміки Європи були використані результати опрацювання перманентних GNSS-станцій, представлених на веб-сторінці SOPAC (Scripps orbit and permanent array center) та на веб-сторінці NGL (Nevada Geodetic Laboratory). Для опрацювання відбирались перманентні GNSS-станції з довготривалим періодом безперервних вимірювань, тривалість якого становить двадцять років (з 2000 по 2011 рр.). Для відібраних перманентних GNSS-станцій обчислено щорічні значення абсолютних швидкостей вертикальних рухів земної кори. На основі цих даних було знайдено середні значення всіх від'ємних і додатних вертикальних швидкостей перманентних GNSS-станцій упродовж року. Наступним кроком було редукування абсолютних швидкостей до регіональних. Під регіональними розуміються річні швидкості вертикальних рухів земної кори, які утворюються введенням постійної поправки в абсолютні швидкості за умови, що середнє значення абсолютних швидкостей дорівнюватиме нулю. На підставі проведених розрахунків було складено картосхеми розподілу щорічних абсолютних та регіональних швидкостей вертикальних рухів на території Європи. Територія Європи була поділена триангуляцією Делоне на трикутники, в вершинах яких знаходились перманентні GNSS-станції. За даними веб-сайтів USGS (U.S.Geological Survey) та CSEM EMSC (Centre Sismologique Euro-Méditerranéen European-Mediterranean Seismological Centre) для території, яку охоплюють визначені трикутники, було зібрано інформацію про сейсмічну активність цієї території. Згідно з визначеними трикутниками триангуляції Делоне було виконано поділ європейських землетрусів для відповідного року на окремі групи. Для узагальнення отриманих результатів, в роботі було використано еліпс розсіювань епіцентрів землетрусів певної території. Велика піввісь еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів узагальнює в основному сильні за магнітудою землетруси, а мала піввісь відповідно слабші землетруси, які становлять сейсмічний фон досліджуваної території. З метою узагальнення вертикальних рухів введено поняття “інтегральний показник висотного зміщення території”. Фізично воно представляє об'єм висотного зміщення земної поверхні. Встановлено математичну залежність, яка дозволяє поррахувати на довготривалий період значення малої півосі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів, за відомого показника висотного зміщення території і навпаки. Після аналізу отриманих результатів на деяких територіях було виявлено кореляційний зв'язок між малою піввіссю еліпса розсіювання землетрусів та інтегральним показником висотного зміщення території.

Результати. Побудовано картосхеми територій, охоплених високим ступенем кореляції між вертикальними зміщеннями земної кори і сейсмічною активністю території. Для територій, де присутній кореляційний зв'язок, характерні слабкі землетруси, які становлять її сейсмічний фон. А для територій, де відсутня кореляція, має місце зростання у відсотковому відношенні кількості сильніших землетрусів. Очевидно, що наявність сильних землетрусів призводить до аномальних рухів земної кори, які понижують кореляційний зв'язок між вертикальними зміщеннями земної кори та сейсмічною активністю. **Наукова новизна.** Визначено території на Європейському континенті, на яких проявляється кореляційний зв'язок між вертикальними зміщеннями земної кори та фонову сейсмічністю. Знайдено кореляційний взаємозв'язок між вертикальними рухами земної кори та сейсмічною активністю. **Практична значущість.** На основі проведених досліджень можна стверджувати про тісний функціональний зв'язок між двома параметрами різної фізичної природи: сейсмічною активністю та вертикальними зміщеннями земної кори.

Ключові слова: перманентна GNSS-станція; вертикальні рухи земної кори; часові серії перманентних GNSS-станцій; землетрус, сейсмічна активність

Вступ

Спостереження за землетрусами ведуться з давніх часів і дотепер. Незважаючи на значні зусилля вчених [Musson R. M., 2013], сьогодні немає конкретних методів, за допомогою яких можна було б прогнозувати виникнення землетрусів. Однак, створено карти з небезпечними сейсмічними зонами, як для території Європи, так і для всього світу [USGS, Jimenez M. J., 2001; Grunthal G., 1999]. Ці карти використовуються під час будівництва гідроенергетичних споруд, великих промислових будівель, морських портів та інших стратегічних споруд.

Інструментальні вивчення сучасних рухів земної кори ведуться вже протягом століть [Галаганов О.Н., 2011; Гусева Т. 2009]. За цей час було розроблено низку спеціальних методів вивчення вертикальних рухів, причому, особливо значний прогрес був досягнутий у цій галузі в останні півтора – два десятиліття [García F., 2012; Галаганов О., 2009]. Це було спричинено появою нових супутникових технологій, які відкрили нові перспективи вивчення геофізичних явищ, зокрема вертикальних рухів земної кори та їх зв'язок з сейсмічною активністю. Результати GNSS-вимірів, отримані за останні роки, зокрема на Європейському континенті, з усією переконливістю вказують на значущість вертикальної складової тектонічних рухів в розвитку земної кори і всієї літосфери. За допомогою глобальної супутникової геодезії стало можливим не тільки отримувати високоякісну інформацію про сучасну геодинаміку, а й оперативно стежити за всіма її просторово-часовими змінами, що особливо важливо для цілей адекватного сейсмічного районування та знаходження взаємозв'язків в геодинамічних процесах [Kaftan V. I., 2013].

Мета

Сьогодні основні зусилля багатьох вчених спрямовані на прогнозування конкретного землетрусу, тобто визначення часу, магнітуди та місця, в якому він проявиться. Основною метою цієї роботи є пошук взаємозв'язку між узагальненими параметрами вертикальних зміщень земної поверхні і фоновою сейсмічною активністю Європейського континенту за допомогою GNSS-технологій. Встановлення взаємозв'язку між цими двома явищами є одним з шляхів прогнозування ступеня загальної сейсмічної активності території

Методика та результати роботи

За вихідні дані для дослідження геодинаміки Європи були використані результати опрацювання перманентних GNSS-станцій, представлених на веб-сторінках [SOPAC, NGL].

Першим етапом роботи став відбір перманентних GNSS-станцій, розміщених на території Європи. Було опрацьовано базу даних з більше ніж 300 перманентних GNSS-станцій. Для опрацювання відбирались станції з довготривалим

періодом вимірювань, тривалість якого становить з 2000 по 2011 рр.

На другому етапі було відібрано результати вимірів висот перманентних GNSS-станцій з 2000 по 2011 рр., які формувались у часові серії. На рис. 1 показано графічний приклад відбору перманентних GNSS-станцій.

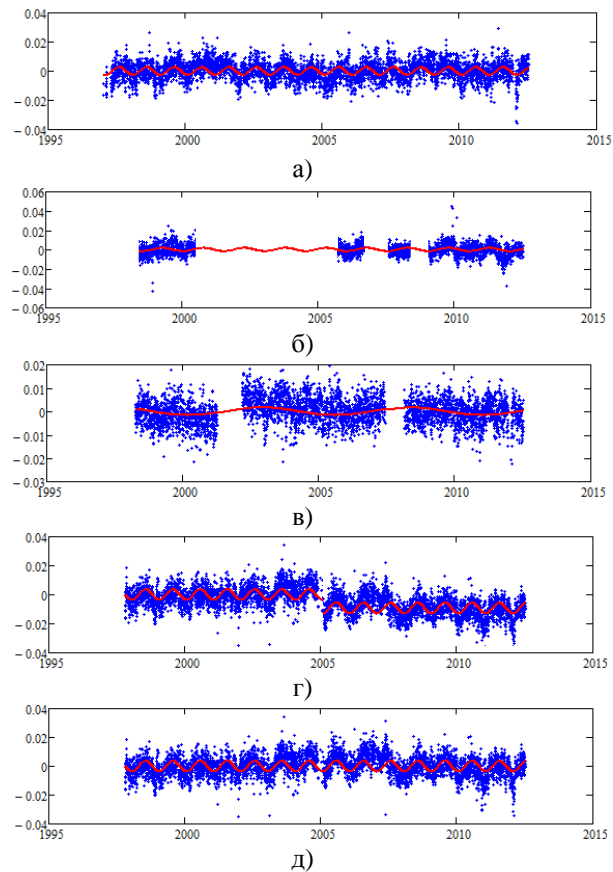


Рис. 1. Аналіз часових серій перманентних станцій:

а – станція BOGO; б – станція LINZ; в – станція DENT; г) станція DRES; д) станція

Для подальшого опрацювання було відібрано перманентні GNSS-станції, часові серії яких мали безперервний ряд спостережень упродовж 2000–2011 рр. та без стрибків у висотному положенні (рис. 1, а). Для прикладу, перманентна GNSS-станція LINZ була вилучена з бази даних, оскільки мала перерву у деяких спостереженнях близько трьох років підряд (рис. 1, б). Перманентні GNSS-станції, які мали розриви у рядах спостережень до півроку, наприклад: DENT, DOUR, CRAS, NOBY (рис. 1, в), були взяті в опрацювання, але на час перерви для них приймалися усереднені значення швидкостей вертикальних рухів земної кори за попередній та наступний роки. Такі перманентні GNSS-станції, як DOUR, DRES, EUSK, GOPE, NOBU, KARL, KLOP, LEIJ, MOPI за період спостережень мали миттєві стрибки у висотному положенні (рис. 1, г), що було пов'язано зі зміною антени на них. У часові серії цих станцій було введено відповідні поправки за зміни висоти антени (рис. 1, д).

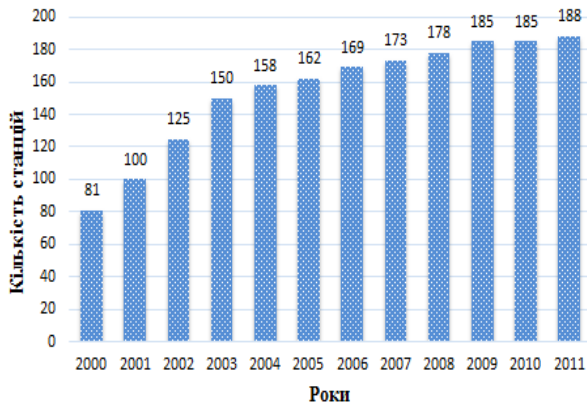


Рис. 2. Гістограма розподілу кількості постійних GNSS-станцій за період (з 2000 по 2011 роки)

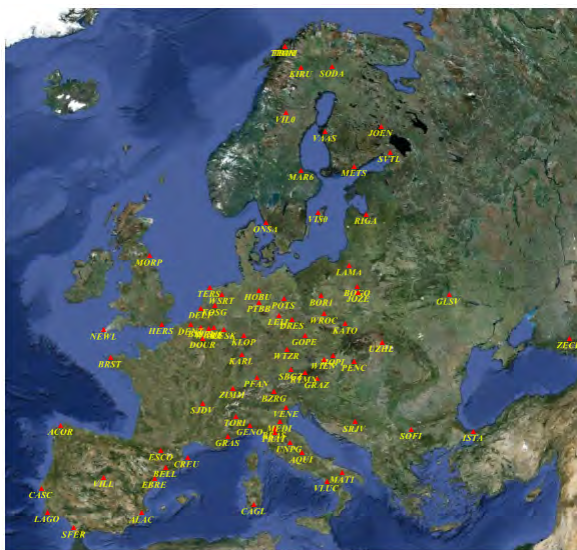


Рис. 3. Розташування відібраних постійних GNSS-станцій Європи у 2000 р.



Рис. 4. Розташування відібраних постійних GNSS-станцій Європи у 2011 р.

Унаслідок фільтрації було відібрано сто дев'яносто шість постійних GNSS-станцій, які розташовані на території всієї Європи. На рис. 2 показано гістограму розподілу кількості постійних GNSS-станцій, на якій спостерігається їх поступове збільшення з кожним роком.

За даними результатів вимірів, проведених у 2000 р., було відібрано 81 постійну GNSS-станцію (рис. 3). Цієї кількості станцій було достатньо для подальшого однорідного вивчення вертикальних рухів земної поверхні Європи. До 2011 р. з постійним збільшенням кількості постійних GNSS-станцій їх густота істотно зростає (рис. 4).

Для відібраних постійних GNSS-станцій обчислено середньорічні значення швидкостей вертикальних рухів земної поверхні та середні квадратичні похибки їх визначення. Ці швидкості визначалися в системі координат ITRF-2008, надалі будемо називати їх абсолютними. Максимальна додатна середньорічна швидкість вертикального руху зафіксована на станції SKE0 у 2007 р., що становить 26,5 мм/рік. Максимальна від'ємна швидкість зафіксована на станції MIKL у 2002 р., і вона становить -24,2 мм/рік. Від'ємні значення швидкостей відповідають опусканню, а додатні підйманню постійної GNSS-станцій. Розташування станцій з максимальними додатними та від'ємними середньорічними швидкостями вертикального руху показано на рис. 4.

Визначено середні квадратичні похибки щорічних абсолютних швидкостей вертикальних рухів, які знаходяться в межах до ± 3 мм/рік.

Для узагальнення результатів дослідження в табл. 1 наведені екстремальні річні швидкості вертикальних рухів постійних GNSS-станцій.

Таблиця 1

Середні щорічні абсолютні швидкості вертикальних рухів постійних GNSS-станцій на території Європи в системі координат ITRF-2008, (мм/рік), (2000–2011 рр.)

Роки	$-V_{abc}$	$+V_{abc}$	$-V_{сеп}$	$+V_{сеп}$	$V_{сеп}$
1	2	3	4	5	6
2000	-11.5	20.5	-4.1	7.9	3.9
2001	-9.8	16.4	-3.4	4.8	0.5
2002	-24.2	16.4	-5.6	4.5	-2.1
2003	-18.8	20.4	-3.5	6.0	4.5
2004	-12.2	21.0	-3.1	6.1	5.5
2005	-23.8	18.4	-4.0	5.8	2.3
2006	-22.6	19.5	-4.3	8.2	7.4
2007	-20.6	26.5	-3.9	5.3	-0.7
2008	-15.2	16.5	-3.2	5.8	3.5
2009	-6.8	18.5	-2.3	6.8	5.6
2010	-16.3	24.6	-3.6	5.2	3.7
2011	-21.6	18.7	-4.8	5.0	1.9

У стовпцях 2 і 3 табл. 1 вказано екстремальні значення абсолютних швидкостей вертикальних рухів (підймання та опускання) земної кори з 2000-го по 2011-й роки: $-V^{abc}$ – максимальне значення від’ємних швидкостей перманентних GNSS-станцій, $+V^{abc}$ – максимальне значення додатних швидкостей перманентних GNSS-станцій. У стовпцях 4 і 5 наведені середні значення відповідних швидкостей для кожного року спостережень: $-V_{сер}^{abc}$ – середнє значення від’ємних швидкостей перманентних GNSS-станцій, $+V_{сер}^{abc}$ – середнє значення додатних швидкостей перманентних GNSS-станцій. У шостому стовпці подано осереднені значення всіх від’ємних і додатних вертикальних швидкостей перманентних GNSS-станцій упродовж року, що обчислювались за виразом (1):

$$V_{сер}^{abc} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^{abc}}{n}, i = 1..n, \quad (1)$$

де V_i^{abs} – абсолютна швидкість вертикального руху i -ї перманентної GNSS-станції; а n – загальна кількість відібраних для опрацювання станцій.

Встановлено, що максимальна сумарна амплітуда (між максимальними значеннями підняття й опускання) абсолютних швидкостей вертикальних рухів земної кори спостерігалася у 2007 р. – 47,1 мм/рік (від -20,6 до +26,5), а мінімальна у 2009 р. – 25,4 мм/рік (від -6,8 до +18,5).

На підставі проведених розрахунків було складено картосхеми розподілу щорічних абсолютних швидкостей вертикальних рухів на території Європи. Для прикладу, на рис. 5 показана картосхема на 2007 р.

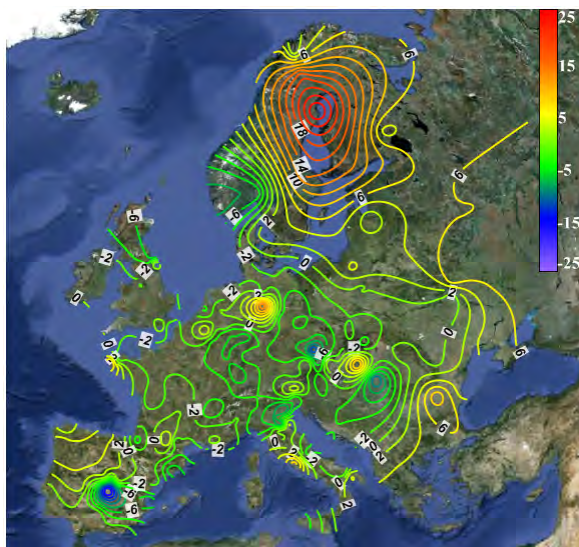


Рис. 5. Картосхеми розподілу щорічних абсолютних швидкостей вертикальних рухів земної кори за даними перманентної GNSS-станції у 2007 р. (мм/рік)

З табл. 1 видно, що кожному року спостережень відповідає певний середній фон руху земної кори. Є роки, за результатами спостережень яких в загальному проявляється опускання території або, навпаки, спостерігається підймання всієї території.

Наступним кроком було редукування абсолютних швидкостей вертикальних рухів до регіональних. Якщо у всі значення швидкостей вертикальних рухів перманентних GNSS-станцій ввести відповідну поправку, при якій середнє значення швидкості дорівнюватиме нулю, то ми отримаємо регіональні швидкості. Отже, під регіональними розуміються швидкості вертикальних рухів земної кори, які утворюються введенням постійної поправки в абсолютні швидкості, за умови, що $V_{сер}^{abc}$ дорівнює нулю.

Щоб встановити річні регіональні швидкості вертикальних рухів, від абсолютних швидкостей вертикальних рухів земної кори необхідно відняти середнє значення абсолютних вертикальних швидкостей перманентних GNSS-станцій:

$$V_i^{pez} = V_i^{abc} - V_{сер}^{abc}, i = 1..n, \quad (2)$$

За виразом (2) розраховано середні щорічні регіональні швидкості вертикальних рухів GNSS-станцій за період з 2000 по 2011 роки.

Для узагальнення отриманих результатів в табл. 2 наведені екстремальні, середні від’ємні та додатні значення регіональних швидкостей вертикальних рухів земної кори.

Таблиця 2

Середні щорічні регіональні швидкості вертикальних рухів перманентних GNSS-станцій на території Європи, (мм/рік), (2000–2011 рр.)

Роки	$-V^{pez}$	$+V^{pez}$	$-V_{сер}^{pez}$	$+V_{сер}^{pez}$
1	2	3	4	5
2000	-15.4	16.6	-6.1	6.2
2001	-10.4	15.9	-3.7	4.7
2002	-22.1	18.5	-4.9	5.0
2003	-23.3	15.9	-3.6	3.9
2004	-17.7	15.5	-2.7	3.1
2005	-26.1	16.1	-4.6	5.2
2006	-30.0	12.1	-4.4	4.6
2007	-19.8	27.3	-3.5	5.2
2008	-18.7	13.0	-4.2	4.2
2009	-12.5	12.9	-4.0	3.6
2010	-20.0	20.9	-3.4	5.4
2011	-23.4	16.8	-4.8	4.4

Ця таблиця складена за прикладом табл. 1 і у стовпцях 2 і 3 вказано екстремальні значення регіональних швидкостей вертикальних рухів (підймання та опускання) земної кори з 2000 по 2011 роки: $-V^{pez}$ – максимальне регіональне значення від’ємних швидкостей перманентних GNSS-станцій, $+V^{pez}$ – максимальне регіональне значення додатних швидкостей цих станцій. У стовпцях 4 і 5 наведені середні значення відпо-

відних швидкостей для кожного року: $-V_{сер}^{abc}$ – середнє регіональне значення від’ємних швидкостей, $+V_{сер}^{abc}$ – середнє регіональне значення додатних швидкостей перманентних GNSS-станцій. Максимальна сумарна амплітуда регіональних швидкостей земної кори відповідає значенням, які були обраховані для абсолютних швидкостей.

На підставі обчислення середніх щорічних регіональних швидкостей вертикальних рухів перманентних GNSS-станцій на території Європи, були складені картосхеми для кожного року. На рис. 6 наведено приклад такої картосхеми для 2007 р.

Мережі перманентних GNSS-станцій на кожний рік вимірювань були поділені триангуляцією

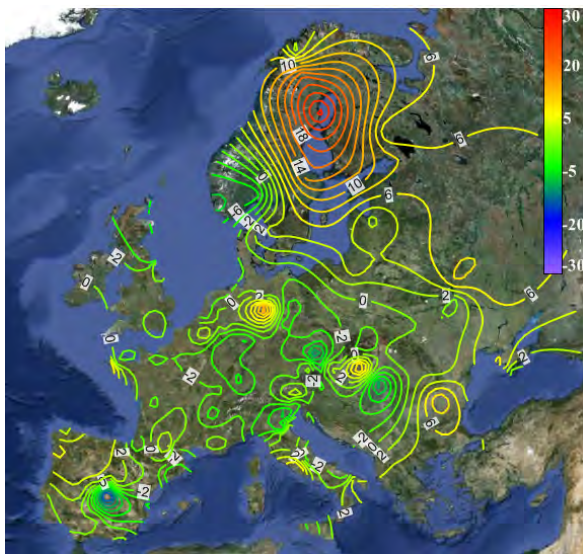


Рис. 6. Картосхема розподілу щорічних регіональних швидкостей вертикальних рухів земної кори за даними перманентних GNSS-станцій у 2007 р. (мм/рік)

Делоне на мережу трикутників, у вершинах яких знаходились перманентні GNSS-станції. Для прикладу, на рис. 7 наведена мережа триангуляції Делоне, утвореної на 2000 рік.

Оскільки з кожним роком кількість перманентних GNSS-станцій збільшується, відповідно згущується мережа трикутників, як доказ на рис. 8 показано мережу трикутників на 2011 рік.

Для виконання наступного етапу було зібрано інформацію про сейсмічну активність Європейського континенту. На основі побудованих картосхем мереж трикутників та за даними баз даних веб-сайтів United States Geological Survey [USGS] та Centre sismologique euro-méditerranéen european-mediterranean seismological centr [CSEM EMSC] було виконано поділ європейських землетрусів для відповідного року на окремі групи.

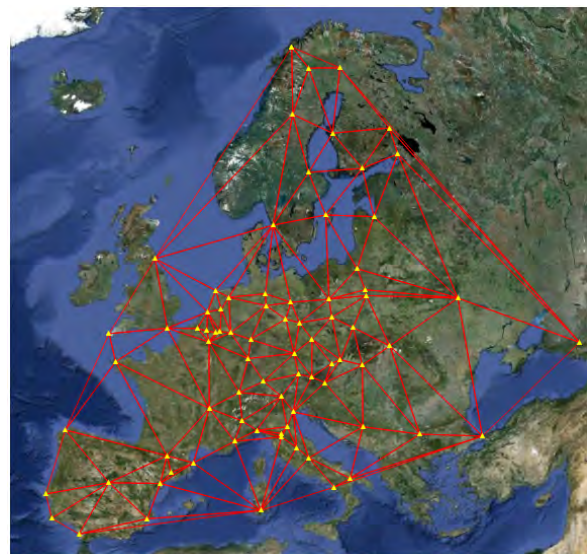


Рис. 8. Мережа трикутників перманентних GNSS-станцій на території Європи на 2011 р.

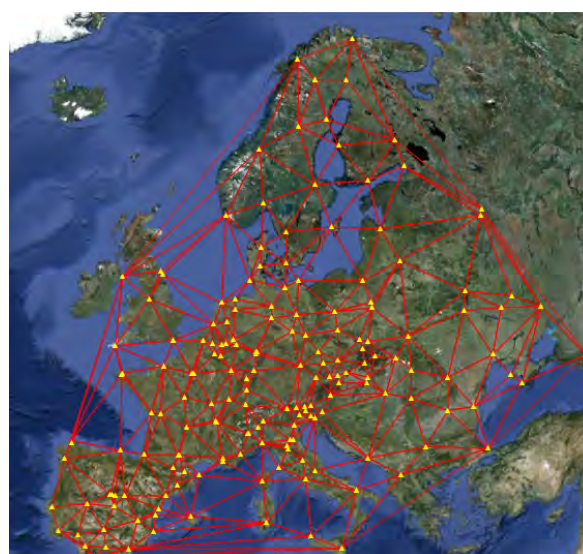


Рис. 7. Мережа трикутників перманентних GNSS-станцій на території Європи на 2000 р.

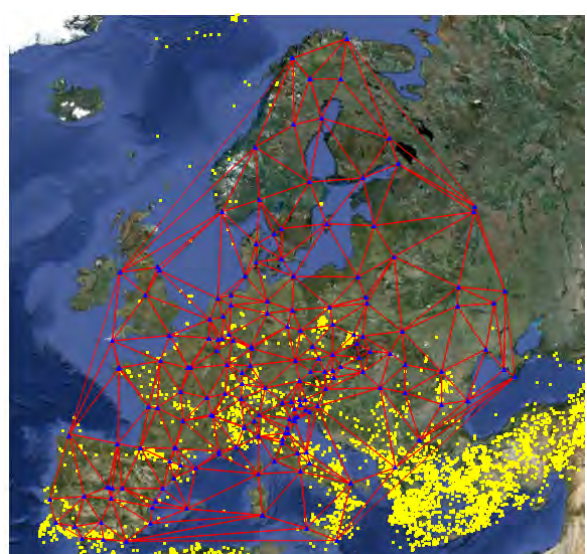


Рис. 9. Картосхема розміщення епіцентрів землетрусів на території Європи за даними сейсмічних станцій на 2007 р.

З вищезгаданих баз даних для кожного землетрусу використано координати епіцентра, магнітуду, глибину та час його прояву. Координати епіцентрів землетрусів кожної групи землетрусів обмежуються територією відповідного трикутника. На вибраній території за період з 2000 по 2011 роки були зафіксовані землетруси в межах 7 балів. Землетруси з магнітудою менше ніж 1 бал до уваги не брали. На рис. 9 наведено розташування епіцентрів землетрусів відносно мереж трикутників на 2007 р.

Для узагальнення сейсмічної активності, в роботі [Третяк К., 2008] введено поняття еліпса розсіювань епіцентрів землетрусів обмеженої території. Для його інтерпретації наведено окремих трикутник, який опирається на перманентні GNSS-станції А,В,С, в межах якого розташовані епіцентри землетрусів різної магнітуди (рис. 10).

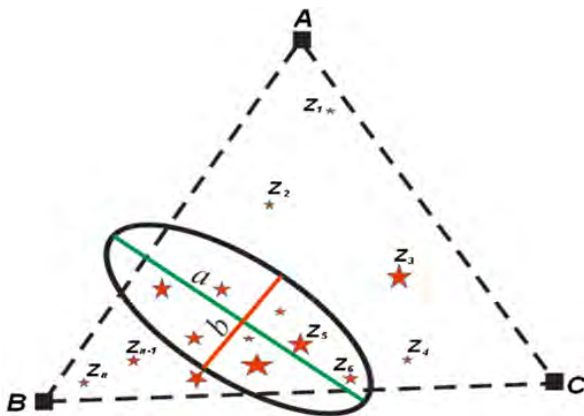


Рис. 10. Трикутник мережі ABC, у якому відбулися землетруси Z1 ... Zn, a та b відповідно велика та мала осі еліпса розсіювання землетрусів

Велика і мала півосі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів (a та b) є власними числами кореляційної матриці Q :

$$Q = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де:

$$a_{11} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{cp})^2 \cdot M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i}},$$

$$a_{22} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - y_{cp})^2 \cdot M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i}},$$

$$a_{12} = a_{21} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp}) \cdot M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i}}, \quad (4)$$

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (5)$$

а: x_i, y_i – координати епіцентрів землетрусів, розташованих в межах виділеного трикутника, n – кількість зафіксованих землетрусів за певний період часу, M – магнітуда землетрусу.

Азимут великої півосі a визначається за таким виразом:

$$\theta = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2a_{12}}{a_{11}^2 - a_{22}^2} \right) \text{ де } : a_{11} \succ a_{22} \\ \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2a_{12}}{a_{11}^2 - a_{22}^2} \right) + 90^\circ \text{ де } : a_{11} \prec a_{22} \end{array} \right\} \quad (6)$$

Велика піввісь еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів узагальнює в основному сильні за магнітудою землетруси, а мала піввісь відповідно слабші землетруси, які становлять сейсмічний фон досліджуваної території.

Для всіх трикутників, на території яких проявлялась сейсмічна активність, були обчислені еліпси розсіювання епіцентрів землетрусів. На рис. 11 наведено приклад картосхеми розміщення еліпсів розсіювання на території Європи для 2007 р.



Рис. 11. Картосхема з еліпсами розсіювання епіцентрів землетрусів на території Європи за даними сейсмічних станцій для 2007 р.

Щоб узагальнити кінематику території, охоплену окремими елементарними трикутниками, ми ввели поняття “інтегрального показника висотного зміщення території”. Фізично він виражає об’єм висотного зміщення земної поверхні. Інтегральний показник висотного зміщення території визначаємо за виразом (5).

$$\Delta H_{\text{інт}} = S \frac{\sum |V_i|}{3}, \quad (6)$$

де S – площа трикутника; $|V_i|$ – абсолютна швидкість зміщення перманентної GNSS-станції i -ї вершини трикутника. На рис. 12 графічно наведені дані параметри, V_1, V_2, V_3 – вектори вертикального руху перманентних GNSS-станцій у вершинах одного трикутника, отриманого з тріангуляції Делоне.

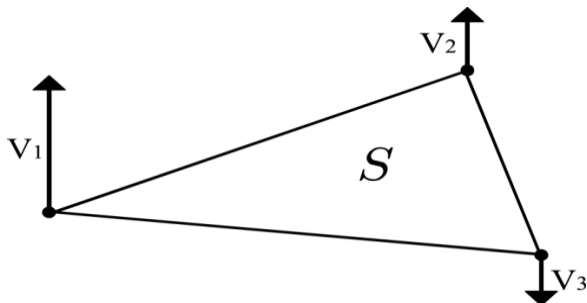


Рис. 12. Інтегральний показник висотного зміщення території

Для кожного трикутника, утвореного тріангуляцією Делоне, на кожний рік спостережень було розраховано еліпси розсіювання епіцентрів землетрусів та інтегральний показник висотного зміщення території.

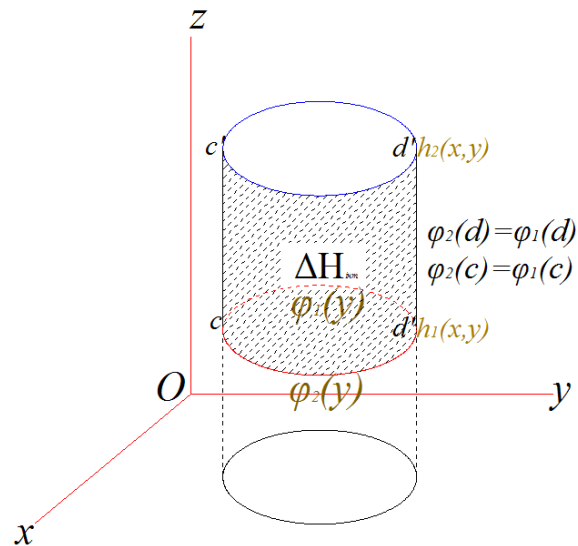
Оскільки вся територія покрита мережею трикутників, то сумарний об’єм висотного зміщення обмежений земною поверхнею на епоху першого циклу спостережень і земною поверхнею на епоху другого циклу спостережень, визначений за виразом (6), буде результатом чисельного інтегрування всієї території по трьох змінних (x, y, h) . Фізично це є абсолютна зміна поверхневого об’єму території, яка виникає внаслідок вертикальних рухів земної поверхні. Для аналітичного обчислення цього об’єму можна застосувати вираз

$$\Delta H_{\text{інт}} = \int_c^d dy \int_{\varphi_1(y)}^{\varphi_2(y)} dx \int_{h_1(x,y)}^{h_2(x,y)} |f(x, y, h)| dh \quad (7)$$

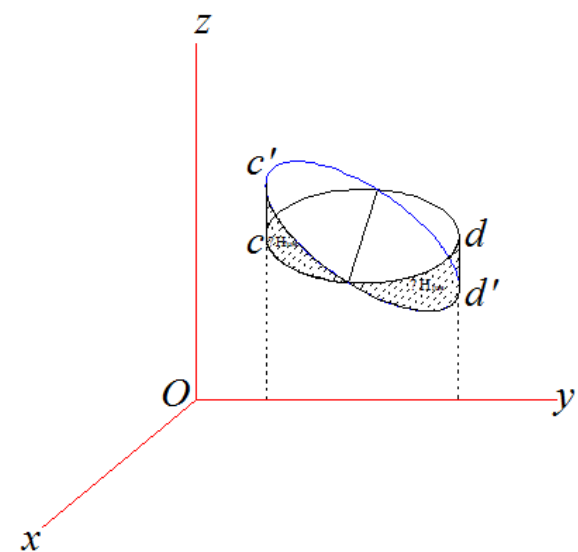
Для інтерпретації цього виразу на рис. 13а наведемо обмежену територію в вигляді двох функцій φ_1 та φ_2 , які сходяться в точках c і d . Оскільки земна поверхня може повністю як опускатися, так і підніматися або тільки якась її частина може опускатися, а інша підніматись, то інтегральний показник висотного зміщення території являє собою абсолютну зміну

поверхневого об’єму обмеженої території $|f(x, y, h)|dh$ (див. рис. 13,б).

Оскільки метою роботи є пошук взаємозв’язку між узагальненими параметрами вертикальних зміщень земної поверхні і фоновою сейсмічністю, то для знаходження цього взаємозв’язку ми використовуємо тільки малу піввісь. Із утвореного масиву річних даних визначено два трикутники, яким відповідає максимальна кореляція між малою піввіссю еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів та інтегральним показником висотного зміщення території. Далі ітераційним процесом послідовно нарощується ряд відібраних трикутників за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції між малою піввіссю еліпса розсіювання епіцентра землетрусів та інтегральним показником висотного зміщення території.



а)



б)

Рис. 13. Геометрична інтерпретація інтегрального показника висотного зміщення

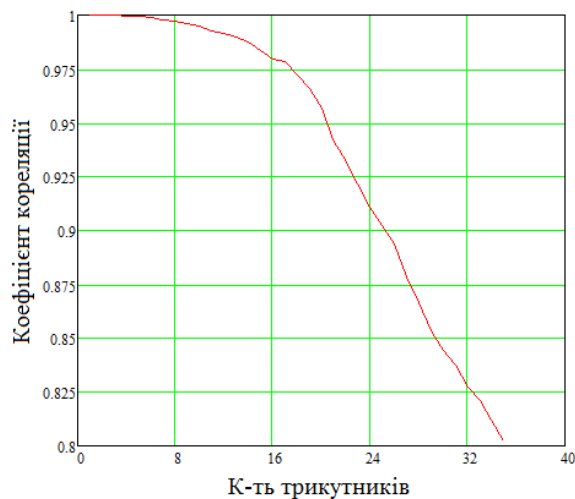


Рис. 14. Крива зменшення коефіцієнта кореляції у впорядкованому ряді трикутників на 2004 р.

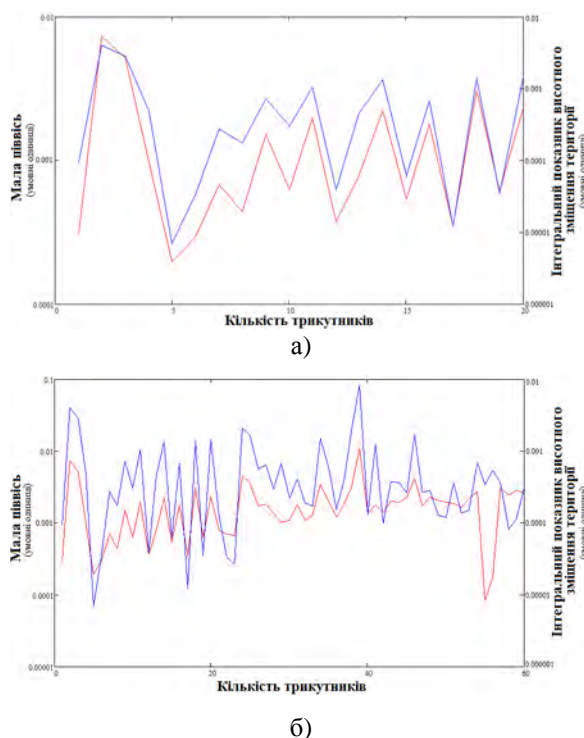


Рис. 15. Графіки зміни малої піввісі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів (-), та інтегрального показника висотного зміщення території (-) для 2004 р. (а – для 20 трикутників, б – для 60 трикутників)

На рис. 14 наведено приклад зміни коефіцієнта кореляції залежно від зростання відібраної кількості трикутників для 2004 р. за встановленим критерієм. Зрозуміло, що з зростанням кількості трикутників, значення коефіцієнта кореляції спадає (див. рис. 14). Однак, ця крива характеризується на початку повільним, а надалі різкішим зменшенням коефіцієнта кореляції. Очевидно, це свідчить про те, що першочергово

відібрані трикутники мають тісний кореляційний зв'язок між малою піввіссю еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів та інтегральним показником висотного зміщення території і це характеризується повільним зменшенням коефіцієнта кореляції. Надалі з початком різкого спадання коефіцієнта кореляції, до цієї сукупності починають залучатися трикутники, для яких відсутня або майже відсутня залежність між вертикальними зміщеннями і фоновією сейсмічною активністю. Так, для 2004 р. тісний кореляційний зв'язок спостерігається у 20 трикутниках з межею коефіцієнта кореляції 0,95. Аналогічно тенденція зміни коефіцієнта кореляції з нарощуванням кількості відібраних трикутників характерна для всіх років спостережень (з 2000 по 2011 роки).

На рис. 15,а наведено зміну залежності інтегрального показника висотного зміщення території та малої піввісі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів для відібраних 20 трикутників зі ступенем кореляції більше ніж 0,95 на 2004 рік спостережень. На рис. 15,б показано як зі збільшенням трикутників зменшується залежність між цими параметрами.

З аналізу кривих (див. рис. 15,а) зміни інтегрального показника висотного зміщення території та малої піввісі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів видно, що криві мають практично паралельну траєкторію, а на рис. 15,б вже не спостерігається цієї паралельності. Отже, візуально можна стверджувати, що для певних територій існує тісний функціональний зв'язок між двома параметрами різної фізичної природи: сейсмічною активністю та зміщеннями земної кори.

З метою знаходження взаємозв'язку на території Європи між параметрами $\Delta H_{\text{інт}}$ та b встановлено функцію взаємозв'язку цих двох параметрів для трикутників з високим ступенем кореляції, утворених перманентними GNSS-станціями

Оскільки, на рис. 15,б вертикальні осі (мала піввісь еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів та піввісь інтегрального показника висотного зміщення території) мають логарифмічне відображення, то в першому наближенні ця залежність набуває такого вигляду:

$$\ln(b) = \ln(\Delta H_{\text{інт}}) + c, \quad (8)$$

де b – значення малої піввісі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів, $\Delta H_{\text{інт}}$ – інтегральний показник висотного зміщення території, c – постійний коефіцієнт.

За результатами досліджень в другому наближенні функція набуває такого вигляду:

$$\ln(b) = a \ln(\Delta H_{\text{інт}}) + d, \quad (9)$$

де d та a – постійні коефіцієнти.

У табл. 3 наведено результати визначення постійних коефіцієнтів a, c, d на основі розв'язання

систем рівнянь (8), (9), утворених відібраними трикутниками за умовою способу найменших квадратів.

Таблиця 3

Річні значення коефіцієнтів c, a, i, d та їх оцінка точності

Рік	К-ть трикутників	Коефіцієнт кореляції	c	СКП апроксимації за виразом (8)	СКП апроксимації за виразом (9)	a	СКП визн. коэф. a	d	СКП визн. коэф. d
2000	31	0,96	4,09	0,92	0,92	0,92	0,17	3,32	1,75
2001	39	0,94	3,91	0,83	0,82	0,88	0,13	2,69	1,34
2002	33	0,98	3,75	0,72	0,69	0,85	0,09	2,25	0,92
2003	47	0,97	3,92	1,01	0,48	0,45	0,04	-1,65	0,45
2004	20	0,96	3,58	0,86	0,16	0,20	0,03	-4,10	0,33
2005	50	0,95	4,20	0,94	0,74	0,57	0,08	-0,38	0,84
2006	33	0,98	3,63	0,81	0,30	0,38	0,04	-2,37	0,43
2007	22	0,99	3,31	0,51	0,50	0,94	0,09	2,69	0,92
2008	32	0,99	3,81	0,81	0,28	0,42	0,04	-1,97	0,39
2009	32	0,98	3,65	0,52	0,37	0,65	0,06	0,24	0,63
2010	33	0,98	3,73	0,92	0,38	0,49	0,04	-1,70	0,45
2011	32	0,94	3,57	0,85	0,81	1,29	0,16	6,60	1,70

Як бачимо, отримані за результатами опрацювання значення коефіцієнтів є значно більшими від їх середніх квадратичних помилок (СКП), що свідчить про тісний функціональний зв'язок між малою піввіссю еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів та інтегральним показником висотного зміщення території.

На рис. 16 зображено приклад картосхеми, на якій наведено сукупність відібраних трикутників, що мають тісний кореляційний зв'язок між вертикальними зміщеннями земної поверхні і сейсмічною активністю для 2007 р. Ці території збігаються із зонами стабільної сейсмічної активності.

З рис. 16 видно, що висока кореляція між параметрами b та $\Delta H_{\text{інт}}$ спостерігається у Піренейській, Альпійській, Апеннінській, Динарській та Карпатській гірських системах.

Як було наголошено вище, саме слабкі землетруси формують напружено деформований стан території Європи і знаходять відображення у вертикальних рухах земної поверхні.

Виділені території збігаються з зонами підвищеної сейсмічної небезпеки, які відображені на картах, що були створені для території Європи. На основі картосхем, приклад яких наведено на рис. 16, знайдено спільні території, на яких практично щорічно проявляється тісний кореляційний зв'язок між параметрами b і $\Delta H_{\text{інт}}$ (рис. 17).

За даними табл. 3 знайдено середнє значення коефіцієнта c за весь період спостережень, що становить 3,76 та його середньоквадратичне відхилення, яке дорівнює 0,24. За результатами

спостережень з 2000 по 2011 роки для виділених територій вираз (8) набуває такого вигляду:

$$\ln(b) = \ln(\Delta H_{\text{інт}}) + 3,76(\pm 0,24). \quad (10)$$



Рис. 16. Картосхема території, охопленої високим ступенем кореляції між b і $\Delta H_{\text{інт}}$ за даними спостережень на 2007 р.

Цей вираз дозволяє порахувати на довготривалий період значення малої півосі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів, при відомому показнику висотного зміщення території.

Вираз (9) є ефективніший, коли опрацюються дані в межах річних спостережень.

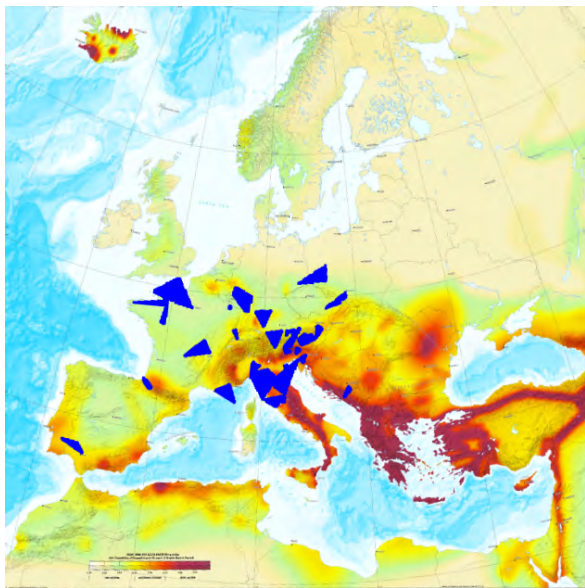


Рис. 17. Європейсько-середземноморська карта сейсмічно небезпечних зон

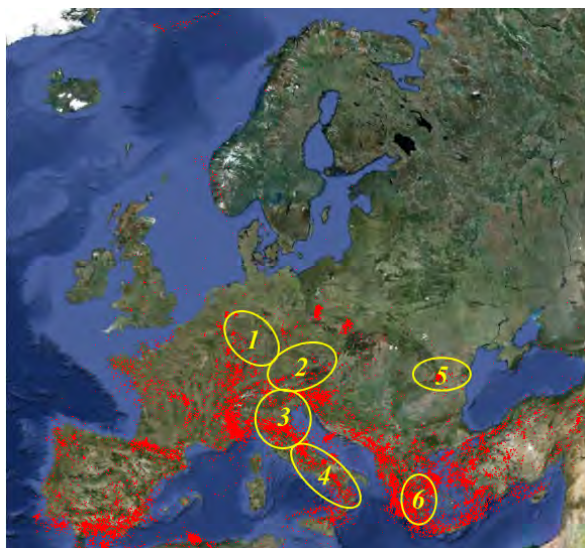


Рис. 18. Карта сейсмічності

З рис. 17 видно, що зони з тісним кореляційним зв'язком між b і $\Delta H_{\text{інт}}$ збігаються з зонами інтенсивної сейсмічної активності. Однак на Європейському континенті є значна частина територій з інтенсивною сейсмічною активністю, для яких не характерний цей кореляційний зв'язок.

З метою вивчення цих територій проведено статистичний аналіз розподілу землетрусів за період спостережень для виділених територій, а також для територій з підвищеною сейсмічною активністю, для яких не встановлено кореляційний зв'язок між інтегральним показником висотного зміщення території та малою піввіссю еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів. Для прикладу, на рис. 18 наведено 6 сейсмічно активних

зон, перші три з яких (1–3) мають кореляційний зв'язок, а наступні три (4–6) не мають кореляційного зв'язку між цими параметрами.

За даними баз даних веб-сайт United States Geological Survey [USGS] та Centre sismologique euro-méditerranéen european-mediterranean seismological centr побудовано гістограми розподілу землетрусів за магнітудою для всіх шести зон (рис. 19). Градація землетрусів по магнітуді є від 1 до 6 балів з інтервалом 1 бал.

Аналізуючи наведену гістограму, можемо встановити, що для перших трьох зон характерно понад 55, до 70 % загальної кількості землетрусів є землетруси з 2-бальною магнітудою. Від 10 до 30 % це землетруси в межах 1 бала. Також мають місце 3-бальні землетруси, які є в межах від 10 до 30 %. У цих зонах є також зафіксовано незначну кількість землетрусів з магнітудою 4 та 5 балів, кількість яких не перевищує 3 %.

Для зон, в яких не спостерігається кореляція між b і $\Delta H_{\text{інт}}$, характерна переважаюча більшість землетрусів з бальністю 3 - від 37 до 70 % та 2-бальних землетрусів від 16 до 49 %. Однак для цих територій є значно більше землетрусів з бальністю 4 - від 6 до 9 % та з магнітудою 5 – від 0,7 до 2,5 %. А також мають місце 6-бальні землетруси від 0,3 до 1,2 %. Тобто на територіях, для яких характерний кореляційний зв'язок між вертикальними зміщеннями і сейсмічною активністю, переважають землетруси за магнітудою 2 і менше балів і повністю відсутні землетруси з магнітудою 6.

Для територій з відсутнім кореляційним зв'язком переважають землетруси з магнітудою 3 бали і мають місце збільшення кількості землетрусів з магнітудою 5 та присутні землетруси з магнітудою 6.

Очевидно, що збільшення середньої бальності землетрусів та поява землетрусів з магнітудою 6 приводить до втрати кореляційного зв'язку між фоновою сейсмічністю та вертикальними зміщеннями земної кори.

Наукова новизна і практична значущість

На основі проведених досліджень GNSS-вимірів та сейсмічної активності за період з 2000 по 2011 роки встановлено сейсмічно активні території з високим ступенем кореляції між сейсмічністю та вертикальними рухами земної поверхні. Для цих територій характерна зміна статистичного розподілу землетрусів за магнітудою порівняно з сейсмічно активними територіями, для яких не встановлений цей зв'язок. На цих територіях мають місце збільшення землетрусів з магнітудою 5 та присутні шестибальні землетруси.

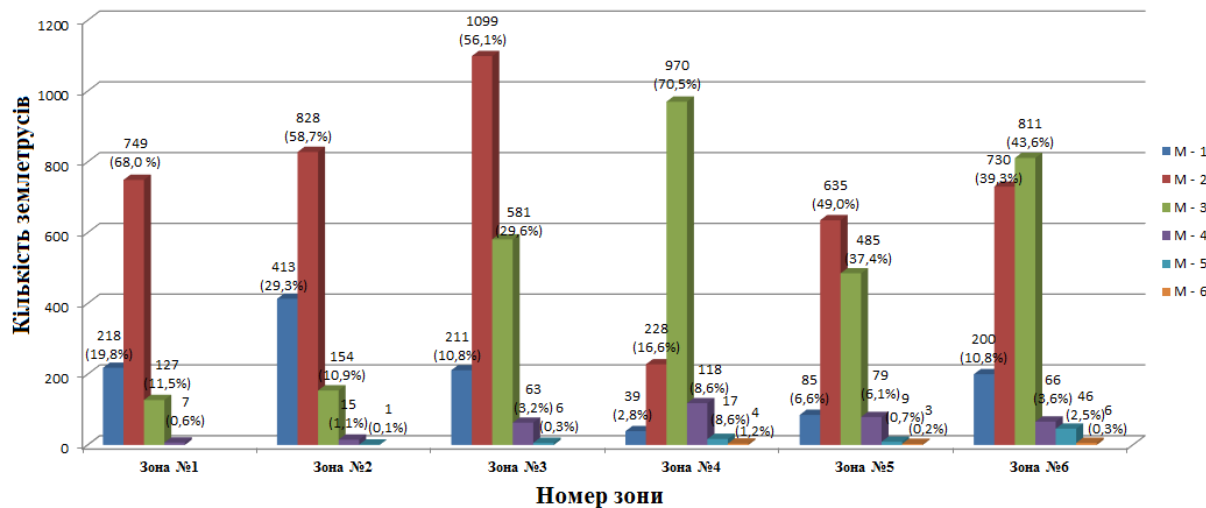


Рис. 19. Гістограма розподілу землетрусів за магнітудою

Висновки

1. На основі опрацьованих баз даних результатів роботи перманентних станцій, на яких проводилися постійні спостереження протягом 2000–2011 рр., обчислено сучасні швидкості вертикальних рухів земної кори. Встановлено, що амплітуди абсолютних швидкостей вертикальних рухів земної кори знаходяться в межах $-24,2 - 26,3$ мм/рік. Визначено середні квадратичні похибки щорічних абсолютних швидкостей вертикальних рухів, які знаходяться в межах до ± 3 мм/рік.

2. Складено картосхеми розподілу щорічних абсолютних та регіональних швидкостей вертикальних рухів території Європи.

4. З метою узагальнення вертикальних рухів земної кори введено поняття “інтегрального показника висотного зміщення території”.

5. За даними сейсмічності території Європи за період з 2000 по 2011 роки обчислено та побудовано еліпси розсіювання епіцентрів землетрусів на обмеженій території.

6. Розроблено методіку, на основі якої досліджено кореляційний зв'язок між малою піввіссю еліпса розсіювання магнітуди землетрусів, яка відповідає за фонову сейсмічність території, та інтегральним показником висотного зміщення території.

7. На території Європи виділені райони з високим ступенем кореляції між вертикальними зміщеннями земної кори та фонову сейсмічністю за період спостережень з 2000 по 2011 роки. Ці території охоплюють ділянки з підвищеною сейсмічною активністю.

8. Встановлено математичну залежність, яка дозволяє порахувати на довготривалий період значення малої півосі еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів, при відомому показнику висотного зміщення території і навпаки.

9. Проведено статистичний аналіз сейсмічно активних територій, для яких характерний кореляційний зв'язок і для яких кореляційний зв'язок відсутній. Для територій, де присутній кореля-

ційний зв'язок, характерні слабкі землетруси з магнітудою 1-2 бали і майже всі землетруси знаходяться в межах 4 балів. А для територій, де відсутня кореляція, має місце зростання у відсотковому відношенні кількості сильніших землетрусів і присутні шестибальні землетруси. Очевидно, що наявність сильних землетрусів призводять до аномальних рухів земної кори, які понижують кореляційний зв'язок.

Література

- Гусева Т., Решение новых геофизических задач по GPS данным / Т. Гусева, Л. Латынина // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2009. – №71. – С. 86 – 90.
- Парадокс отличий в вертикальных движениях по данным определенной разными методами / О. Галаганов, В. Горшков, Т. Гусева та ін. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2009. – №1. – С. – 241–248.
- Современные движения земной коры ладожско-онезжского региона по данным геодезических измерений / О.Н. Галаганов, В.Л. Горшков, Т.В. Гусева та ін. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – №2 – С. 130–136.
- Третьяк К. Зв'язок між горизонтальними деформаціями земної поверхні та сейсмічною активністю Центральної Європи / Третьяк К., Серант О., Смірнова О. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2008. – №1(15). – С.74–81.
- Combination of Multisatellite Altimetry and Tide Gauge Data for Determining Vertical Crustal Movements along Northern Mediterranean Coast / F. García, M.I. Vigo, D. García-García, J.M. Sánchez-Reales// Pure and Applied Geophysics. – 2012. – № 8. – С. 1411 – 1423.
- Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Middle East / Grunthal G., Bosse C., Sellami S. and other.// Annali di geofisica. – 1999. – № 6. – С. 1215–1223.

- CSEM EMSC (Centre Sismologique Euro-Méditerranéen European-Mediterranean Seismological Centr) [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.emsc-csem.org/>.
- Kaftan V. I. Use of global navigation satellite systems for monitoring deformations of water-development works / V.I. Kaftan, A.V. Ustinov // Power Technology and Engineering. – 2013. – №1. – С. 30 – 37.
- Musson R.M.W. A history of British seismology / R.M.W. Musson // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2013. – №3 – С. 715–861.
- NGL (Nevada Geodetic Laboratory) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geodesy.unr.edu>.
- SOPAC (Scripps orbit and permanent array center): [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sopac.ucsd.edu>.
- Unified seismic hazard modelling throughout the Mediterranean region / M. J. Jimenez, D. Giardini, G. Grünthal // Bollettino di geofisica teorica ed applicata. – 2001. – № 1 – С. 3–18.
- USGS (U.S.Geological Survey) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://earthquake.usgs.gov/>.

К.Р. ТРЕТЯК¹, В.В. РОМАНИУК^{2*}

¹Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандеры 12, Львов, Украина, 79013

^{2*}Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандеры 12, Львов, Украина, 79013, ел. пошта volodymyromaniuk@gmail.com

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ДЕФОРМАЦИЕЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Цель. Основной целью работы является поиск взаимосвязи между обобщенными параметрами вертикальных смещений земной поверхности и фоновой сейсмической активности Европейского континента с помощью GNSS -технологий. Установление взаимосвязи между этими двумя явлениями является одним из путей прогнозирования степени общей сейсмической активности территории.

Методика. Одним из способов определения вертикальных движений земной коры является GNSS-измерения. Базируется данный метод на результатах собранной информации с перманентных GNSS-станций, входящих в глобальную систему IGS (International GNSS Service). За исходные данные для исследования геодинамики Европы были использованы результаты обработки перманентных GNSS-станций, представленных на странице SOPAC (Scripps orbit and permanent array center) и на веб-странице NGL (Nevada Geodetic Laboratory). Для обработки отбирались перманентные GNSS-станции с долговременным периодом непрерывных измерений, продолжительность которого составляет двенадцать лет (с 2000 по 2011 гг.). Для отобранных перманентных GNSS-станций вычислены ежегодные значения абсолютных скоростей вертикальных движений земной коры. На основе этих данных были найдены средние значения всех отрицательных и положительных вертикальных скоростей перманентных GNSS-станций в течение года. Следующим шагом было редуцирование абсолютных скоростей к региональным. Под региональными понимают годовые скорости вертикальных движений земной коры, которые образуются введением постоянной поправки в абсолютные скорости при условии что среднее значение абсолютных скоростей будет равняться нулю. На основе проведенных расчетов были составлены картосхемы распределения ежегодных абсолютных и региональных скоростей вертикальных движений на территории Европы. Территория Европы была поделена триангуляцией Делоне на треугольники, в вершинах которых находились перманентные GNSS-станции. По данным веб-сайтов USGS (US Geological Survey) и CSEM EMSC (Centre Sismologique Euro – Méditerranéen European – Mediterranean Seismological Centr) для территории, которую охватывают определенные треугольники, была собрана информация о сейсмической активности этой территории. Согласно определенных треугольников триангуляции Делоне было выполнено разделение европейских землетрясений для соответствующего года на отдельные группы. Для обобщения полученных результатов в работе были использованы эллипс рассеиваний эпицентров землетрясений определенной территории. Большая полуось эллипса рассеивания эпицентров землетрясений обобщает в основном сильные по магнитуде землетрясения, а малая полуось соответственно более слабые землетрясения, которые складывают сейсмический фон исследуемой территории. С целью обобщения вертикальных движений введено понятие “интегрального показателя высотного смещения территории”. Физически оно представляет объем высотного смещения земной поверхности. После анализа полученных результатов на некоторых территориях была выявлена корреляционная связь между малой полуосью эллипса рассеивания землетрясений и интегральным показателем высотного смещения территории. **Результаты.** Построено картосхемы территорий, охваченных высокой степенью корреляции между вертикальными

смещениями земной коры и сейсмической активностью территории. Для территорий, где присутствует корреляция, характерны слабые землетрясения, которые составляют ее сейсмический фон. А для территорий, где отсутствует корреляция, имеет место рост в процентном отношении количеству более сильных землетрясений. Очевидно, что наличие сильных землетрясений приводят к аномальным движениям земной коры, которые снижают корреляционную связь между вертикальными смещениями земной коры и сейсмической активностью. **Научная новизна.** Определены территории на Европейском континенте, на которых проявляется корреляционная связь между вертикальными смещениями земной коры и фоновой сейсмичностью. Найдена корреляционная взаимосвязь между вертикальными движениями земной коры и сейсмической активностью. **Практическая значимость.** На основе проведенных исследований можно утверждать о тесной функциональной связи между двумя параметрами различной физической природы: сейсмической активностью и вертикальными смещениями земной коры.

Ключевые слова: перманентная GNSS - станция; вертикальные движения земной коры; временные серии перманентных GNSS - станций; землетрясение; сейсмическая активность

K.R. TRETIAK¹, V.V. ROMANIUK^{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 volodymyromaniuk@gmail.com

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MODERN VERTICAL DISPLACEMENT OF THE CRUST AND SEISMIC ACTIVITY OF EUROPE

Purpose. The main goal is to find the relationship between the generalized parameters of the vertical displacement of the earth's surface and the background seismic activity of the European continent by means of GNSS- technology. Establishing the relationship between these two phenomena is one way to predict the overall degree of seismic activity of the area. **Methodology.** One way of determining the vertical movements of the crust is GNSS- measurement. This method is based on the results of the collected information from permanent GNSS- stations that are part of a global system of IGS (International GNSS Service). According to the source data for the study we used Geodynamics Europe Result of permanent GNSS- stations presented on the web page SOPAC (Scripps orbit and permanent array center) and on the web page NGL (Nevada Geodetic Laboratory). For the study permanent GNSS- stations with long term continuous measurements, the duration of which is twelve years (2000 to 2011) were selected. For selected permanent GNSS- stations annual values of the absolute velocity of vertical crustal movements were calculated. Based on these data, it was found the average value of all the negative and positive vertical velocities of permanent GNSS- stations during the year. The next step was the reduction of the absolute velocity to the regional. As the regional we mean the annual rates of vertical crustal movements which can be formed by the introduction of permanent amendments to the absolute velocity, provided that the average absolute velocity will be zero. On the basis of the calculations the maps of annual distribution of the absolute velocities and regional vertical movements in Europe were made. Europe was divided according to the Delaunay triangulation into triangles at the tops of which were permanent GNSS- station. According to the websites USGS (USGeological Survey) and CSEM EMSC (Centre Sismologique Euro-Méditerranéen European-Mediterranean Seismological Centr) for the area covered by triangles the information about the seismic activity of the area was collected. According to the triangles defined by the Delaunay triangulation it was performed earthquakes European division for the relevant year into separate groups. To summarize the results we used the scattering ellipse of earthquake epicenters of the area. The major semi-axis of the ellipse of dispersion of earthquake epicenters summarizes mainly the strong magnitude earthquakes and the small semi-axis respectively have weaker earthquakes that make up the seismic background of study area. In order to generalize the vertical movements we used the notion of "integral index of offset high-altitude of area." Physically, it represents the amount of altitudinal displacement of the earth's surface. Mathematical dependence which allows to compute for the long term value of small axis of the ellipse of dispersion of earthquake epicenters with a known indicator of high-altitude offset of area and vice versa has been established. After analyzing of the results in some areas it was found a correlation between low semi-axis of the scattering ellipse of earthquakes and the integral indicator of altitudinal displacement of area. **Results.** We constructed the maps of the area covered by a high degree of correlation between the vertical displacements of the crust and seismic areas. In areas where there is poor correlation can occur light earthquakes that make up its seismic background. And in areas where there is no correlation there is an increase in the percentage of the number of stronger

earthquakes. It is clear that the presence of strong earthquakes lead to abnormal crustal movements that lowering correlation between the vertical displacements of the crust and seismic activity. **Originality.** There were defined areas of the European continent which manifest the correlation between the vertical displacement of the crust and background seismicity. We found correlation between the vertical movements of the crust and seismic activity. **Practical significance.** On the basis of the research can be said about the close functional relationship between the parameters of different physical nature: seismic and vertical displacements of the crust.

Keywords: permanent GNSS- station, vertical crustal movements, time series of permanent GNSS- stations, earthquake, seismic activity

REFERENCES

- Guseva T., Latynina L. *Reshenie novyh geofizicheskikh zadach po GPS dannym* [Solving of geophysical problems on GPS data]. *Geodezija, kartografija i aerofotozнимannja* [*Geodesy, Cartography and Aerial Photography*]. 2009, no. 71, pp. 86–90.
- Paradoks otlichij v vertikal'nyh dvizhenijah po dannym opredelenij raznymi metodami* [Paradoks of differences in vertical motion according to the data is defined by different methods]. O. Galaganov, V. Gorshkov, T. Guseva ta in. *Geodezija, kartografija i aerofotozнимannja* [*Geodesy, Cartography and Aerial Photography*]. 2009, no.1, pp. 241–248.
- Sovremennye dvizhenija zemnoj kory ladozhsko-onezhskogo regiona po dannym geodezicheskikh izmerenij* [Modern movement of the crust of Ladogo-Oneg's region according to the data of geodesic measurements]. O.N.Galaganov, V.L Gorshkov, T.V. Guseva ta in. *Sovremennye problemy distancion-nogo zondirovanija Zemli iz kosmosa* [*Modern problems of remote sensing of the Earth from space*]. 2011, no.2, pp. 130–136.
- Tretiak K., Serant O., Smirnova O *Zviazok mizh horyzontalnymi deformatsiiamy zemnoi poverkhni ta seismichnoiu aktyvnistiu Tsentralnoi Yevropy* [The relationshipbetween horizontal deformations of the surface and seismic activity in Central Europe]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva* [*Recent advances in geodetic science and industry*].2008, no.1(15), pp.74–81.
- Combination of Multisatellite Altimetry and Tide Gauge Data for Determining Vertical Crustal Movements along Northern Mediterranean Coast. F. García, M. I. Vigo, D. García-García, J. M. Sánchez-Reales *Pure and Applied Geophysics*. 2012, no. 8, pp. 1411–1423.
- Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Meddle East. Grunthal G., Bosse C., Sellami S. and other. *Annali di geofisica*. 1999, no.6, pp. 1215–1223.
- CSEM EMSC (Centre Sismologique Euro-Méditerranéen European-Mediterranean Seismological Centr): Available at: <http://www.emsc-csem.org/>.
- Kaftan V. I. Ustinov A. V. Use of global navigation satellite systems for monitoring deformations of water-development works. *Power Technology and Engineering*. 2013, no.1, pp. 30–37.
- Musson R. M. W. A history of British seismology. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2013, no 3, pp.715–861.
- NGL (Nevada Geodetic Laboratory): Available at: <http://geodesy.unr.edu>.
- SOPAC (Scripps orbit and permanent array center): Available at: <http://sopac.ucsd.edu>.
- Unified seismic hazard modelling throughout the Mediterranean region. M. J. Jimenez, D. Giardini, G. Grünthal. *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*. 2001, no.1, pp. 3–18.
- USGS (U.S.Geological Survey): Available at: <http://earthquake.usgs.gov/>.

Надійшла 7.05.2014 р.