

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ПУНКТИВ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ПЕРМАНЕНТНОЇ ГНСС-МЕРЕЖІ EPN/EUREF МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Представлена робота розглядає практичне застосування методу скінченних елементів до аналізу просторових переміщень станцій європейської перманентної ГНСС-мережі. Виконано аналіз переміщень перманентних станцій у період з 2007 по 2014 рр. Встановлено наявність значних за величиною (більше 100 мм) горизонтальних та вертикальних переміщень. За допомогою методу скінченних елементів розраховано основні деформаційні характеристики (стиснення-розширення, дилатація, зміщення) та побудовано поля переміщень і деформаційних характеристик за встановлений період.

Ключові слова: метод скінченних елементів, переміщення, зсув, розтяг, деформація, тензор деформацій.

Постановка проблеми Проектування складних інженерних споруд вимагає серйозного та ґрунтового підходу до вибору місця розміщення такої споруди. Зрозуміло, що в більшості випадків місце спорудження об'єкту обґрунтовано економічними показниками. В такому випадку при проектуванні споруди необхідно враховувати всі фактори ризику, що можуть призвести до аварії інженерної споруди. Одним з таких факторів є вплив геодинамічних процесів локального, регіонального та навіть глобального характеру. Врахування можливих переміщень земної поверхні у майбутньому допоможе уникнути можливих аварійних ситуацій на стадії експлуатації інженерних споруд.

Найбільш ефективним при дослідженні геодинамічних процесів є використання результатів спостережень на постійно діючих станціях ГНСС-мережі. Такі мережі створені скрізь і мають, як регіональне так і глобальне призначення. Відомим прикладом такої мережі є Європейська Перманентна ГНСС-мережі EPN/EUREF [16,17].

Для встановлення факту наявності геодинамічних процесів достатньо провести аналіз часових рядів результатів спостережень на станціях. Для визначення критичності деформаційних процесів необхідно використати методи механіки за якими встановлюються зони максимальних напружень, що виникають на земній поверхні. Для обчислення деформаційних характеристик

використовують метод скінченних елементів [18,19]. При розрахунку скінченноелементних моделей найбільш доцільно користуватися спеціалізованими програмними засобами. Останнім часом з'явилися онлайн програмні комплекси на основі методу скінченних елементів, розроблені для вирішення завдань саме оброблення результатів геодезичного моніторингу [12,13,14,15].

Проведення якісного і достовірного аналізу просторових переміщень земної поверхні за результатами спостережень перманентних станцій є актуальним завданням, вирішення якого є дуже важливим для вивчення, як глобальних процесів (рух континентів, прогнозування землетрусів) так і для локальних процесів, що пов'язані із проектуванням інженерних споруд.

Огляд попередніх публікацій Питанню дослідження можливостей використання GNSS-технологій для вирішення задач інженерної геодезії присвячено величезну кількість робіт, в першу чергу закордонних авторів [4,6,9,11]. В цих роботах отримані достатньо надійні результати щодо точності отриманих даних в залежності від умов спостережень та розроблені відповідні методики для досягнення необхідної точності. Найбільш детальний огляд інженерних задач для вирішення яких застосовують ГНСС можна знайти в періодичних іноземних виданнях GPS Solutions та GPS World.

Використання методів механіки для аналізу переміщень та обчислення деформаційних характеристик знайшло своє відображення у роботах [1,3,5,7,8].

Постановка завдання Метою представленої роботи є проведення аналізу просторових переміщень пунктів Європейської Перманентної ГНСС-мережі EPN/EUREF за період з 2007 по 2014 рр., з використанням методів механіки, а саме методу скінченних елементів.

Основний зміст роботи. Аналіз переміщень Європейської Перманентної ГНСС-мережі EPN/EUREF за період з 2007 по 2014 рр. розпочнемо з виконання аналізу величин переміщень за встановлений період. Схему ГНСС-мережі EPN/EUREF наведено на рис. 1.

Для подальшого аналізу нами було використано результати спостережень з 58 станцій, для яких результати спостережень наявні за весь період аналізу. Результати визначення координат станцій наведено на період грудня місяця кожного року, починаючи з грудня 2007 р.

Обчислимо переміщення станцій відносно початкового, 2007-го року. Результати переміщень для деяких станцій представимо графічно в плані та по вертикалі на рис. 2 – рис. 11.

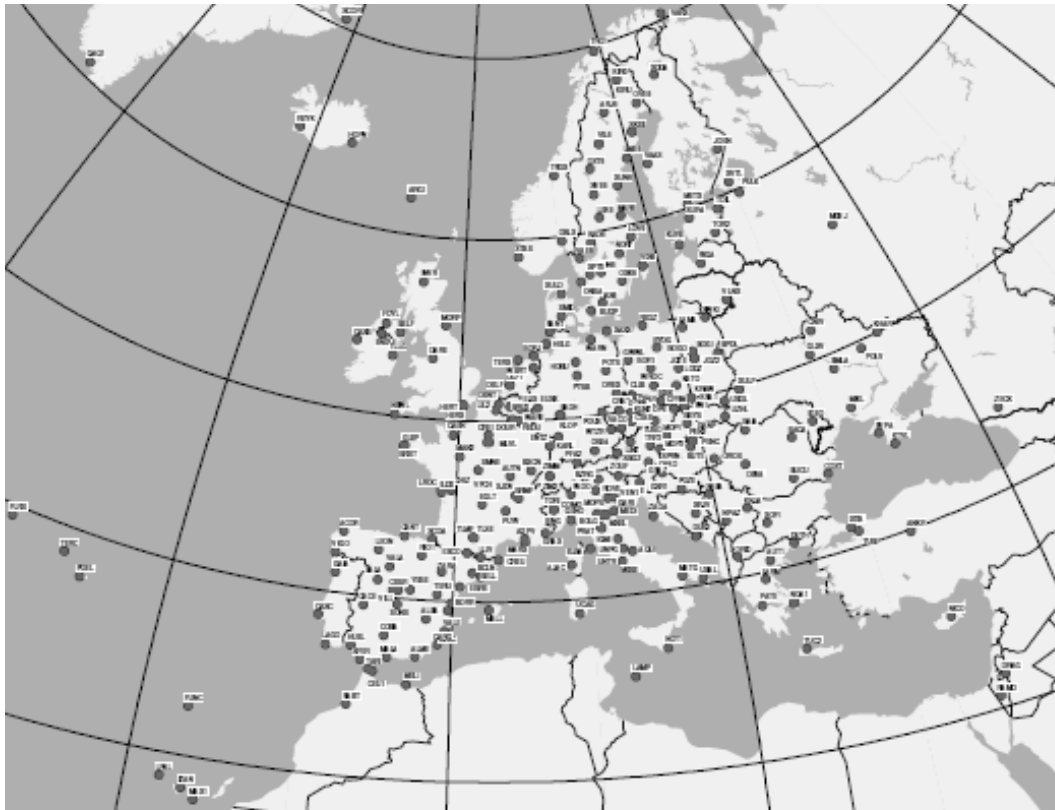


Рис. 1. Розміщення пунктів EPN/EUREF [16]

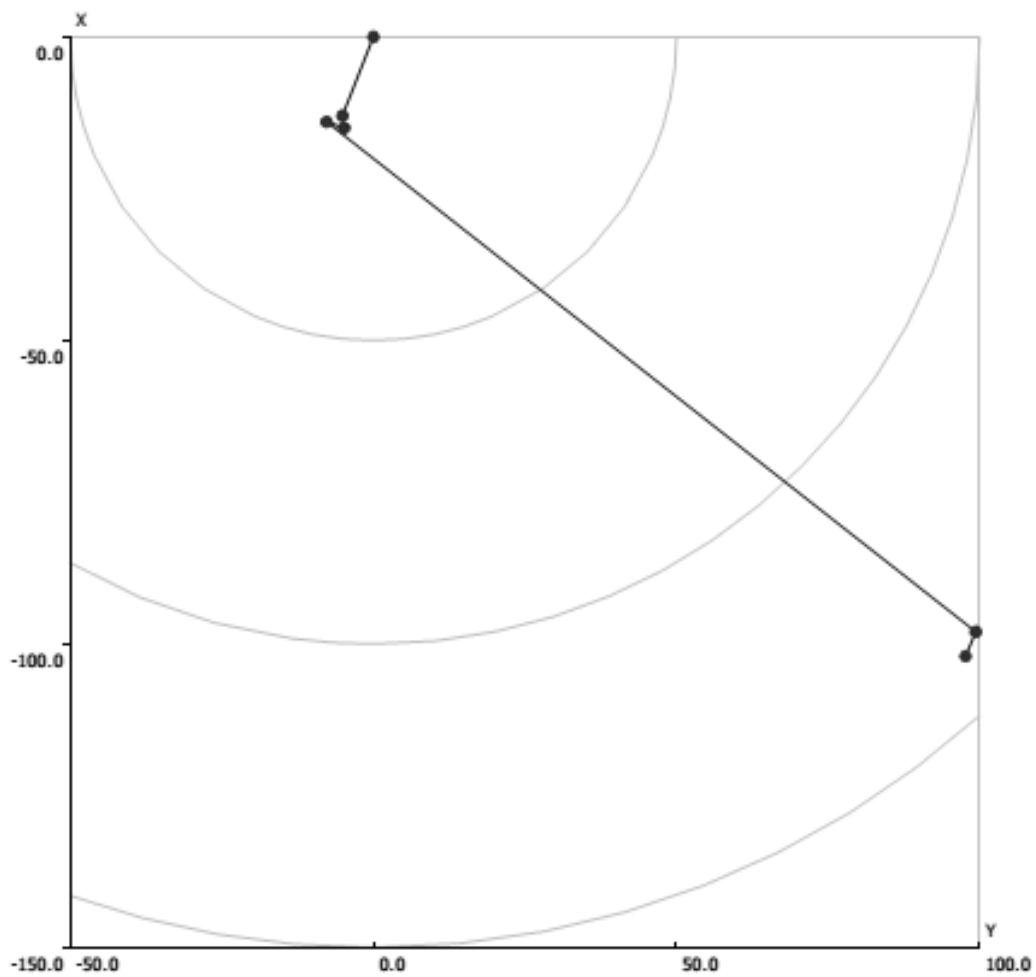


Рис. 2. Планові переміщення станції EPN/EUREF - POUS

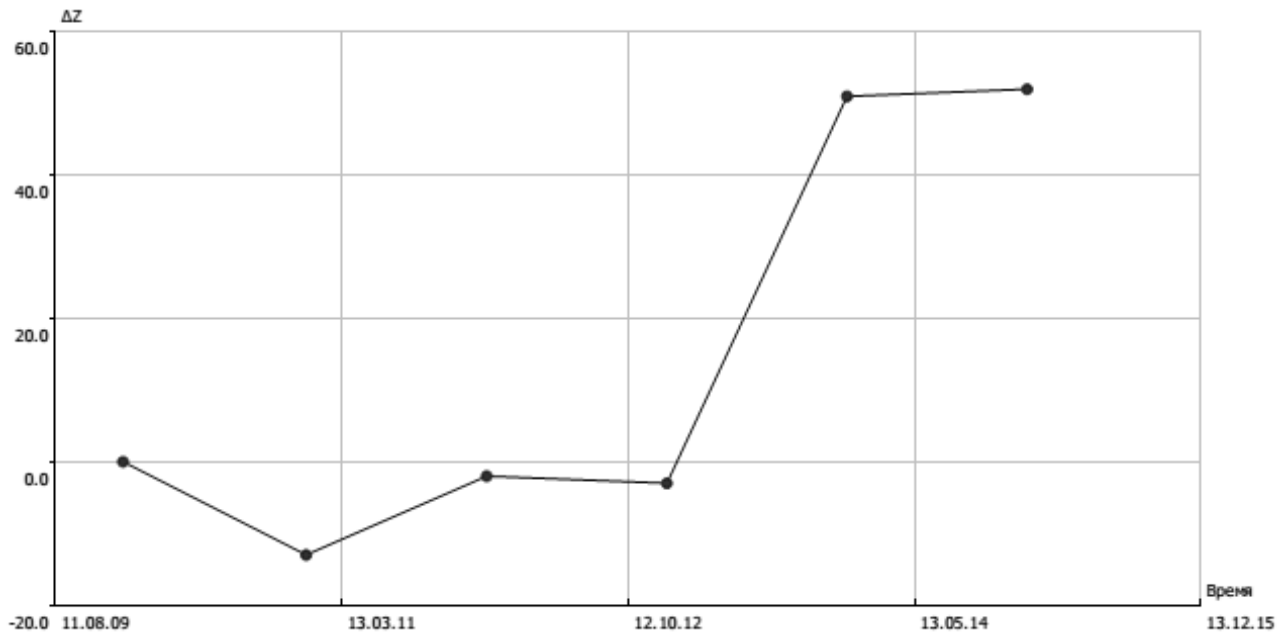


Рис. 3. Вертикальні переміщення станції EPN/EUREF - POUS

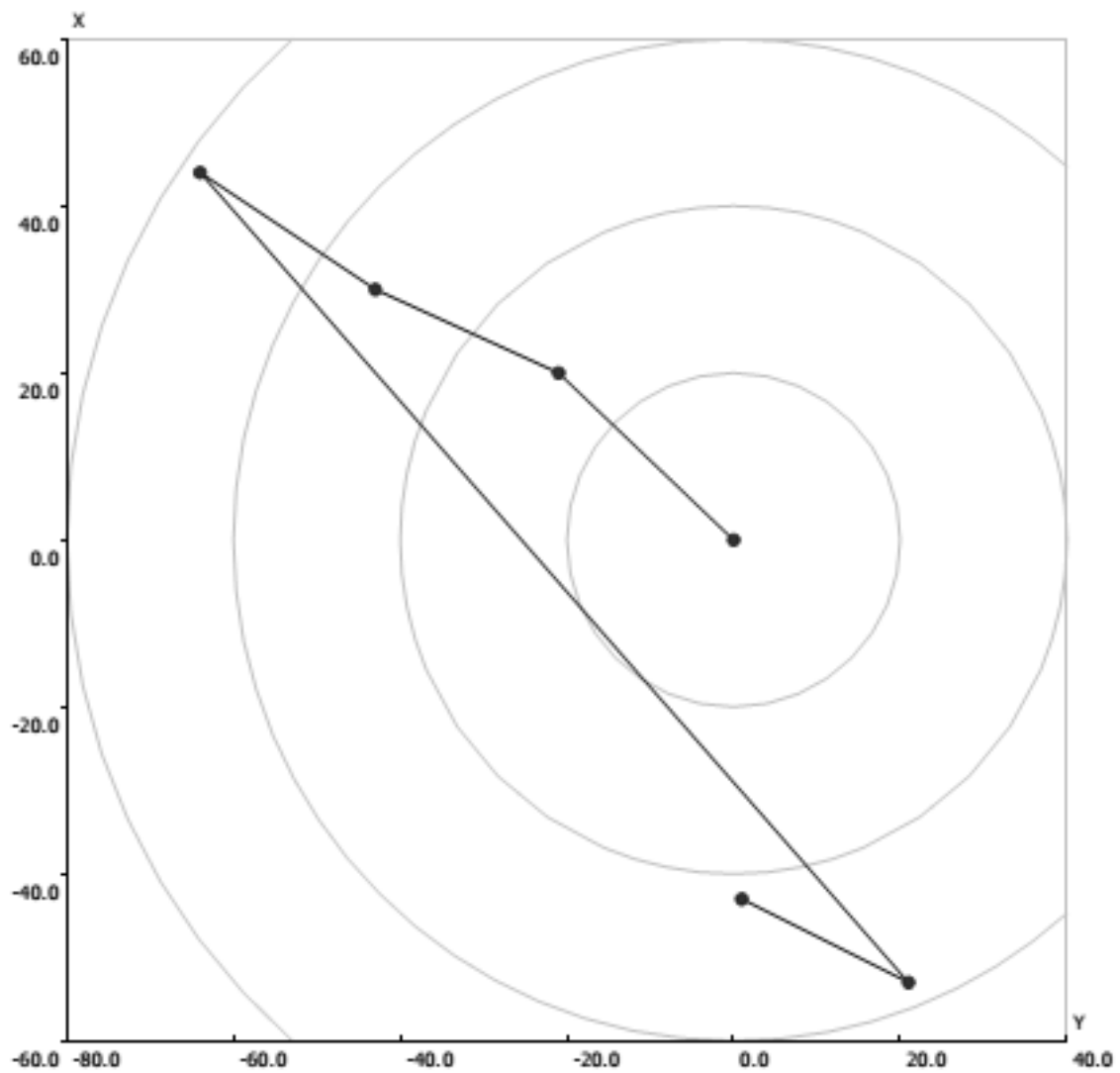


Рис. 4. Планові переміщення станції EPN/EUREF - ANKR

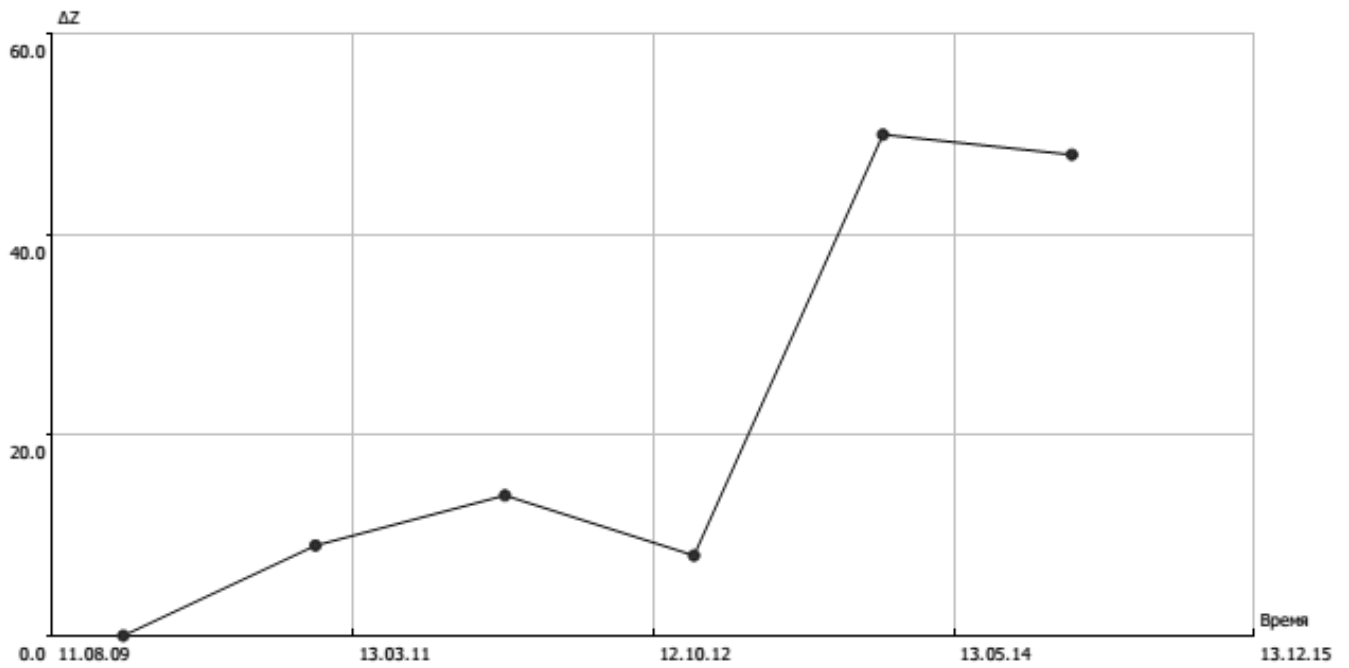


Рис. 5. Вертикальні переміщення станції EPN/EUREF - ANKR

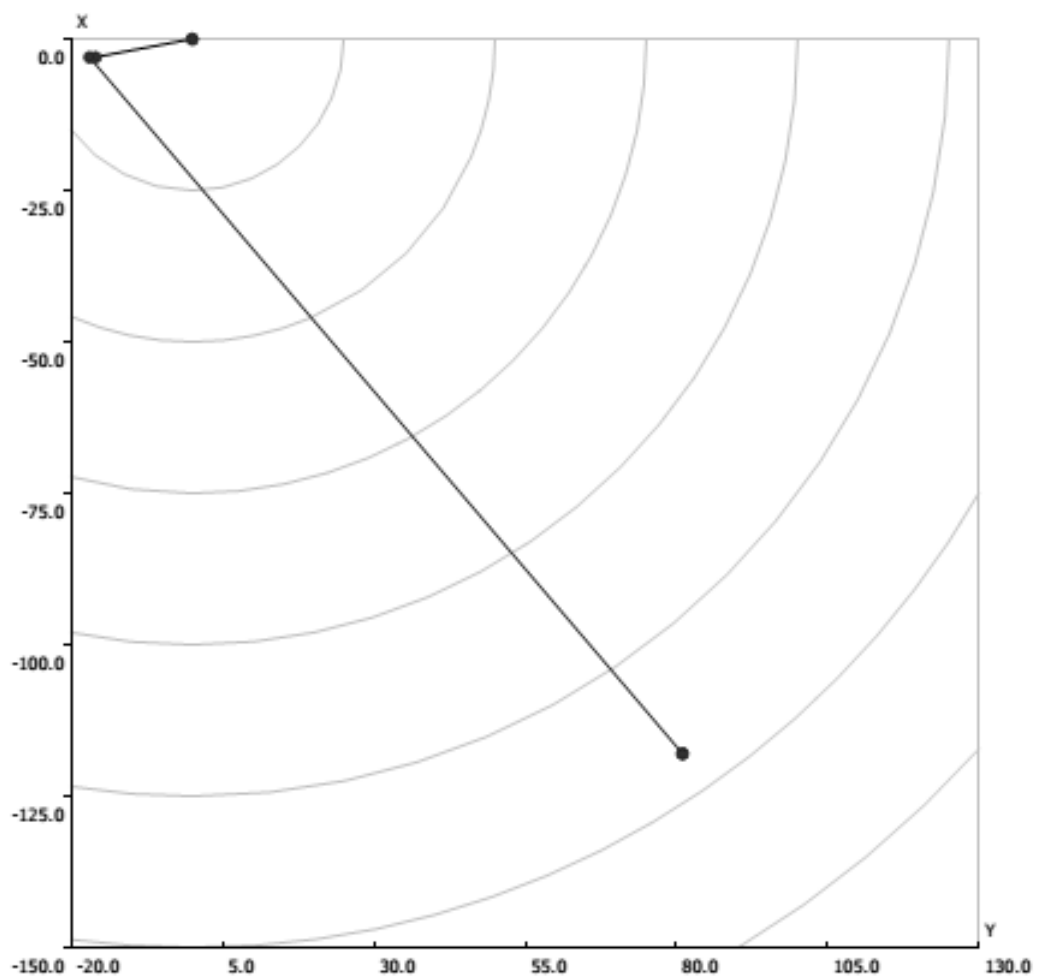


Рис. 6. Планові переміщення станції EPN/EUREF - EVPA

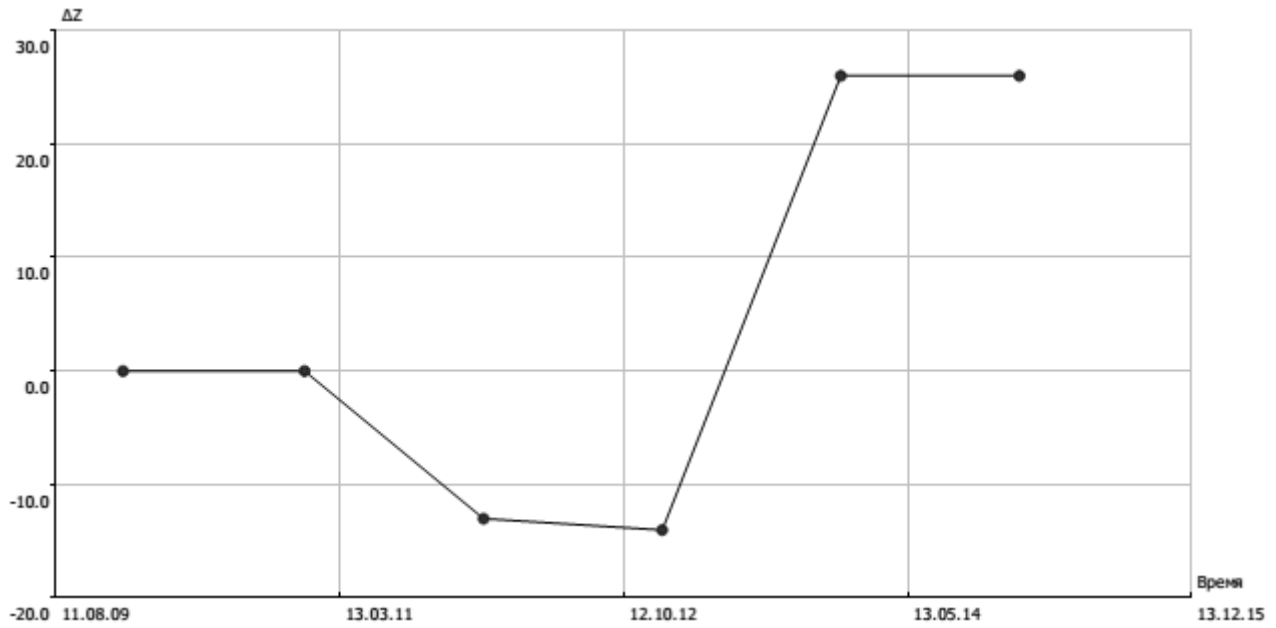


Рис. 7. Вертикальні переміщення станції EPN/EUREF - EVPA

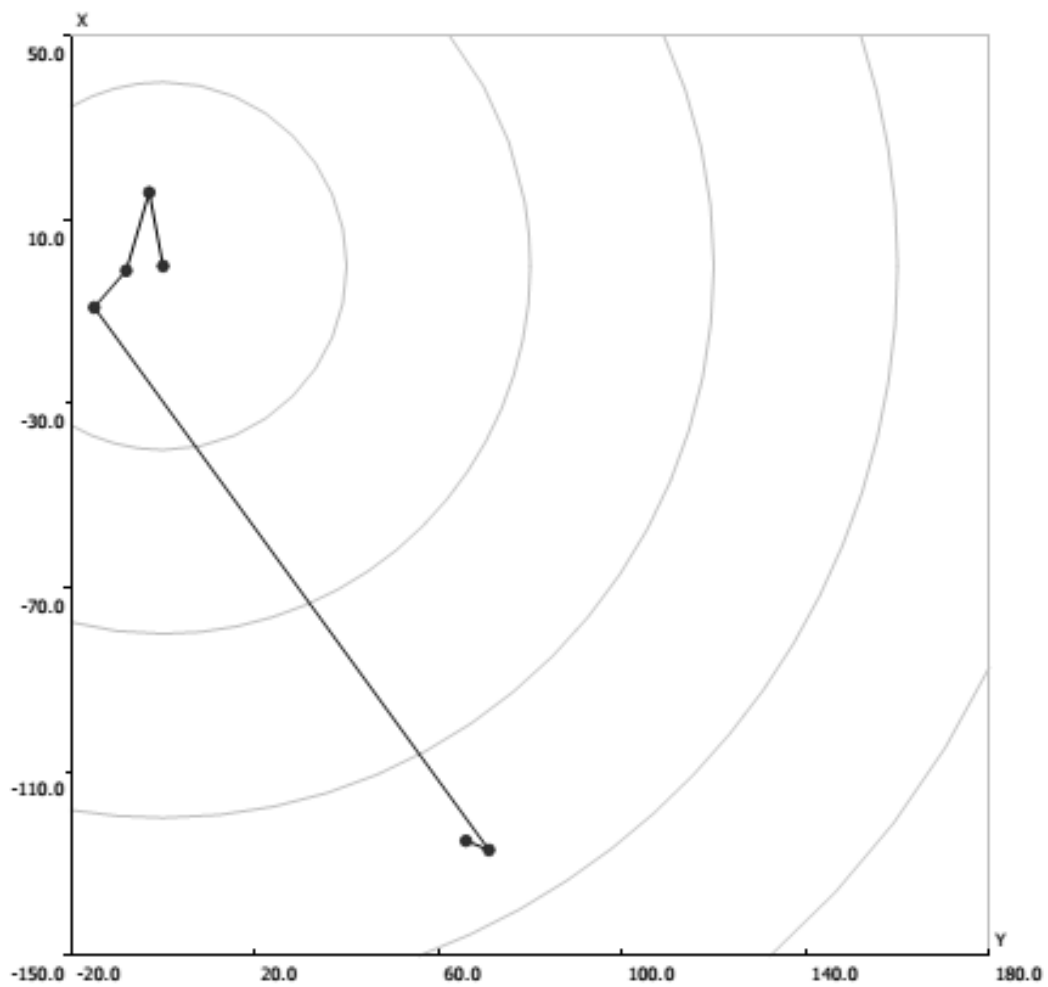


Рис. 8. Планові переміщення станції EPN/EUREF - MDVJ

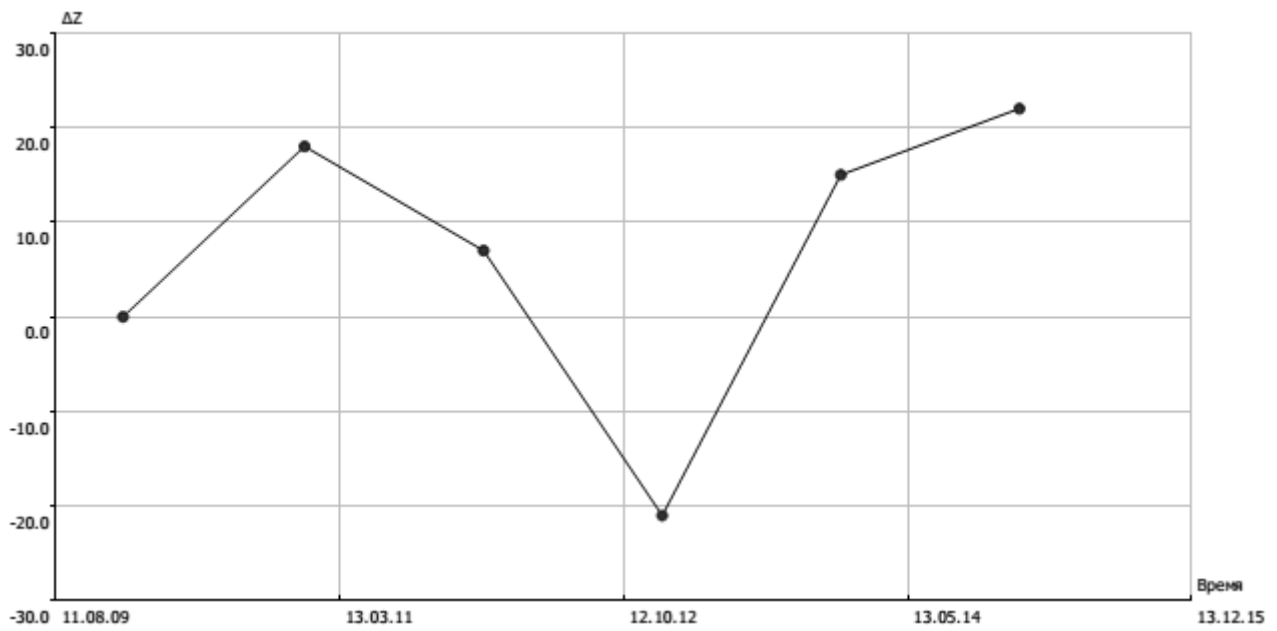


Рис. 9. Вертикальні переміщення станції EPN/EUREF - MDVJ

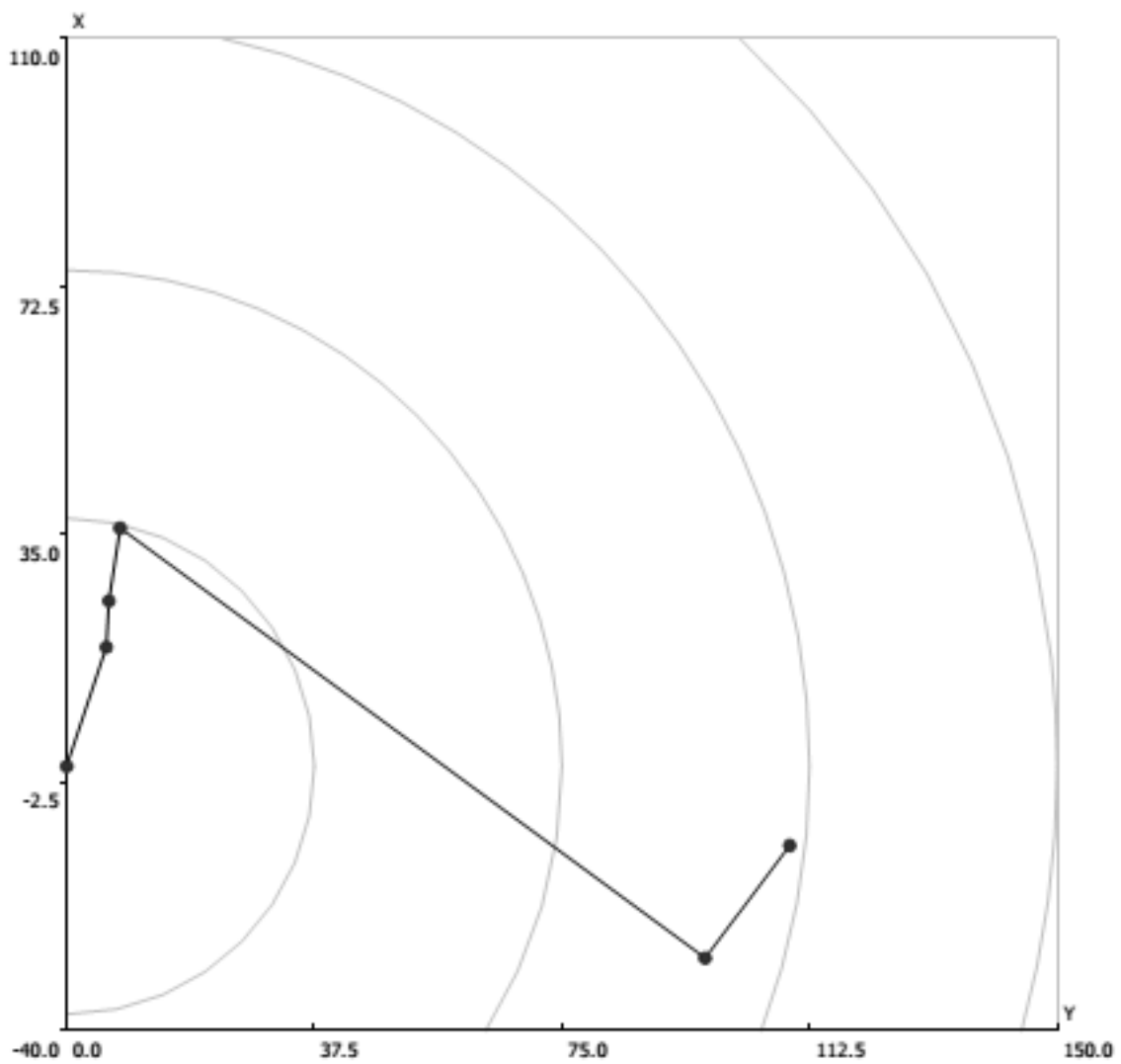


Рис. 10. Планові переміщення станції EPN/EUREF - HOFN

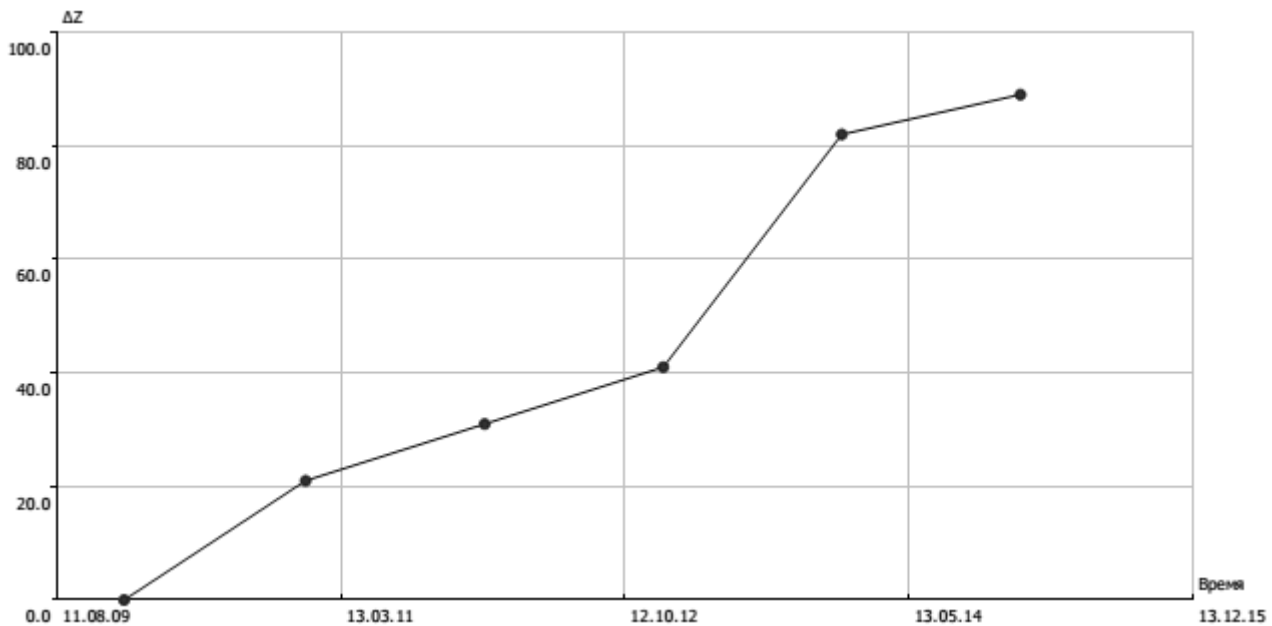


Рис. 11. Вертикальні переміщення станції EPN/EUREF – HOFN

Представлені переміщення на рис. 2-11 вказують на наявність суттєвих геодинамічних процесів, які можуть вплинути на процес експлуатації інженерних споруд.

Для подальшого аналізу обчислимо різниці між умовно першим циклом спостережень (2007 р.) та останнім циклом. Обчислені переміщення представлені в табл.

Для подальшого аналізу використаємо метод скінченних елементів. Загальна ідея цього методу полягає у наступному [12-15]. Для поля переміщень записують загальне рівняння:

$$\mathbf{u} = d\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{t}, \quad (1)$$

де $\mathbf{u}$ - вектор-стовпчик виміряних переміщень; $\mathbf{x}$ - вектор координат точок; $\mathbf{t}$ - вектор зміщень елементів,

$$d\mathbf{F} = \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_r, \quad (2)$$

градієнт переміщень, утворений симетричним тензором деформації $\mathbf{T}_d$ та антисиметричним тензором повороту (обертання) $\mathbf{T}_r$.

Після перетворень, які можна знайти наприклад у [1,3], виразимо переміщення u_1, u_2, u_3 у напрямку координатних вісей x, y, z через наступні рівняння:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= e_{11}x + e_{12}y + e_{13}z + w_{13}z - w_{12}y + t_1; \\ u_2 &= e_{22}x + e_{12}y + e_{23}z + w_{12}x - w_{23}z + t_2; \\ u_3 &= e_{33}x + e_{13}y + e_{23}z + w_{23}y - w_{13}x + t_3, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де e_{ii} та e_{ij} компоненти тензора $\mathbf{T}_d$; w_{ij} компоненти тензора $\mathbf{T}_r$.

Компоненти тензорів разом із зміщеннями t_i є невідомими і можуть бути визначені з вирішення системи рівнянь, введенням вимірних переміщень для кожної точки u_i . Після визначення компонентів тензору (2), за відомими формулами розраховують головні напрямки стиснення або розтягнення, повну дилатацію, зміщення деформацій та їх орієнтування.

Головною перевагою застосування такого підходу до дослідження деформацій є незалежність наведених вище параметрів деформацій від системи координат.

Таблиця

Переміщення пунктів мережі EPN/EUREF на 2014 р.

Станція	δX , м	δY , м	δZ , м	Станція	δX , м	δY , м	δZ , м
POUS	-0.0921	0.0975	0.0677	ALME	-0.0557	0.1142	0.082
ANKR	-0.0336	-0.0492	0.045	AUT1	-0.0889	0.1281	0.0202
BADH	-0.0691	0.1056	0.0821	BELF	-0.0641	0.0935	0.0629
BORJ	-0.0872	0.0982	0.0495	BRST	-0.0688	0.1112	0.0633
BUCU	-0.088	0.1081	0.0743	BUDP	-0.0891	0.0909	0.0528
BUTE	-0.0937	0.1081	0.0644	COST	-0.0953	0.0946	0.0688
DRES	-0.0907	0.0998	0.0569	ENTZ	-0.0953	0.1064	0.0542
EUSK	-0.0902	0.1001	0.0539	EVPA	-0.1182	0.0848	0.0358
GLSV	-0.0971	0.0909	0.0641	GRAZ	-0.0997	0.1065	0.0673
HELG	-0.0881	0.1001	0.0531	HERS	-0.0869	0.1011	0.055
HERT	-0.0741	0.1012	0.0648	HOBU	-0.093	0.0982	0.0522
HOE2	-0.087	0.0976	0.0522	HOFN	0.0019	0.1123	0.1053
IGEO	-0.105	0.094	0.0634	ISTA	-0.1023	0.1045	0.0561
KARL	-0.0851	0.1031	0.0634	KIRU	-0.0872	0.0675	0.0629
KLOP	-0.0816	0.1049	0.0582	LAMP	-0.0696	0.1093	0.0913
LEON	-0.0524	0.1119	0.0755	MALL	-0.0699	0.1452	0.092
MATE	-0.1146	0.1071	0.0972	MDVJ	-0.1229	0.0694	0.0385
METS	-0.0994	0.084	0.0438	MOPS	-0.1343	0.1127	0.0739
MORP	-0.0702	0.0987	0.0647	MSEL	-0.0458	0.1224	0.1433
NICO	-0.1141	0.0525	0.0846	ONSA	-0.0781	0.0879	0.0611
ORID	-0.0832	0.1275	0.0581	OSJE	-0.0076	0.0003	0.0098
POTS	-0.0955	0.0975	0.0646	ZECK	-0.1291	0.0894	0.0657
PTBB	-0.088	0.1011	0.0607	RABT	-0.0567	0.1099	0.0895
REYK	-0.1363	-0.0238	0.0352	SASS	-0.0955	0.0953	0.0479
SBGZ	-0.1904	0.0817	-0.0328	TRDS	-0.0698	0.0744	0.0782
TRFB	-0.2096	0.078	-0.0649	TUBI	-0.0961	0.0725	0.0502
UNTR	-0.0934	0.1024	0.0849	USDL	-0.0988	0.1005	0.0673
VFCH	-0.0795	0.1204	0.0601	VIL0	-0.068	0.0736	0.0905
WTZR	-0.093	0.1062	0.0653	YEBE	-0.0584	0.1181	0.0758

За геоцентричними координатами пунктів виконаємо триангулювання та побудуємо триангуляцію Делоне для вибраних пунктів. Побудована триангуляція представлена на рис. 12. Оскільки побудована триангуляція Делоне найкращим чином поєднує між собою пункти мережі, то утворені в результаті триангуляції трикутники можна розглядати як скінченні елементи на які виконано розбиття земної поверхні [2]. В такому випадку для кожного скінченного елементу можна обчислити основні деформаційні характеристики. Для цього за виразом (3) обчислюють параметри e_{ij} .

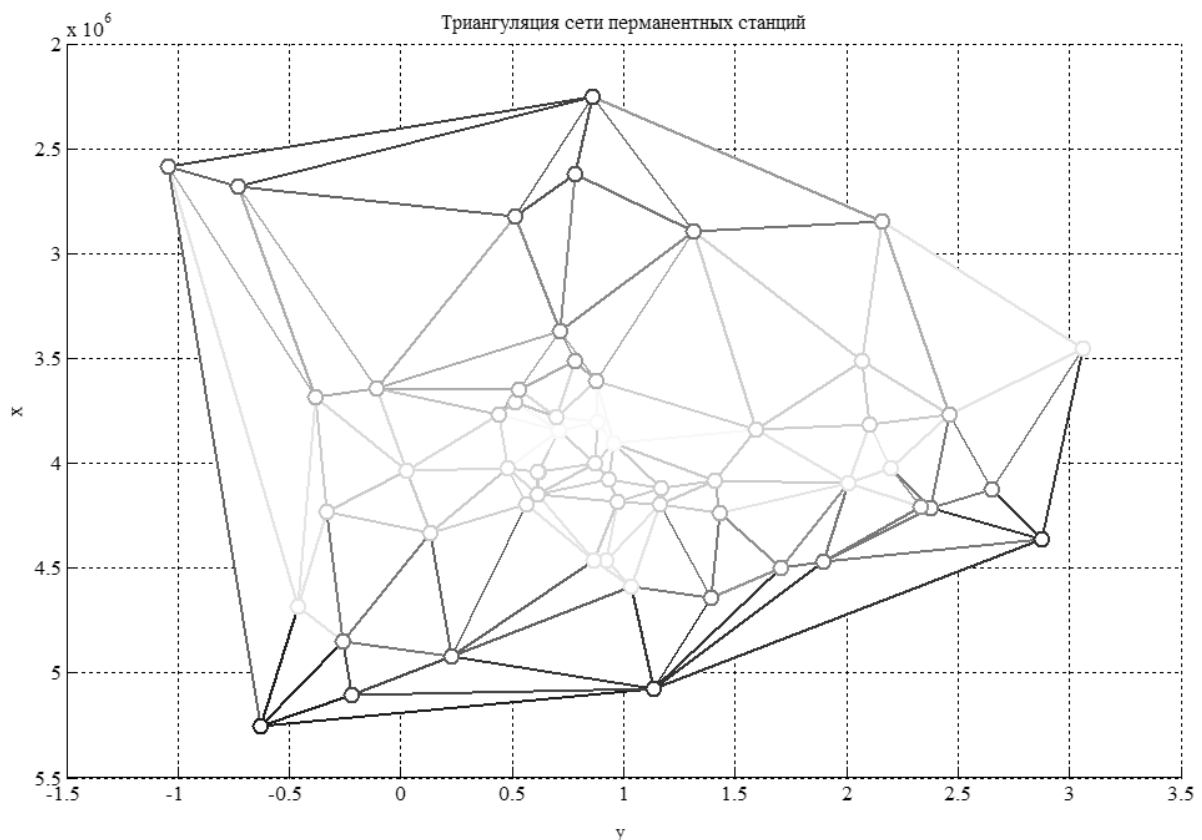


Рис. 12. Триангуляція Делоне, побудована на мережі станцій EPN/EUREF

За виразами (1) – (3) було розраховано основні деформаційні характеристики та використовуючи онлайн сервіс [10,14] відображено ці характеристики на карті Європи. Обчислені деформаційні характеристики у графічному вигляді наведено на рис. 13 – 21.

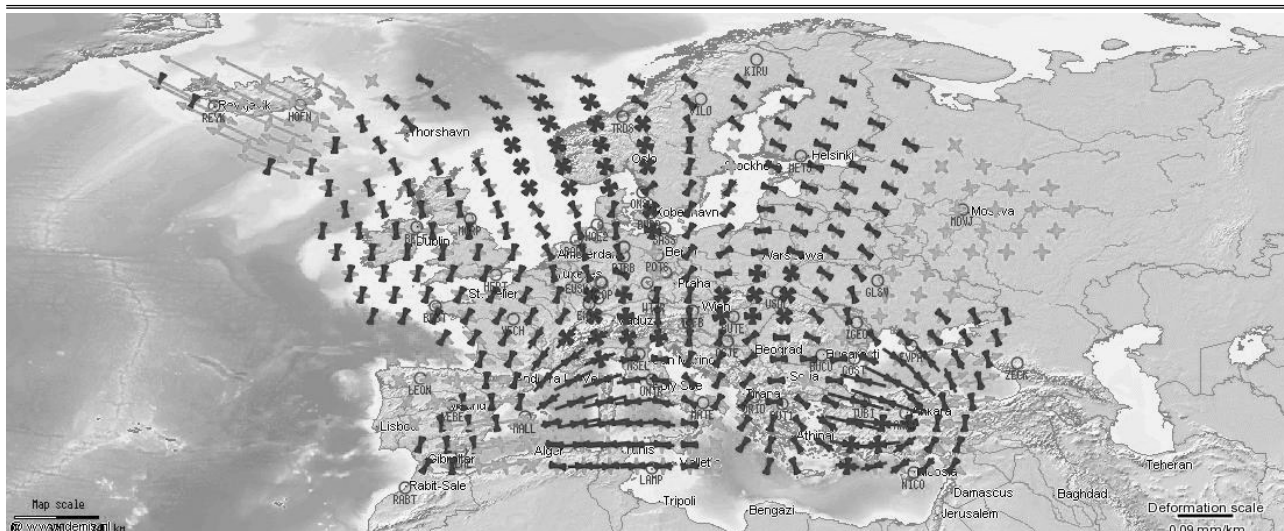


Рис. 13. Розподіл компонентів стиснення-розтягнення на території Європи за період 2007-2008 рр.



Рис. 14. Вектори переміщень постійних станцій на території Європи за період 2007-2008 рр.

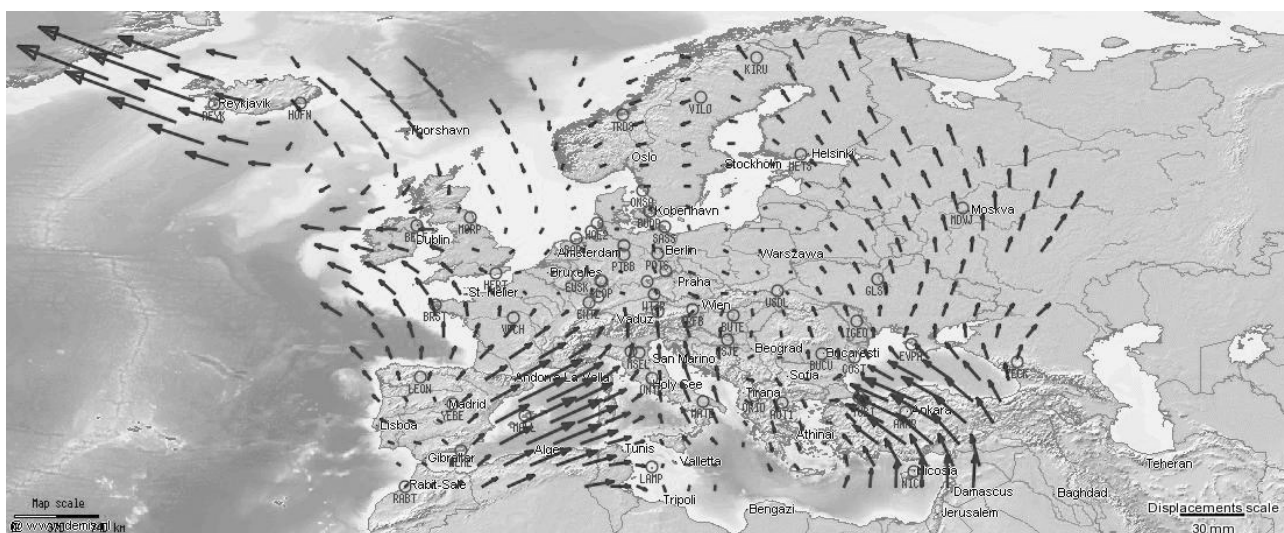


Рис. 15. Поле переміщень постійних станцій на території Європи за період 2007-2008 рр.



Рис. 16. Розподіл компонентів стиснення-розтягнення на території Європи за період 2007-2010 рр.



Рис. 17. Вектори переміщень постійних станцій на території Європи за період 2007-2010 рр.

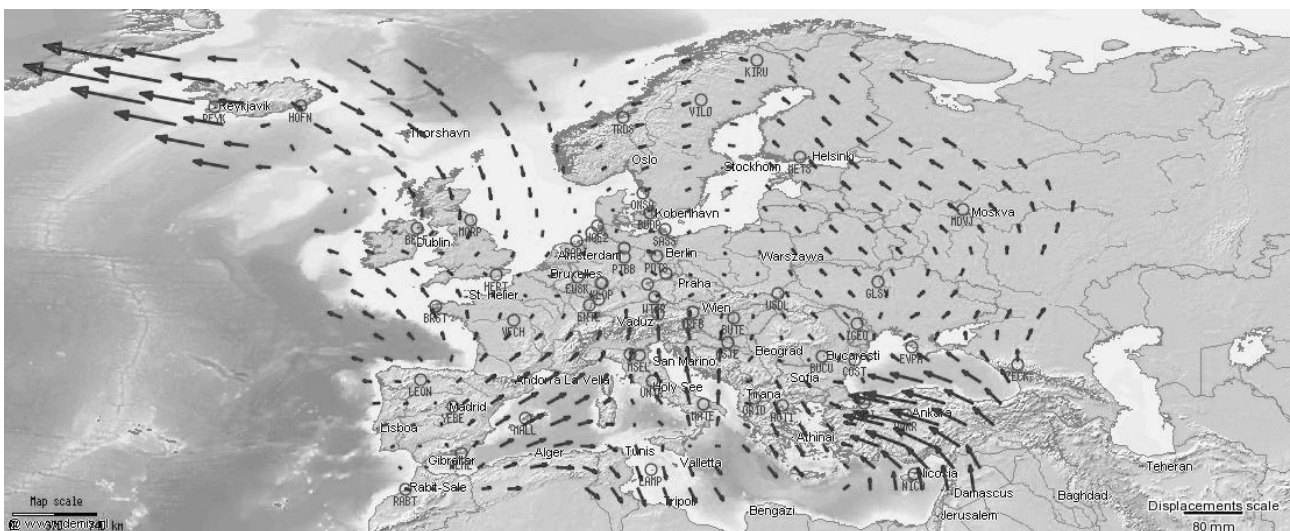


Рис. 18. Поле переміщень постійних станцій на території Європи за період 2007-2010 рр.



Рис. 19. Розподіл компонентів стиснення-розтягнення на території Європи за період 2007-2014 рр.



Рис. 20. Вектори переміщень перманентних станцій на території Європи за період 2007-2014 рр.

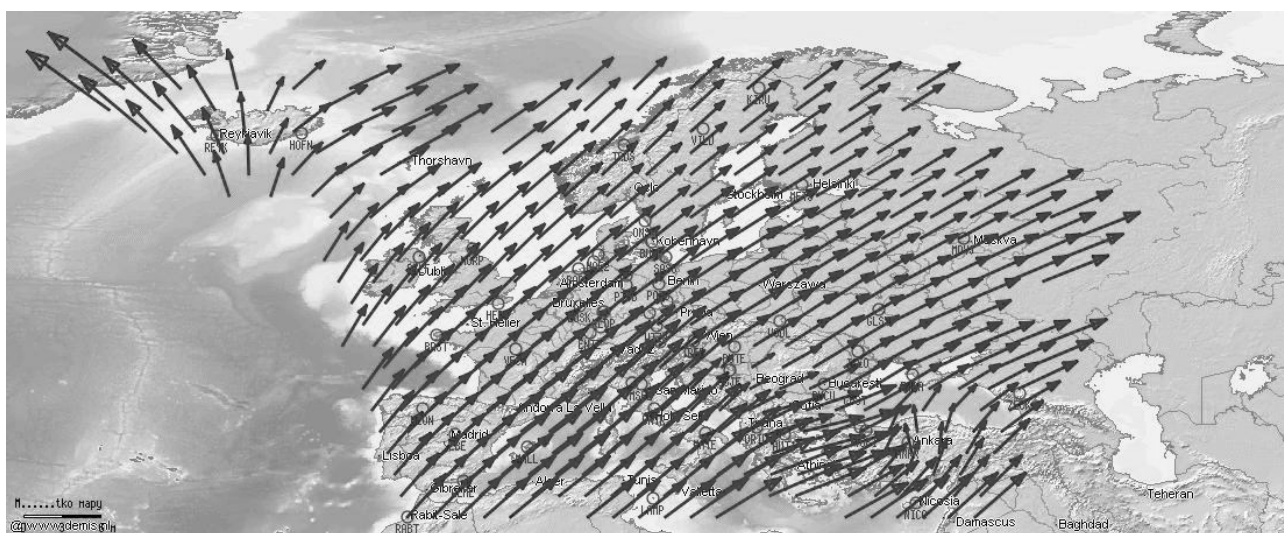


Рис. 21. Поле переміщень перманентних станцій на території Європи за період 2007-2014 рр.

Отримані результати дозволяють провести детальний аналіз кінематики і характеру деформаційних процесів на досліджуваній території. Такий підхід дозволяє більш якісно підійти до процесу проектування і зведення інженерних споруд і врахувати особливості експлуатації.

Висновки та рекомендації. В роботі представлено методику та результати аналізу просторових переміщень пунктів Європейської Перманентної ГНСС-мережі EPN/EUREF за період з 2007 по 2014 рр., з використанням методів механіки, яка дозволяє визначити зони критичних деформацій та врахувати ці деформації при проектуванні інженерних споруд. Встановлено наявність значних за величиною (більше 100 мм) горизонтальних та вертикальних переміщень. За допомогою методу скінченних елементів розраховано основні деформаційні характеристики (стиснення-розширення, дилатація, зміщення) та побудовано поля переміщень і деформаційних характеристик за встановлений період. В подальшому пропонується наведений аналіз поєднати із результатами геологічних спостережень.

Список літератури

1. Asadi, A., Quanbari, H., Nikoonejad, A. (2013) Strain Analysis of the Darvazeh Quran Fault, Zagros Mountains, Iran, Iranian Journal of Science & Technology, 37A4, pp. 467-475.
2. Belhadj, A., Ghezali, B., Kahlouche, S. (2012) Triangulation of Delaunay: Application to the Deformation Monitoring of Geodetic Network by Use of Strain Tensors. FIG Working Week 2012 – Territory, environment, and cultural heritage, Italy.
3. Berber, Mustafa (2006). Robustness Analysis of Geodetic Networks. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 242, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 121 pp.
4. Bond, J. (2004). An Investigation on the Use of GPS for Deformation Monitoring in Open Pit Mines. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 222, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 140 pp.
5. Cai, J., Grafarend, E. W. (2007) Statistical Analysis of Geodetic Deformation (Strain Rate) Derived from the Space Geodetic Measurements of BIFROST Project in Fennoscandia, Journal of Geodynamics, 43, pp. 214-238.
6. Chen, Xin (1998). Continuous GPS Monitoring of Crustal Deformation with the Western Canada Defo17'111JdonArray: 1992-1995. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 195, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 158 pp.

7. Chunming, C., Dongchen, E., Weining, Q. (1997) Data processing and Analysis of Crustal Deformation Monitoring in the Fildes Region, West Antarctica. Chinese Journal of Polar Science, vol. 8, N2, pp.139-145.
8. Deniz, I., Ozener, H. (2010) Estimation of Strain Accumulation of Densification Network in Northern Marmara Region, Turkey. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, pp. 2135-2143.
9. Gourine, B., Benaicha, K. (2015) Robustness Analysis of the GPS Network of Oran city, Algeria. FIG Working Week 2015, From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World. Bulgaria
10. Labant, S., Weiss, G., Zuzik, J., Baran, M. (2014) Graphical Interpretation Deformation Analysis of Stability Area Using of Strain Analysis. Acta Montanistica Slovaca, vol. 19, pp. 31-40.
11. Shen, C. (2004). A Method for Processing Data from a Regional Continuous Crustal Deformation GPS Monitoring Network. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 221, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 125 pp.
12. Talich, M., Havrlant, J.: Application of deformation analysis and its new possibilities. In: Measuring the changes - joint symposia of 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, LNEC, Lisbon, Portugal, May 12-15 2008.
http://www.fig.net/commission6/lisbon_2008/papers/pst02/pst02_05_talich_mc057.pdf
13. Talich, M.: Analýza deformací v poddolovaných lokalitách z opakovaných polohových měření s využitím webové aplikace a mapových služeb WMS. Acta Montanistica Slovaca, ISSN 1335-1788, Ročník 12 (2007), mimoriadne číslo 3, 567-575. <http://actamont.tuke.sk/pdf/2007/s3/41Talich.pdf>
14. Talich, M.: Geometrical Analysis of Deformation Measurement using Continuum Mechanics by Web Application. In: Strategic Integration of Surveying Services, The XXX FIG General Assembly and Working Week 2007, Hong Kong SAR, China, 13-17 May 2007, ISBN 978-87-90907-59-4
http://www.fig.net/pub/fig2007/papers/ts_1f/ts01f_03_talich_1375.pdf
15. Talich, M.: Practical advantages of using the mechanics of continuum to analyse deformations obtained from geodetic survey. In: Measuring the changes - joint symposia of 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis and 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, LNEC, Lisbon, Portugal, May 12-15 2008.
http://www.fig.net/commission6/lisbon_2008/papers/pas07/pas07_03_talich_mc056.pdf

16. www.epncb.oma.be/_networkdata/ EUREF Permanent Network
17. www.monika.ag MONIKA Deformation Integrity Monitoring for GNSS-Positioning Services Including a Scalable Hazard Monitoring by the Karlsruhe Approach
18. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем. // В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.Ф. Ловягин. Новосибирск, СГГА, 2004. – с. 326.
19. Панкрушин В.К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем. - Новосибирск: СГГА, 2002. - 424 с.

Аннотация

Представленная работа рассматривает практическое применение метода конечных элементов к анализу пространственных перемещений станций европейской перманентной ГНСС-сети. Выполнен анализ перемещений перманентных станций за период с 2007 по 2014 гг. Установлено наличие значительных по величине (более 100 мм) горизонтальных и вертикальных перемещений. С помощью метода конечных элементов рассчитаны основные деформационные характеристики (сжатие-расширение, дилатация, смещение) и построены поля перемещений и деформационных характеристик за установленный период.

Ключевые слова: метод конечных элементов, перемещение, сдвиг, растяжение, деформация, тензор деформаций.

Annotation

This work examines the practical application of the finite elements method to analyze the spatial displacements of the permanent European GNSS stations network. The analysis of the permanent stations displacements for the period from 2007 to 2014 was carried out. The presence of large in size (100 mm) of horizontal and vertical displacements was fixed. With the help of the finite elements method to the main characteristics of deformation (compression-expansion, dilatation, and displacement) were calculated and the displacements fields and deformation characteristics for the specified period were built.