

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА» МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БРУСАК ІВАН ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК: 528.2

ДИСЕРТАЦІЯ
ОЦІНКА ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНОСТІ ТА НЕПРИПЛИВНИХ
АТМОСФЕРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ
КОРИ ЗА ДАНИМИ ГНСС-ВИМІРІВ

103 «Науки про Землю»

10 «Природничі науки»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело _____ / І.В.Брусак/

Науковий керівник Третяк Корнилій Романович, д.т.н., професор

ЛЬВІВ – 2022

АНОТАЦІЯ

Брусак І.В. Оцінка впливу сейсмічності та неприпливних атмосферних навантажень на деформації земної кори за даними ГНСС-вимірів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 «Науки про Землю» (10 «Природничі науки»). Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2022.

Одним із способів дослідження деформацій земної кори як для значних за площею територій, так і великих інженерних споруд є використання даних часових серій координат ГНСС-станцій. Часто аналізуючи часові серії координат мереж ГНСС-станцій помітні одночасні зміщення декількох станцій. При виключенні групи інструментальних похибок можна припускати, що такі зміщення викликані геофізичними факторами: припливними, неприпливними навантаженнями чи процесами в надрах планети. У цьому дослідженні розглянуто два із таких факторів: сейсмічність та неприпливні атмосферні навантаження.

Проблема прогнозу землетрусів досі повністю не вирішена, тому дослідження, що стосуються пошуку взаємозв'язків сейсмічності територій з іншими параметрами є важливими до розгляду. Для пошуку взаємозв'язків між деформаціями за вплив землетрусів та ГНСС-даних часто оперують багаторічними рядами даних, кількість набору яких постійно зростає. Якщо на сьогодні досить чітко виділяють пресеїсмічні, косеїсмічні та постсеїсмічні деформації землетрусів, то деформації спричинені впливом неприпливних атмосферних навантажень досліджені не так широко. Так, навіть конвенції Міжнародної служба обертання Землі (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) не рекомендують враховувати корекції за неприпливні атмосферні навантаження при опрацюванні ГНСС-даних. Проте перерозподіл атмосферних мас над пунктами спостережень спричиняють реальні

деформації земної кори, які можуть сягати до 20-30 мм за декілька днів у вертикальній складовій, що привертає увагу до цього феномену. Таким чином, основна увага дисертаційної роботи зосереджена на дослідженнях деформацій спричинених сейсмічністю та неприпливними атмосферними навантаженнями як для регіонального рівня: Європа, Карпато-Балканський регіон, так і локального характеру, наприклад, моніторингу деформацій гідротехнічних споруд Дністровської ГЕС-1.

У розділі 1 «Сучасний стан дослідження впливу сейсмічних та неприпливних атмосферних навантажень на деформації територій» проведений аналіз літературних джерел за тематикою. Розглянуті фактори впливу на ГНСС-дані для геодинамічних задач, які поділено на дві групи: інструментальні (ГНСС-апаратура та проходження сигналу від супутника до приймача) та геофізичні (екзогенні та ендегенні процеси, що деформують земну поверхню). Окремо для сейсмічного фактору оглянуто вплив окремих землетрусів та методику оцінки сукупної сейсмічної активності у регіоні. Серед неприпливних навантажень детально розглянуто атмосферне навантаження та наявні моделі таких зміщень.

У розділі 2 «Вплив неприпливних атмосферних навантажень та сейсмічності на регіональну геодинаміку» виділено по 1-му дослідженню для розгляду впливу неприпливних атмосферних навантажень та сейсмічності на регіональному рівні. Перше дослідження стосується впливу неприпливних атмосферних навантажень на ГНСС-станції, що розташовані в Україні і Європі, які були відстежені на кінець грудня 2019 року. Розглядаються вертикальні деформації земної кори, оскільки короткотривалий геодинамічний процес найбільш явно впливає на висотні складові ГНСС-станцій. Друге дослідження стосується впливу сейсмічності на деформацію території Карпато-Балканського регіону з 2010 по 2019 роки. Виділено зони з високим ступенем кореляції ($>0,84$) між абсолютною дилатацією $|\Delta|$ та великою піввіссю a еліпсів розсіювання

землетрусів. У Карпато-Балканському регіоні усі виділені території з багаторічним високим ступенем кореляцій (понад 5 років з 10) розташовані по одну зі сторін активних тектонічних розломів, які є зонами субдукції.

У розділі 3 «Вплив сейсмічності та неприпливних атмосферних навантажень на деформації великих інженерних об'єктів» розроблений та апробований метод виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій ГНСС-станцій. Алгоритм можна використовувати для диференціації кінематики конструктивних елементів інженерних споруд, промислових територій, геодинамічних полігонів, на території яких встановлені ГНСС-станції. Розглянута сейсмічність у регіоні Дністровського енергокомплексу та встановлений ймовірний зв'язок між наповненням Дністровського водосховища та проявами землетрусів. Показано, що вогнища землетрусів виникають у контакті залягання структур різного літологічного складу на глибині 1-3 км, ймовірно внаслідок їх тертя викликаних змінами навантажень. Обчислено функціональний зв'язок між енергією землетрусів і зміною об'єму води у водосховищі. Проаналізовано неприпливні атмосферні навантаження, що впливають на пружні деформації верхнього прошарку земної поверхні. Встановлено диференціацію висотного зсуву ГНСС-станцій розташованих на різних об'єктах Дністровської ГЕС-1: динаміка пунктів на греблі слабша, ніж для пунктів на берегах. Пункти ГНСС-мережі на греблі розташовані на щільних породах венду (алевроліти, аргіліти, частково пісковики), які залягають на гранітах. Неоднорідність структурної будови підстилаючих гірських порід під спорудами очевидно призводить до зафіксованих тріщин в конструктивних елементах ГЕС, особливо в ділянках контакту греблі з берегом.

Ключові слова: деформації земної кори, землетруси, неприпливні атмосферні навантаження, часові серії координат, Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС)

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у наукових періодичних виданнях України, які включено
до міжнародних наукометричних баз:**

1. Tretyak, K., & Brusak, I. (2020). The research of interrelation between seismic activity and modern horizontal movements of the Carpathian-Balkan region based on the data from permanent GNSS stations. *Науковий журнал "Геодинаміка"*, Випуск 1(28), 5-18. DOI:10.23939/jgd2020.01.005.

2. Tretyak, K., Brusak, I., Bubniak, I., Zablotskyi F. (2021). Impact of non-tidal atmospheric loading on civil engineering structures. *Науковий журнал "Геодинаміка"*, Випуск 2(31), 16-28, DOI:10.23939/jgd2021.02.016

**Стаття у науковому періодичному фаховому виданні України за
спеціальністю:**

3. Tretyak, K., & Brusak, I. (2021). Method for detecting short-term displacements of the Earth's surface by statistical analysis of GNSS time series. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, Випуск 93, 27-34. DOI:10.23939/istcgcap2021.93.027

**Публікація у науковому виданні, яка додатково відображає наукову
цінність дисертації:**

4. Третяк, К., Корлятович, Т., Брусак, І., Смірнова, О. (2021). Диференціація кінематики греблі Дністровської ГЕС-1 (за даними ГНСС-моніторингу просторових зміщень). *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 42, 57-66. DOI:10.33841/1819-1339-2-42-57-66

**Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, а
саме матеріали та тези міжнародних і вітчизняних науково-технічних
та наукових конференцій:**

5. Brusak, I. & Tretyak, K. (2020, December) About the phenomenon of subsidence in continental Europe in December 2019 based on the GNSS stations

data. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020», Lviv, 2020 DOI: 10.3997/2214-4609.20205717

6. Brusak, I., & Tretyak, K. (2021). On the impact of non-tidal atmospheric loading on the GNSS stations of regional networks and engineering facilities. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021». European Association of Geoscientists & Engineers, Lviv, 2021 DOI: 10.3997/2214-4609.20215K3013

7. Tretyak, K., Korliatovych, T., & Brusak, I. (2021). Applying the statistical method of GNSS time series analysis for the detection of vertical displacements of Dnister HPP-1 dam. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021». European Association of Geoscientists & Engineers, Lviv, 2021 DOI: 10.3997/2214-4609.20215K3012

ABSTRACT

Brusak I.V. Estimation of seismicity and non-tidal atmospheric loading on deformations of Earth crust based on GNSS data. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) on specialty 103– Earth Sciences (10 «Natural Sciences»). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2022.

One of the ways to study the deformations of the Earth crust for both large areas as well as for large engineering structures, is to use the data of time series coordinates of GNSS stations. Frequently, when analyzing time series of coordinates of networks of GNSS stations, simultaneous displacements of several stations can be noticed. After exclusion of instrumental errors, it can be assumed that such displacements are caused by geophysical factors: tidal, non-tidal loading or processes in the bowels of the planet. Two of these factors are considered in this study: seismicity and non-tidal atmospheric loading.

The problem of earthquakes forecasting has not yet been fully resolved. Thus, studies related to the search for interrelationships between the seismicity of territories and other parameters need further consideration. During the search of interrelationships between deformations under the influence of earthquakes and GNSS data, multi-year series of data, the number of which is constantly increasing, are often used. While pre-seismic, co-seismic and post-seismic deformations of earthquakes are quite clearly distinguished today, the deformations caused by the influence of non-tidal atmospheric loading have not been studied at the same extent. Thus, even the conventions of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) do not recommend to take into account corrections for non-tidal atmospheric loading when processing GNSS data. However, the redistribution of atmospheric masses over the observation points causes real deformations of the Earth crust, which during several days can reach 20-30 mm in the vertical component; such fact draws

attention to this phenomenon. Thus, the main focus of the dissertation work is dedicated to studies of deformations caused by seismicity and non-tidal atmospheric loading both for the regional level (Europe, the Carpatho-Balkan region), as well as for local issues, for example, monitoring deformations of hydrotechnical structures of the Dnister HPP-1.

In the first section "The current state of research on the influence of seismic and non-tidal atmospheric loading on the deformation of territories" the analysis of literary sources of the studied issue is carried out. Factors influencing GNSS-data for geodynamic problems are considered, which are divided into two groups: instrumental (GNSS equipment and signal transmission from the satellite to the receiver) and geophysical (exogenous and endogenous processes that deform the Earth surface). Separately, for the seismic factor the influence of individual earthquakes and the method of assessing the total seismic activity in the region were reviewed. Among the non-tidal loading, the atmospheric loading and available models of such displacements are considered in detail.

In second section "Influence of non-tidal atmospheric loading and seismicity on regional geodynamics" the first study is introduced to consider the influence of non-tidal atmospheric loading and seismicity at the regional level. The first study concerns the impact of non-tidal atmospheric loading on GNSS stations located in Ukraine and Europe, which were monitored at the end of December 2019. Vertical deformations of the Earth crust are considered, since the short-term geodynamic process most obviously affects the height components of GNSS stations. The second study concerns the influence of seismicity on the deformation of the territory of the Carpatho-Balkan region since 2010 until 2019. Zones with a high degree of correlation (>0.84) between the absolute dilatation $|\Delta|$ and the major semi-axis a of the earthquakes scattering ellipses are highlighted. In the Carpatho-Balkan region, all selected territories with long-term high correlations (more than 5 years out of 10) are located on one side of active tectonic faults, which are subduction zones. In the

Carpatho-Balkan region, all selected territories with long-term high correlations (more than 5 years out of 10) are located on one side of active tectonic faults, which are subduction zones.

In third chapter "The influence of seismicity and non-tidal atmospheric loading on the deformation of large engineering objects" the method of indication of short-term displacements of the earth's surface based on the statistical analysis of time series of GNSS stations has been developed and tested. The algorithm can be used to differentiate the kinematics of structural elements of engineering structures, industrial territories, geodynamic polygons, on the territory of which GNSS stations are installed. Seismicity in the region of the Dniester energy complex is considered and the probable connection between the filling of the Dniester reservoir and the earthquakes signs is established. It is shown that the epicenters of earthquakes occur in the contact of structures of different lithological composition at a depth of 1-3 km, probably due to their friction caused by changes in loading. The functional interrelationship between the energy of earthquakes and the change in the volume of water in the reservoir was calculated. The non-tidal atmospheric loading affecting the elastic deformations of the upper layer of the Earth surface, on which the points of the Dniester HPP-1 network are located, were analyzed. The differentiation of the height shift of GNSS stations located at different objects of the Dniester HPP-1 was established: the dynamics of points on the dam is weaker than that for points on the banks. The heterogeneity of the tectonic composition of the underlying rocks under the structures obviously leads to indicated cracks in the structural elements of the HPP, especially in the areas of contact between the dam and the shore.

Keywords: deformations of the Earth crust, earthquakes, non-tidal atmospheric loading (NTAL), time series of coordinates, Global Navigation Satellite Systems (GNSS).

**THE RESEARCHER LIST OF PUBLICATIONS WHICH CONTAIN
THE MAIN SCIENTIFIC RESULTS OF THIS DISSERTATION**

**Publications in scientific editions of Ukraine, which are included in
international science-computer databases:**

1. Tretyak, K., & Brusak, I. (2020). The research of interrelation between seismic activity and modern horizontal movements of the Carpathian-Balkan region based on the data from permanent GNSS stations. *Geodynamics*, 1(28), 5-18. DOI:10.23939/jgd2020.01.005.

2. Tretyak, K., Brusak, I., Bubniak, I., Zablotskyi F. (2021). Impact of non-tidal atmospheric loading on civil engineering structures. *Geodynamics*, 2(31), 16-28, DOI:10.23939/jgd2021.02.016

Publications in scientific professional editions of Ukraine:

3. Tretyak, K., & Brusak, I. (2021). Method for detecting short-term displacements of the Earth surface by statistical analysis of GNSS time series. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography* 93, 27-34. DOI:10.23939/istcgcap2021.93.027

**Publication in a scientific journal, which additionally reflects the
scientific value of the dissertation:**

4. Tretyak, K., Korliatovych, T., Brusak, I., Smirnova, O. (2021). Differentiation of kinematics of the Dnister HPP-1 dam (based on the data of GNSS monitoring of spatial displacements). *Modern achievements of geodesic science and industry*, 42, 57-66. DOI:10.33841/1819-1339-2-42-57-66

**Publications that testify to the approbation of the dissertation
materials, namely the materials and abstracts of international and national
scientific and technical conferences:**

5. Brusak, I. & Tretyak, K. (2020, December) About the phenomenon of subsidence in continental Europe in December 2019 based on the GNSS stations data. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020», Lviv, 2020 DOI: 10.3997/2214-4609.20205717

6. Brusak, I., & Tretyak, K. (2021). On the impact of non-tidal atmospheric loading on the GNSS stations of regional networks and engineering facilities. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021». European Association of Geoscientists & Engineers, Lviv, 2021 DOI: 10.3997/2214-4609.20215K3013

7. Tretyak, K., Korliatovych, T., & Brusak, I. (2021). Applying the statistical method of GNSS time series analysis for the detection of vertical displacements of Dnister HPP-1 dam. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021». European Association of Geoscientists & Engineers, Lviv, 2021 DOI: 10.3997/2214-4609.20215K3012

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	15
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНИХ ТА НЕПРИПЛИВНИХ АТМОСФЕРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ДЕФОРМАЦІЇ ТЕРИТОРІЙ.....	23
1.1. Огляд факторів впливу на результати ГНСС-даних для геодинамічних задач.....	24
1.2. Сейсмічний вплив на деформації територій.....	38
1.2.1. Вплив локальних зон сейсмічності	38
1.2.2. Вплив сукупної сейсмічної активності на зміщення територій	42
1.3. Деформації територій під впливом неприпливних атмосферних навантажень	46
1.3.1 Сучасний стан дослідження неприпливних атмосферних навантажень	46
1.3.2. Моделі неприпливних атмосферних навантажень та їх врахування для геодинамічних досліджень	48
Висновки до розділу 1	53
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ НЕПРИПЛИВНИХ АТМОСФЕРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА СЕЙСМІЧНОСТІ НА РЕГІОНАЛЬНУ ГЕОДИНАМІКУ.....	55
2.1. Просторово-часова оцінка висотних зміщень ГНСС-станцій Європи під впливом неприпливних атмосферних навантажень.....	55
2.1.1. Сумісні висотні зміщення ГНСС-станцій української мережі Геотерраса	55

2.1.2. Методика оцінки короткотривалих зміщень у часових серіях координат ГНСС-станцій на території України.....	64
2.1.3. Просторово-часова оцінка короткотривалих висотних зміщень на території Європи.....	68
2.1.4 Аналіз вертикальних деформацій земної кори Європи за неприпливні атмосферні навантаження.....	76
2.2. Дослідження взаємозв'язку сейсмічності та сучасних горизонтальних деформацій Карпато-Балканського регіону	81
2.2.1 Тектонічні особливості регіону та сейсмічна активність	81
2.2.2. Результати опрацювання ГНСС-станцій та оцінка горизонтальних деформацій регіону	86
2.2.3. Взаємозв'язок параметрів горизонтальних деформацій регіону та узагальненої сейсмічності	88
Висновки до розділу 2	97
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ СЕЙСМІЧНОСТІ ТА НЕПРИПЛИВНИХ АТМОСФЕРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ДЕФОРМАЦІЇ ВЕЛИКИХ ІНЖЕНЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	99
3.1. Метод виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій ГНСС-станцій.....	99
3.1.2. Апробація методу для ГНСС-станцій мережі Геотерраса	103
3.1.3. Апробація методу для великих інженерних об'єктів на прикладі моніторингової мережі греблі Дністровської ГЕС-1	109
3.2. Аналіз впливу локальних землетрусів та неприпливних атмосферних навантажень на моніторингову мережу Дністровської ГЕС-1	113
3.2.1. Стаціонарна система моніторингу просторових зміщень, споруд Дністровської ГЕС-1 та локальна сейсмічність регіону	114

3.2.2. Взаємозв'язок сейсмічності регіону та зміни об'ємів верхнього Дністровського водосховища.....	122
3.2.3 Результати впливу неприпливних атмосферних навантажень на мережу моніторингу Дністровської ГЕС-1.....	129
Висновки до розділу 3	141
ВИСНОВКИ.....	143
Список використаних джерел	146
Додатки.....	165

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

APL	Навантаження атмосферного тиску (Atmospheric Pressure Loading)
C3S	Служба зміни клімату Copernicus (Copernicus Climate Change Service)
DD	Метод подвійних різниць (Double Differences)
DORIS	Доплерівська Орбітографія та Радіопозиціонування (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite)
ECMGFZ	Німецький дослідницький центр геонаук у Потсдамі (Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Potsdam)
EMSC	Європейсько-Середземноморський сейсмологічний центр (European-Mediterranean Seismological Centre)
EPN	Європейська мережа перманентних станцій (EUREF Permanent Network)
GPS	Глобальна система позиціонування США (Global Positioning System)
IERS	Міжнародна служба обертання Землі (International Earth Rotation and Reference Systems Service)
IGS	Міжнародна служба GNSS (International GNSS Service)
ITRF	Реалізація міжнародної земної системи відліку (International Terrestrial Reference Frame)
ITRS	Міжнародна земна референсна система (International Terrestrial Reference System)
NGL	Геодезична лабораторія Невади (Nevada Geodetic Laboratory)
NTAL	неприпливне атмосферне навантаження (Non-Tidal Atmospheric Loading)

PPP	Абсолютний метод точного позиціонування (Precision Point Positioning)
RINEX	Незалежний формат обміну даних приймача (Receiver independent exchange format)
SLR	Супутникове лазерне визначення дальності Satellite Laser Ranging
VLBI	Інтерферометрія з наддовгою базою (Very-long-baseline interferometry)
ГЕС	Гідроелектростанція
ГНСС	Глобальні навігаційні супутникові системи (Global Navigation Satellite Systems)
СЄП	Східноєвропейської платформа
СКП	Середньоквадратична похибка
ССМПЗС	Стационарна система моніторингу просторових зміщень споруд

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Враховуючи сучасні геодинамічні зміни як у глобальному, так і регіональному масштабах існує проблема диференціації земної кори як за динамікою, так і напрямом сучасних рухів територій. Також виникає загроза стійкості великих інженерних споруд, наприклад гідроелектростанцій, які функціонують близько півстоліття та потребують постійного моніторингу їх стану. Одним із методів дослідження сучасної геодинаміки територій як у глобальному, так і в регіональному аспектах є аналіз часових серій координат постійно діючих ГНСС-станцій.

Аналізуючи часові серії координат мереж ГНСС-станцій, помітні одночасні зміщення декількох станцій. Наприклад, виявлений висотний зсув ГНСС-станцій на території Європи, який відбувся у грудні 2019 року [42]. Такі явища мають короткий часовий прояв для вирішення геодинамічних задач, однак суттєво впливають на геодезичні мережі і практичний моніторинг об'єктів. Для того, щоб відслідковувати подібні зміщення потрібні мережі ГНСС-станцій з єдиним центром та методологією опрацювання даних, наприклад, як мережа Геотерраса на території України. Аналіз факторів впливу на координати часових серій координат ГНСС-станцій є комплексним завданням, а використання ГНСС-даних без виключення їх впливу для геодинамічних задач є неприйнятним. Питаннями аналізу геодинамічних зміщень за ГНСС-даними займалися закордонні та вітчизняні вчені (Bock O., Burg, G., Mémin, A., Métivier, L., Sośnica, K., Haritonova, D., Dong D, Fang P, Tregoning P., van Dam T. M., Blewitt G., Heflin M., Munekane H, Watson C., Dach R., Третяк К., Савчук С., Романюк В., Іщенко М.).

Для моніторингу великих інженерних об'єктів створюються спеціальні мережі, які зокрема включають перманентні ГНСС-станції,

наприклад, мережа стаціонарної системи моніторингу просторових зміщень споруд (ССМПЗС) Дністровської ГЕС-1. Аналіз часових серій координат мереж ГНСС-станцій дозволяє виявляти періоди аномальних зміщень та диференціювати кінематику греблі Дністровської ГЕС-1 [26, 141]. Питаннями моніторингу великих інженерних об'єктів займалися закордонні та вітчизняні вчені (Dardanelli, G., La Loggia G., Behr, J. A., Hudnut K., Yavaşoğlu H. , Kalkan, Y., Третяк К., Савчин І.).

Як правило, у часових серіях координат ГНСС-станцій можна виділити тривалий лінійний тренд, часто зумовлений рухом тектонічної плити, та періодичні (сезонні) складові. Ці зміни координат ГНСС-станцій спричинені різними факторами, які поділяємо на інструментальні та геофізичні (припливні та неприпливні навантаження). Поділ на припливні та неприпливні навантаження на поверхню Землі виникає, якщо природа впливу залежить від гравітаційної нерівномірності притягання інших небесних тіл. Інструментальні фактори пов'язані з ГНСС-апаратурою та проходження сигналу від супутника до приймача. Дослідженням факторів впливу зміни координат часових серій координат ГНСС-станцій займалися Bock O., Bury, G., Mémin, A., Boy, J., Métivier, L., Sośnica, K., Cenni, N., Haritonova, D., Dong D., Fang P., Tregoning P., van Dam T., Blewitt G., Watson C., Petrov L., Третяк К., Савчук С.

Після врахування і виключення впливу наведених вище факторів залишкові зміни координат дозволяють характеризувати сучасні рухи верхнього шару земної кори чи деформації структур великих інженерних споруд для уникнення їх руйнувань. Особливу увагу у цьому дослідженні приділено сейсмічному фактору впливу та фактору неприпливного атмосферного навантаження.

Сейсмічний фактор впливу виділяємо оскільки для регіону Карпато-Балкан, куди включаємо захід України і локальні досліджувані об'єкти, як

полігони для досліджень, землетруси показують вагомий вплив на зміни положення ГНСС станцій.

На сьогодні відповідно до конвенцій IERS [110] відсутні рекомендації щодо врахування неприпливних навантажень при обчисленнях розв'язків ГНСС-даних. Водночас перерозподіл атмосферних мас може спричиняти пружні деформації земної кори до 20-30 мм за декілька днів [111]. Такі навантаження можуть спричиняти аномальні зміщення для споруд великих інженерних об'єктів і проявляти неоднорідність їх динаміки, особливо зважаючи на складну геологічну будову територій, що призводить до деформацій, утворення тріщин та руйнувань.

Це дослідження ставить перед собою задачі виявлення аномальних зміщень на ряді ГНСС-станцій, аналіз причин та розроблення інтерпретації для їх можливого прогнозування. Таким чином, вибір теми дослідження і її актуальність зумовлені необхідністю виявлення та аналізу аномальних зміщень у мережі ГНСС-станцій, як для моніторингу великих інженерних об'єктів так і диференціації земної кори.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідна робота виконувалась на кафедрі вищої геодезії та астрономії Національного університету «Львівська політехніка» і відповідає таким науковим темам кафедри та інституту геодезії: ДЗ/39-2018 «Розбудова мережі активних перманентних ГНСС-станцій у Західному транскордонному регіоні», ДБ/ГНСС 2021-2022 «Розробка та впровадження системи моніторингу деформацій техногенно небезпечних промислових споруд».

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є виявлення деформацій земної кори за даними ГНСС-станцій спричинених землетрусами та неприпливними атмосферними навантаженнями, проведення досліджень причин цих зміщень та розроблення інтерпретації.

Відповідно до поставленої мети, необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити фактори впливу на дані ГНСС-спостережень для геодинамічних задач на регіональному та локальному рівнях;
- розробити та апробувати алгоритм пошуку аномальних зміщень за часовими серіями ГНСС-станцій;
- оцінити просторово-часові взаємозв'язки між горизонтальними деформаціями земної кори та узагальненою сейсмічністю;
- оцінити деформації земної кори спричинені неприпливними атмосферними навантаженнями на регіональному рівні;
- дослідити локальну сейсмічність довкола Дністровської ГЕС-1 та зв'язок зі змінами об'ємів у водосховищі;
- оцінити пружні деформації споруд Дністровської ГЕС-1 за ГНСС-даними мережі під впливом неприпливного атмосферного навантаження.

Об'єкт дослідження. Часові серії зміщень координат референціальних ГНСС-станцій.

Предмет дослідження. Оцінка аномальних просторових зміщень ГНСС-станцій під впливом сейсмічного фактору та неприпливного атмосферного навантаження.

Методи дослідження. При проведенні досліджень використані методи статистичного опрацювання експериментальних даних, методи математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів. Поставлені і вирішені завдання, пов'язані з виявленням та аналізом причин короткотривалих аномальних зміщень часових серій координат мереж ГНСС-станцій та розроблення інтерпретації для їх можливого прогнозування.

Ступінь наукової новизни дисертаційних досліджень визначають наступні основні результати:

- розроблено методіку пошуку аномальних зміщень за статистичним аналізом часових серій ГНСС-станцій;

– виявлено просторово-часові взаємозв'язки між величинами узагальнених критеріїв поля горизонтальних швидкостей земної кори та узагальненої сейсмічності;

– проаналізовано пружні деформації споруд Дністровської ГЕС-1 та зафіксовано взаємозв'язок динаміки висотного зсуву з потужністю та щільністю гірських порід під відповідними ГНСС- пунктами.

– оцінено короткотривалі деформації земної кори спричинені неприпливними атмосферними навантаженнями на території Європи у грудні 2019 року;

– встановлено взаємозв'язок локальної сейсмічності та змін об'ємів у верхньому Дністровському водосховищі;

– оцінено пружні деформації споруд Дністровської ГЕС-1 за ГНСС- даними мережі під впливом неприпливного атмосферного навантаження.

Достовірність наукових і практичних результатів підтверджується використанням сучасних наукових методів та програмного забезпечення, збіжністю теоретичних результатів з даними експерименту, апробацією результатів в практичних умовах, критичним обговоренням результатів роботи на науково-технічних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів. Практична значущість роботи полягає в тому, що отримані результати дозволяють виконати сучасну геодинамічну диференціацію досліджуваних регіонів, оцінити пружні деформації верхнього шару земної кори під впливом сейсмічних даних та неприпливного атмосферного навантаження, а також оцінити зміщення споруд великих інженерних об'єктів з метою їх стійкості, особливо у моменти критичних навантажень.

Особистий внесок здобувача. Результати наукових досліджень, які представлені у дисертаційній роботі та виносяться на захист, отримані автором самостійно. Загалом за темою дисертації опубліковано 7 наукових праць. Основні положення та результати дисертаційної роботи, отримані

автором, опубліковано у співавторстві у працях [18, 26, 42, 43, 138, 140, 141]. Праці [18, 26, 141] присвячені виявленню геодинамічних аномалій за рядом станцій, аналізу сейсмічного впливу на результати ГНСС-даних [138], аналізу впливу неприпливних атмосферних навантажень на результати ГНСС-даних [42, 43, 140], а також розробленні та реалізовані методики виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій [18, 141].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати наукових досліджень, що включені до дисертації, доповідались і обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, зокрема на Міжнародній науково-технічній конференції GEOFORUM (Львів-Брюховичі-Яворів, Україна) у 2021 р., Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «GeoTerrace» (м. Львів, Україна) у 2020-2021 рр.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 7 наукових працях. Серед них: 2 публікації у науковому періодичному виданні України, яке внесено до міжнародних наукометричних баз даних, 1 публікація у науковому фаховому виданні України, 1 публікація у науковому виданні, яка додатково відображає наукову цінність дисертації, 3 публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та які додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, трьох розділів основної частини, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 170 сторінок, у тому числі 124 сторінок основної частини, включаючи 57 рисунків, 15 таблиць та 159 позицій списку літератури.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНИХ ТА НЕПРИПЛИВНИХ АТМОСФЕРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ДЕФОРМАЦІЇ ТЕРИТОРІЙ

На сьогодні для оцінки сучасної геодинаміки територій та моніторингу великих інженерних об'єктів прийнято використовувати аналіз часових серій постійно діючих ГНСС-станцій. Вагомою перевагою над іншими класичними геодезичними чи геофізичними методами є те, що метод може застосовуватись як для визначення глобальної чи регіональної геодинаміки територій, так і для локальних об'єктів. При цьому кількість даних з часом накопичується, густина розміщення ГНСС-станцій постійно збільшується, а апарат та підходи до опрацювання ГНСС-даних вдосконалюються. Це дозволяє детальніше та з більшою впевненістю диференціювати сучасні геодинамічні процеси. Як правило, модель руху часових серій координат ГНСС-станцій можна охарактеризувати чотирма основними частинами: тривалий лінійний тренд (тренд), стрибки, періодичні (сезонні) складові та моделі постсейсмічної деформації.

Водночас, щоб використовувати ГНСС-дані для аналізу геодинамічних рухів під час опрацювання сигналів потрібно вилучити помилки та обґрунтовано врахувати похибки викликані різними факторами впливу. Їх аналіз є комплексним завданням, яке на сьогодні продовжує досліджуватися. Починаючи від запуску системи GPS й систем ГНСС на сьогодні цьому питанню присвячено багато праць як закордонних, так вітчизняних науковців [56, 127, 80, 27]. Аналіз факторів впливу на координати часових серій координат ГНСС-станцій є актуальною задачею, а використання ГНСС-даних без виключення їх впливу для геодинамічних задач є неприйнятним.

1.1. Огляд факторів впливу на результати ГНСС-даних для геодинамічних задач

В наукових дослідженнях з опрацювання ГНСС-даних по різному підходять до групування, узагальнення та класифікації факторів впливу на їх результати.

У роботі [27] науковці Національного університету «Львівська політехніка» поділяють фактори впливу на ГНСС-дані з метою їх геодинамічної інтерпретації на: екзогенні, ендегенні та інструментальні. Такий поділ на групи спричинений перш за все джерелом їх виникнення.

У першу групу екзогенних факторів, тобто факторів зовнішнього впливу включено: сонячні та місячні припливні ефекти гідросфери, атмосфери та твердої Землі; зміни характеристик обертового руху Землі; перерозподіл і рух атмосферних мас, що проявляється змінами тиску та температури; температурне розширення верхнього шару земної поверхні; температурне розширення земної поверхні; зміна балансу льодовикових і снігових мас, у тому числі постгляціація (танення льодовиків).

У другу групу ендегенних факторів, тобто факторів внутрішнього впливу включено: рухи тектонічних блоків; зміни гравітаційного поля Землі; вплив прояву землетрусів та вулканів; гідрографічні зміни річкової сітки та рівня ґрунтових вод.

Третя група складається з інструментальних факторів, тобто специфіки роботи ГНСС-апаратури та проходження сигналу від супутника до антени. Вона включає супутникову конфігурацію супутників, так звану геометрію сузір'я; затримки проходження сигналу у іоносфері та тропосфері; вплив багатопроменевості, похибки встановлення та центрування обладнання; похибки програмних пакетів під час обчислення фінальних рішень. Ця група факторів узагальнюється також пізнішим дослідженням про похибки ГНСС-вимірів під керівництвом Karaim [80].

На початку століття у дослідженнях під керівництвом вченого Dong [56] запропонований поділ факторів впливу на часові серії координат ГНСС-станцій при розгляді сезонних коливань на три категорії. Перша категорія походить від гравітаційного збудження, переважно від Сонця та Місяця. Друга категорія сезонних коливань має теплове походження в поєднанні з гідродинамікою. Третя категорія містить різні помилки, які також породжують очевидні сезонні коливання.

Аналіз літературних джерел [56, 27, 127, 80] дозволяє виділити дві категорії факторів для задач моніторингу та геодинаміки за допомогою ГНСС-технологій. Перша категорія пов'язана безпосередньо з ГНСС-апаратурою та проходженням сигналу від супутника до приймача, а друга включає геофізичні фактори, які деформують земну поверхню незалежно від способу збору інформації про це (сейсмічні події, припливи та відпливи, перерозподіл атмосферних мас, тощо). Схема поділу факторів впливу на ГНСС-дані для геодинамічних задач показана на рисунку 1.1.

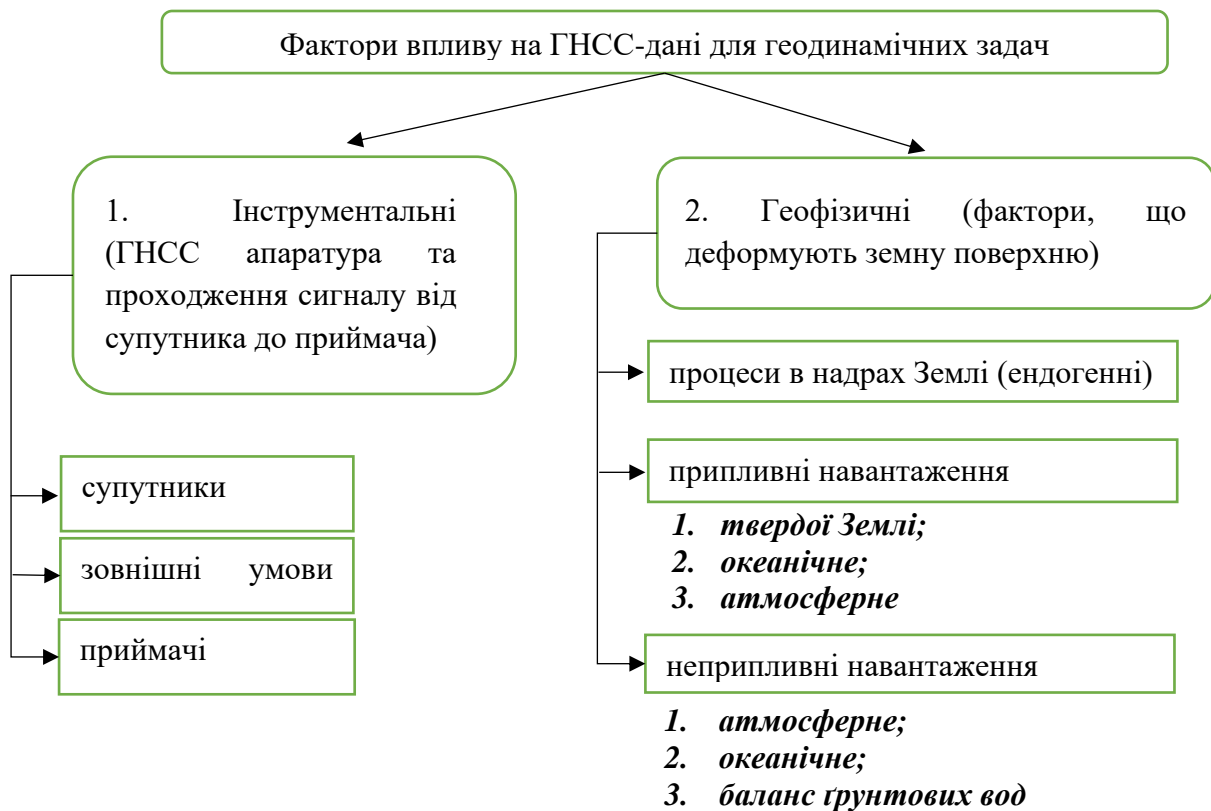


Рисунок 1.1. – Фактори впливу на ГНСС-дані для геодинамічних задач

Спочатку розглянемо першу категорії факторів впливу, яка включає апаратуру і особливості роботи ГНСС. Як для запущеної вперше американської мережі GPS, так й інших систем, які зараз об'єднуємо спільною назвою ГНСС, головним принципом є вимірювання часу проходження мікрохвильових сигналів від супутника в космосі до приймача на поверхні Землі. Оскільки цей час проходження сигналу вимірюється за допомогою різних годинників (в приймачі та на супутнику), ці годинники необхідно синхронізувати, оцінюючи зсув годинника приймача. На додаток до геометричної відстані між супутником і приймачем, слід враховувати атмосферні затримки поширення, спричинені іоносферою та тропосферою та менші ефекти пов'язані із зміщеннями коду та фазових спостережень, ефектами, пов'язаними з антеною, та релятивістськими ефектами. [127].

У дослідженні [80] джерела похибок ГНСС-вимірів поділяють на такі три групи: супутники, зовнішні умови та приймачі. До групи супутників відносять геометрію сузір'я супутників на момент виміру; похибки визначення точного часу; похибки визначення ефемерид і координат штучних супутників Землі. До зовнішніх умов включають іоносферну та тропосферну затримку проходження сигналу, багатошляховість сигналу та релятивістські ефекти. До третьої групи під назвою «приймачі» належать інструментальні похибки, похибки за визначення фазового центру антени та її центрування.

До другої категорії з рисунку 1.1 відносимо геофізичні фактори, тобто процеси, під дією яких виникає деформація земної поверхні. Класично процеси деформації земної поверхні називають геологічними та поділяють на ендогенні, які відносяться до внутрішньої динаміки Землі, та екзогенні, викликані зовнішньою динамікою Землі. Ендогенні геологічні процеси зумовлені взаємодією сил, які виникають в надрах Землі. Прикладами можуть бути землетруси, магматизм, гравітаційні аномалії

спричинені перерозподілом мас в середині Землі, тощо. Екзогенні геологічні процеси зумовлені зовнішніми силами, які діють на поверхні Землі. Прикладами екзогенних процесів можуть бути зміни під впливом водних мас, вивітрювання гірських порід тощо.

Такий підхід і поділ на екзогенні та ендегенні процеси є зручним з точки розгляду геології як науки, але складний для математичної оцінки і практичного використання для задач сучасної геодинаміки. На думку автора, для задач геодинаміки їх більш доцільно групувати на припливні навантаження, неприпливні навантаження та процеси всередині надр Землі, зокрема, в результаті яких виникають сейсмічні події.

Земля в цілому реагує на зовнішні сили як пружне тіло. Будь-які додаткові навантаження на поверхню Землі викликають деформацію кори, а перерозподіл мас призводять до зміщень поверхні Землі. Якщо не врахувати перерозподіл навантажень належним чином, то такі відхилення спотворюють точні геодезичні вимірювання, зокрема і ГНСС-дані. Частина з цих навантажень зумовлена так званими припливними факторами. Припливним вважається той фактор, якщо природа його впливу залежить від гравітаційної нерівномірності притягання інших небесних тіл. Але є і такі фактори, які не залежать від впливу інших небесних тіл, але створюють змінні навантаження на поверхню Землі. Власне для математичного окреслення сучасних геодинамічних змін навантаження прийнято поділяти на припливні та неприпливні. Наприклад, за результатами досліджень [133, 135] подаються рекомендації для врахування як припливного, так і неприпливного атмосферного навантаження і включення таких моделей у поточні пакети програмного забезпечення з метою покращення точності розв'язків ГНСС-станцій.

На сьогодні при опрацюванні ГНСС-даних у сучасних наукових програмних пакетах використовуються моделі, які дозволяють враховувати припливні рухи. Моделі неприпливних навантажень також

створюють [57, 111, 112, 148]. Також аналізується вплив навантажень на визначення міжнародної наземної системи відліку ITRF (International Terrestrial Reference Frame) [52]. Станом на сьогодні відповідно до конвенцій Міжнародної служби обертання Землі IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) за 2010 рік [110], існують рекомендації для врахування деформації моделей припливних факторів у часових ГНСС рядах, натомість щодо неприпливних моделей такі рекомендації відсутні.

Припливні навантаження

Припливні навантаження виникають під дією припливної сили, яка є результатом конкуруючої взаємодії сили тяжіння та відцентрової сили інерції. Якщо сила тяжіння спрямована до центра гравітації і зменшується обернено пропорційно до квадрата відстані, то відцентрова сила інерції характеризує криволінійний рух небесного тіла навколо цього центру. Таким чином, ці сили, які протилежні за напрямом, але є однаковими за величиною лише у центрі мас кожного з небесних тіл. У зв'язку з дією внутрішніх сил Землі, вона обертається навколо Сонця як ціле з постійною кутовою швидкістю для кожного елемента її маси. При віддаленні цього елемента маси від центра гравітації, відцентрова сила зростатиме пропорційно до квадрата відстані. Оскільки положення Місяця і Сонця відносно Землі періодично змінюється, то й інтенсивність сонячних та місячних припливів не є сталою. У результаті на поверхні Землі виникає припливна хвиля, що займає постійне положення в системах тіл, що взаємно тяжіють. Деформації земної поверхні за вплив сонячних та місячних приливів сягають величини 36 см, ґрунтується на теоретичних даних [27].

До припливних навантажень належать припливне навантаження твердої Землі, припливне океанічне навантаження та припливне атмосферне навантаження. Такі навантаження створюють періодичний рух

літосфери, гідросфери та атмосфери Землі, який зумовлений обертанням Землі у гравітаційному полі Сонця, Місяця та інших небесних тіл. Найвагомішим є вплив саме Сонця і Місяця, а зважаючи на те, що створювані ними ефекти незалежні, то їх вплив розглянемо окремо. Беручи до уваги два тіла в просторі можна вважати, що кожне з них обертається навколо спільного центра мас. Центр обертання двох тіл Земля – Сонце розташований у надрах Сонця на відстані 451 км від його центра. Місяць обертається довкола точки, яка знаходиться у надрах Землі на відстані $2/3$ радіуса від її центра.

Дослідження припливних ефектів показують, що їх вплив на статичне позиціонування пов'язане з часом спостереження, розташуванням станції та довжиною базової лінії. Загальний припливний вплив на прибережних ГНСС-станціях більший, ніж на ГНСС-станціях, що розташовані у глибині материка. У деяких дослідженнях зафіксовано, що вплив океанічного припливу становить 9–15 мм на вертикальну та до 5 мм горизонтальні складові часових серій координат ГНСС-станцій [110, 146]. Останні дослідження показали, що така деформація океанічного припливу може досягати більше 100 мм у вертикальній складовій на прибережних ділянках, а горизонтальні зміщення можуть становити приблизно одну третину від вертикальних, тобто близько 30 мм [110]. Помітна різниця припливного ефекту навіть для берегових ГНСС-станцій, що відносно близько розташовані. Домінуючий ефект показує зональний розподіл для станцій у глибині материка, тому це необхідно враховувати навіть для невеликої прибережної мережі ГНСС-станцій. Розрахункові деформації атмосферного припливного навантаження становлять приблизно 1-2 мм по вертикалі і приблизно одну третину цих значень у горизонтальних компонентах [39].

Алгоритми врахування впливу припливних ефектів запропоновані у наукових програмних пакетах обробки ГНСС-даних. Наприклад, у

програмному пакеті GAMIT для врахування океанічного припливного навантаження є два варіанти корекцій: або з відповідного файлу безпосередньо зчитують так звані приливні коефіцієнти, які включають амплітуду та фазу кількох основних приливних складових, або інтерполюють приливні коефіцієнти шуканої точки з файлу глобальної сітки даних [159]. Наукове програмне забезпечення обробки ГНСС-даних Bernese [54] відповідно до конвенцій IERS 2010 [110] включає моделі припливів, щоденного обертання Землі та нутації; інтерполяцію припливного навантаження океану до 342 складових; навантаження приливних поправок атмосферного тиску; серію ефемерид DE405 для планет, а також гравітаційний ефект океану та твердих земних припливів в інтеграторі орбіти, тощо.

Неприливні навантаження

Неприливні навантаження по своїй суті є залишковим перерозподілом мас атмосфери та гідросфери, що не залежить від приливних сил Місяця чи Сонця. Перерозподіл мас призводять до зміщень та деформації поверхні Землі, тобто і до змін координат об'єктів. Прийнято виділяти три складових неприливних навантажень: неприливне атмосферне навантаження (NTAL) , неприливне океанічне навантаження та зміни водності річкової сітки регіону і ґрунтових вод у цілому.

Останній фактор зміщень земної поверхні за вплив гідрологічних змін найактивніше проявляється, наприклад, у басейні Амазонки [83], що зумовлено природними явищами і розташування регіону. Проведений також аналіз впливу гідрологічного навантаження на ГНСС-мережі у Південній та Південно-Східній Азії [92]. Для таких регіональних досліджень часто виконують порівняння ГНСС-даних та прогнозовану вертикальну деформацію за даними від супутникової місії вивчення гравітаційного поля Землі GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [130, 133, 136]. Проте цей фактор також може бути локальним

для конкретної ГНСС-станції у зв'язку з певним режимом річки у близькості від об'єкту. Тоді, як правило, такі дослідження як вихідний матеріал розглядають для моніторингу рівня ґрунтових вод у свердловинах. У дослідженні [102] показано, що вертикальні рухи ГНСС-станції TSKB мають значну кореляцію зі зміною розподілу ґрунтових вод і можуть бути прогнозовані за зміною кількості води. Антропогенний фактор також може впливати на зміну координат часових рядів ГНСС-вимірів. Наприклад, у зв'язку надмірним видобутком питної води на півночі Китаю, зафіксовані просідання ГНСС-станцій HESX, TJVN [90].

Деформації земної поверхні у прибережних територіях головним чином спричинені неприпливним океанічним навантаженням, що є наслідком перерозподілу мас на дні океану і відповідною зміною тиску. Логічно цей процес можна описати наступним чином. Зміни атмосферного тиску змінюють рівень моря. У великих інтервалах часу, скажімо, більше кількох місяців, зміна рівня моря компенсує зміну атмосферного тиску, тому придонний тиск залишається незмінним. Океан реагує як перевернутий барометр: чим вище тиск, тим нижче рівень моря. Зміна атмосферного тиску викликає перерозподіл маси води в океані [156]. Таким чином, океан підкоряється моделі перевернутого барометра за тривалістю в один місяць і більше, але для коротших періодів реакція океану сильно відхиляється від моделі перевернутого барометра, і тому слід враховувати всю складність динаміки океану. Моделювання динамічної реакції океану можливе за допомогою чисельної океанічної моделі, яка враховує атмосферний вплив серед інших факторів.

Зазначимо також, що окрім змін атмосферного тиску над водною поверхнею та виключаючи місячні та сонячні припливи, океан піддається й іншим впливам. Такі моделі спеціально розроблялись авторами праць [57, 148]. ГНСС-станції, що розташовані близько до напівзакритих заток чи моря, більшою мірою піддаються впливу неприпливного океанічного

навантаження, ніж інші станції [145]. Дослідження впливу неприливної океанічного навантаження за записами мареографів та даними прибережних ГНСС-станцій Балтійського моря на території Латвії показує як неприливне навантаження може спричинити зміни в часових рядах регіональних мереж ГНСС-станцій та підтверджує необхідність видалення таких ефектів [68]. У середині материка на відстані близько або понад 1000 км ГНСС-станції не чутливі до змін океанічних навантажень [144].

Неприпливне атмосферне навантаження викликане перерозподілом атмосферних мас над земною поверхнею. У різних дослідженнях його вплив оцінюють в межах до 20-30 мм. За розрахунковими моделями такий вплив може досягати 20 мм для вертикальної складової і 3 мм для горизонтальної [111]. Останні дослідження для північного регіону Китаю дозволили зафіксувати зміщення до 24 мм за вплив атмосферного навантаження на висотну складову часових серій координат постійно діючих ГНСС-станцій [158]. Розглядаючи сучасні моделі неприливної атмосферного навантаження [57, 112, 148] такий вплив інколи сягає і понад 30 мм впродовж десяти діб. Оскільки для території України, зважаючи на її географічне положення, саме цей вид неприпливних навантажень матиме основний вплив, у порівнянні з неприпливним океанічним навантаженням та змінами гідрологічної сітки регіону, то детальніше його проаналізовано у підрозділі 1.3

Таким чином, за останнє десятиліття вплив неприпливних навантажень на часові серії координат постійно діючих ГНСС-станцій продовжує досліджуватись [154, 97]. Відомо, що корекція висотних часових серій координат постійно діючих ГНСС-станцій, що розташовані біля Північного моря, за неприпливне океанічне та атмосферне навантаження дозволяє зменшити дисперсію часових серій на 12–22 мм (20–30%) [154]. З використанням баротропних або бароклінічних моделей океану при корекції ряду координат на неприливне атмосферне та

океанічне навантаження змінність вертикальних рухів суші зменшується в середньому на 20% [97]. Водночас порівняльний аналіз навантаження навколишнього середовища та передбачене навантаження з різних моделей не зменшує розкид координат висоти для деяких станцій у Європі [77]. Також досліджувались впливи неприпливних навантажень на результати інших геодезичних мереж, зокрема спостережень станцій інтерферометрії з наддовгою базою [60, 111].

Зазначимо, що окрім категорії припливних чи неприпливних навантажень потрібно розглянути сейсмічний фактор спричинений ендегенними процесами. Сейсмічна активність регіону пов'язана з виникненням і проявом у ньому землетрусів не може бути віднесена до навантажень на земну поверхню, оскільки спричинена силами в надрах Землі. Зміщення координат у часових серіях постійно діючих ГНСС-станцій спричинені землетрусами розділяють на пресеїсмічні, косеїсмічні та постсеїсмічні. Під час землетрусу на ГНСС-станціях фіксують різкі зміни координат впродовж декількох секунд і землетруси високої магнітуди як правило стрибкоподібно змінюють тренд станції. Також важливим є моніторинг території після землетрусів з локальною магнітудою більше 4 балів. Такі дослідження виконуються і показують, що постсеїсмічні рухи можуть тривати ще впродовж десятків днів [88, 98, 142]. Такі пластичні деформації до і після землетрусу можна оцінити з використанням ГНСС-даних [59]. У залежності від потужності землетрусів та характеру розриву вогнища, радіус деформацій від епіцентру землетрусу в середньому може досягати 500 км, а землетруси з величиною магнітуди більше 8 суттєво впливають на положення ГНСС-станцій за тисячі кілометрів від епіцентрів землетрусу [136]. З метою оцінки сумарних косеїсмічних впливів також створюють моделі деформацій [98], але вони стосуються подій, що вже зафіксовані. Проблема прогнозування землетрусів досі не є вирішеною.

Сейсмічна активність у Карпато-Балканському регіоні, до якого відносимо і західну частину України, та невирішеність проблем прогнозування землетрусів мотивує приділити більшу увагу дослідженню впливу цього фактору на часові серії координат постійно діючих ГНСС-станцій. Тому це питання детально буде розглянуте у підрозділі 1.2.

Часові серії координат окремих ГНСС-станцій також можуть характеризуватися нелінійними та неперіодичними рухами без зафіксованих землетрусів [38, 125]. Це може бути пов'язано з пружною реакцією земної кори від швидкої втрати маси льоду на полярних льодовиках або гірських льодовиків [150], які знаходяться в зонах деформації поблизу кордонів плит [152]. Також нелінійні та неперіодичні зміщення ГНСС-станцій можуть відбуватися у зонах деформації поблизу меж плит або у районах видобутку корисних копалин [123] або підземних вод [90, 102].

Комплексна оцінка похибок за вплив факторів різної природи на результати ГНСС-даних для геодинамічних задач

Зазначимо, що будь-яка математична оцінка факторів різної природи на результати ГНСС-даних, як і самих вимірювань, супроводжується похибками в їх оцінці. До них можна віднести похибки самих вимірювань; похибки використаних моделей для оцінки параметрів та похибки самих оцінюваних параметрів [17]. У таблиці 1.1. показані відомі фактори, які відносимо до першої категорії, яка характеризує ГНСС-апаратуру та проходження сигналу від супутника до приймача, а саме: похибки визначення орбіти супутника; похибки визначення годинників на супутниках та приймачах; складові тропосферної (ZHD та ZWD) й іоносферної (першого та вищих порядків) затримки сигналу; релятивістські поправки; похибка набігу фази (wind-up); зміщення антени вздовж осі z фазового центру антени супутника; зміщення та зміни фазового центру антени приймача; похибка за фазову багатопляховість;

нестабільність встановлення геодезичного знаку та шум фазових спостережень [17, 127]. У той час як похибки орбіт були основним джерелом похибок на початку функціонування супутникових систем, на сьогодні найбільшими джерелами похибок є тропосферна затримка сигналу та ефекти багатошляховості індивідуальні для кожної з ГНСС-станцій.

Таблиця 1.1

Перелік похибок ГНСС-спостережень викликаний апаратурою системи та проходженням сигналу від супутника до приймача [17, 127]

Компонент моделі	Максимальний ефект	Модель/Виміряні похибки	Джерело
Орбіти супутника	-	декілька см	[74]
Годинники супутника	до $1 \cdot 10^{-3}$ с	$\sim 7.5 \cdot 10^{-13}$ с	[74]
Годинники приймача	до $1 \cdot 10^{-3}$ с	$\sim 7.5 \cdot 10^{-13}$ с	[74]
Тропосфера (ZHD)	2.3 м	2-6 мм	[37, 70, 39]
Тропосфера (ZWD)	0-40 см	3-6 мм	[105, 129]
Іоносфера (першого порядку)	до 30 м в напрямку зеніту	лінійні комбінації	[84]
Іоносфера (вищих порядків)	0-2 см	1-2 мм	[73, 101]
Релятивістські поправки	до 7 м	залежно від порядку величини знехтуваних ефектів	[30]
Набіг фази (wind-up)	кілька см	залежно від помилок орієнтації супутника	[33]
Зміщення антени супутника вздовж осі z	0.7-2.7 м	6 см	[124]
Зміни фазового центру антени (PCV) супутника	до 12 мм	0.2-1.1 мм	[124]
Зміщення фазового центру антени (PCO) приймача	до 16 см	-	[74]
Зміни фазового центру антени (PCV) приймача	до 3 см	1-2 мм	[62, 74]
Фазова багатошляховість	до 6 см	-	[118, 126]
Нестабільність геодезичного знаку	до 3 мм	-	[80]
Шум фазових спостережень	1-2 мм	-	[82, 151]

У таблиці 1.2 показані геофізичні фактори впливу на ГНСС-дані, а саме: змінність руху полюса; змінність тривалості дня (LOD); субдобові рухи полюсів та зміни тривалості дня; зміни спричинені рухом тектонічної плити, на якій розташована конкретна ГНСС-станція; припливні ефекти твердої Землі; припливні та неприпливні океанічні навантаження; припливні рухи полюсів; припливні та неприпливні атмосферні навантаження [17, 127].

Таблиця 1.2

Перелік похибок ГНСС-спостережень викликаний геофізичними факторами [17, 127]

Компонент моделі	Максимальний ефект	Модель/Виміряні похибки	Джерело
Полярний рух	до 0.5 "	$3 \cdot 10^{-7}$ "	[74]
LOD (тривалість дня)	до $3 \cdot 10^{-3}$ с	$1 \cdot 10^{-7}$ с	[74]
Субдобові рухи полюсів	$\pm 1 \cdot 10^{-3}$ "	$0.2 \cdot 10^{-3}$ "	[128]
Субдобові зміни тривалості дня	$\pm 0.7 \cdot 10^{-3}$ с	$0.1 \cdot 10^{-3}$ с	[128]
Рух тектонічної плити	до 10 см/рік	0.3 мм/рік	[1]
Припливні ефекти твердої Землі	До 40 см	1 мм	[93]
Припливні океанічні навантаження	1-10 см	1-2 мм	[80, 95]
Неприпливні океанічні навантаження	до 15 мм	0.7 мм (оцінка між різними моделями)	[145]
Припливні рухи полюсів	до 25 мм	-	[110]
Атмосферні неприпливні навантаження	до 20-30 мм	15% від загального впливу	[57, 111, 112, 148, 158]
Атмосферні припливні навантаження	до 1.5 мм	-	[110]

Додатково до джерел похибок, перелічених у таблицях 1.1 та 1.2, існують систематичні похибки як похідні параметри від супутникових систем. Наприклад, потреби врахування аномальності драконітного року, тобто часу, після якого орієнтація орбітальних площин Сонця

повторюється (аномальні періоди в 350 днів). Для цієї причини цілочисельні гармоніки пов'язані з орієнтацією супутникових орбіт [64] відображаються у часових серіях координат ГНСС-станцій [114]. На сьогодні розроблені спеціальні моделі для зменшення систематичних похибок в драконітні періоди у параметри супутникових систем [117]. Для дослідження часових серій координат ГНСС-станцій важливим є обране місце її встановлення та нерухомість антени. Власне окрім нестабільності геодезичного пункту індивідуальний характер впливу на станцію мають такі фактори: багатошляховість, похибка фазового центру антени й атмосферне навантаження.

Сучасні програмні пакети аналізу ГНСС-даних реалізують 2 основних підходи до пошуку координатних рішень станцій. Ці методи поділяються на диференціальний DD (Double Differencing) та абсолютний PPP (Precise Point Positioning). Для реалізації PPP-методу основними є два загальні джерела інформації: прямі спостереження до супутників та ефемериди. Натомість для методу DD використовується мережеве рішення від інших наземних ГНСС-станцій, які працюють у момент шуканих вимірів. Окрім цього координати опорних станцій повинні бути визначені з достатньою точністю. Відповідно до цих методів розглянуті вище фактори впливу на ГНСС-дані проявлятимуться по-різному. Але якщо оцінювати часові серії координат мереж ГНСС-станцій, які отримані двома методами за допомогою класичного математичного опрацювання, то результати є майже однаковими.

За останнє десятиліття кількість постійно діючих ГНСС-станцій значно збільшилася. Це також прослідковується і на території України. Аналізуючи часові серії ГНСС-станцій, які є відносно близько розташованими, як правило, можна помітити спільні за динамікою та напрямом зміщення [42, 68]. Як правило, такі зміщення спричинені факторами геофізичної природи. Для аналізу та правильного врахування

таких факторів важливим є створення методики пошуку одночасних зміщень ГНСС-станцій мережі.

Важливо зазначити, що більшість досліджень та пакетів опрацювання ГНСС-даних присвячені розгляду та аналізу часових серій координат окремої ГНСС-станції [69, 100, 120, 131, 155]. Програмне забезпечення TSAalyzer для аналізу часових рядів ГНСС-станцій дозволяє візуалізувати часові ряди, застосовуючи метод найменших квадратів, спектральний аналіз, інтерактивну перевірку даних на зсуви, тощо [155]. Програмне забезпечення SARI окрім візуалізації серії також включає наступні математичні методи опрацювання: обробка з використанням методу найменших квадратів, фільтрації Кальмана, смугового фільтра запропонованого Vondrak та методу максимальної правдоподібності для аналізу шумів [120]. Проте на сьогодні відсутні комплексні програми для аналізу короткотривалих зміщень та зсувів ГНСС-мереж.

Підсумовуючи викладене відзначимо, що для території України серед неприпливних факторів найвагомішим є атмосферний. Враховуючи включення території заходу України до сейсмічно активного Карпато-Балканського регіону визначення впливу землетрусів на зміни координат ГНСС-станцій є також важливими для досліджень. Зважаючи на густу сітку ГНСС-станцій ключовим питанням є розроблення методики пошуку одночасних зміщень координат ГНСС-станцій у цій мережі.

1.2. Сейсмічний вплив на деформації територій

1.2.1. Вплив локальних зон сейсмічності

Сейсмічний вплив можна назвати швидкою складовою геодинамічних явищ, на відміну від повільних сучасних тектонічних рухів. В останні роки серед науковців утвердилася тенденція називати повільні рухи сучасною геодинамікою (чи деформаційними процесами), а все

пов'язане з землетрусами визначати як сейсмічні процеси [8]. Такий підхід додає розуміння для аналізу впливу землетрусів на ГНСС-дані.

Землетрус – це струс земної поверхні в результаті раптового вивільнення енергії в літосфері Землі, що створює сейсмічні хвилі. Для опису загальної сили або «розміру» землетрусу використовуються шкали сейсмічної величини. Магнітуди зазвичай визначають на основі вимірювань сейсмічних хвиль землетрусу, записаних на сейсмограмі. Не залежно від шкал магнітуд, яких розроблено декілька, чим вищим є показник магнітуди – тим потужнішим є землетрус.

Для слабких землетрусів прийнято використовувати енергетичний клас землетрусів K , який рівний десятковому логарифму енергії. У залежності від виникнення землетрусів магнітуда M може визначатися за тривалістю запису за методикою описаною в [10]. Енергетичний клас K обчислюється за формулою Раутіан Т.Г. [15]:

$$LgE = K = 1.8 * M + 4 \quad (1.1)$$

Виникнення землетрусів найчастіше відбувається на границі плит, які є областями тектонічної, сейсмічної та магматичної активності. Внутрішні області плит є слабо сейсмічними та характеризуються низьким рівнем прояву ендегенних процесів [2]. При прояві землетрусу на деформацію земної кори також важливим фактором є глибина вогнища землетрусу.

При проявах землетрусів поруч з перманентною ГНСС-станцією помітні стрибкоподібні зміни ряду координат. Для прикладу на рисунку 1.2 показано часову серію координат ГНСС-станції NEAB (Греція, $B=36,509^\circ$, $L=23.060^\circ$). Ця ГНСС-станція розташована на Півдні Греції, у районі, який відзначається значною сейсмічною активністю.

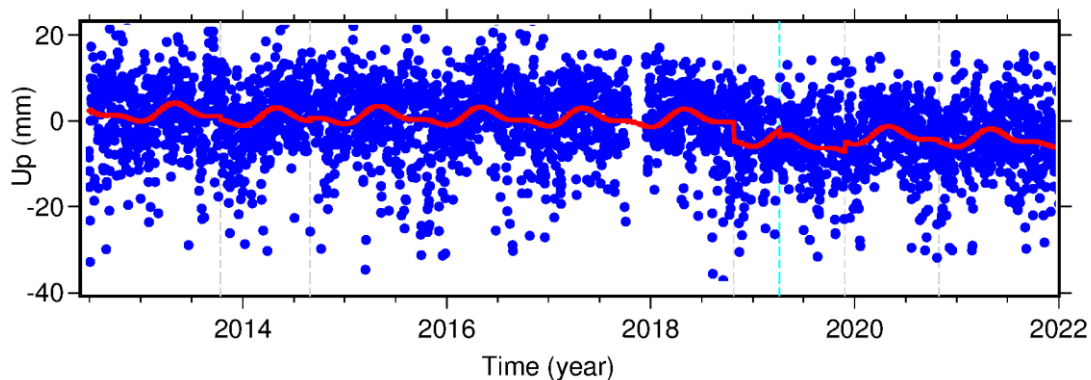


Рисунок 1.2. Часова серія висотних координат ГНСС-станції NEAB (Греція). [104] Сині точки – висотні координати, червона лінія – тренд, сіра штрихова лінія – зміщення за вплив землетрусів, блакитна штрихова лінія – зміщення за заміну обладнання.

Як бачимо з рисунку 1.2 зафіксовано вплив п'яти землетрусів (сіра штрихова лінія) на зміну тренду висотних координат ГНСС-станції. Узагальнюючи ці землетруси: їх магнітуда змінюється від 5.8 до 7.0 одиниць, а відстань епіцентру від ГНСС-станції варіюється від 60 до 364 км.

Зазначимо, що основними методами спостереження за сейсмічними подіями є геофізичні методи, а визначення координат та характеристик землетрусів, що відбулися оцінюють за даними сейсмографів. Проте останнім часом у літературі з'являються роботи не лише дослідження впливу сейсмічних подій на зміщення у часових серіях координат ГНСС-станцій [98], а й оцінки землетрусів за даними ГНСС [71, 119, 153]. У цьому контексті перевага ГНСС-методів над сейсмографами у тому, що є можливість відслідкувати не лише коливання під час землетрусу (косейсмічні рухи), які щоправда сейсмографи визначають точніше, а й оцінювати геодинаміку територій задовго до (пресейсмічні рухи) та після землетрусу (постсейсмічні рухи).

Дослідження різких змін координат перманентних ГНСС-станцій пов'язані з косейсмічними та постсейсмічними рухами потужних

землетрусів з локальною магнітудою більше 4 балів виконуються досить часто [71, 99, 136, 152]. З метою оцінки сумарних косейсмічних впливів на зміщення на поверхні земної кори та розгляду питання глобального впливу косейсмічних деформацій від усіх типів та магнітуди землетрусів, вчені [98] розробили модель косейсмічних деформацій, припускаючи різні співвідношення масштабів землетрусів, яку систематично застосовували при землетрусах магнітудою більше 4 з 1991 до 2010 року. Враховуючи косейсмічні деформації, виявлено більше розривів у координатах перманентних станцій ГНСС, ніж без врахування цих факторів. Також автори стверджують, що численні розриви, спричинені землетрусами, занадто малі, щоб їх можна було візуально виявити через сезонні коливання та шуми ГНСС-станцій.

Є також дослідження, які стосуються певної конкретної події [153]. Радіус від епіцентру землетрусу для видимих зміщень на станції залежить від потужності землетрусів, глибини та характеру розриву вогнища землетрусів. Під час землетрусу на ГНСС-станціях фіксують різкі зміни, а постсейсмічні рухи тривають ще впродовж десятків днів.

За допомогою ГНСС-приймачів із частотою запису сигналу 1 Гц зафіксований косейсмічний зсув під час землетрусу у 2016 році у місті Ветторе (Центральна Італія) [153]. Результати також підтверджені чітким часовим і просторовим зв'язком між ГНСС-даними ближнього та дальнього поля, деформаціями по знімках InSAR, а також польовими вимірюваннями розривів поверхні. Автори стверджують, що метод ГНСС є точним інструментом моніторингу, якщо він встановлений у вигляді мереж з короткими базовими лініями [153]. Також здійснюється аналіз та оцінка активних мереж ГНСС-станцій з метою швидкої фіксації сейсмічних подій [71]. У дослідженні стверджують, що інформація про землетрус доступна у проміжку через десятки секунд до кількох хвилин після виникнення події у залежності від відстані від гіпоцентру до ГНСС-станцій.

В роботі [136] показано, що землетруси з величиною магнітуди більше 8 суттєво впливають на положення ГНСС-станцій за тисячі кілометрів від епіцентрів землетрусу, враховуючи точність вимірювання ГНСС на сьогодні, яка знаходиться на рівні декількох міліметрів.

1.2.2. Вплив сукупної сейсмічної активності на зміщення територій

Тектонічні напруження виникають на границях літосферних плит під час їх взаємодії. Границі плит є областями тектонічної, сейсмічної та магматичної активності, натомість внутрішні області плит слабо сейсмічні та характеризуються низьким рівнем прояву таких процесів [2]. Території можна класифікувати за їх сейсмічною активністю, тобто за частотою, типом і магнітудою землетрусів, які спостерігаються за певний період часу. Оскільки є регіони, де землетруси виникають часто з'являється можливість переходу до сукупної сейсмічної активності регіону за певний період.

Одним із підходів є спільне нанесення на карту регіону змодельованих сучасних деформацій та епіцентрів землетрусів. Сучасні тектонічні деформації регіонів отримуємо з ГНСС-даних, а координати, глибину та магнітуду землетрусів можна отримати з відповідних каталогів [57]. Відомі дослідження, де так розглядають сейсмічність локальних зон окремих регіонів: західна Канада [94], Піренейський півострів [109].

Також виконується пошук статистичних зв'язків між деформаціями та сейсмічними подіями. Проведений аналіз понад 2000 землетрусів з магнітудою вище 4 балів за 100-річний період у південній Анатолії (Туреччина) [65]. Автори виділяють певні статистично корельовані регіони, в яких наступні 25 років ймовірно відбудуться землетруси з магнітудою 6 і вище. Виділення регіонів опиралося на параметр b за Kaltek методом, який більше відповідає природі землетрусу, але з побудованих

карт видно, що зони підвищеного ризику виникнення землетрусів відповідають регіонам, де присутні значні сучасні горизонтальні деформації. Також виконується моніторинг зон, де проявляються землетруси слабкої магнітуди. Відоме дослідження пошуку взаємозв'язків деформацій поверхні Землі та локальних землетрусів на заході Канади [79]. Автори розділили регіон на квадрати зі сторонами 20 км, в яких відстежувались закономірності між часом виникнення землетрусів та тектонічним напруженням регіону. У результаті вони дійшли до висновку, що тектонічні деформації є основним фактором виникнення локальних землетрусів.

Як відомо, проблема прогнозу землетрусів та їх взаємозв'язку з деформаціями територій досі не вирішена. Однак в останньому десятилітті з'являються вагомні праці присвячені цьому питанню. Часто роботи науковців показують різні результати, наприклад, дослідження Апеннінського півострова під керівництвом Riguzzi [115] показують, що у зонах з мінімальною деформацією територій найвища ймовірність проявів землетрусів. Водночас у пізніших дослідженнях цього ж регіону не виявлено такої залежності, адже як малі, так і великі за магнітудою землетруси належать до різних зон розтягу без виділення якоїсь одної закономірності [49].

Узагальнення сейсмічної активності

Для пошуку взаємозв'язків між сейсмічною активністю регіону та його деформаціями потрібно встановити певний параметр узагальнення сейсмічної активності регіону. Наприклад, відомим є поділ територій за показником кількісного індексу сейсмічної активності, що характеризує кількість землетрусів певного енергетичного класу, які відповідають одиниці довжини розлому при прийнятій ширині області динамічного впливу за певний проміжок часу [28]. Застосування цієї методики дозволило виявити хвильові процеси зі швидкостями від 4 до 90 кілометрів

на рік. Проте цей підхід показав помітний розкид величин зумовлених швидкостей міграції сейсмічності.

Параметр узагальнення сейсмічної активності для геодинамічних задач запропонований науковцями Національного університету «Львівська політехніка» у роботі [22] та апробований у дослідженнях [24]. Цей метод для геодинамічних досліджень виникає тоді, коли досліджуваний регіон можна розбити триангуляцією Делоне на суміжні трикутники, у вершинах яких будуть знаходитися ГНСС-станції. Для узагальнення сейсмічності в межах таких трикутників введено поняття еліпса розсіювань епіцентрів землетрусів [22]. Цей параметр прийнято обчислювати тривалістю на 1 рік, але вона може бути різною.

На рисунку 1.3 показано інтерпретацію цього методу для одного трикутника, що опирається на перманентні ГНСС-станції А,В,С, в межах якого розташовані епіцентри землетрусів різної магнітуди [24].



Рисунок 1.3. Трикутник мережі ABC, у якому відбулися землетруси $Z_1 \dots Z_n$, a та b відповідно велика та мала осі еліпса розсіювання землетрусів [24]

Велику та малу піввісь еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів (a та b) можна обчислити як власні числа кореляційної матриці Q (1.2). :

$$Q = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

де:

$$a_{11} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{avr})^2 \cdot M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i}}, a_{22} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - y_{avr})^2 \cdot M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i}}$$
$$a_{12} = a_{21} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{avr})(y_i - y_{avr}) M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i}}$$

Обчислення x_{avr} та y_{avr} , які використані під час обчислень, приведені у формулі (1.3):

$$x_{avr} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad y_{avr} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (1.3)$$

де x_i, y_i – координати епіцентрів землетрусів, розташованих в межах трикутника;

n – кількість зафіксованих землетрусів за певний період час;

M – магнітуда землетрусу.

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.

Встановлено, що цей параметр узагальненої сейсмічності території має високий показник кореляції саме з вертикальними рухами земної кори, зафіксованими за даними постійно діючих ГНСС-станцій Європи [24, 139]. У сейсмічно активному регіоні Карпато-Балкан тісний просторово-часовий кореляційний зв'язок між цими параметрами встановлено у зоні, яка охоплює Динарське нагір'я і прилеглу частину Адріатичного побережжя. Ці дослідження можуть мати перспективу у обчисленні не лише взаємозв'язку вертикальних зміщень території, а й оцінки горизонтальних деформацій за ГНСС-даними та пошуку їх кореляційного зв'язку з узагальненою сейсмічністю території.

Підсумовуючи зазначимо, що останні дослідження демонструють те, що геодезичний моніторинг разом з детальним розумінням сучасної тектонічної структури території можуть дозволити ідентифікувати зони, де є висока ймовірність появи землетрусу.

1.3. Деформації територій під впливом неприпливних атмосферних навантажень

1.3.1 Сучасний стан дослідження неприпливних атмосферних навантажень

З одного боку, неприпливне атмосферне навантаження (NTAL - Non-Tidal Atmospheric Loading) виділяють як одну із трьох складових неприпливних навантажень: іншими є неприпливне океанічне навантаження та зміни ґрунтових вод. Неприпливне атмосферне навантаження викликане перерозподілом мас атмосфери без впливу місячних чи сонячних припливів, який призводять до зміщень та деформації поверхні Землі. Основним параметром, який впливає на величину навантаження є атмосферний тиск, але також враховується температура та вологість повітряних мас.

Часто неприпливне атмосферне навантаження досліджується поруч з іншими неприпливними факторами [61, 97, 154]. Так, внесення поправок за вплив спільного неприпливного океанічного та неприпливного атмосферного навантажень висотних часових серій координат постійно діючих ГНСС-станцій дозволяє покращити змінність вертикальних рухів прибережних ГНСС-станцій в середньому на 20-30% [97, 154]. Також досліджують вплив неприпливних навантажень на результати інших геодезичних мереж, зокрема спостережень станцій інтерферометрії з наддовгою базою [60, 111, 144].

З іншого боку, у багатьох дослідженнях розглядається вплив сукупного навантаження атмосферного тиску (APL - Atmospheric Pressure

Loading), у межах якого можна виділяти припливну і неприпливну складові [7, 53, 116, 134, 135, 144]. Сукупні варіації APL, тобто зміни ваги стовпа атмосфери внаслідок змін тиску в середньому мають середньоквадратичні похибки (СКП) 2,6 мм для вертикальної складової і 0,6 мм для горизонтальної складової, але варіації від піку до піку можуть досягати 40 мм для вертикальної складової і 7 мм для горизонтальної [112].

На думку Tregoning та van Dam [134] при спільній оцінці впливу APL важливим є врахування як припливних, так і неприпливних атмосферних навантажень. Дослідження зміщень часових серій координат 45-ти ГНСС-станцій у Європі та Азії та порівняння впливу на них атмосферного навантаження показує, що для деяких континентальних станцій спостерігалася висока кореляція між вертикальними зміщеннями земної кори та моделями атмосферного навантаженням [116]. Навантаження атмосферного тиску відіграє вирішальну роль у точній космічній геодезії, і його упущення, особливо частини неприпливного навантаження, призводить до невідповідності між рішеннями, заснованими на рішеннях мікрохвильових (ГНСС) та оптичних (SLR - супутникове лазерне визначення дальності) спостереженнях [46, 106].

Вплив неприпливного атмосферного навантаження за оцінкою більшості вчених варіюється у межах до 20-30 мм. Дослідження [111] стверджують, що такий вплив може досягати 20 мм для вертикальної складової і 3 мм для горизонтальної. Малкін [11] стверджує, що під дією атмосферного впливу зміни висоти ГНСС-станцій можуть досягати до 30 мм. Останні дослідження впливу атмосферного навантаження на висотну складову часових серій координат постійно діючих ГНСС-станцій для північного регіону Китаю фіксують зміщення до 24 мм [158]. Розглядаючи сучасні моделі неприпливного атмосферного навантаження [57, 112, 148] такий вплив інколи сягає і понад 30 мм впродовж десяти діб. Tregoning та van Dam, [134] показали, що максимальні зміни висоти протягом дня

можна очікувати до 18 мм для ГНСС-станцій у високих широтах, де коливання тиску більші.

1.3.2. Врахування неприпливних атмосферних навантажень для геодинамічних досліджень

Атмосферна циркуляція переміщує повітряні маси навколо Землі, а результуюча зміна атмосферного тиску деформує кору і для врахування цього ефекту створюють моделі неприпливних атмосферних навантажень.

Пружні поверхневі деформації розраховуються в просторовій області шляхом розкладу функції Гріна для моделі пружної Землі. Часові ряди станції отримуємо з переміщень навантаження на звичайній глобальній сітці, використовуючи бікубічну інтерполяцію, уникаючи інтерполяції над береговою лінією.

Відповідно до Farrell [58] вертикальна деформація на станції з координатами \vec{r} спричинена змінами поверхневого тиску $\Delta P(\vec{r}, t)$ обчислюється

$$u_r(\vec{r}, t) = \iint \Delta P(\vec{r}, t) G_R(\psi) \cos \varphi' d\lambda' d\varphi', \quad (1.4)$$

де вертикальна функція Гріна:

$$G_R(\psi) = \frac{fa}{g_0^2} \sum_{n=0}^{+\infty} h'_n P_n(\cos \psi), \quad (1.5)$$

де f – універсальна гравітаційна константа, a – середній радіус Землі, g_0 – середня поверхнева сила тяжіння, φ' – геоцентрична широта, λ' – геоцентрична довгота. ψ – кутова відстань між станцією та джерелом тиску, P_n — поліном Лежандра ступеня n .

Атмосферні дані поверхневого тиску, необхідні для побудови моделей атмосферних навантажень надаються різними дослідницькими центрами, зокрема, Національні центри прогнозування навколишнього середовища, Національний центр атмосферних досліджень, Європейський центр середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) і ретроспективний

аналіз сучасної епохи для досліджень і застосувань (MERRA). Коли ми оцінюємо навантаження від атмосферного тиску, ми маємо мати справу з атмосферою над сушею та над океаном. Тому для характеристики реакції океану на зміни атмосферного тиску необхідно застосувати гіпотезу перевернутого барометра [156], яка згадується у підрозділі 1.1.

Моделі зміни навантаження APL можна завантажити з Міжнародного сервісу масового навантаження (International Mass Loading Service) [112] та Віденського центру відкритих функцій даних для картування (Vienna Mapping Functions Open Access Data) [148].

Міжнародний сервіс масового навантаження надає можливість отримати часові ряди тривимірних зміщень викликаних APL. Для зручності вони представлені в трьох формах:

1. Попередньо обчислені тимчасові ряди для станцій, включаючи VLBI, ГНСС, SLR та DORIS (Доплерівська Орбітографія та Радіопозиціонування).
2. Попередньо обчислений часовий ряд на звичайній глобальній сітці $2' \times 2'$.
3. Онлайн-розрахунок навантаження APL за запитом для довільної точки на Землі.

Віденський центр відкритих даних функцій для картування для ГНСС-станцій обчислює поправки за APL. На рисунку 1.4 показаний файл згенерований на 1 лютого 2022 року з поправками за APL за трьома компонентами координат. Загалом файл на цей день налічує понад 2256 ГНСС-станцій.

```

! Source:           Atmosphere pressure loading (calculated in the center of mass (CoM) frame)
! Data-types:      APL-NT-LOAD-IB
! Day:             2022-01-01
! Range/resolution: gnss.ell
! Comment:         http://vmf.geo.tuwien.ac.at/APL_products/GNSS/
! Columns:
! (1) station name
! (2) modified Julian date
! (3) up component (m)
! (4) east component (m)
! (5) north component (m)
!
ABMF      59580.00   0.00148  -0.00098  -0.00042
ABPO      59580.00   0.00034  -0.00024  -0.00100
ABUZ      59580.00  -0.00271  -0.00138   0.00021
ACRG      59580.00  -0.00123  -0.00141   0.00001
ADIS      59580.00  -0.00205  -0.00071  -0.00018

```

Рисунок 1.4 – файл згенерований Віденським центром відкритих функцій даних для картування на 1 лютого 2022 року з поправками за APL

Німецький дослідницький центр геонаук у Потсдамі (Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Potsdam) [57] подає дані неприливногo атмосферного навантаження за моделлю ECMWF.

За вихідні дані використано часові серії приземного тиску за результатами місії ERA-40 та ERA-Interim. При цьому маска топографії є сталою, а структура щільності атмосфери змінюється. Такий підхід дозволяє використовувати останні дані з операційної детермінованої моделі, зберігаючи при цьому довгострокову стабільність наборів даних повторного аналізу. Дані неприливногo атмосферного приземного тиску характеризуються 3-годинною частотою та густотою сітки $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Атмосферні припливи були видалені шляхом гармонійного аналізу 12 основних припливних складових. Неприливний атмосферний тиск на поверхні повторно відбирається на звичайній глобальній сітці $0,125^\circ \times 0,125^\circ$.

Операційна модель ECMWF зазвичай оновлюється приблизно два рази на рік, щоб включити в систему останні вдосконалення чисельної схеми, фізичної моделі або процедур асиміляції даних для постійного покращення якості щоденного прогнозування погоди. Такі зміни часто впливають на довгострокову стабільність метеорологічних величин у детермінованій моделі ECMWF, але ці дані операційної моделі доступні

майже в реальному часі із значно вищою просторовою роздільною здатністю, ніж альтернативно доступні набори даних повторного аналізу атмосфери.

У репозиторії ECMGFZ можна обрати моделі навантажень завантажені у двох наборах: для центру фігури Землі та центру мас Землі. У дослідженні [77] показано, що розбіжність між центром мас Землі і центром фігури для задач навантаження на ГНСС-мережу мала і її можна ігнорувати. До завантаження доступні як сітка (netCDF файли) зі значеннями впливу NTAL по кожній з компонент координат, так і значення у конкретній точці. Їх можна обробляти як один набір даних, об'єднаний вздовж осі часу. Також є функція побудови графіків значень у конкретній точці, наприклад, на рисунку 1.5 показаний графік змін висотної компоненти NTAL для Львова за 2021 рік.

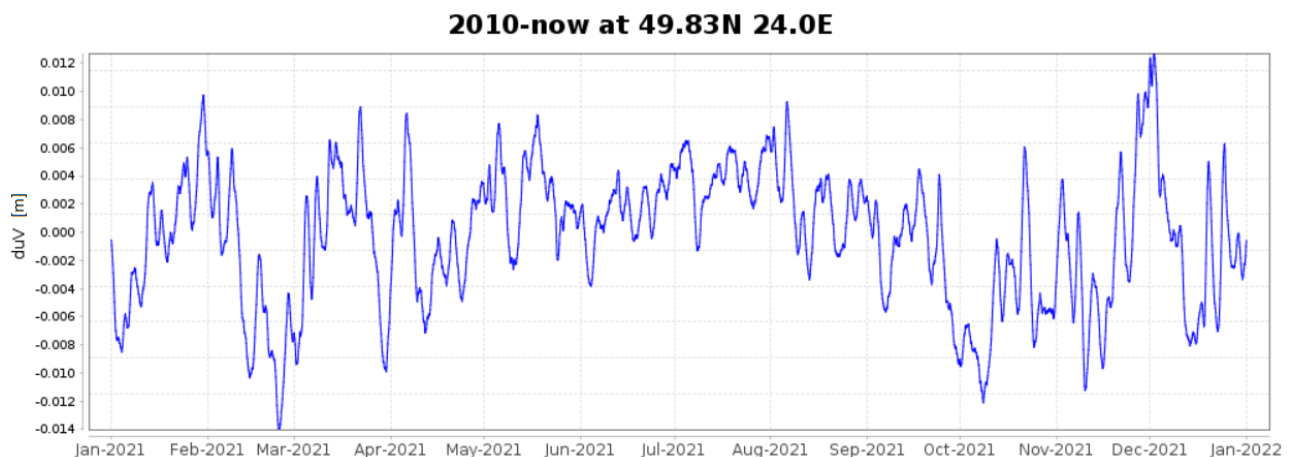


Рисунок 1.5 – графік змін висотної компоненти неприпливного атмосферного навантаження NTAL для Львова за 2021 рік

Отже, у вільному доступі можна отримати дані про APL з двох сайтів [112, 148] та дані NTAL, що надає Німецький дослідницький центр геонаук у Потсдамі [57]. Хоча APL це сума припливного та неприпливного атмосферних навантажень (NTAL) та при порівнянні висотної складової часових рядів цих трьох моделей для території західної частини України констатуємо, що вони є практично ідентичними з відхиленнями в межах 1

мм і максимальними до 3 мм. Це логічно пояснюється тим, що максимальні значення припливного атмосферного навантаження оцінюють до 1.5 мм [110], а решту похибок пояснюється різницею наборів даних та методами їх опрацювання.

Відомо, що дослідження моделей навантажень APL станом на 2005 рік були точними на станціях поблизу екватора, але, імовірно погіршували оцінки висотної складової на інших широтах [134]. На сьогодні такі моделі досить коректні для станцій на всій території Землі.

Зрозуміло, що регіони, в залежності від їх геологічної структури, по-різному пружно реагуватимуть на однакові навантаження, зокрема і атмосферні, адже гірські породи мають різні фізичні властивості. У роботі [112] показано, що при моделюванні впливу неприпливних навантажень використовують середню щільність Землі (ρ_{\oplus}). Опираючись на це, доцільним є дослідження впливу атмосферного навантаження, зокрема неприпливного, на територію з відомою геологічною будовою. Це також дозволить провести порівняння пружних деформацій для пунктів, під якими залягають породи різної щільності, потужності та віку. Для реалізації такої задачі інструментом оцінки може бути густа мережа ГНСС-станцій. Такі поставлені умови може задовільнити постійно діюча мережа ГНСС-станцій моніторингу. Такі мережі часто створюються для безпеки гідроелектростанцій (ГЕС) [20, 26]. Також такі мережі містять ряд інших інженерних давачів та приладів, які можуть додатково підтвердити результати ГНСС-даних.

Для цілей моніторингу великих інженерних об'єктів врахування впливів APL, а зокрема NTAL на результати ГНСС-даних лише починає розглядатися. Відоме дослідження впливу APL на результати ГНСС вимірів для Загорської гідроакумулюючої електростанції № 2 [7]. Автори вказують про необхідність застосування моделей атмосферних навантажень для корекції супутникових вимірів методом PPP як

ефективного інструменту для моніторингу складних інженерних споруд. У задачах моніторингу великих інженерних об'єктів варто розуміти, що атмосферне навантаження піддає пружним деформаціям і споруди створені людиною. Оскільки фізичні властивості штучного шару (наприклад, бетонної подушки) і геологічних природних порід, що залягають (наприклад, перешарування алевроліту та пісковика з аргелітами) є різними, то і при близькому розташуванні вони гіпотетично зазнаватимуть різних пружних деформацій. Унаслідок цього гіпотетично можуть виникати руйнування конструкцій, особливо у місцях стику.

Висновки до розділу 1

1. Огляд досліджень останніх років дозволяє виділити дві категорії факторів впливу на часові серії координат ГНСС-станцій для геодинамічних задач. Перша категорія пов'язана безпосередньо з ГНСС-апаратурою та проходженням сигналу від супутника до приймача, а друга включає геофізичні фактори, які деформують земну поверхню. Геодинамічні зміщення, що характерні для декількох ГНСС-станцій певної мережі, які відносно близько розташовані, переважно, спричинені геофізичними факторами. Для аналізу та правильного врахування таких факторів важливим є розроблення методики пошуку одночасних зміщень ГНСС-станцій мережі.

2. Аналіз геофізичних факторів та їх впливу на часові серії координат ГНСС-станцій показує, що для території України серед неприпливних факторів найвагомішим є атмосферний. Сейсмічно активний Карпато-Балканський регіон, до якого відносимо і західну частину України, та невирішеність проблем прогнозування землетрусів мотивує приділити увагу дослідженню впливу сукупної та локальної сейсмічності на часові серії координат постійно діючих ГНСС-станцій.

3. Серед досліджень взаємозв'язків сукупної сейсмічності та вертикальних деформацій територій знайдені стійкі взаємозв'язки зокрема для Карпато-Балканського регіону. Накопичення баз даних землетрусів та геодинамічної інформації від постійно діючих ГНСС-станцій дозволяє продовжити ці дослідження для регіону та встановити зв'язок горизонтальних деформацій з узагальненою сейсмічністю.

4. Неприпливні атмосферні навантаження, можуть деформувати земну поверхню до 20-30 мм. Водночас розгляд моделей неприпливних навантажень показує, що для моделювання навантаження не враховується вплив геологічної будови територій, а використовується значення середньої густини Землі. Опираючись на це, доцільним є дослідження впливу атмосферного навантаження, зокрема неприпливного на територію з відомою геологічною будовою. Якщо пружні деформації земної кори для пунктів, під якими залягають різні гірські породи будуть різними, то можна оцінити ці деформації територій. Полігоном для вирішення такої наукової задачі може бути постійно діюча густа мережа ГНСС-станцій моніторингу великих інженерних об'єктів.

РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ НЕПРИПЛИВНИХ АТМОСФЕРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА СЕЙСМІЧНОСТІ НА РЕГІОНАЛЬНУ ГЕОДИНАМІКУ

У цьому розділі розглядається вплив неприпливних атмосферних навантажень та сейсмічності для регіональних територій.

Перше дослідження стосується впливу неприпливних атмосферних навантажень на ГНСС-станції заходу України і Європи за даними спостережень на кінець грудня 2019 року. Оскільки короткотривалий геодинамічний процес найбільш явно впливає на висотні складові ГНСС-станцій, тому доцільно розглядати вертикальні деформації земної кори.

Друге дослідження стосується впливу сейсмічності на деформацію території Карпато-Балканського регіону з 2010 по 2019 роки. Оскільки взаємозв'язок між сейсмічністю та вертикальними рухами для цієї території був встановлений [24, 139], то увагу приділено пошуку кількісних показників кореляцій сейсмічності та горизонтальних деформацій регіону.

2.1. Просторово-часова оцінка висотних зміщень ГНСС-станцій Європи під впливом неприпливних атмосферних навантажень

2.1.1. Висотні зміщення ГНСС-станцій української мережі Геотерраса

Опрацювання даних перманентних ГНСС-станцій мережі Геотерраса є однією із задач Інституту геодезії, Національного університету «Львівська політехніка», що забезпечує функціонування цієї державної мережі. Для задач геодинаміки одними із основних даних слугують добові розв'язки перманентних ГНСС-станцій, що включають набір геодезичних планових координат та геодезичної висоти для однієї станції на день. Ці дані отримуються під час пост-обробки файлів вимірів станцій у програмному пакеті Bernese GNSS та є важливими для уточнення координат

перманентних ГНСС-станцій мережі, що зазвичай відбуваються раз в 1-3 місяці.

Оскільки надалі на підставі часових серій координат ГНСС-станцій, зокрема мережі Геотерраса, розглядатимемо їх сумісні аномальні зміщення, то важливим є наведення стратегії опрацювання ГНСС-даних.

Стратегія опрацювання даних ГНСС-станцій мережі Геотерраса

Опрацювання ГНСС-вимірювань проводиться з використанням ліцензованого програмного забезпечення Bernese GNSS V 5.2 [54], розробленим командою Астрономічного інституту Бернського університету. Bernese GNSS вважається науковим пакетом обробки і дозволяє виконувати опрацювання ГНСС-вимірів як методом подвійних різниць DD, так і абсолютним PPP методом. На сьогодні для мережі Геотерраса використовуємо метод подвійних різниць DD метод. Під час обчислень користуємось модулем Bernese Processing Engine (BPE), який на основі спеціальних файлів сценаріїв обробки дозволяє автоматизувати процес обробки вимірів, та сценарій RNX2SNX.

Сценарій RNX2SNX складається з таких семи почергових складових: копіювання необхідних даних; підготовка ефемерид, файлів полюсів і поправки годинника; перетворення та синхронізація даних спостережень; формування базових ліній, попередня обробка, відхилення вимірювань фаз, збереження файлів NEQ; плаваюче мережеве рішення; фіксоване мережеве рішення; створення звітів, запис результатів, очищення тимчасових файлів.

Перший крок полягає у копіюванні усіх необхідних даних у директорію програми, а саме: даних спостереження (RINEX-формат), точних ефемерид (*.sp3); координат полюсів (*.erp); поправок супутникових годинників (*.CLK); файлу інформації для станцій (*.STA).

На другому етапі необхідно перетворити підготовлені дані ефемерид, файлів полюсів і поправок годинника у внутрішній формат Bernese.

Третім етапом є перетворення даних спостережень з формату RINEX у бінарний формат Bernese та синхронізація годинників приймачів з GPS-часом. Важливим є аналіз сформованого звіту про дані спостережень, що включає достатність кількості супутників та інформацію про якість сигналу. Важливо вилучити з опрацювання ГНСС-станції із значними втратами сигналу чи фазовими збоями. Далі, за допомогою спеціальної програми RNXSMT виконується "очищення" файлів спостережень за фазові збої чи прогалини.

Четвертим етапом є попередня обробка даних, формування базових ліній, відхилення вимірювань фаз та збереження файлів NEQ. Для створення базової лінії застосовується стратегія OBS-MAX. Серед усіх можливих комбінацій для кожної станції базовою обирається та лінія, яка містить максимальну кількість безперервних вимірювань. Виконується опрацювання файлів перших різниць фазових спостережень з виявленням та виправленням фазових збоїв. Після цього здійснюється обробка подвійних різниць кожного вимірювання фази, і в результаті програма формує файли залишків і аналізує їх на прогалини. Якщо вони з'являються, такі спостереження позначаються і формується перелік ГНСС-станцій з недопустимою кількістю прогалин. Після цього виконується опрацювання цих даних вдруге з врахуванням визначених прогалин. У результаті отримується файли нормальних рівнянь NEQ.

П'ятим етапом є визначення плаваючого мережевого рішення: з файлів нормальних рівнянь NEQ обчислюємо координати ГНСС-станцій та регіональні параметри тропосфери. На підставі цих результатів надалі за допомогою алгоритму Quasi-Ionosphere-Free вирішується неоднозначність частот L1 / L2.

Шостим етапом є визначення фіксованого мережевого рішення. На підставі раніше отриманих даних обраховуються добові координати точок, зенітні затримки тропосфери, горизонтальні градієнти тропосфери та файли нормальних рівнянь. Рішення нормальних рівнянь на підставі умови мінімальних обмежень дозволяє одержати кінцеві координати станцій.

Додатково зазначимо декілька аспектів:

- остаточні обчислення добових координат ГНСС-станцій здійснюється у міжнародній системі координат ITRS (реалізація ITRF2014) з урахуванням помилок вихідних даних, а потім виконується переобчислення у актуальну реалізацію Європейської системи (ETRF).
- опорними є ГНСС-станції мережі IGS (74), які розташовані довкола станцій мережі Геотерраса коректно працюють у цей момент.
- дані остаточних координат включають поправки за припливні фактори, проте поправки з моделей за неприпливні фактори не вводяться, зважаючи на рекомендації конвенції IERS [110].

Заключним кроком є формування звітів, запис результатів та очищення тимчасових файлів. Запис результатів включає наступні файли: кінцеві координати (*.CRD), кінцеві рішення (*.NQ0, *.SNX), звіт про обробку даних та визначення параметрів тропосфери у форматі Bernese і SINEX. Звіт про обробку даних включає повідомлення про помилки при перетворенні файлів RINEX; звіт про генерацію ефемерид, абсолютне позиціонування та попередню обробку та відхилення даних; список видалених файлів під час обробки; звіт про квазііоносферне вирішення неоднозначності; попередні та кінцеві координати, параметри тропосфери; порівняння отриманих координат.

Подальші результати часових серій координат ГНСС-станцій мережі Геотерраса розглядаються саме опираючись на наведену вище стратегію опрацювання добових рішень.

Виявлення сумісних аномальних висотних зміщень ГНСС-станцій на території України

Станом на початок 2020 року центр опрацювання Інституту геодезії, Національного університету «Львівська політехніка» аналізував дані близько 30 перманентних станцій на території України та 10 станцій на території Польщі. На рисунку 2.1 показано розташування перманентних ГНСС-станцій мережі Геотерраса.

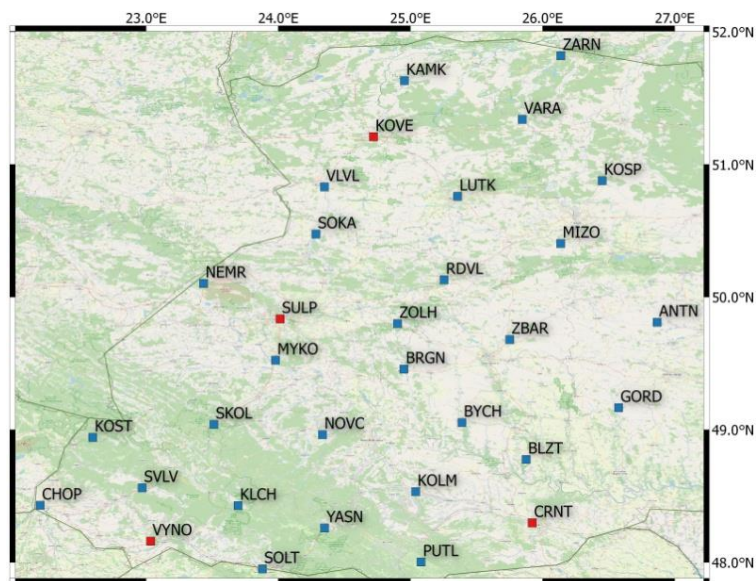


Рисунок 2.1 – Розташування станцій мережі Геотерраса, Україна [3]

Виконуючи планове уточнення координат станцій мережі було виявлено цікавий факт: СКП визначення висотного положення станцій після грудня 2019 року почало зростати. Це протирічить загальній тенденції зменшення похибки даних до певної граничної точності вимірів у зв'язку зі збільшенням набору даних. Оскільки цей факт був несподіваним, то було приділено детальну увагу розгляду часових серій координат ГНСС-станцій за грудень 2019 року. На рисунку 2.2 показано зростання СКП визначення висоти для чотирьох ГНСС-станцій SULP (Львів), VYNO (Виноградів), CRNT (Чернівці), KOVE (Ковель) мережі Геотерраса за період з епохи 2019.7 до епохи 2020.3.

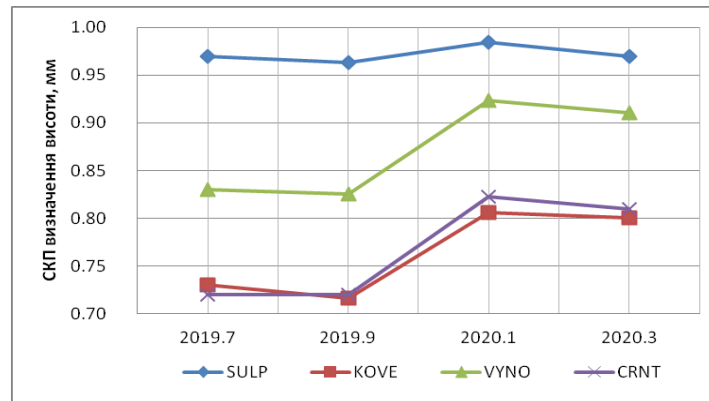


Рисунок 2.2 – Зростання СКП визначення висоти ГНСС-станцій мережі Геотерраса. Їх розташування показано на рисунку 2.1 (червоним)

У таблиці 2.1 показано фрагмент зміни точності висотного положення для 24-ох станцій мережі Геотерраса, які розташовані на території України до та після грудня 2019 року. ГНСС-станції, на яких відбувалося зміни антени впродовж декількох місяців до цього були виключені з аналізу.

Епоха 2019.9 відповідає даті 24 листопада 2019 року й включає весь ряд спостережень від дати початку роботи кожної станції до цього дня. Епоха 2020.1 відповідно – до 5 лютого 2020 року. Бачимо, що після епохи 2019.9 у порівнянні з 2020.1 епохою, спостерігається погіршення точності визначення СКП всього ряду спостережень. Проаналізуємо ці результати. У цілому, якщо порівняти СКП визначення висотного положення ГНСС-станції на епоху 2019.9 та на епоху 2020.1, то різниця між ними становить від 0,02 до 0,28 мм, що відповідно від 2% до 35%. Найбільші відхилення зафіксовані на станції KLMN (Кельменці), де СКП на епоху 2019.9 становить 0.80 мм, а на епоху 2020.1 відповідно 1.08 мм, тобто погіршення точності на 0.28 мм (35%).

Таблиця 2.1

Зміна точності висотного положення станцій мережі Геотерраса до та після грудня 2019 року

Назва ГНСС-станції	Дата початку роботи	Тривалість роботи до 2020 р., роки	СКП визначення висотного положення ГНСС-станції			
			На епоху 2019.9, мм	На епоху 2020.1, мм	Різниця СКП між епохами (2020.1-2019.9)	
					мм	%
SULP	06.10.2001	18.2	0.96	0.98	0.02	2.25%
MYKO	01.10.2012	7.3	0.78	0.88	0.10	13.23%
SAMB	15.01.2013	7.0	0.79	0.91	0.13	16.12%
SKOL	05.02.2013	6.9	0.90	0.96	0.06	6.65%
BRGN	06.05.2014	5.7	0.83	0.89	0.05	6.43%
ZOLH	24.08.2014	5.4	0.83	0.92	0.09	11.37%
VLVL	04.06.2015	4.6	0.86	0.93	0.07	8.11%
SOKA	31.10.2017	2.2	0.91	0.94	0.03	3.66%
NEMR	23.07.2018	1.5	0.84	0.95	0.11	12.56%
VYNO	24.12.2018	1.0	0.83	0.92	0.10	11.89%
KLCH	26.12.2018	1.0	0.89	0.94	0.04	4.68%
SOLT	28.12.2018	1.0	0.97	0.99	0.02	2.42%
YASN	29.12.2018	1.0	1.06	1.09	0.02	2.12%
SVLV	09.01.2019	1.0	0.74	0.87	0.13	18.01%
KOVE	21.02.2019	0.9	0.72	0.81	0.09	12.49%
KAMK	22.02.2019	0.9	0.71	0.83	0.13	18.18%
VARA	23.02.2019	0.9	0.79	0.85	0.06	7.38%
PUTL	02.07.2019	0.5	0.86	0.91	0.04	4.84%
CRNT	03.07.2019	0.5	0.72	0.82	0.10	14.29%
KLMN	04.07.2019	0.5	0.80	1.08	0.28	35.10%
BLZT	05.07.2019	0.5	0.77	0.86	0.09	11.72%
NOVC	23.07.2019	0.5	0.82	0.91	0.09	10.96%
BYCH	24.07.2019	0.5	0.80	1.00	0.20	24.38%
ZBAR	25.07.2019	0.5	0.77	0.87	0.10	12.76%

Відзначимо таку тенденцію: великі відхилення понад 10 % спостерігаються для станцій, які працюють менше одного року. Це логічно, оскільки менший набір приводить до більшої СКП у відсотковому відношенні під час однакових аномальних зміщень, ніж довший ряд набору даних. Так, для станції Львів SULP, яка працює з 2001 року різниця СКП між епохами 2020.1-2019.9 становить тільки 2% і могла би бути

взагалі непоміченою. Тобто такі зміщення найпростіше зафіксувати для станцій, які працюють відносно недовго, а для фіксації на станціях, що працюють довше слід розглядати короткі ряди добових даних. Зростання СКП вимірів висотного положення на станціях мережі Геотерраса ймовірно свідчить про помилку даних або вплив неврахованих факторів.

Для подальшого розгляду візьмемо станції у різних областях України, де зміни СКП за даний період є суттєвими, наприклад: CRNT, Чернівці (15%); VYNO, Виноградів (12%); KOVE, Ковель (12%) та станцію SULP, Львів де такі зміщення становили тільки 2%. На рисунку 2.3 показано часові серії координат цих ГНСС-станцій мережі Геотерраса за період з 20.11.2019 до 29.01.2020. З графіків бачимо, що для станції VYNO поступове зменшення відбулося після 22 грудня, KOVE – 22 грудня, SULP – 21 грудня, CRNT – 22 грудня. Висотний зсув триває декілька днів і після просідання станцій VYNO, KOVE, CRNT загальний тренд залишається нижчим за попередній на понад 15-20 мм.

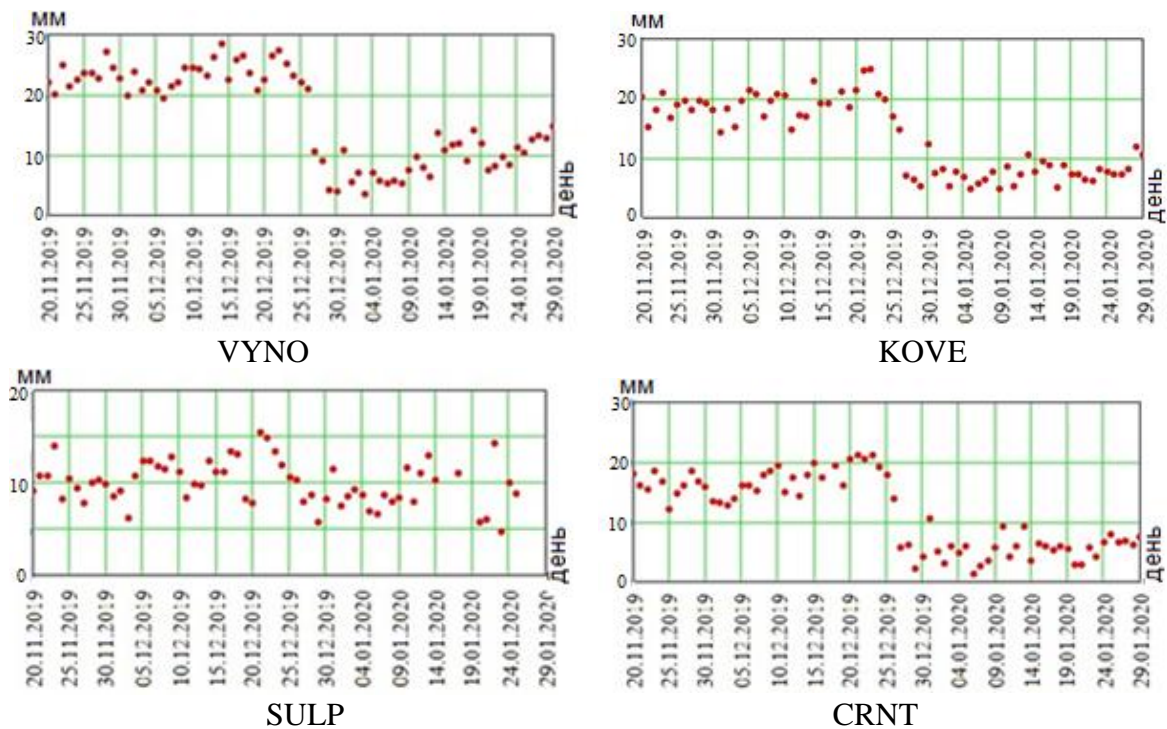


Рисунок 2.3 – Висотний зсув у часових серіях координат ГНСС-станцій мережі Геотерраса. Їх розташування показано на рисунку 2.1 (червоним)

Для станції SULP поступова зміна висотного положення також помітна, але скачок цілого тренду не простежується.

Оскільки явище виявлено за результатами опрацювання в Інституті геодезії, Національного університету «Львівська політехніка», а центрів опрацювання ГНСС-вимірювань є декілька, і всі вони можуть використовувати не лише різні стратегії опрацювання, а й різні програмні пакети, то слід оглянути чи підтверджується висотний зсув за результати їх опрацювань.

З цією метою розглянемо станцію SULP, Львів, яка входить в мережу IGS [74]. Порівняємо наші результати опрацювання з результатами опрацювання, що розміщені на сайті мережі перманентних ГНСС-станцій EPN [57] (рисунок 2.4). У мережі EPN файли вимірів SULP опрацьовують паралельно два центри: Федеральний офіс метрології та вимірювань Австрії і Федеральне відомство картографії та геодезії Німеччини за допомогою Bernese GNSS Software [54].

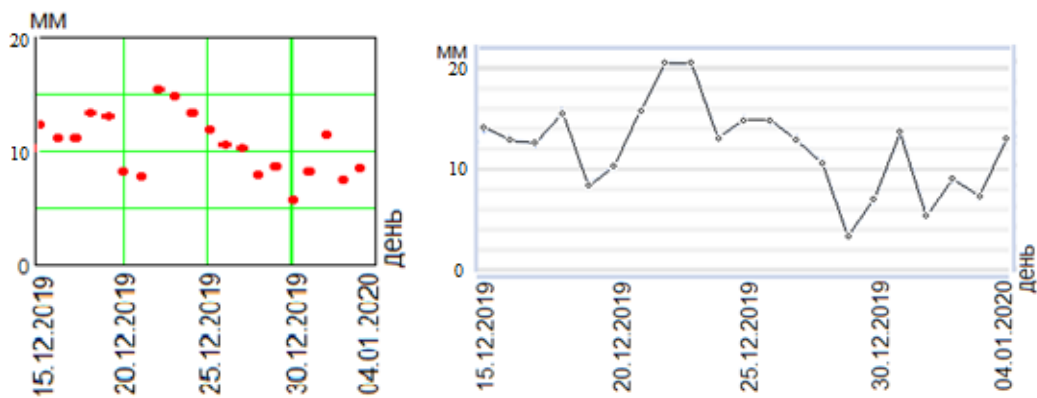
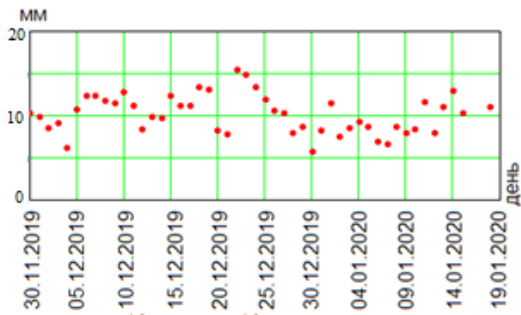
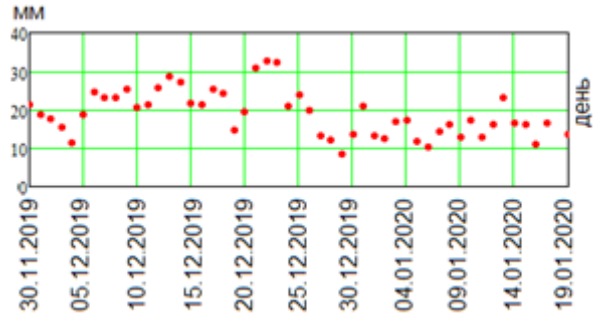


Рисунок 2.4 – Часові серії висоти ГНСС-станції SULP опрацьовані у Bernese різними центрами (зліва – Геотерраса, справа – EPN)

Також розглянемо опрацювання у різних наукових пакетах обробки ГНСС-даних. Для прикладу порівняємо наші дані опрацьовані у Bernese GNSS V 5.2 та опрацювання Геодезичної лабораторії Невади, США у LPSY OASIS II [35]. На рисунку 2.5 показані відповідні часові серії координат ГНСС-станції опрацьовані у різних наукових пакетах обробки.



Bernese GNSS V 5.2 (Геотерраса)



GIPSY OASIS II (NGL)

Рисунок 2.5 – Часові серії висоти ГНСС-станції SULP опрацьовані у різних наукових пакетах обробки ГНСС-даних

З рисунків 2.4, 2.5 бачимо, що не залежно від центру, тобто різної стратегії опрацювання, та використання різних програмних пакетів обробки ГНСС-даних, динаміка висотного зсуву для станції SULP за період з 22 по 30 грудня 2019 року добре відстежується. Цей факт підтверджує наявність висотного зсуву та дозволяє приступити до його оцінки.

2.1.2. Методика оцінки короткотривалих зміщень у часових серіях координат ГНСС-станцій на території України

Для короткотривалих зміщень (тривалістю близько десяти днів) у часових серіях координат ГНСС-станцій у літературі не присвячено достатньо уваги. Цьому є ряд причин:

1. Аби зауважити такі зміщення потрібно розглядати часові серії координат ГНСС-станцій тривалістю до 2-3 місяців, де вони є візуально помітними. При розгляді, наприклад, річних рядів ці зміщення виглядають як шум на фоні відомих сезонних явищ [27, 56, 82].

2. Опрацювання даних перманентних станцій повинно здійснюватися в одному із сучасних наукових пакетів опрацювання ГНСС-даних таких як Bernese, Jipsy, Gamit, тощо. Сценарій опрацювання також повинен бути відомим, оскільки певні налаштування можуть усереднити і тим самим згладити результати.

3. Для виявлення меж поширення певної локальної чи регіональної аномалії потрібно оперувати значною кількістю ГНСС-станцій, які охоплюють більшу площу, ніж розповсюдження цього явища.

Оскільки методики для оцінки просторово-часової динаміки короткотривалих різких зміщень у часових серіях координат ГНСС-станцій немає, то запропонуємо її. Вводимо сім параметрів, які репрезентують цей процес: чотири вхідних, які беремо безпосередньо з даних та три параметри, які з них обчислюються. Вхідними параметрами є:

- h_0 – значення висоти в день, після якого відбулося просідання;
- t_0 – день, після якого відбулося просідання;
- h_1 – значення висоти в день, коли просідання завершилися;
- t_1 – день, коли просідання завершилися;

Трьома параметрами, які обчислюються з вхідних є:

- T – тривалість геодинамічного явища, *дні*;
- Δh – максимальні зміщення під час геодинамічного явища, *мм*;
- V_h – швидкість зміщень за добу під час геодинамічного явища, *мм/день*.

Для обчислення параметрів T , Δh , V_h використовуємо вирази (2.1-2.3):

$$T = t_1 - t_0 \quad (2.1)$$

$$\Delta h = h_1 - h_0 \quad (2.2)$$

$$V_h = \frac{\Delta h}{T} \quad (2.3)$$

На рисунку 2.6 на прикладі станції Бучач, ВУСН мережі Геотерраса показано графічне зображення вхідних параметрів (h_0 , t_0 , h_1 , t_1) для методики оцінки короткотривалих зміщень.

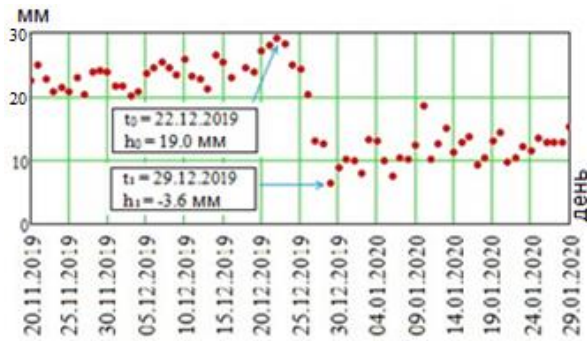


Рисунок 2.6 – Вхідні параметри h_0 , t_0 , h_1 , t_1 для оцінки висотного зсуву у часових серіях координат ГНСС-станції ВУСН, Бучач мережі Геотерраса

З рисунку 2.6 бачимо, що на станції ВУСН, Бучач умовний максимум до падіння $t_0 = 22$ грудня і процес зниження висоти закінчується $t_1 = 29$ грудня, тобто геодинамічний процес триває впродовж $T = 7$ днів. Максимальна величина падіння, тобто різниця значення висоти 29 грудня та 22 грудня становить $\Delta h = -22.6$ мм. Швидкість зміщень за добу $V_h = -3.2$ мм /день. Аналогічно розглянемо інші ГНСС-станції мережі Геотерраса на території України. Узагальнимо дані у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

**Характеристика процесу просідання ГНСС- станцій на прикладі
мережі Геотерраса у грудні 2019**

Назва ГНСС- станції	Початок процесу		Кінець процесу		Характеристика процесу		
	t_0 Дата: день. місяць	Зміна висоти відносно початкової епохи h_0 ,мм	t_1 Дата: день. місяць	Зміна висоти відносно початкової епохи h_1 ,мм	T Три- валість, дні	Δh макс. змі- щення	V_h швид- кість мм/день
1	2	3	4	5	6	7	8
ANTN	23.12	16.4	29.12	-1.1	5	-17.4	-3.5
BLZT	21.12	6.7	29.12	-11.6	8	-18.3	-2.3
BRGN	20.12	11.1	29.12	4.9	9	-6.2	-0.7
BYCH	22.12	19.0	29.12	-3.6	7	-22.6	-3.2
CHOP	22.12	14.2	27.12	-2.2	5	-16.4	-3.3
CRNT	23.12	11.2	29.12	-7.8	6	-19.1	-3.2
GORD	22.12	17.0	29.12	-2.2	7	-19.2	-2.7
KAMK	22.12	13.2	27.12	-7.8	5	-21.0	-4.2
KLCH	22.12	5.6	30.12	-11.6	8	-17.1	-2.1
KOLM	21.12	10.7	30.12	-2.1	9	-12.8	-1.4
KOSP	23.12	5.4	29.12	-6.3	6	-11.7	-1.9
KOST	24.12	11.9	31.12	-0.7	7	-12.6	-1.8
KOVE	22.12	14.9	29.12	-4.6	7	-19.5	-2.8
LUTK	22.12	15.6	27.12	-3.3	5	-18.9	-3.8
MIZO	22.12	11.5	29.12	-6.2	7	-17.7	-2.5
MYKO	23.12	18.2	29.12	5.0	6	-13.2	-2.2
NEMR	22.12	14.9	27.12	3.4	5	-11.5	-2.3
NOVC	22.12	22.9	30.12	4.5	8	-18.5	-2.3
RDVL	21.12	11.6	30.12	3.4	8	-8.2	-1.0
SKOL	22.12	13.3	29.12	2.9	7	-10.4	-1.5
SOKA	24.12	12.9	29.12	-2.6	5	-15.5	-3.1
SOLT	21.12	21.6	30.12	-7.1	9	-28.7	-3.2
SULP	21.12	10.4	29.12	0.8	8	-9.6	-1.2
SVLV	24.12	14.2	28.12	-6.1	4	-20.2	-5.1
VARA	24.12	17.8	28.12	-1.0	4	-18.8	-4.7
VLVL	22.12	8.3	28.12	-3.2	6	-11.5	-1.9
VYNO	22.12	7.4	30.12	-15.9	8	-23.3	-2.9
YASN	23.12	1.8	30.12	-16.9	7	-18.7	-2.7
ZARN	21.12	13.0	30.12	-4.2	9	-17.1	-1.9
ZBAR	21.12	10.8	27.12	-3.2	6	-14.0	-2.3
ZOLH	23.12	8.6	29.12	-2.1	6	-10.6	-1.8

Узагальнюючи дані таблиці 2.2 можна констатувати, що досліджуване геодинамічне явище просідання на території заходу України за станціями

мережі Геотерраса у кінці грудня 2019 року тривало від 4-ох до 9-ти днів. Усі станції впродовж явища зазнали просідання по висоті: найменший висотний зсув у станції BRGN, Бережани $\Delta h = -6$ мм, а найбільший – станції SOLT, Солотвино $\Delta h = -27$ мм. Швидкість зміщень за добу V_h варіюється досить сильно від -1.0 до -4,7 мм/день. Така варіація може бути пояснена складною тектонічною будовою території заходу України [19]. Оскільки всі досліджені станції мережі Геотерраса так чи інакше зазнають висотного зсуву, то потрібно опрацювати й ГНСС-станції в інших регіонах Європи та світу аби зрозуміти межі поширення даного геодинамічного явища.

2.1.3. Просторово-часова оцінка короткотривалих висотних зміщень на території Європи

Просторово-часова оцінка геодинамічного явища складається з декількох етапів:

- На першому етапі необхідно встановити межі поширення геодинамічного явища. Оскільки воно не є локальним, адже підтвержене на багатьох станціях мережі Геотерраса, – воно може бути загальноземним чи регіональним [27].
- Другим етапом є підготовка бази даних ГНСС-станцій на цю територію. По-перше, добових розв'язків ГНСС-станцій у досліджуваній період повинно бути достатньо для аналізу. По-друге, у період спостережень на станціях не має бути заміни приймача чи антени. По-третє, ГНСС-станції повинні утворювати максимально можливу регулярну сітку на обраній території.
- На третьому етапі з використанням тих же параметрів h_0 , t_0 , h_1 , t_1 , T , Δh , і V_h , що описані вище, необхідно оцінити зміщення висот станцій.
- Завершальним етапом просторово-часової оцінки короткотривалих висотних зміщень на території Європи є побудова відповідних картосхем,

що узагальнюють та репрезентують це геодинамічне явище. Окрім цього залежно від результатів оцінки явища, також може бути виконана його регіоналізація.

Встановлення меж поширення геодинамічного явища

Оскільки зафіксований висотний зсув відбувся на всіх станціях мережі Геотерраса, то необхідним було визначити крайні межі поширення геодинамічного явища за даними інших мереж ГНСС-станцій. Мережа перманентних ГНСС-станцій IGS [74] є мережею, що включає ГНСС-станції регулярно розміщені по цілому світу, що працюють впродовж довгого періоду часу та визначаються стабільністю й надійністю розв'язків. Тому для встановлення меж поширення геодинамічного процесу на першому етапі оглянуті випадкові ГНСС-станції цієї мережі на різних континентах у грудні 2019 року. Висотний зсув характерний для усїєї території континентальної Європи, але не помітний на ГНСС-станціях розташованих на інших континентах. Тобто характер геодинамічного процесу носить не глобальний, а регіональний (континентальний) характер. Було проаналізовано часові серії ГНСС-станцій мереж IGS, EPN [74, 57], NGL [35], Словацької мережі, української мережі Геотерраса та System Solutions. На рисунку 2.7 наведена карта оглянутих станцій з поміченим (жовтий) та відсутнім (зелений) висотним зсувом за досліджуваний період.

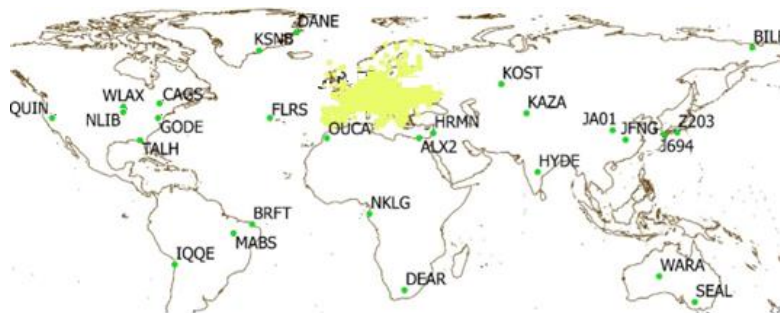


Рисунок 2.7 – ГНСС-станції, у часових серіях яких висотний зсув у кінці грудня 2019 року зафіксований (жовті) та не зафіксований (зелені).

На рисунку 2.8 наведені приклади часових серій висотного положення ГНСС-станцій за період з 20.11.2019 по 29.01.2020 року опрацьованих NGL [35], на яких висотний зсув не зафіксований.

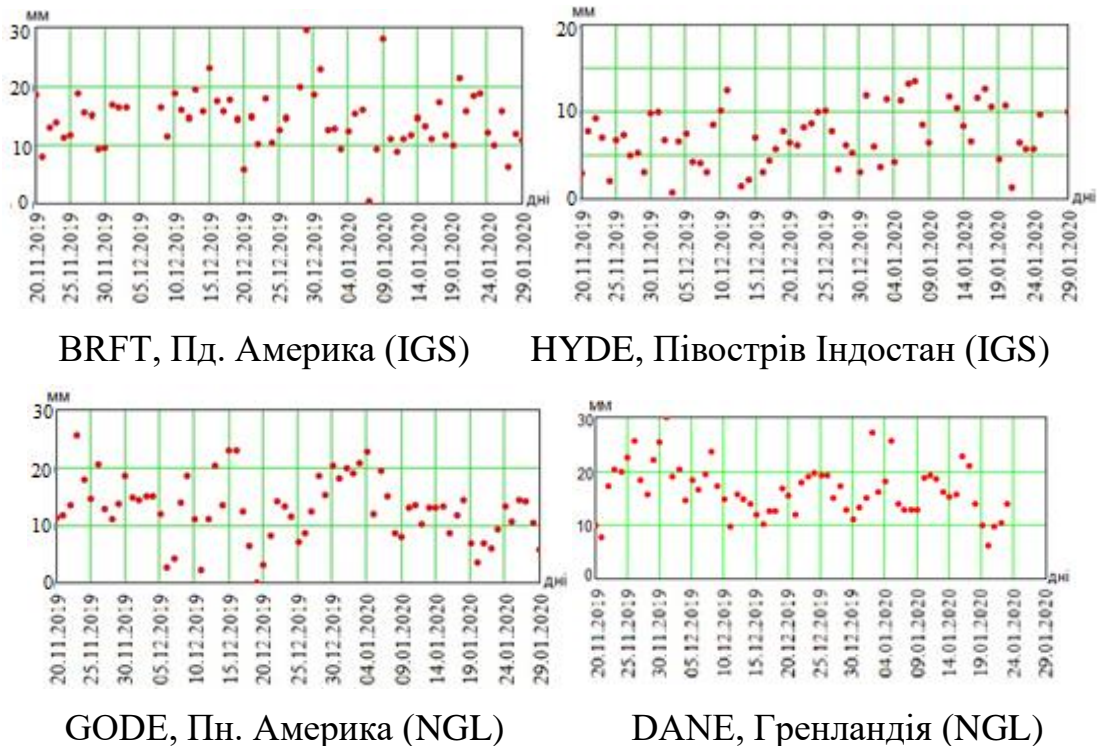


Рисунок 2.8 – Часові серії висот ГНСС-станцій мережі IGS, на яких висотний зсув у кінці грудня 2019 року не спостерігається

Для території усієї континентальної Європи висотний зсув підтверджується за даними різних центрів опрацювання ГНСС-даних. На рисунку 2.9, приведена зміна висоти станції KARL, Німеччина за даними мережі EPN [57] та USDL, Польща за даними мережі NGL [35].

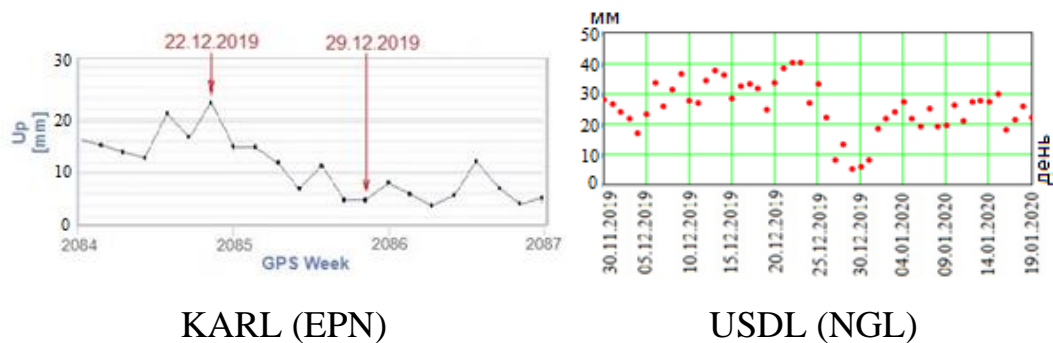


Рисунок 2.9 – Часові серії висот ГНСС-станцій Європи з висотним зсувом подані різними центрами опрацювання

Детальніше розглянемо створену базу даних для території України. Для утворення бази даних ГНСС-станцій на територію України до мережі Геотерраса [3] нами були додатково опрацьовані сирі файли RINEX мережі System Solutions та Головної астрономічної обсерваторії НАН України у Bernese GNSS. На рисунку 2.10. Стратегія опрацювання аналогічна до наведеної вище для ГНСС-станцій мережі Геотерраса.



Рисунок 2.10 – Вибрані ГНСС-станції з бази даних на території України

В сукупності база даних включає 32 ГНСС-станції мережі Геотерраса, 34 ГНСС-станції мережі System Solutions та 2 станції Головної астрономічної обсерваторії НАН України, які складають регулярну сітку на територію України.

Для території Європи використані готові добові рішення обчислені іншими центрами. У загальну базу в додаток до згаданих вище даних для території України увійшли: опрацювання станцій Європи за даними NGL [35], рішення мереж мереж IGS [74], EPN [57], Словацької мережі надані геодезичним та картографічним інститутом Братислави, опрацьовані нами дані на території Молдови за RINEX-файлами мережі System Solutions та дані 10-ти станцій Польщі опрацьовані мережею Геотерраса. До бази даних увійшло в цілому 552 станції, що розташовані на території континентальної Європи. На усіх станціях спостерігається висотний зсув.

Наведемо встановлені крайні межі висотного зсуву. Крайньою західною межею є континентальна територія Піренейського півострова та острови Великої Британії, адже далі на островах у Атлантичному океані цей процес не спостерігався. На ГНСС-станціях, що розташовані на півночі Африки зміщення в кінці грудня 2019 року також відсутні. Крайньою північною точкою, де спостерігались зміщення є північ Скандинавського півострова, проте ще далі на північ ГНСС-станції, які би працювали в цей момент не виявлені. Східна межа чітко не виявлена. На території України зміщення присутнє так, як і в Білорусі. На території росії біля Москви та Санкт-Петербурга це явище також відбулося. Але, оскільки дані російських перманентних ГНСС-мереж не є у відкритому доступі, то даних є недостатньо для чіткого встановлення східної межі. Оскільки зміщення на решті континенту Євразії, зокрема на Аравійському півостріві, півостріві Індостан, Японських островах не виявлені, то можна припустити, що територіально процес стосується тектонічного блоку Європейської частини Євразійської плити.

Візуалізація просторово-часових зміщень геодинамічного явища на території Європи

Для усіх 552-ох перманентних ГНСС-станцій Європи, що увійшли до бази даних, визначені параметри h_0 , t_0 , h_1 , t_1 , T , Δh , і V_h . З метою узагальнення отриманих результатів побудовані карти.

На рисунку 2.11 приведена карта загальної тривалості (T) вертикальних зміщень за досліджуваний період. Параметр T змінюється від 4 до 10 днів. Найдовше регіонально явище відбувається на території платформи на пн.-зх. від Альп, а найкоротше в межах Українського кристалічного щита. Також слід виділити, що із загального контексту подекуди виділяються окремі станції, на яких процес триває на день-два довше чи коротше. Це імовірно пов'язано з локальною тектонікою та геодинамікою регіону.

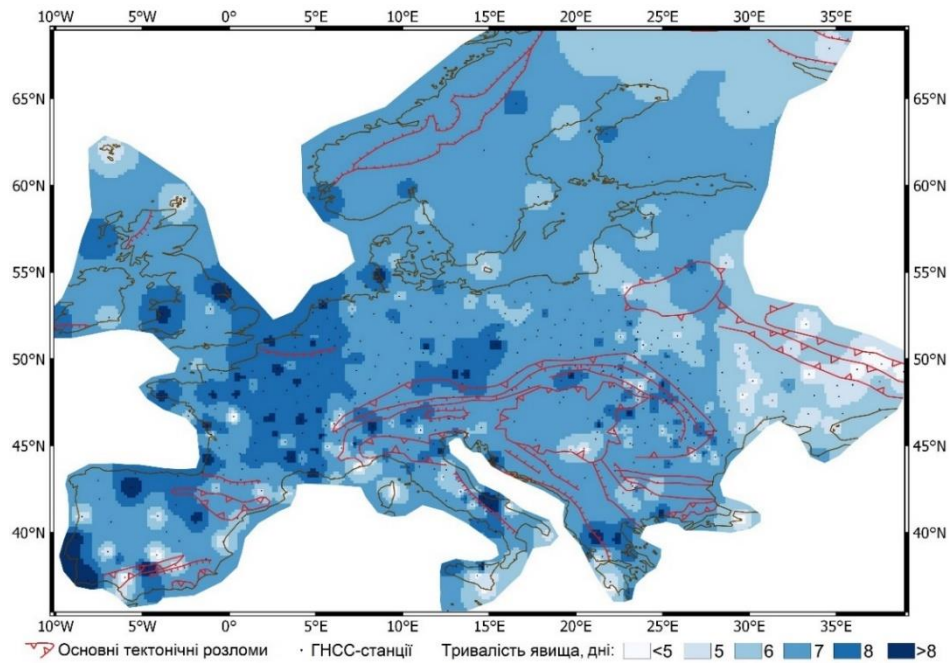


Рисунок 2.11 – Карта загальної тривалості (T) вертикальних зміщень за досліджуваний період

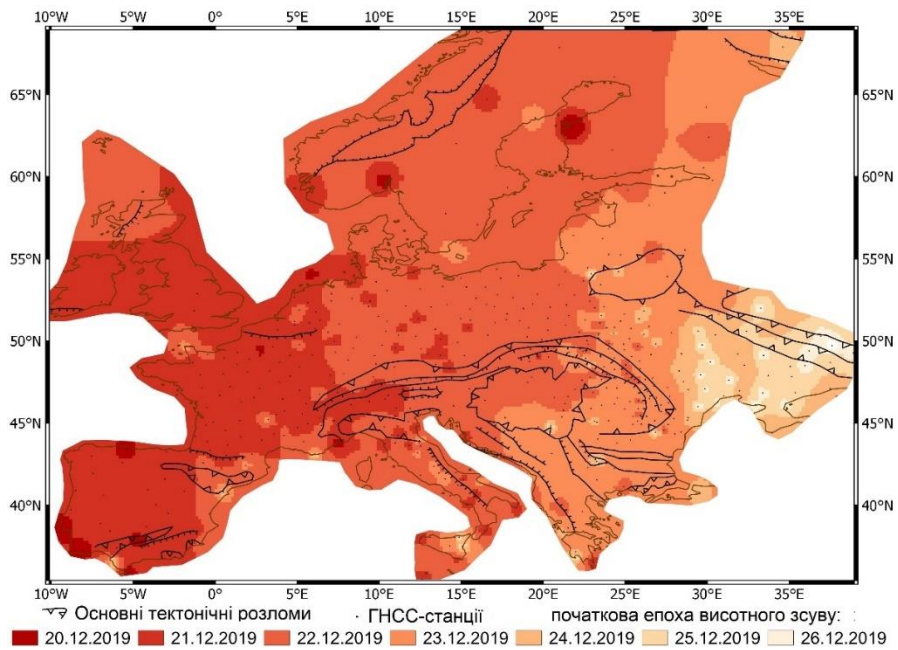


Рисунок 2.12 – Початкова епоха висотного зсуву (t_0) на території Європи

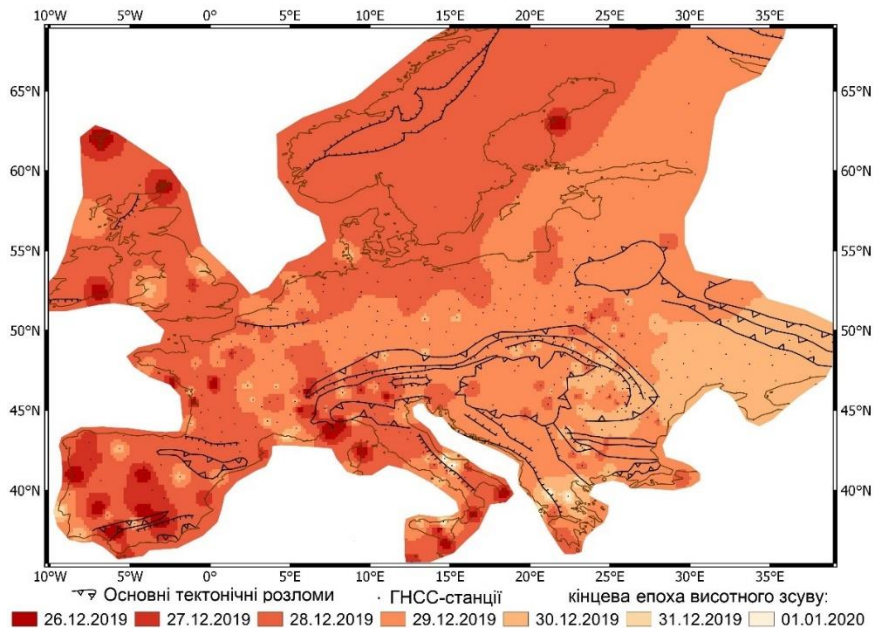


Рисунок 2.13 – Кінцева епоха висотного зсуву (t_1) на території Європи

З рисунків бачимо, що геодинамічний процес «переміщається» як хвильовий процес із заходу на схід вздовж Європейської плити. День початку зафіксованих зміщень на території Європи варіюється від 20 до 26 грудня 2019 року й має чіткий характер захід-схід. Кінець геодинамічного явища змінюється від 26 грудня 2019 року до 2 січня 2020 року. На відміну від початкової епохи висотного зсуву, де виділені кольорами зони чітко зазнають змін із заходу на схід, то кінцева епоха не настільки чітко піддається цій тенденції. Чим територія розташована більше в глибині континенту, тим дата завершення зафіксованих просідань (t_1) є пізнішою. Це можемо побачити на прикладі дня завершення падіння 28 грудня 2019 року, який водночас співпадає для Британських островів, Скандинавського півострова, частини Піренейського та Апеннінського півостровів. Натомість 29 грудня характерне вже для більш континентальних територій. Імовірно це можна пояснити впливом ряду океанічних факторів [146].

Карти розподілу параметрів Δh і V_h також побудовані. На рисунку 2.14 показані максимальні просідання (Δh) висотного зсуву за досліджуваний період на території Європи.

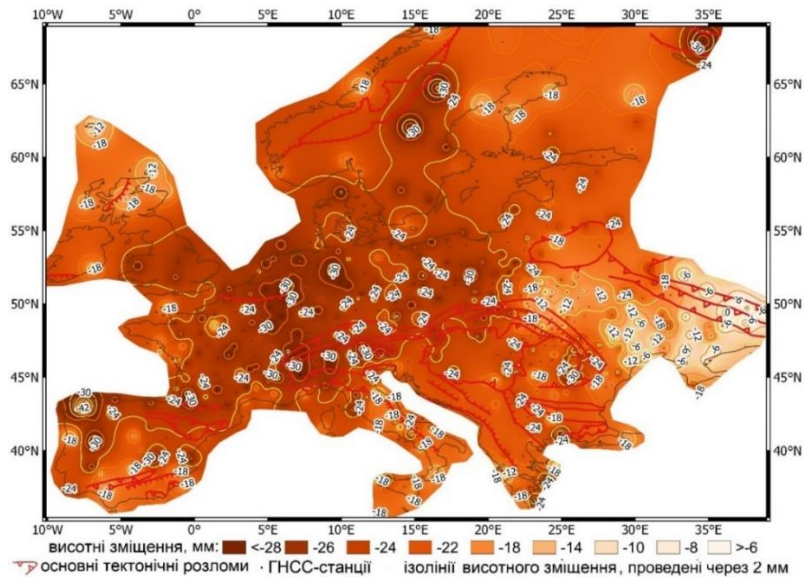


Рисунок 2.14 – Висотний зсув земної поверхні (Δh) за досліджуваний період

Значні зміщення більше 20 мм характерні для територій основних тектонічних розломів та суміжних територій. Найбільших просідань (до 30 мм) зазнає територія в районі Альп та на північ від них. Помітно, що за межею Карпат на схід величина максимальних зміщень поступово зменшується. Просторово-часовий розподіл швидкостей середньодобових зміщень у $\text{мм}/\text{день}$ показаний на рисунку 2.15.

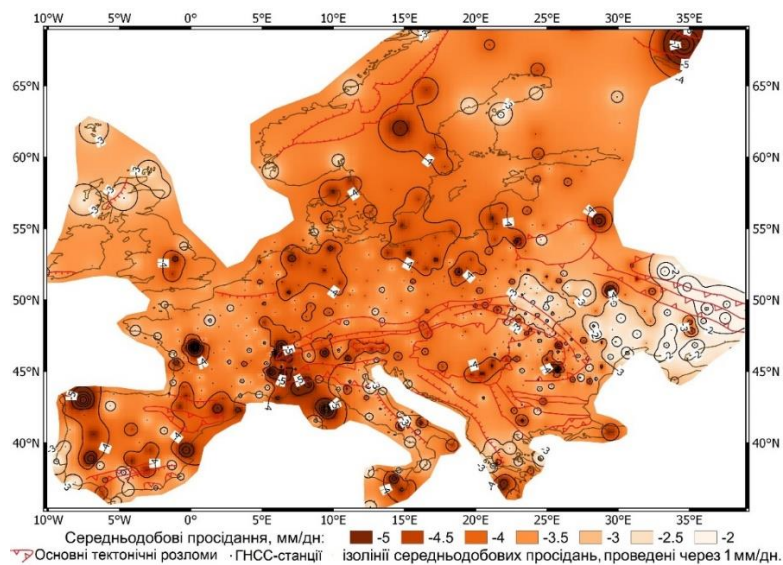


Рисунок 2.15 – Середньодобова швидкість висотного зсуву (V_h) за досліджуваний період

З рисунку 2.15 бачимо, що виділяються регіони, де висотний зсув відбувається швидко і з великими просіданнями та навпаки: тривалість явища є довгим, а просідання незначними. Значення середньодобової швидкості висотного зсуву на території Європи змінюється від 2 до 5 мм/день за абсолютним значенням. Найрізкіший перебіг геодинамічного процесу відбувається у східних Альпах, де зміщення сягають до 5 мм/день. Найповільніше цей процес відбувається на схід від Карпат. Отже, з одного боку більш швидші зміщення характерні для гірської місцевості та вздовж активних тектонічних розломів, а з іншого боку з рухом у напрямку захід-схід вони стають меншими.

Підведемо підсумки щодо характеристики висотного зсуву. Геодинамічний процес на території Європи триває 4-10 днів у кінці грудня 2019 року. Висотний зсув (Δh) за досліджуваний період на території Європи в середньому становить 20 мм, а більші просідання характерні для територій основних тектонічних розломів та суміжних територій. Найбільших просідань (до 30 мм) зазнає територія в районі Альп та на північ від них. Встановлено лінійність розгортання процесу зі заходу на схід. Узагальнення за параметром (V_h) швидкості середньодобових змін висоти показує, що найрізкіший перебіг явища відбувається у східних Альпах, де зміщення сягають до 5 мм/день, а найповільніше цей процес відбувається на схід від Карпат. Це зокрема частково відповідає території України, де потужності висотного зсуву поступово зменшуються з 20 до 6 мм в напрямку на схід.

2.1.4 Аналіз вертикальних деформацій земної кори Європи за неприпливні атмосферні навантаження

Виходячи з наведеної вище просторово-часової оцінки можемо перейти до аналізу причин висотного зсуву. Такий аналіз здійснимо згідно з категоріями факторів впливу на результати ГНСС-даних для

геодинамічних задач виділених у першому розділі: ГНСС-апаратура та проходження сигналу від супутника до приймача та геофізичні фактори, що деформують земну поверхню.

Почнемо з категорії, що безпосередньо стосується ГНСС. Помилки, що зумовлені геометрією сузір'я супутників виключаємо, оскільки, по-перше, розглянуті перманентні ГНСС-станції отримують дані впродовж 24 годин на добу, а по-друге абсолютна більшість станцій приймають сигнали як мінімум від супутників систем GPS та ГЛОНАСС. Це дозволяє однозначно визначити своє положення, оскільки у будь-який момент часу відслідковується як мінімум 6-8 супутників. Також використання остаточних ефемерид супутників під час пост обробки дозволяє отримати добове рішення практично з відсутністю впливу за геометрію сузір'я супутників.

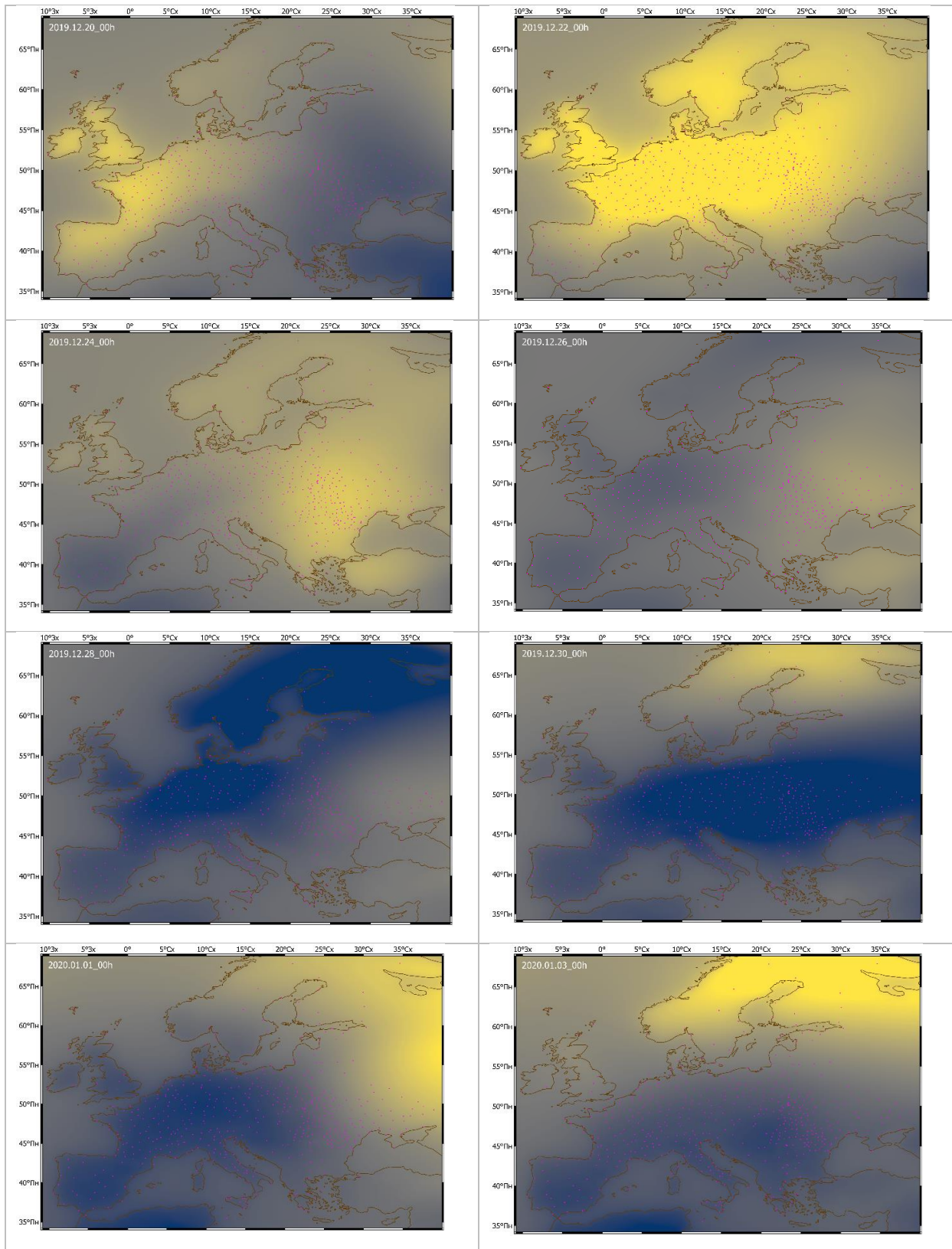
Для Європейського регіону вплив тропосферної затримки для ГНСС враховується за даними Європейського центру середньострокових прогнозів погоди У добових розв'язках пост обробки вже враховані дані тропосферної затримки. Іоносферна затримка мінімізована оскільки добові розв'язки є даними пост обробки і при обчисленнях включають в себе актуальні остаточні моделі іоносфери, що з'являються з запізненням до 14 діб після виміру [74].

Також можемо виключити похибки обладнання, оскільки дані опрацьованих 552 ГНСС-станцій, що розташовані на території Європи належать різним мережам та виготовлені різними фірмами. Наприклад, лише в мережі Геотерраса є ГНСС-приймачі фірм Leica, Trimble, Topcon, South. Щодо способу монтування частина станцій є закріплена на будівлях, а інша – безпосередньо в корінних породах. Детальний аналіз способу монтування станцій не проводився, проте дані станцій, на яких у грудні 2019 року було замінено ГНСС-антену чи приймач не бралися до уваги. Вплив обчислень програмних пакетів обробки виключається, оскільки

розглядаються дані різних мереж Європи опрацьовані різними центрами, зокрема Геотерраса, System Solutions, NGL, IGS, EPN, Словацької мережі SKPOS, і мають різну стратегію опрацювання у різних наукових пакетах обробки. Як відомо NGL [35] опрацьовані у GIPSY OASIS II, а українських Геотерраса та System Solutions у програмному пакеті Bernese, а рішення європейської системи EPN взагалі опрацьоване різними центрами для надійності і часто у різних наукових пакетах обробки ГНСС-даних. Оскільки висотні просідання підтверджені на одних і тих же станціях за результатами опрацювання різних мереж, то можна стверджувати, що фактор помилки програмних пакетів обробки не є таким, що значно спотворив це геодинамічне явище. Вплив багатошляховості, зважаючи на нерухомість перманентних станцій і повторювальний кожні 12 годин рух супутників довкола Землі є незначним та відносно стабільним для кожного приймача.

Отже, фактори з категорії ГНСС-апаратури та проходження сигналу від супутника до приймача не є причиною спостережуваного явища. Почергово розглянемо геофізичні фактори, що деформують земну поверхню, а саме неприпливні навантаження, припливні навантаження та процеси в надрах Землі. Прийнято виділяти три складових неприливних навантажень: неприпливне атмосферне, неприпливне океанічне та гідрологічне. Аналіз моделей [57] неприпливного океанічного навантаження та гідрологічного, який полягає у зміні водності річкової сітки регіону і ґрунтових вод в межах регіону не показує якихось значних взаємозв'язків з досліджуваним явищем. Натомість зміщення з моделі NTAL показують певну залежність, яку необхідно розглянути.

На рисунку 2.16 показані зміни модельованих NTAL на території Європи [57] за досліджуваний період. Такі моделі створюються кожні 3 години.



Модель NTAL -0,01м 0,01м, * - ГНСС-станції

Рисунок 2.16 – Зміни модельованих неприпливних навантажень на території Європи [57] за досліджуваний період

Для узагальнення приведені моделі станом на початок доби (00:00 годин) через 2 доби з 20 грудня 2019 року до 3 січня 2020 року. За досліджуваний період досить чітко відстежується міграція двох атмосферних явищ. Перше тривалістю з 20 по 24 грудня: міграція у напрямі захід-схід низького тиску, яка виражається у піднятті модельного верхнього шару земної поверхні на 10 мм. Друге явище – міграція у напрямі північ-південь високого тиску, яка виражається в опусканні модельного верхнього шару земної поверхні на 10 мм.

Початок першого атмосферного явища також показаний у звіті Служби зміни клімату Copernicus (C3S - Copernicus Climate Change Service). Відповідно до звіту C3S [47] у грудні 2019 на більшій частині Європи було менше хмар, ніж зазвичай, що відповідає позитивній аномалії вхідної сонячної радіації і вся Європа відчувала винятково вище середньої температури (аномалії до 5 градусів). Область низького тиску Zelio 20-21 грудня 2019 року доходить до Альп.

Проте порівнюючи рисунок 2.16 та рисунок 2.15, бачимо, що ГНСС-станції у різних регіонах зазнають різних зміщень від впливу схожих атмосферних навантажень. Це можна пояснити різною геологічною будовою регіонів, оскільки для моделювання атмосферних навантажень вона не врахована. Також у майбутніх дослідженнях потрібно оглянути процеси релаксації після таких геодинамічних явищ.

Підсумовуючи дослідження зазначимо, що висотний зсув у часових серіях ГНСС станцій до 20-30 мм за такий короткий період до 10 днів під впливом NTAL є важливим фактором для ГНСС-моніторингу великих інженерних об'єктів таких як ГЕС, ГАЕС, АЕС, особливо враховуючи неоднорідність геологічної будови довкола станцій. Адже зміщення з одного боку можуть бути інтерпретовані, як небезпечна ситуація на об'єкті, а з іншого постійна зміна навантажень може спричинити деформації конструкцій. Такі дослідження виконані у розділі 3.

Важливо зазначити, що короткотривалі висотні зміщення виявлені у грудні 2019 року на території Європи не є одноразовою подією. Далі у дисертаційному дослідженні на прикладі усієї ГНСС-мережі Дністровської ГЕС-1 показано короткотривалі висотні зміщення у лютому 2021 року та на прикладі станцій греблі Дністровської ГЕС-1 висотні зміщення на епохи 2017.8, 2019.0 та 2019.4 (Додаток В).

2.2. Дослідження взаємозв'язку сейсмічності та сучасних горизонтальних деформацій Карпато-Балканського регіону

На відміну від підрозділу 2.1, який стосувався оцінки короткотривалої геодинаміки Європи, у підрозділі 2.2 розглянута довготривала (багаторічна) геодинаміка Карпато-Балканського регіону, який виділяється значною сейсмічною активністю у межах Європи. Цей регіон вибрано у зв'язку з тим, що, по-перше, він включає території зі значною територіальною диференціацією сейсмічної активності, а, по-друге, є досить добре дослідженим з точки зору сучасних деформацій земної кори і щільним покриттям ГНСС-станціями.

Взаємозв'язок між сейсмічною активністю та вертикальними рухами земної кори для території Європи встановлено у роботі [24]. Для території Карпато-Балканського регіону тісний просторово-часовий кореляційний зв'язок між цими параметрами встановлено у зоні, яка охоплює Динарське нагір'я і прилеглу частину Адріатичного побережжя. Метою цього дослідження є пошук кореляційних зв'язків між сейсмічною активністю та сучасними горизонтальними деформаціями земної кори за останнє десятиріччя з використанням подібних методів викладених у [24].

2.2.1 Тектонічні особливості регіону та сейсмічна активність

На рисунку 2.17 показано основні розломи та території Карпато-Балканського регіону, який включає Панонський басейн, Карпати, Балкани, Родопи, Динариди, Геленіди та Південні Альпи.



Рисунок 2.17 – Основні розломи та території досліджуваного регіону (складено за [48, 67])

Карпато-Балканський регіон займає важливий сегмент Альпійсько-Гімалайського орогенного поясу і складається з тектонічних елементів різних масштабів. Цей регіон є результатом еволюції океану Тетіс, який існував між континентальними плитами Євразійською (Європа) та Гондваною (Африканською) і представлений геологічними одиницями, сформованими від докембрійського та мезозойського періодів. З боку Гондвани вона представлена Зовнішніми Динаридами, Далматинсько-Іонічною зоною та мікроплитою Адрія, які в основному сформовані від палеозою до мезозою.

Тектонічні елементи регіону та їх деформації добре досліджені [48, 67, 78, 99, 103]. Розлом, що тягнеться вздовж Східно-Європейської платформи та Карпат і спричинені деформації у Південних і Східних Карпатах детально проаналізовані [48, 147]. Верифікація тектонічної моделі Карпато-Паннонського регіону та зони з можливим ризиком для землетрусів на основі динаміки літосфери, геофізичних та геодезичних даних продемонстрована у [4, 113]. Для сейсмогенної зони Вранча побудована нова тектонічна та геодинамічна модель, в межах якої виділено

два регіональних поперечних розломи [75]. При дослідженні геодинаміки заходу Болгарії за сейсмологічними та геодезичними даними виявлені горизонтальні деформації за напрямком північ-південь, які природно відповідають скидам у регіоні [85]. Дослідження, пов'язані з регіональною геодинамікою Македонії, свідчать, що відносно до стабільної Європи вона великим блоком рухається на південь разом із частиною Болгарії [45].

Ще один великий розлом між Адріатичним морем та Динарським нагір'ям. Адріатична плита цілим блоком рухається на північний-схід з швидкістю 4 мм/рік. Основних деформацій зазнає саме Динарське нагір'я, де виділяють менші блоки з різною щорічною швидкістю. За даними ГНСС-станцій обчислені сучасні деформації Албанії, які вказують на те, що однакове поле деформації впливає на Західні Балкани та регіон, що включає територію Греції, Македонії та Болгарії. Межею між Динаридами та Альбанідами є основний розлом Шкодера-Пежа [78]. Визначено тектонічний стиль Словенії та показані активні деформації вздовж Перідріатичного розлому за ГНСС-даними в дослідженні [149].

Складною є тектоніка і деформації на Балканському півострові, адже у західній частині є великий розлом на межі з Адріатикою, на півдні і сході в Егейському морі. У регіональній геодинаміці Греції показані горизонтальні деформації центральної частини, де характерні найбільш значні горизонтальні деформації: водночас стиснення у південній та південно-західній частині, і розтяги у північно-західній частині півострова [51, 72]. Значні деформації спостерігаються на островах у Адріатичному морі та вздовж північного розлому в Егейському морі. [63].

Вагомою роботою для узагальнення геодинамічної моделі регіону Альп, Карпат, Панонського басейну, Динарид та Балкан в цілому є публікація [48], в якій за даними семи мереж перманентних ГНСС-станцій зведено та показано горизонтальні рухи та деформації регіону. Також детально вивчені сучасні швидкості у регіоні, що включає Трансільванію,

Південні Карпати, Егейське море та Албанію, де показаний рух блоку Македонії, Західної Болгарії та Румунії на південь-південь-захід.

Неоднорідна диференціація земної кори і складна просторова кінематика тектонічних блоків Карпато-Балканського регіону є хорошим полігоном для дослідження горизонтальних рухів земної кори.

Карпато-Балканського регіон має нерівномірний просторовий розподіл сейсмічної активності. Перш за все виділяється зона Вранча, Динаридське нагір'я, Балканський півострів, де частота та магнітуда землетрусів є вищою. У межах Панонського басейну та Східних Карпат переважно спостерігаються слабкі землетруси з нижчою частотою. У Карпатському регіоні найбільш сейсмічно активною є зона Вранча, яка є досить вузькою (40×60 км), що є результатом зіткнення між Африкою та Євразією. У зоні Вранча відбуваються найглибші землетруси на всій території Карпат з високою магнітудою. На сьогодні ця зона добре вивчена, створені геодезичні та геофізичні полігони, розроблені спеціальні симуляції землетрусів та моделі їх прогнозування [75, 76, 113].

Вздовж західного узбережжя Балканського півострова виділяється зона високої активності сильних землетрусів. Спостережувана сейсмічність є результатом досить складної геологічної будови, пов'язаної з континентальною субдукцією мікроплити Адріатики нижче Євразії [66, 108]. Vochini et al. [36] детально розглядають процеси в еллінській зоні субдукції, включаючи розрив, сегментацію та відступ, шляхом уточнення геометрії Нубійської плити до глибини 150-180 км, використовуючи розташовані гіпоцентри з каталогів глобальної сейсмічності та сейсмічності локальних зон. У Динаридах виділяють три активні сейсмічні зони: узбережжя Адріатичного моря, зони вигину навколо Загреба, регіон розлому Баня-Лука. Просторовий розподіл епіцентрів та фокусних глибин, аналізи макросейсмічного поля та вирішення фокальних механізмів для

декількох менших подій свідчать про постійне скорочення внутрішніх Динаридів [143].

Вихідні сейсмічні дані для дослідження завантажено з Європейсько-Середземноморського сейсмологічного центру (European-Mediterranean Seismological Centre, EMSC) [57]. Дані землетрусів згруповано у десять щорічних каталогів з 2010 по 2019 роки. Параметри землетрусів наступні:

- координати розташування землетрусу;
- глибина гіпоцентру в кілометрах;
- локальна магнітуда (M_L) за шкалою Ріхтера.

Для відбору землетрусів мінімальною магнітудою прийнято $M_L=1,5$ балів. Серед зібраних даних найглибші зафіксовані землетруси знаходяться на глибині 600 км.

Відомо, що регіональна сейсмічна активність територій (кількість землетрусів, виділеної енергії) у різні роки може спадати чи зростати, що пов'язано з перерозподілом мас у середині Землі та іншими планетарними процесами [132]. Щорічна кількість землетрусів на території Карпато-Балкан з 2010 до 2019 років приведена на рисунку 2.18. Географічне положення використаних у дослідженні землетрусів приведене у наступних підрозділах.

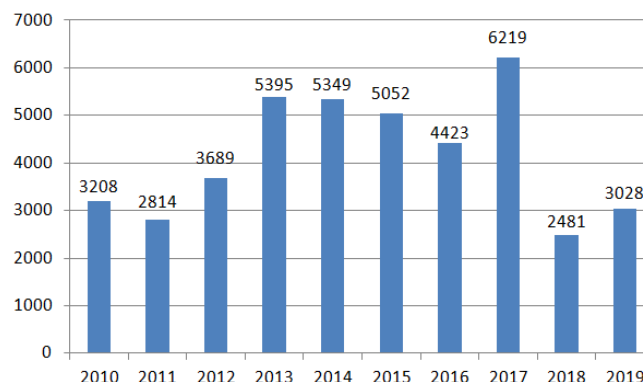


Рисунок 2.18 – Щорічна кількість землетрусів використаних у дослідженні у Карпато-Балканському регіоні впродовж 2010-2019 років

З рисунку бачимо, що найбільша сейсмічна активність у регіоні зафіксована у 2017 році (6219 землетрусів), а висока – у 2013-2015 роках (понад 5000 землетрусів). У 2018 та 2019 роках спостерігається зменшення кількості землетрусів у регіоні удвічі.

Найбільша щільність епіцентрів землетрусів зосереджена у південній частині регіону на території Греції. За досліджуваний період найбільша за магнітудою ($M_L = 6.9$) сейсмічна подія відбулася у 2014 році: гіпоцентр на глибині 29 км, координати епіцентру $B = 40.29^\circ$ $L = 25.40^\circ$.

2.2.2. Результати опрацювання ГНСС-станцій та оцінка горизонтальних деформацій регіону

Вхідними даними для дослідження сучасних геодинамічних процесів регіону є часові серії координат мереж ГНСС-станцій Карпато-Балканського регіону з 2010 по 2019 роки. Остаточні добові розв'язки перманентних ГНСС-станцій завантажені з сайту NGL, обчислені цим центром із використанням GIPSY-OASIS-II у системі координат IGS-2014 [35]. В дослідженні використано дані 173-ох перманентних ГНСС-станцій, а їх щорічна кількість показана на рисунку 2.19. Зменшення кількості станцій з 2016 року до 2019 пов'язана з відсутністю достатньої кількості добових розв'язків для відповідних ГНСС-станцій.

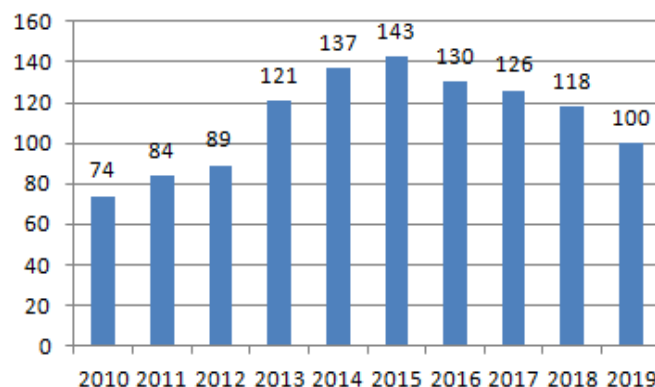


Рисунок 2.19 – Щорічна кількість перманентних ГНСС-станцій використаних у дослідженні з 2010 по 2019 рік

Завантажені дані ГНСС-станцій піддаються відбору за такими параметрами: тривалість роботи станцій, особливості розташування їх (близько розташовані ГНСС-станції видалялися) та заміна обладнання. Умова тривалості роботи ГНСС-станцій така: в цілому робота станції не менше трьох років. Через 8 ГНСС-станцій, які є близько розташованими (до 20 км) до станцій з більшою тривалістю вимірів були вилучені, оскільки вони вносили неоднорідність у просторовий розподіл станцій мережі. Щоб уникнути помилок, пов'язаних із заміною антен, часові серії координат 45-ти ГНСС-станцій були скореговані на різницю викликаних зміщень. Середня квадратична похибка визначення координат з добового розв'язку в плані становить 0,6-1,0 мм.

Якщо для ГНСС-станції щорічна кількість добових даних становить понад 200 діб, то для неї визначаються річні швидкості за напрямком північ (V_N) та схід (V_E). Використання середньорічних швидкостей V_N та V_E обумовлене виключенням впливу сезонних факторів. Вони обчислюються із розв'язку лінійних рівнянь за даними щорічної часової серії. Обчислені швидкості визначені з координат у загальноземній системі IGS-2014, відповідно для виділення і візуалізації регіональних кінематичних процесів доречним є перехід у регіональну систему координат. Такий перехід здійснено у два кроки. Першим є визначення середніх швидкостей зміщення для регіону за весь досліджуваний період ($V_{N.сер.} = + 11,7$ мм/рік; $V_{E.сер.} = + 21,3$ мм/рік). Другим кроком є врахування цих швидкостей, які подані у формулах:

$$V_{N\text{ пер.}} = V_{N\text{ igs}} - V_{N.сер.}, \quad V_{E\text{ пер.}} = V_{E\text{ igs}} - V_{E.сер.} \quad (2.4)$$

де:

$V_{N\text{ пер.}}, V_{E\text{ пер.}}$ – щорічні регіональні швидкості,

$V_{N\text{ igs}}, V_{E\text{ igs}}$ – щорічні обчислені швидкості,

$V_{N\text{ пер.}}, V_{E.сер.}$ – середні швидкості для регіону за весь період.

Таким чином, для 173-ох перманентних ГНСС-станцій обчислено їх регіональні швидкості та виконано оцінку їх точності. Фрагмент обчислення регіональних швидкостей на ГНСС-станціях за даними 2019 р подано у Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Фрагмент визначених регіональних річних швидкостей зміщення ГНСС-станцій та їх середні квадратичні похибки у 2019 році

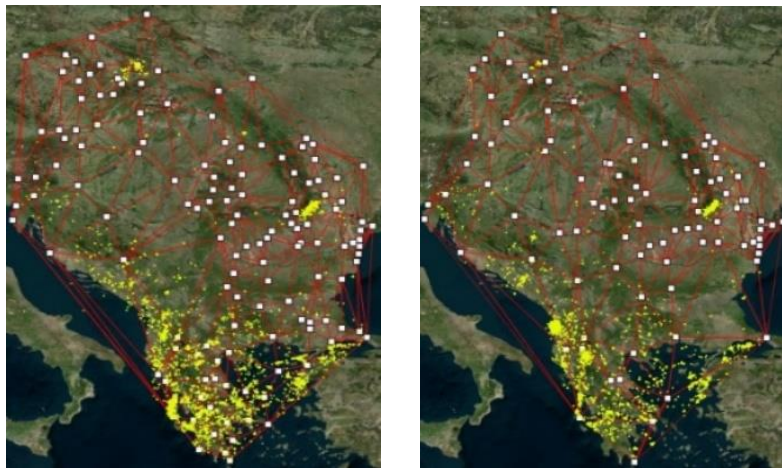
№	Назва станції	Регіональні швидкості та СКП			
		V_N , мм/рік	m_{V_N} , мм	V_E , мм/рік	m_{V_E} , мм
1	ABIU	3.5	1.7	4.7	1.3
2	BACA	3.0	1.4	3.9	1.4
3	BERA	-0.1	1.7	-4.6	1.7
4	BISK	3.4	2.6	0.3	1.5
5	BUTE	3.3	1.6	0.7	1.8
6	CAKO	4.1	1.5	1.1	4.1
7	DUTH	-1.3	2.9	2.8	1.9
8	ISTA	0.2	2.0	1.9	1.6
9	KATO	-0.1	1.8	-0.6	1.3
10	LEHL	-0.4	2.2	9.0	2.3
11	NPAZ	1.8	1.9	1.8	1.5
12	PASC	3.9	1.3	4.2	1.6
13	POZE	4.7	1.9	1.8	1.5
14	SFGH	4.6	1.7	5.8	2.1
15	SKYR	-22.0	1.6	-10.4	1.6
16	SRJV	4.1	2.5	1.1	2.4
17	TRO3	-2.4	2.8	-3.6	2.0
18	VASL	4.2	1.7	4.8	1.4
19	VATR	1.9	2.0	2.5	1.8
20	VSBO	0.6	1.4	-4.9	1.6

2.2.3. Взаємозв'язок параметрів горизонтальних деформацій регіону та узагальненої сейсмічності

Складна структура та просторова кінематика тектонічних блоків Карпато-Балканського регіону в сокупності із просторово-часовою неоднорідністю розподілу сейсмічної активності дозволяє вивчати і

розглядати параметри взаємозв'язку між сейсмікою та геодинамічними деформаціями.

З метою детального дослідження деформацій земної кори і сейсмічності, Карпато-Балканський регіон розділяємо на суцільну мережу трикутників, у вершинах яких розташовані ГНСС-станції. Цей поділ проводимо за принципом триангуляції Делоне для кожного року спостережень, оскільки кількість ГНСС-станцій щороку є іншою. На рисунку 2.20, показана мережа триангуляції Делоне, яка утворена діючими перманентними ГНСС-станціями за період 2014 – 2019 роках, а також епіцентри землетрусів у ці роки.



□ – перманентна ГНСС-станція ● – епіцентр землетрусу  – трикутник мережі Делоне

Рисунок 2.20 – Мережа суміжних трикутників Делоне, утворена з ГНСС-станцій та епіцентри землетрусів у 2015 та 2019 роках

Відповідно до методики [19, 22, 23], для кожного трикутника за щорічними регіональними швидкостями ГНСС-станцій, які знаходяться у його вершинах, обчислюємо значення таких горизонтальних деформацій: загальний зсув γ та його азимут, дилатацію Δ , максимальний стиск $E1$ чи розтяг $E2$ та Θ – азимут головної півосі деформації.

Для прикладу у Таблиці 2.4 наведено фрагмент результатів визначення горизонтальних деформацій, обчислених для утворених трикутників за даними 2019 року, приведених у Таблиці 2.3.

**Фрагмент даних визначених горизонтальних деформацій у
трикутниках за даними 2019 року**

№ трик.	Назви вершин трикутника			Δ $10^{-8}/\text{рік}$	γ $10^{-8}/\text{рік}$	A_γ , °	E_1 $10^{-8}/\text{рік}$	E_2 $10^{-8}/\text{рік}$	Θ , °
	I	II	III						
155	VASL	PASC	BACA	2.62	0.16	86	24.10	2.04	43
81	SFGH	VATR	ABIU	-1.19	-1.93	219	6.55	-18.40	20
177	SKYR	ISTA	DUTH	8.09	8.46	35	91.80	-10.90	17
109	BUTE	CAKO	POZE	-0.45	-0.69	219	2.19	-6.66	19
167	DUTH	LEHL	TRO3	9.25	-10.10	185	96.80	-4.28	3
103	BISK	VSBO	KATO	1.89	3.35	65	49.60	-30.70	33
112	SRJV	BERA	NPAZ	2.25	-0.53	113	17.90	4.60	147

Поля щорічного розподілу швидкостей дилатацій території Карпато-Балканського регіону за даними ГНСС-станцій та щорічні вектори швидкостей у регіональній системі показано у додатку А. У цілому, впродовж 2010-2019 років щорічні дилатації територій не зазнають значних змін, оскільки більшість перманентних ГНСС-станцій мають відносно стабільний тренд руху. Загальні зміни швидкості дилатаційних змін знаходяться в межах менше $50 \cdot 10^{-8}/\text{рік}$. Південна частина Балканського півострова у регіональній системі координат рухається на південь і, якщо у 2010-2013 роках там спостерігається стиснення до $40 \cdot 10^{-8}$, то згодом після розширення у 2015 році ця тенденція зникає і у 2016-2019 роках спостерігається слабке розширення. Найбільші розширення територій характерні для 2014, 2015 років, а стиснення – 2010-2013 років.

З метою визначення узагальненого параметру сейсмічних подій, які відбулися протягом певного року на території обмеженій границями заданого тркутника, скористаємося узагальненим еліпсом розсіювання землетрусів, який поданий у підрозділі 1.2.2 [21, 22, 24, 139]. Параметри великої півосі a , малої півосі b та азимуту великої півосі θ для фрагменту трикутників наведені у Таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Фрагмент узагальнених параметрів сейсмічності за даними 2019 року

№ трик.	Назви вершин трикутника			Мала піввісь b , км	Велика піввісь a , км	Азимут вел. півосі θ , ^o	К-сть землетрусів
	I	II	III				
155	VASL	PASC	BACA	0.001	0.336	20	2
81	SFGH	VATR	ABIU	0.001	0.157	143	2
177	SKYR	ISTA	DUTH	0.163	1.077	160	342
109	BUTE	CAKO	POZE	0.001	0.027	39	2
167	DUTH	LEHL	TRO3	0.001	1.292	36	2
103	BISK	VSBO	KATO	0.023	0.196	162	12
112	SRJV	BERA	NPAZ	0.178	0.344	167	279

Таким чином, для кожного трикутника відповідного року обчислено параметри горизонтальних деформацій та параметри еліпса розсіювання землетрусів. Відповідно можна перейти до пошуку кореляційних зв'язків між деформаціями території та узагальненою сейсмічністю. Серед параметрів деформацій перш за все розглядаємо загальний зсув γ , дилатацію Δ , максимальне стиснення $E1$ та розтяг $E2$, а серед параметрів сейсмічності – малу (b) та велику (a) піввісь еліпса розсіювання землетрусів. Провівши попередній аналіз між зазначеними параметрами було вирішено репрезентувати геодинамічні рухи через параметр абсолютної дилатації території $|\Delta|$, оскільки сейсмічна енергія у залежності від просторового розміщення тектонічних блоків може стискувати, або навпаки розширяти земну поверхню. З метою встановлення кореляційних зв'язків між горизонтальними деформаціями рухів земної кори та сейсмічністю виконано порівняльний аналіз співвідношення півосей еліпса розсіювання епіцентрів землетрусів та значеннями дилатації кожного окремого трикутника.

Для цього з утвореного масиву річних даних дилатації та великої півосей еліпса розсіювання землетрусів методом перебору усіх комбінацій визначаються два трикутники, яким відповідає максимальна кореляція між

параметрами великої піввісі a еліпса розсіювання та $|\Delta|$. Для 2019 року це були 155-й та 81-й трикутники, з коефіцієнтом кореляції 1. Далі ітераційно нарощується такий ряд. У таблиці 2.6 показані відібрані трикутники за критерієм максимуму коефіцієнта кореляції між параметрами a та $|\Delta|$.

Таблиця 2.6

Фрагмент трикутників за критерієм максимуму коефіцієнта кореляції між параметрами a та $|\Delta|$ у 2019 році

№ з/п	№ трик.	Назви вершин трикутника			Велика піввісь a , (км)	$ \Delta $ 10^{-8} /рік	Коефіцієнт кореляції K
		I	II	III			
1	155	VASL	PASC	BACA	0.336	2.62	1
2	81	SFGH	VATR	ABIU	0.157	1.19	1
3	177	SKYR	ISTA	DUTH	1.077	8.09	1
4	109	BUTE	CAKO	POZE	0.027	0.45	1
5	167	DUTH	LEHL	TRO3	1.292	9.25	0.999
6	103	BISK	VSBO	KATO	0.196	1.89	0.999
7	112	SRJV	BERA	NPAZ	0.344	2.25	0.998
8	32	SRJV	SABA	POZE	0.071	1.27	0.998
9	36	DMDM	KNJA	DRTS	0.227	1.41	0.997
10	34	DMDM	DRTS	BUZE	0.146	1.70	0.996
11	13	GANP	PENC	OROS	0.122	1.64	0.994
12	147	DUTH	AUT1	SKYR	0.488	3.20	0.992
13	79	TGTS	BUZA	ADJU	0.059	1.59	0.988
14	148	SOFI	DUTH	TRO3	0.488	4.85	0.985
15	141	GRAZ	TRIE	GSR1	0.403	1.69	0.981
16	116	NOA1	VLSM	NEAB	0.793	4.71	0.976
17	108	GRAZ	GSR1	CAKO	0.251	0.54	0.970
18	48	ORID	AUT1	SOFI	0.548	2.83	0.958
19	115	KLOK	NOA1	LARM	0.297	0.45	0.950
20	144	SRJV	POZE	ZADA	0.205	0.09	0.943
21	50	LARM	NOA1	SKYR	0.370	5.18	0.931
22	47	SOFI	DUTH	AUT1	0.470	1.86	0.925
23	25	CAKO	POZE	ZADA	0.372	0.37	0.915
24	138	KATO	WROC	BISK	0.014	2.00	0.894
25	35	SABA	SRJV	NPAZ	0.398	1.27	0.873
26	142	ZADA	GSR1	CAKO	0.481	0.81	0.858
27	41	NPAZ	DMDM	KNJA	0.391	0.68	0.845
28	146	MAL3	KLOK	VLSM	0.580	7.63	0.832
29	164	ZADA	BERA	SRJV	0.637	1.82	0.814
30	38	NPAZ	KNJA	ORID	0.695	1.22	0.792

На рисунку 2.21 подано криві зміни параметрів a та $|\Delta|$ (зліва) та їх коефіцієнт кореляції (справа) з нарощуванням кількості корельованих трикутників у 2019 році. Видно, що приблизно за відібраними першими

23-ма трикутниками криві зміни параметрів a та $|\Delta|$ мають синхронний характер. У подальшому нарощування нових трикутників приводить до втрати синхронності зміни цих кривих (I та II зони на рисунку 2.21). Криву зміни коефіцієнта кореляції (рисунок 2.21, правий) між параметрами a та $|\Delta|$ також умовно можна розділити на дві частини. Перша частина кривої характеризується повільним зменшенням коефіцієнта кореляції між параметрами a та $|\Delta|$, а друга частина кривої характеризується стрімким зменшенням коефіцієнта кореляції. Останнє свідчить про те, що нові трикутники не мають кореляції між параметрами a та $|\Delta|$.

Відповідно трикутники першої групи мають високу кореляцію між параметрами a та $|\Delta|$, тобто за результатами 2019 року група трикутників, які мають високу кореляцію між a та $|\Delta|$ є обмежена 23 трикутниками з коефіцієнтом кореляції 0,915 (таблиця 2.6).

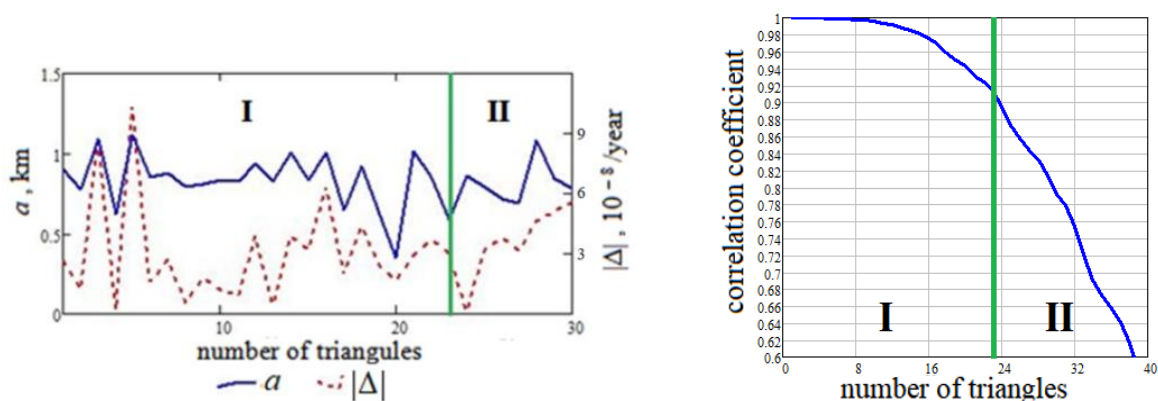


Рисунок 2.21. – Криві зміни параметрів a та $|\Delta|$ (зліва) та їх коефіцієнта кореляції (справа) для ряду відібраних трикутників у 2019 році.

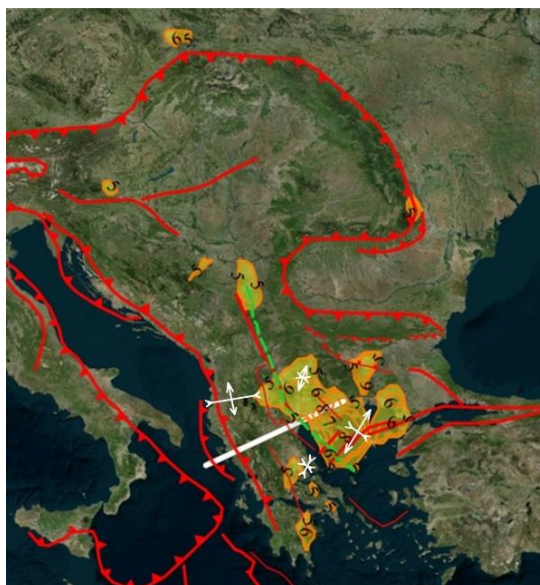
Карто-схеми територій в межах Карпато-Балканського регіону, в яких виявлений високий ступінь кореляції між a та $|\Delta|$ за період дослідження щорічно з 2010 по 2019 роки окремо приведені у додатку Б. У таблиці 2.7 показані щорічна кількість та мінімальні значення коефіцієнту кореляції між a та $|\Delta|$ для трикутників віднесених до I групи.

**Щорічні значення для трикутників з високим показником коефіцієнту
кореляції між a та $|\Delta|$**

Рік	Коефіцієнт кореляції	Кількість трикутників
2010	0.88	22
2011	0.89	31
2012	0.84	30
2013	0.88	41
2014	0.84	31
2015	0.87	45
2016	0.87	35
2017	0.92	30
2018	0.87	32
2019	0.91	23

З метою визначення територій з постійним у часі проявом кореляційних зв'язків між великою піввіссю еліпса розсіювання землетрусів a та абсолютною дилатацією $|\Delta|$ застосуємо методику запропоновану в [139]. Усю територію Карпато-Балканського регіону розбито на сітку точок у вершинах квадратів зі стороною у 10 км. Для кожної точки визначаємо трикутник, у якому вона знаходиться. Якщо визначений трикутник відібраний у ряд трикутників з високим ступенем кореляції між параметрами a і $|\Delta|$, то цій точці присвоюємо значення 1, у протилежному випадку присвоюємо 0.

Перевірку кожної точки проводимо для усіх років. Сума присвоєних значень за усі роки спостережень відповідає кількості років, у яких дана точка знаходилась у трикутнику з високим ступенем кореляції між параметрами a і $|\Delta|$. Таким чином, якщо щороку з 2010 по 2019 рік точка знаходилась в межах трикутників з високою кореляцією, то набувала б значення 10, якщо жодного – 0. Після відповідних обчислень виявлено, що для досліджуваного регіону існують точки з максимальним значенням рівним 8. На рисунку 2.22 приведено території, в яких проявляється кореляція між параметрами a і $|\Delta|$ понад 5 років з 2010 по 2019 роки (жовті зони).




 – зони щорічного прояву високих кореляцій між a та $|\Delta|$;  – основні розломи;
 – Sava Suture Zone [67];  – головні осі розтягу і стиску E_1 E_2 ;
 – профіль за [103] (див. рисунок 2.23.)

Рисунок 2.22 – Картоschema територій, з високим ступенем кореляції між сейсмічністю і горизонтальними деформаціями земної кори за даними з 2010 по 2019 рр. (доповнено за [67])

Необхідно зазначити, що усі виділені території зі високим ступенем кореляції між сейсмічністю і горизонтальними деформаціями межують з лініями трасування активних розломів. Найбільша за площею територія з високою кореляцією охоплює Родопський масив. Територія високої кореляції також співпадає зоною Вранча. Відповідно до досліджень [107] Sava Suture Zone (зелена лінія на рисунку 2.22) – це зона межі Адрії-Європи та стиснення тектонічних масивів Родопи, Геленіди та мікроплити Адрія, а у загальному це зона субдукції Африканської та Євразійської тектонічних плит. На рисунку 2.23 подано геологічний профіль цієї території. На профілі нанесено гіпоцентри землетрусів за 2010-2019 роки і виділено зону високої кореляції між параметрами a і $|\Delta|$. Зона Родопського масиву зазнає розширення у напрямку перпендикулярному осі розлому, а зона Геленідів навпаки зазнає стиснення [103].

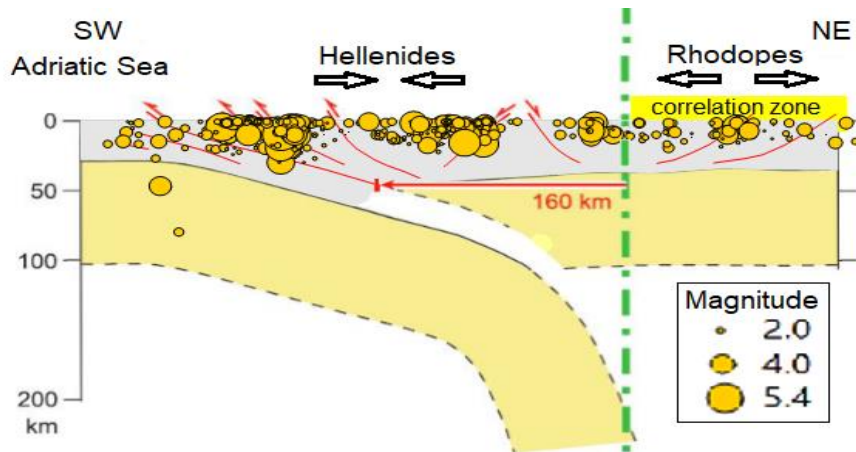


Рисунок 2.23 – Поперечний переріз тектонічних структур Динаридів-Геленідів з нанесеними гіпоцентрами землетрусів (на основі [67, 103])

Відповідно можна припустити, що кореляційний взаємозв'язок між горизонтальними деформаціями, визначеними за ГНСС-даними, і узагальненою сейсмічністю проявляється тільки у зонах субдукції, де є інтенсивна сейсмоактивність і мають прояв деформації земної кори. Це підтверджується проявом зон кореляцій (див. рисунок 2.22), які розташовані по одну зі сторін активних розломів. Слід зауважити, що зон високої кореляції між узагальненою сейсмічністю і вертикальними рухами земної кори [24, 139] є значно більше, ніж зон кореляцій з горизонтальними деформаціями. Це може свідчити про те, що сейсмічна енергія у першу чергу відображається у вертикальних рухах земної кори, а горизонтальні деформації є вже похідними від вертикальних. У зонах субдукції поява горизонтальних напружень відстежується насумом двох плит, які викликають сейсмічні події. Вивільнена сейсмічна енергія може у свою чергу привести до вертикальних і горизонтальних деформацій і цей процес має циклічний характер.

Висновки до розділу 2

1. Досліджено короткотривалий (4-10 днів) висотний зсув у часових серіях координат ГНСС-станцій території континентальної Європи у кінці грудня 2019 року. За межами континентальної Європи висотний зсув ГНСС-станцій за досліджений період – відсутній. Оцінено величини та швидкості висотного зсуву 552-ох ГНСС-станцій та побудовано відповідні карти, що характеризують його просторово-часове поширення. Досліджене явище характеризується лінійністю розгортання процесу зі заходу на схід. Висотний зсув (Δh) за досліджуваний період на території Європи в середньому становить 20 мм, а більші просідання характерні для територій основних тектонічних розломів та суміжних територій. Найбільших просідань (до 30 мм) зазнає територія в районі Альп та на північ від них. Найрізкіший висотний зсув відбувається для ГНСС-станцій у східних Альпах, де зміщення сягають до 5 мм/день, а найповільніше цей процес відбувається на схід від Карпат. Це зокрема частково відповідає території України, де за величиною висотний зсув поступово зменшуються з 20 до 6 мм в напрямку на схід.

2. Аналізуючи причини досліджуваного короткотривалого висотного зсуву бачимо, що він практично повністю за характером і просторо-часовим проявом відображається в моделях NTAL на цей період. Простежується неоднорідність пружних деформацій регіонів у порівнянні з модельованими навантаженнями NTAL. Це ймовірно залежить від неоднорідності геологічної будови регіонів, що потребує детального дослідження на локальному рівні. Зокрема такі дослідження важливо провести для регіонів відомої і різної геологічної будови вкритих густою сіткою ГНСС-станцій, наприклад, для великих інженерних об'єктів.

3. Виконане дослідження просторово-часових взаємозв'язків між величинами узагальнених критеріїв поля горизонтальних швидкостей

земної кори та узагальненої сейсмічності для Карпато-Балканського регіону з 2010 по 2019 роки дозволяє навести такі результати:

- за даними сейсмічних станцій визначено щорічні параметри узагальненої сейсмічності, а саме великої піввісі a , малої піввісі b та азимуту великої піввісі θ еліпсів розсіювання землетрусів для трикутників обмежених ГНСС-станціями;

- за даними 173-ох перманентних ГНСС-станцій оцінені горизонтальні деформації Карпато-Балканського регіону, за параметрами загального зсуву γ та його азимуту, дилатації Δ , максимального стиску $E1$ та розтягу $E2$ та азимуту головної піввісі деформації Θ .

- проведено пошук кореляційних взаємозв'язків між абсолютною дилатацією $|\Delta|$ та узагальненими параметрами сейсмічності територій та виділено щорічні зони, з високим ступенем кореляції ($>0,84$) між цими параметрами.

- виділено території, у яких кореляційний зв'язок між абсолютною дилатацією $|\Delta|$ та великою піввісю a еліпсів розсіювання землетрусів триває понад 5 років при дослідженні у 10 років.

4. У Карпато-Балканському регіоні усі виділені території з багаторічним високим ступенем кореляцій між сейсмічністю і горизонтальними деформаціями межують з лініями трасування активних тектонічних розломів, які є зонами субдукції. Найбільша за площею територія з високою кореляцією охоплює Родопський масив, зону занурення Африканської плити під Євразійську. Відстежується закономірність прояву сейсмічності у зонах субдукції: зони кореляцій розташовані по одну із сторін активних розломів. В зонах субдукції поява горизонтальних напружень проявляється насупом двох плит, які викликають сейсмічні події. Вивільнена сейсмічна енергія може у свою чергу привести до вертикальних і горизонтальних деформацій і цей процес має циклічний характер.

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ СЕЙСМІЧНОСТІ ТА НЕПРИПЛИВНИХ АТМОСФЕРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ДЕФОРМАЦІЇ ВЕЛИКИХ ІНЖЕНЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Для аналізу впливу неприпливних атмосферних навантажень та сейсмічності на деформації локальних територій вирішено запропонувати та апробувати метод виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій ГНСС-станцій та детально розглянути вплив вище зазначених факторів на геодинаміку великих інженерних об'єктів на прикладі Дністровської ГЕС-1.

3.1. Методика виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій ГНСС-станцій

На основі аналізу часових серій координат ГНСС-станцій іноді можна виявити різкі зміни просторового положення станцій впродовж 10-15 днів. Часто такі одночасні подібні зміщення можуть відбуватися на сусідніх станціях і охоплювати значні території. Наприклад одним із таких геодинамічних процесів є висотний зсув перманентних станцій Європейського регіону зафіксований у грудні 2019 року тривалістю 4-10 днів [42], який описаний у підрозділі 2.1. Важливо зазначити, що такі висотні зсуви можна чітко помітити розглядаючи короткі ряди спостережень ГНСС-станцій (до 2 місяців). Натомість при порівнянні річних рядів ці зсуви координат візуально практично непомітні. З метою автоматизації пошуку таких одночасних зміщень мережі ГНСС-станцій та можливої майбутньої їх геодинамічної інтерпретації, пропонуємо метод, що ґрунтується на статистичному аналізі часових серій ГНСС-станцій.

У літературних джерелах за останні роки з'являються комплексні програми чи алгоритми аналізу часових рядів ГНСС-станцій з подальшою геодинамічною інтерпретацією, проте вони переважно присвячені розгляду окремих станцій [69, 100, 120, 131, 155]. Програмне забезпечення

TSAnalyzer для аналізу часових рядів ГНСС-станцій дозволяє візуалізувати часові ряди застосовуючи метод найменших квадратів, спектральний аналіз, інтерактивну перевірку даних на зсуви, тощо [155]. Програмне забезпечення SARI окрім візуалізації серії також включає наступні математичні методи опрацювання: обробка з використанням методу найменших квадратів, фільтрації Кальмана, смугового фільтра запропонованого Vondrak та методу максимальної правдоподібності для аналізу шумів [120]. Проте на сьогодні відсутні комплексні програми для аналізу короткотривалих зміщень та зсувів ГНСС-мереж.

Це дослідження присвячене розробці методу, який би дозволяв виявляти корельовані зміщення координат пари ГНСС-станцій на коротких часових серіях. Виявлення таких зміщень та одночасне підтвердження між різними парами станціями дозволить автоматизувати пошук локальних чи регіональних геодинамічних процесів на цій території, а в подальшому і допомогти в дослідженнях причин та оцінці впливів схожих просторових зсувів. Особливий вплив такі геодинамічні процеси можуть мати на результати ГНСС-моніторингу великих інженерних об'єктів таких як ГЕС [23, 24, 25], ГАЕС, АЕС, адже раптові зміщення можуть бути інтерпретовані, як небезпечна ситуація на об'єкті, а також регіонів, де відбуваються активні зсуви чи провалля [123].

Вхідними даними для запропонованого методу є часові серії координат як мінімум двох ГНСС-станцій, які повинні повністю чи частково співпадати у часі. Одночасні зміщення можна виявити у періоди спільної роботи ГНСС-станцій. У подальшому ґрунтуючись на взаємозв'язках між парами часових серій координат можемо перейти до взаємозв'язків у мережі, яка містить будь-яку кількість спільних у часі вимірів.

Для аналізу просторово-часових рядів пари ГНСС-станцій виконуємо наступний алгоритм. Спочатку визначаємо тривалість періоду Δt , у межах

якого порівнюються результати двох часових серій. Довжину цього періоду можна змінювати. Найкраще короткотривалі тренди зміщень проявляються при довжині досліджуваного періоду у межах від 15 до 40 діб.

Між сформованими рядами часових серій поступово від початку спостережень через одну добу змінюємо визначений період дослідження зміщень. Відповідно для середньої епохи досліджуваного періоду виконуємо у межах цього періоду статистичний аналіз часових серій. Перша середня епоха

$$T_{сер} = T_{поч} + \frac{\Delta t}{2}, \quad (3.1)$$

де, $T_{сер}$ - середня епоха часової серії; $T_{поч}$ - епоха початку часової серії;

Δt – тривалість періоду, в межах якого відбувається пошук взаємозв'язку.

При зміщенні періоду Δt по часовій серії з інтервалом в одну добу, $T_{сер}$ також змінюватиметься на одну добу. Для кожної епохи $T_{сер}$ у межах періоду Δt визначаємо коефіцієнти кореляції та коваріації за даними зміщень часової серії по одній з координат.

Пошук ковзних кореляційних і коваріаційних зв'язків між часовими рядами двох ГНСС-станцій за короткі періоди, які зміщуються вздовж усієї часової серії дозволяє за виділенням аномальних зміщень пар ГНСС-станцій показати характер зміщень на усій досліджуваній території. Коефіцієнт кореляції покаже ступінь лінійної залежності між рядами координат на двох ГНСС-станціях і буде високим, якщо між ними присутні співрозмірні за величиною зміщення, але вони можуть мати різну направленість. Оскільки геодинамічні процеси проявляються, зазвичай, у змінах координат однієї направленості, то судити про наявність процесу лише за коефіцієнтом кореляції складно. Тому з метою пошуку одночасних і співнаправлених зміщень використовуємо коефіцієнт коваріації. На

основі виконаних розрахунків для кожної епохи $T_{сер}$ у межах часової серії визначаємо коефіцієнти кореляції та коваріації часових серій у межах періодів Δt . У результаті отримуємо зміну коефіцієнтів кореляції і коваріації протягом періоду спостережень. Далі необхідно виконати аналіз цих періодів для подальшої інтерпретації зміщень як наслідку ймовірних геодинамічних процесів, з оцінкою їх величини, тривалості, характеру поширення та територіального охоплення.

Тестування алгоритму на відомому геодинамічному процесі

З метою апробації цього методу застосуємо його для вже відомого висотного зсуву у грудні 2019 року, описаного у підрозділі 2.1 [42]. За вихідні дані використаємо часові серії координат станцій мережі Геотерраса SULP, Львів та МУКО, Миколаїв. На рисунку 3.1 наведені їх висотні часові серії та позначений спостережуваний висотний зсув.

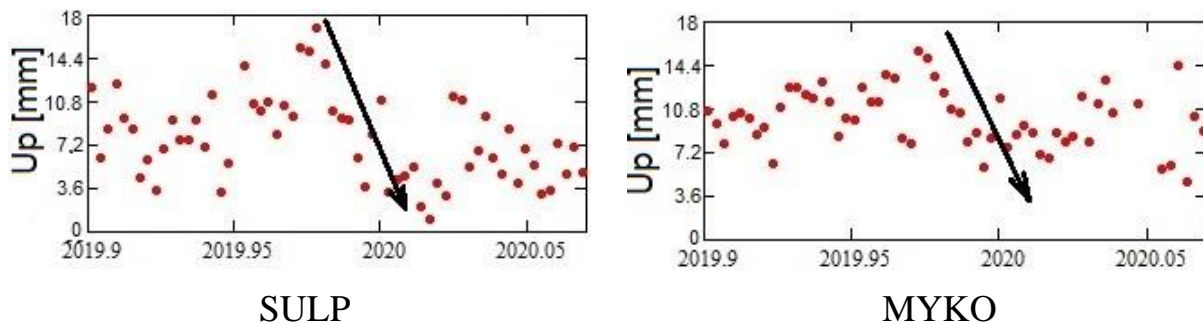


Рисунок 3.1 – Висотний зсув ГНСС станцій SULP та МУКО у грудні 2019 року

За цими часовими серіями обчислено щодобові зміни коефіцієнтів кореляції та коваріації з різною тривалістю періоду Δt . Відповідно графіки зміни коефіцієнтів кореляції та коваріації при $\Delta t = 20$ днів за період з 2019.5 по 2020.5 показані на рисунку 3.2.

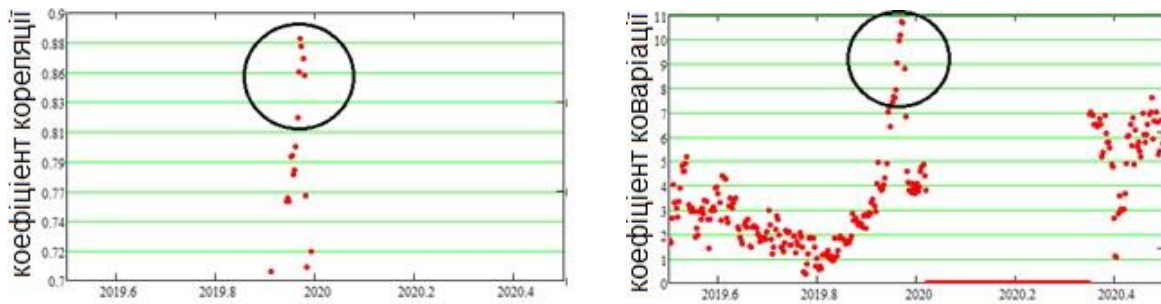


Рисунок 3.2 – Щодобова зміна коефіцієнтів кореляції (зліва) та коваріації (справа) між висотними часовими рядами станцій SULP і МУКО за період 2019.5 по 2020.5, при $\Delta t = 20$ днів.

Отже, високий кореляційний та коваріаційний зв'язок між станціями SULP і МУКО співпадає із зафіксованим висотним зсувом у грудні 2019 року [42]. Це дозволяє стверджувати, що запропонований нами алгоритм може бути застосований для пошуку короткотривалих зміщень пари ГНСС-станцій у довготривалих рядах часових серій.

3.1.2. Апробація методу для ГНСС-станцій мережі Геотерраса

Одна із апробацій запропонованого методу здійснена на часових серіях мережі постійно діючих ГНСС-станцій Геотерраса на території України [3]. Мережа створена та обслуговується лабораторією «Опрацювання супутникових вимірів» Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка». ГНСС-станції утворюють рівномірну мережу, відстань між якими в середньому становить 70 км.

Для дослідження використано часові серії просторових координат восьми ГНСС-станцій мережі Геотерраса, які працюють найдовше та з більшою надійністю можуть бути використані для геодинамічних досліджень. Їх розташування показане на рисунку 3.3.

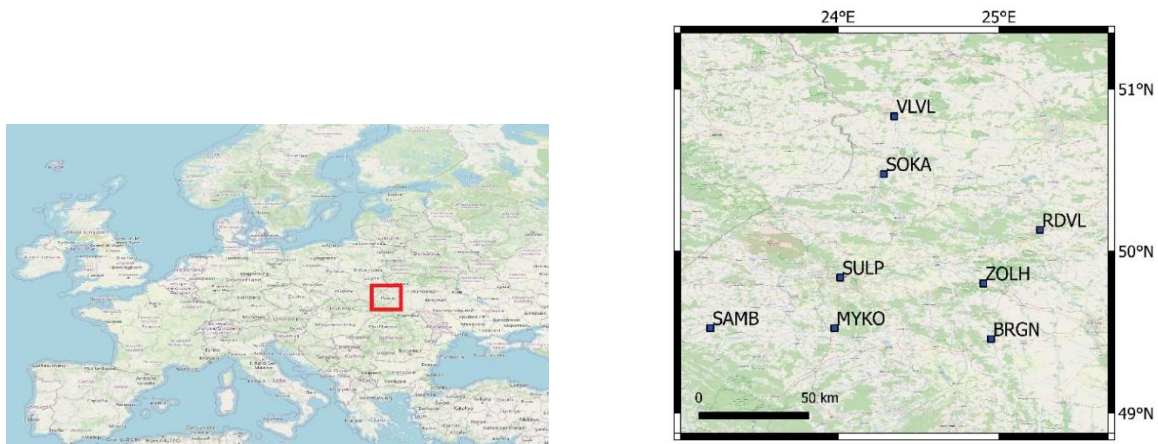


Рисунок 3.3 – Розташування ГНСС-станції мережі Геотерраса використаних у цьому дослідженні на карті Європи (а) та детальніше (б).

Стратегія опрацювання добових розв’язків приведена у підрозділі 2.1. Тривалість та цілісність результатів часових серій ГНСС-станцій мережі Геотерраса, які працювали з кінця 2017 до початку 2021 року показано на рисунку 3.4.

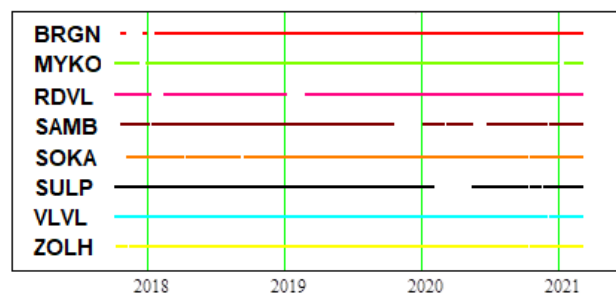


Рисунок 3.4 – Тривалість та цілісність результатів часових серій обраних ГНСС- станцій мережі Геотерраса

Як вже зазначалося вище: у грудні 2019 року у мережі Геотерраса зафіксований висотний зсув на усіх станціях мережі тривалістю 4-10 днів [42]. Проте є ймовірність, що схожі геодинамічні процеси виникали за час роботи мережі і не були помічені. З цією метою важливо здійснити пошук взаємозв’язків між часовими серіями ГНСС-станцій. Аналізуючи ряди відповідно до наведеного вище алгоритму звертаємо увагу на ті періоди, коли кореляційний та коваріаційний зв’язок зазнає одночасного суттєвого зростання між декількома станціями, що може свідчити про прояв

ймовірного геодинамічного явища. Зв'язок між однією парою станцій може бути випадковим.

На основі опрацювання за представленою методикою часових серій вибраних пунктів мережі Геотерраса за період з кінця 2017 по початок 2021 року при $\Delta t = 20$ днів виділяється ймовірне одночасне та однонаправлене висотне зміщення частини станцій на середню епоху $T_{сер}$ (185 день 2018 року). Про це свідчить екстремально високий показник коваріації (25-30) у більшості пар станцій, що супроводжується не найвищим, але високим коефіцієнтом кореляції (0,7-0,85). Для прикладу на рисунку 3.5 показаний графік коваріаційного та кореляційного зв'язку координат між станціями SULP та RDVL. Аналогічні дослідження на задану епоху було проведено для решти пар станцій.

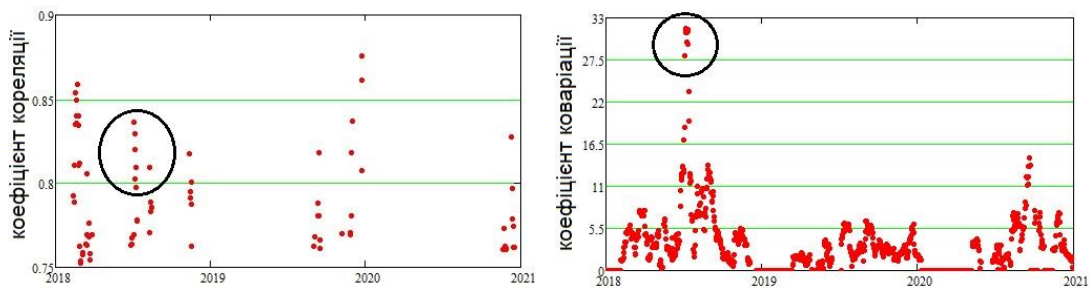


Рисунок 3.5 – Кореляційний та коваріаційний зв'язок висотного зміщення станцій SULP та RDVL на епоху $T_{сер}$ (185 день 2018 року) при $\Delta t = 20$ днів.

У таблиці 3.1 приведено коефіцієнти кореляції та коваріації часових серій висотного зміщення на епоху $T_{сер}$ (185 день 2018 року) при $\Delta t = 20$ днів між усіма можливими парами ГНСС-станцій мережі Геотерраса.

Таблиця 3.1

Коефіцієнти кореляції та коваріації часових серій висотного зміщення на епоху $T_{сер}$ (185 день 2018 року) при $\Delta t = 20$ днів мережі Геотерраса

№ з/п	ГНСС- станції		Коефіцієнт т кореляції	Коефіцієнт т коваріації
1	RDVL	SULP	0,84	31,68
2	MYKO	SAMB	0,83	22,57
3	BRGN	SULP	0,82	25,08
4	BRGN	MYKO	0,81	21,41
5	SULP	ZOLH	0,81	24,23
6	BRGN	RDVL	0,79	21,64
7	BRGN	ZOLH	0,79	20,20
8	MYKO	RDVL	0,78	24,43
9	BRGN	VLVL	0,76	22,17
10	MYKO	SOKA	0,75	29,69
11	MYKO	SULP	0,73	30,37
12	SAMB	ZOLH	0,73	18,22
13	RDVL	SOKA	0,71	29,81
14	RDVL	VLVL	0,71	21,22
15	VLVL	ZOLH	0,71	19,65
16	BRGN	SAMB	0,69	18,42
17	SULP	VLVL	0,69	22,99
18	MYKO	ZOLH	0,67	17,78
19	RDVL	ZOLH	0,66	21,24
20	SAMB	SULP	0,64	21,75
21	SAMB	VLVL	0,62	17,14
22	SOKA	SULP	0,61	27,53
23	BRGN	SOKA	0,57	20,29
24	MYKO	VLVL	0,56	16,19
25	RDVL	SAMB	0,56	16,26
26	SAMB	SOKA	0,56	20,66
27	SOKA	ZOLH	0,35	13,52
28	SOKA	VLVL	0,28	11,04

З таблиці 3.1 бачимо, що найвищий кореляційний зв'язок з іншими станціями проявляється у станції SULP та MYKO – по 3 вектори з коефіцієнтом кореляції більше 0.8. Тобто ці станції з сусідніми станціями мають однакову інтенсивність зміщень. Значення коваріації найвище між станціями SULP та SOKA, що показує однонаправленість висотних зміщень на цих станціях відносно інших.

На рисунку 3.6 показано часові серії висотного зміщення ГНСС- станцій RDVL та Sulp період $\Delta t = 20$ днів, з середньою епохою $T_{сер}$ (185 день 2018 року), між якими визначена найвища коваріація (31,68).

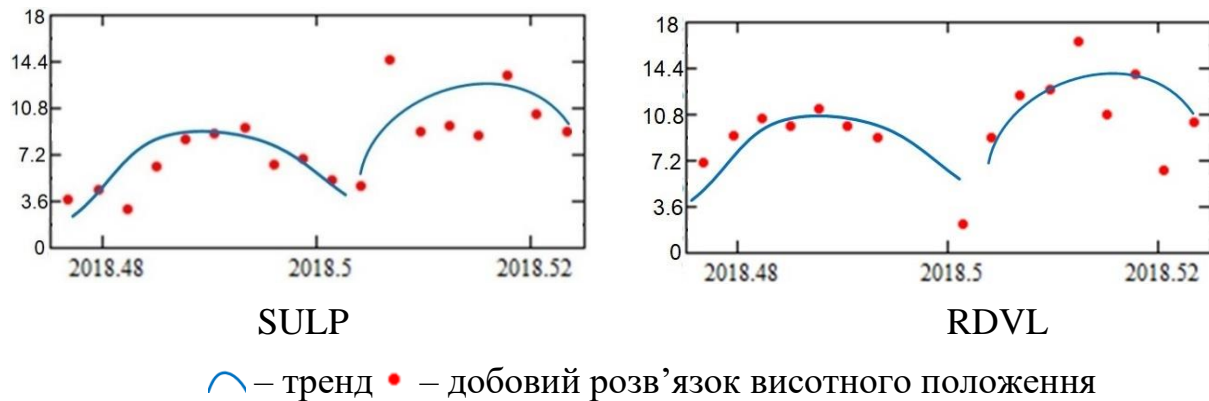


Рисунок 3.6 – Часові серії висотного зміщення ГНСС- станцій RDVL та Sulp період $\Delta t = 20$ днів, з середньою епохою $T_{сер}$ (185 день 2018 року).

Як видно з рисунку 3.6 лінії тренду висотних зміщень обох ГНСС- станцій є практично однакові і мають одночасний прояв.

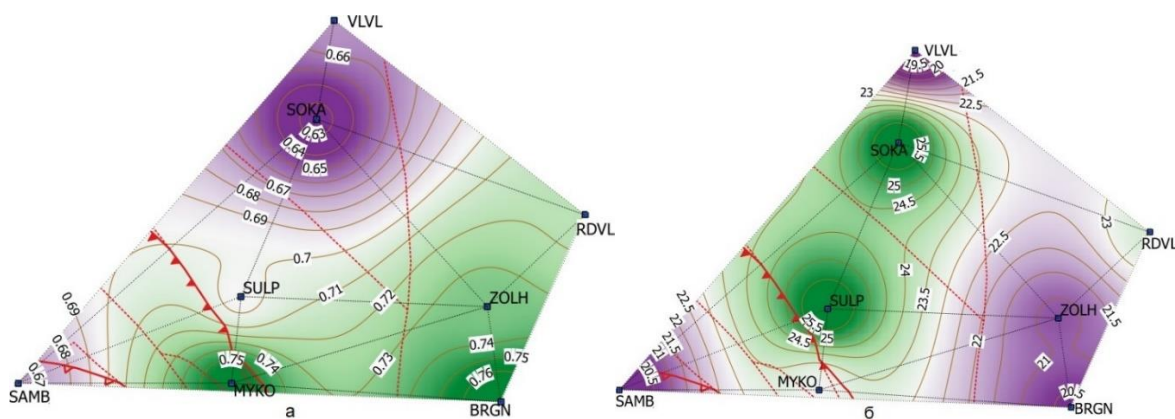
Для узагальнення отриманих результатів обчислимо за даними таблиці 3.1 середні значення кореляції та коваріації для кожної ГНСС- станції. Однак, для вивчення просторового розподілу взаємозв’язків часових серій ГНСС- станцій доцільно обчислювати середні значення кореляції та коваріації за даними пар сусідніх ГНСС- станцій. Для цього мережа ГНСС- станцій була розбита на суміжні трикутники за триангуляцією Делоне. Для обчислень використаємо лише сторони, які утворюють ці трикутники (рисунок 3.7).

У таблиці 3.2 наведено середні значення кореляції та коваріації висотного зміщення ГНСС- станцій на епоху $T_{сер}$ (185 день 2018 року).

Середні значення кореляції та коваріації висотного зміщення
ГНСС-станції на епоху $T_{сер}$ (185 день 2018 року)

ГНСС - станція	середнє значення	
	коре ляції	кова ріації
BRGN	0.77	20.42
MYKO	0.76	23.03
RDVL	0.72	23.48
SAMB	0.67	20.11
SOKA	0.63	26.00
SULP	0.69	25.97
VLVL	0.66	19.18
ZOLH	0.73	20.86

На рисунку 3.7 показано розподіл середніх значень кореляції та коваріації висотного зміщення ГНСС- станцій на епоху (185 день 2018 року).



■ ГНСС-станції зв'язки суміжних трикутників ізолінії
 основні розломи каледонський насув альпійський насув

Рисунок 3.7 – Розподіл середніх значень кореляції (зліва) та коваріації (справа) висотного зміщення ГНСС-станцій на епоху $T_{сер}$ (185 день 2018 року)

Вищі кореляційні взаємозв'язки відстежуються між станціями BRGN, MYKO, ZOLH, RDVL, що свідчить про схожу інтенсивність зміщень між цими станціями, проте зміщення можуть мати різнонаправлений характер. Натомість на станціях SOKA, VLVL та SAMB

інтенсивність висотних зміщень є за величиною більш різномірною. ГНСС-станції SULP і SOKA мають максимально синхронні коливання між собою та із навколишніми ГНСС-станціями.

Узагальнюючи просторовий розподіл коефіцієнтів кореляції та коваріації, можна допустити, що аномальні за весь період спостережень вертикальні зміщення охопленої мережею території мають певні закономірності. Зокрема північна частина території характеризується практично однаковою інтенсивністю зміщень, що підтверджується також тектонічною структурою, оскільки від інших станцій цей регіон відділений тектонічними розломами (рис 7а). Натомість територія, яка прилегла до ГНСС-станцій SULP і SOKA, характеризується одночасними і однонаправленими зміщеннями. Виділені території за кінематичними характеристиками узгоджуються з тектонічними розломами. Зокрема станція SAMB, яка відділена від більшості станцій як каледонським, так і альпійським насувом, за інтенсивністю та направленістю зміщень відрізняється від решти станцій мережі. Запропоновану методику доцільно вдосконалювати та застосувати для дослідження кінематичних процесів на територіях з густою мережею ГНСС-станцій та тривалими часовими рядами спостережень.

3.1.3. Апробація методу для великих інженерних об'єктів на прикладі моніторингової мережі греблі Дністровської ГЕС-1

Апробація методу виконана з метою диференціації кінематики греблі Дністровської ГЕС-1. Вихідними даними для цього дослідження є дані 6 пунктів ГНСС-мережі моніторингу Дністровської ГЕС-1, що розташовані на греблі. Розташування пунктів відносно блоків греблі Дністровської ГЕС-1 показано на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Розміщення ГНСС-пунктів МР1-МР6 відносно блоків греблі Дністровської ГЕС-1

Тривалість та цілісність даних за період 01.07.2017 по 31.03.2021 подана на рисунку 3.9. Щоденні RINEX файли ГНСС-спостережень за період з 01.07.2017 по 31.03.2021 з частотою запису вимірів 30 с опрацьовано відповідно до стратегії приведеної у підрозділі 2.1. Дані з пунктів МР01-МР05 поступали практично безперервно з невеликими прогалинами. Щодо контрольного пункту МР06, то він не включений до опрацювання, оскільки розв'язки на ці дні мають великі похибки та розбіжності в результатах. Це обумовлено розташуванням контрольного пункту МР06 безпосередньо під будівельним краном, які обмежує доступ до супутникових сигналів та створює значні похибки багатопрохідності поширення супутникових сигналів.

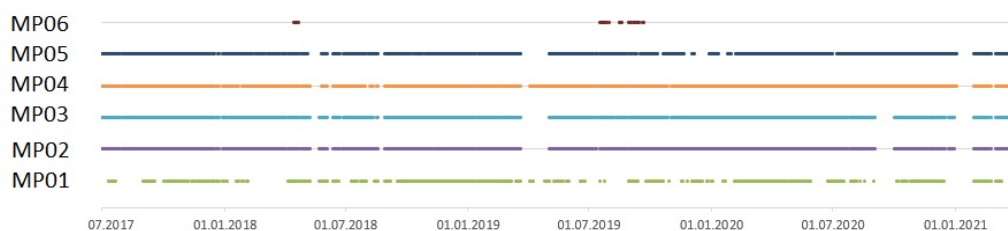


Рисунок 3.9 – Тривалість та цілісність результатів часових серій розв'язків перманентних ГНСС-станцій.

У ході дослідження виконаний пошук коваріаційних взаємозв'язків між усіма парами контрольних пунктів МР01-МР05 ГНСС-мережі Дністровської ГЕС-1 за період з 01.07.2017 по 31.03.2021. Для прикладу на рисунку 3.10 показано часову серію зміни коефіцієнта

коваріації між контрольними пунктами MP02-MP03 за період з 01.07.2017 по 31.03.2021, розраховану для $\Delta t = 0.2$ року.

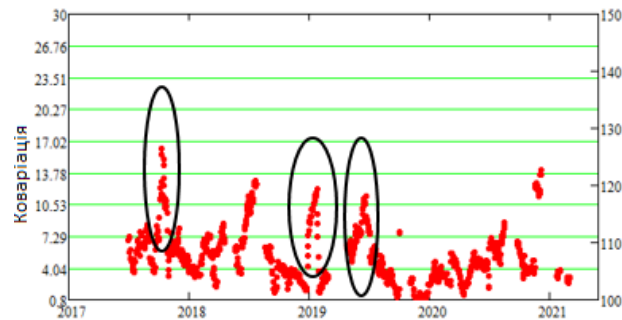


Рисунок 3.10 – Коваріаційний зв'язок станцій MP02-MP03 за період з 01.07.2017 по 31.03.2021

На рисунку 3.10 виділено епохи екстремальних значень коефіцієнтів коваріацій, які свідчать про аномальну кінематику даних контрольних пунктів. Інші аномальні значення коефіцієнтів коваріацій не виділено, оскільки часова серія на ці періоди має розриви даних, обумовлені відсутністю ГНСС-розв'язків. Екстремальні значення коефіцієнтів коваріації часових серій між контрольними пунктами MP02-MP03 припадають на епохи 2017.8, 2019.0, 2019.4. Аналогічні часові серії з такими епохами аномальних коефіцієнтів коваріації отримано для решти пар контрольних пунктів.

Для прикладу, у таблиці 3.3 подані коефіцієнти коваріації між усіма парами контрольних пунктів MP01-MP05, що обчислені для епохи 2019.0 для $\Delta t = 0,2$ року. В нижньому рядку цієї таблиці показані середні значення коефіцієнтів коваріацій для усіх контрольних пунктів. У таблиці 3.4 наведено середні значення коваріації висотного зміщення контрольних пунктів на виділені епохи 2017.8, 2019.0, 2019.4.

Таблиця 3.3

Коефіцієнти коваріації між парами пунктів MP01-MP05 обчислені для епохи 2019.0 при $\Delta t=0,2$ року та їх середні значення

Назви пунктів	Назви пунктів					
		MP01	MP02	MP03	MP04	MP05
MP01	0	0	0	7.2	11.5	
MP02	0	0	12.1	10.2	10.7	
MP03	0	12.1	0	10.7	12.6	
MP04	7.2	10.2	10.7	0	10.4	
MP05	11.5	10.7	12.6	10.4	0	
Середнє значення коваріації	4.7	8.2	8.8	9.6	11.3	

Таблиця 3.4

Обчислена сумарна коваріація для контрольних пунктів MP01-MP05 для кожного періоду із високим коваріаційним зв'язком

Епоха T = 2017.8		Епоха T = 2019.0		Епоха T = 2019.4	
Назва станції	Значення коваріації	Назва станції	Значення коваріації	Назва станції	Значення коваріації
MP05	7.1	MP01	4.7	MP01	1.0
MP02	7.2	MP02	8.2	MP04	7.7
MP04	10.1	MP03	8.8	MP03	8.1
MP03	11.0	MP04	9.6	MP02	8.2
MP01	35.4	MP05	11.3	MP05	8.7

Із таблиці 3.4 видно, що на епоху T= 2017.8 найбільше значення коваріації є для контрольного пункту MP01 і становить 35.4, а для усіх решти контрольних пунктів значення коваріації є суттєво меншим і знаходиться в межах 7.1-11. На епоху T = 2019.0 найменше значення коваріації є для контрольного пункту MP01 і становить 4.7, а для усіх решти контрольних пунктів значення коваріації є в 2 рази більше і знаходиться в межах 8.2-11.3. На епоху T = 2019.4 значення коваріації для контрольного пункту MP01 становить 1, а для усіх решти пунктів значення коваріації є суттєво більшим і знаходиться в межах 7.7-8.7.

Суттєва різниця між коефіцієнтами коваріації контрольного пункту MP01 і решти контрольних пунктів свідчить про розбіжності в кінематиці

цих пунктів на епохи прояву екстремальних значень коефіцієнтів коваріації. У додатку В подані часові ряди зміни висоти контрольних пунктів МР01-МР05 для виділених епох 2017.8, 2019.0, 2019.4 із екстремальними коваріаційними зв'язками. Часова серія зміни висоти контрольного пункту МР01 суттєво відрізняється від часових серій решти контрольних пунктів МР02-МР05. Розмах коливань висотного зміщення контрольного пункту МР01 є в 3-8 раз більший від розмаху на інших контрольних пунктах на аналогічні епохи. Часові серії контрольних пунктів МР02-МР05 мають характерні одночасні і однонаправлені зміщення. Однак такі зміщення не проявляються на часовій серії контрольного пункту МР01. Це також у свою чергу підтверджує аномальність кінематики контрольного пункту МР01 по відношенню до кінематики контрольних пунктів МР02-МР05. Кожен з контрольних пунктів розташований на окремому будівельному блоці (див. рисунок 3.8.). Ймовірною причиною аномальної кінематики висотних зміщень контрольного пункту МР01 є суміжність з адміністративною будівлею блоку, на якому він встановлений.

3.2. Аналіз впливу локальних землетрусів та неприпливних атмосферних навантажень на моніторингову мережу Дністровської ГЕС-1

Побудова гідроелектростанцій та створення водосховищ є активним втручанням в геологічні, геодинамічні та гідрологічні умови [25], тому геодинамічний моніторинг зокрема і вплив локальних землетрусів та неприпливних атмосферних навантажень на споруди великих інженерних об'єктів є важливою задачею. Це підсилюється ще й довготривалою експлуатацією ГЕС. Унаслідок експлуатації впродовж півстоліття ряд геодинамічних явищ можуть призвести до активізації деформаційних процесів інженерних споруд, до загибелі людей, аварій, руйнувань та

матеріальних збитків. Оскільки греблі становлять найвищу гідродинамічну небезпеку техногенного характеру, то вони потребують детального геодезичного моніторингу [19, 21, 23, 24].

3.2.1. Стационарна система моніторингу просторових зміщень, споруд Дністровської ГЕС-1 та локальна сейсмічність регіону

У дослідженні розглядаємо Дністровську ГЕС-1, яка є складовою частиною Дністровського гідроенергетичного каскаду, побудована на р. Дністер і розташована в 60 км на північний захід від м. Могилів-Подільського Вінницької області ($48^{\circ} 35' 37''$ Пн. шир. $27^{\circ} 27' 8''$ Сх. довг.). На рисунку 3.11 показано загальний вигляд споруд Дністровської ГЕС-1. Будівля ГЕС руслова суміщена, водозливного типу, має довжину поперек потоку 153 м, ширину уздовж потоку 75 м. Під час дослідження об'єкту восени 2019 року виявлені тріщини та просідання в тілі греблі, які потребують детального аналізу (рисунок 3.12).

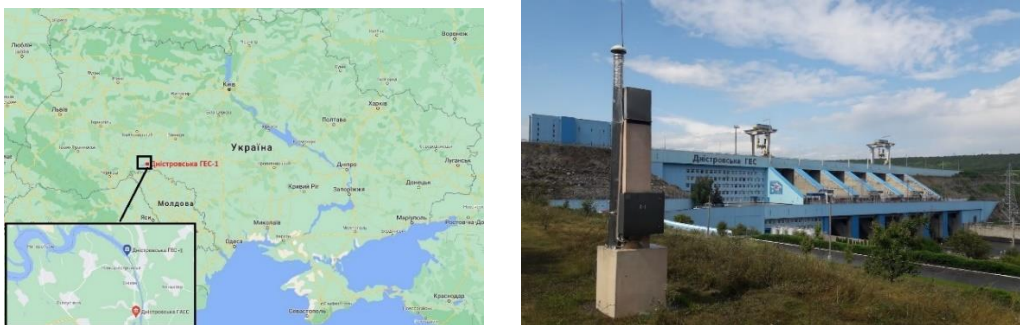


Рисунок 3.11 – Розташування та вигляд споруд Дністровської ГЕС-1

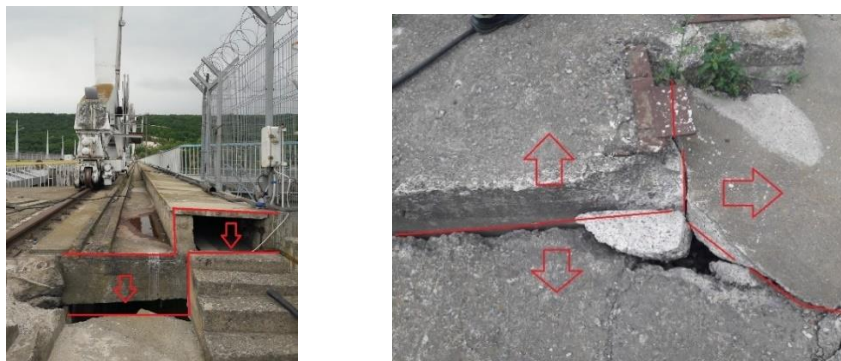


Рисунок 3.12 – Тріщини та деформації, що проявляються в тілі греблі Дністровської ГЕС-1 (фото осінь, 2019 року)

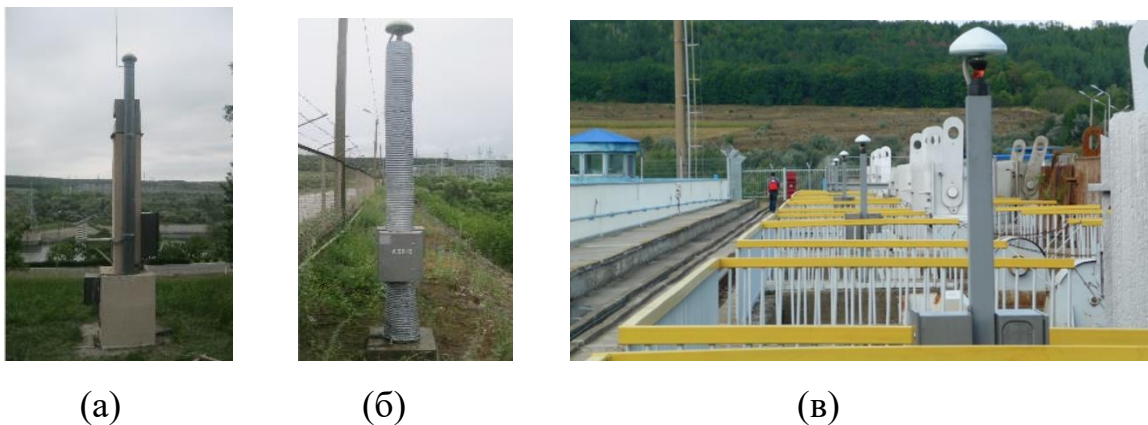
У світі активно проводять моніторинг аналогічних об'єктів гідроенергетики з різною конструкцією та формою дамб [31, 32, 55, 157]. Одним із перших вдалих експериментів по забезпеченню надійності моніторингу гребель дамб методом ГНСС є дослідження греблі Пакойма у Каліфорнії, США [32]. Зміна рівня води у водосховищах, отримана за оцінками поверхні води за даними дистанційного зондування, показує кореляційний взаємозв'язок зі зміщеннями греблі, яка його утворює за ГНСС даними [55]. Дослідження стійкості греблі та аналіз, виконаний як за серіями ГНСС спостережень та за даними тахеометричної зйомки греблі Ататюрк (Туреччина) дав змогу виділити ділянки, які зазнають найбільші деформації [157]. Виконавши оцінку та порівняння деформації греблі в Італії з використанням класичних геодезичних і ГНСС методів, Barzaghi [31] доходить до висновку, що ГНСС моніторинг є достатньо надійним методом моніторингу гідроспоруд.

ПАТ «Укргідроенерго» з метою підвищення безпеки греблі Дністровської ГЕС-1 впровадило автоматизовану систему контролю стану гідротехнічних споруд [1]. Складовою частиною «Стаціонарної системи моніторингу просторових зміщень споруд» (ССМПЗС). ССМПЗС є сучасні складні програмно-апаратні комплекси, що включають мультисистемні ГНСС-приймачі, роботизовані електронні тахеометри, прецизійні інклінометри та телекомунікаційне обладнання [20]. Робота цієї мережі здійснюється з метою математичного опрацювання і визначення достовірних параметрів зміщень і деформацій бетонних та ґрунтових гребель у режимі реального часу. [13]. Для контролю, окрім визначення параметрів деформацій у реальному часі та з метою визначення поля швидкостей пунктів мережі, здійснюється додаткове пост опрацювання даних.

ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 показана на рисунку 3.13. ГНСС-мережа ССМПЗС обладнана ГНСС-приймачем Leica GMX902 GG з антеною AR10 (рисунок 3.14).



Рисунок 3.13 – Мережа геодезичних пунктів ССМПЗС Дністровської ГЕС-1



(а)

(б)

(в)

Рисунок 3.14 – Загальний вигляд ГНСС-пунктів ССМПЗС

Дністровської ГЕС-1: DSR1 і DSR2 (а), ACP1-ACP2 (б) та MP01-MP06 (в)

Опорними пунктами ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 є пункти DSR1 і DSR2 розташовані на правому березі найбільш віддаленого від бетонної греблі. Вони додатково обладнані роботизованим тахеометром TM30 та метеорологічним давачем DTM для здійснення регулярного моніторингу методами тахеометрії. Пункти, які розташовані безпосередньо на греблі, маркуються MP01-MP06. Пункти ACP1-ACP2 є точками активного контролю, а пункти WP1-WP4 доповнюють геометрію ГНСС-мережі.

Район належить до активних в тектонічному відношенні та потрапляє в перехідну зону між ізосейтами в 6 і 7 балів. За історичними даними перші

прояви сейсмічності на Буковині були відомі з 1721 року. За період інструментальних спостережень з 1961 по 2004 рр. мережею сейсмічних станцій Карпатського регіону України в районі Дністровського енергокомплексу, було зареєстровано 15 землетрусів енергетичного класу $K=8.6\div 10.5$. Існуюча до 2004 р. мережа з 14 сейсмічних станцій могла реєструвати в даному районі лише землетруси з енергетичним класом $K>8.5$. Для того, щоб реєструвати слабкі землетруси з $K=4$, необхідно створити окрему мережу станцій навколо району Дністровського енергокомплексу. З 2005 р. в даному районі працювала тимчасова сейсмічна станція «Жван», а в подальшому, замість неї у 2006 р. була організована сейсмічна станція «Новодністровськ» в с. Ломачинці Сокирянського району Чернівецької області, У 2007 році Інститутом геофізики НАН України була запроектована мережа сейсмічних станцій для здійснення моніторингу місцевої сейсмічності та контролю за небезпечними геодинамічними явищами в районі Дністровського енергокомплексу, яка налічувала крім сейсмічної станції в Ломачинцях ще 5 станцій в населених пунктах Наддністрянське, Хонківці, Лядова, Коболчин, Неповоротово. На даний час тут поки що продовжує працювати лише одна сейсмічна станція «Новодністровськ».

За даними відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики за період 2005-2011 роки в районі Дністровського енергокомплексу зареєстровано 41 землетрус. За період з 2012 по 2021 рік тут було зафіксовано 956 землетрусів. З них 40 землетрусів було надійно зареєстровано трьома і більше сейсмічними станціями: отримано їх магнітуду M , енергетичний клас K та координати епіцентра з похибкою $\pm 0.5-2.0$ км. Точність визначення глибин вогнищ землетрусів в основному знаходиться в межах $\pm 0.1-1.0$ км. Решта землетрусів були зареєстровані лише однією сейсмічною станцією «Новодністровськ», що унеможливило достатньо точно визначити їх місцеполження. Їх координати були

отримані у відповідності до Інструкції [6], за азимутом та відстанню від сейсмічної станції до епіцентру. Більшість з них мають енергетичний клас К в межах $\approx 4.0-5.0$, а вогнища землетрусів знаходяться на глибині біля 2 км. Магнітуда М цих землетрусів визначалася за тривалістю запису за методикою описаною в [10].

На рисунку 3.15 наведені дані річного розподілу N та логарифма сумарної сейсмічної енергії E в джоулях, яка виділилась в районі Дністровського енергокомплексу за період 2012–2021 рр.

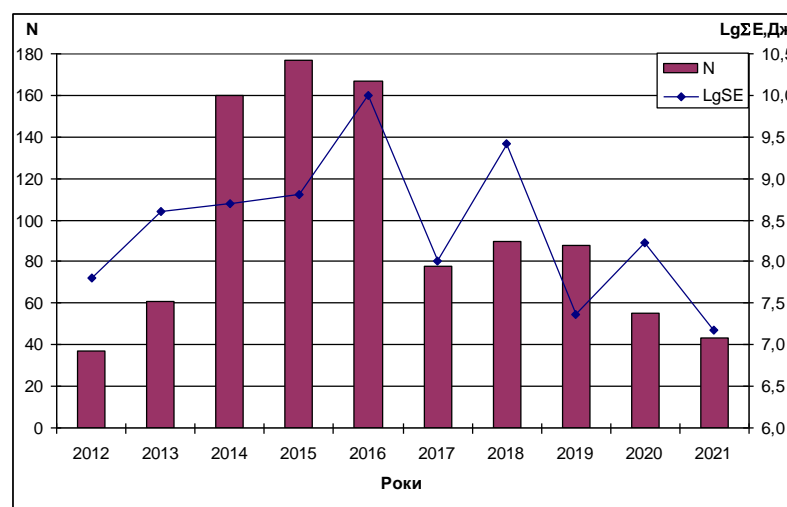


Рисунок 3.15 – Розподіл кількості землетрусів N та логарифма сумарної сейсмічної енергії E в джоулях, яка виділилась в районі Дністровського енергокомплексу за період 2012–2021 рр.

Як видно з рисунку 3.16 максимум кількості землетрусів припадає на 2014-2016 роки, а максимум виділеної енергії був у 2016 році. Після цього року відбувається спад як кількості землетрусів, так і сумарної виділеної енергії. Зміна кількості сейсмічних подій можливо свідчить про перерозподіл напружено-деформованої складової, яка супроводжується порушенням суцільності (міцності) порід, а подібні процеси є цілком закономірними і відображають реакцію масиву на техногенне втручання. Не виключено, що таке зменшення сейсмічної активності в останні роки можливо залежить від певної стабілізації напруженого стану земної кори,

пов'язаної з заповненням водосховища Дністровської ГАЕС та коливаннями рівня води в Дністровському водосховищі перед ГЕС-1.

Вогнища землетрусів, які реєструються на даній території розташовані, в основному, на глибині $h=2$ км і ймовірно знаходяться в районі Подільського та Немирівського розломів, а також Жмеринської системи розломів, виділеної за матеріалами космічної зйомки, яка простягається з північного сходу на південний захід. Також попередніми дослідженнями тут виявлено досить густу сітку лінементів [44].

В таблиці 3.5 поданий каталог лише надійно зареєстрованих землетрусів в районі Дністровського енергокомплексу трьома і більше сейсмічними станціями Карпатської сейсмологічної мережі за останні 10 років з 2012 по 2021 роки.

Таблиця 3.5

Каталог лише надійно зареєстрованих землетрусів в районі Дністровського енергокомплексу за період з 2012 по 2021 рр.

№ п/п	Рік	Міс	День	Час в епіцентрі			Координати		h, км	Магнітуда, M	K
				год	хв	Сек	Широта° N	Довгота° E			
1	2012	7	22	09	45	55,0	48,74	27,42	4,4	1,9	7,8
2		10	23	08	56	19,6	48,60	27,25	3,0	2,0	7,6
3	2013	2	16	13	33	58	48,66	27,31	3,0	2,1	7,8
4		2	23	18	03	17	48,67	27,33	2,0	2,5	8,5
5		7	13	23	45	33	48,6	27,4	2,0	1,7	7,1
6		9	29	15	30	13	48,7	27,4	2,0	1,7	7,1
7	2014	4	12	15	32	52	48,64	27,29	2,0	0,8	5,5
8		4	29	01	42	46	48,55	27,30	2,8	1,3	6,2
9		5	26	08	37	03	48,58	27,40	2,0	1,3	6,4
10		5	28	16	52	32	48,56	27,37	1,0	0,7	5,1
11		6	10	21	49	38	48,65	27,32	1,3	2,0	8,0
12		7	18	13	50	35	48,59	27,37	2,3	0,9	5,6
13		7	19	05	03	08	48,59	27,41	1,9	2,5	8,5
14		7	19	10	51	06	48,59	27,41	2,1	0,9	5,7
15		7	19	15	10	58	48,59	27,40	2,4	1,1	6,0
16		7	22	16	17	38	48,55	27,32	2,0	1,1	5,9
17		8	12	04	00	42	48,6	27,4	2,8	1,5	6,3

№ п/п	Рік	Міс	День	Час в епіцентрі			Координати		h, км	Магнітуда, M	K
				год	хв	Сек	Широта° N	Довгота° E			
18	2015	4	23	07	26	35	48,63	27,26	2,0	2,3	8,8
19	2016	2	7	17	06	53	48,58	27,31	4,0	2,9	9,2
20		2	8	4	46	39	48,63	27,32	2,0	2,2	7,9
21		3	9	23	4	57	48,61	27,23	5,0	2,2	8,0
22		5	5	06	57	47,5	48,68	27,23	2,0	1,5	6,8
23		7	12	18	21	52	48,63	27,29	2,0	3,4	9,9
24	2017	3	4	04	04	28,9	48,60	27,30	1,1	1,8	7,2
25		4	6	11	39	19,8	48,53	27,36	2,0	1,4	6,6
26		5	25	19	17	47,9	48,67	27,37	3,2	1,6	7,4
27		6	12	02	34	12,2	48,49	27,10	3,1	1,3	6,4
28		6	14	21	47	12,7	48,62	27,23	2,0	0,9	5,7
29		7	8	22	25	20,8	48,62	27,32	2,0	1,7	7,5
30		11	26	04	48	46,3	48,61	27,36	2,0	1,6	7,2
31	2018	1	17	04	14	27,8	48,63	27,27	2,0	1,6	7,2
32		3	24	12	20	53,8	48,61	27,38	1,0	2,6	9,4
33		7	20	4	30	28,3	48,57	27,15	2,0	2,0	7,6
34		12	27	19	39	41,4	48,62	27,32	2,0	1,7	7,1
35	2019	5	16	22	45	03,8	48,64	27,30	2,0	1,2	6,1
36	2020	5	20	15	20	42,0	48,61	27,34	1,3	2,0	8,2
37	2021	2	5	00	51	27,0	48,57	27,45	2,0	1,4	6,5
38		3	14	16	23	30,0	48,50	27,28	2,0	1,2	6,2
39		12	26	21	45	23	48,61	27,35	2,0	0,8	5,8
40		12	29	11	50	48	48,57	27,28	2,0	1,7	6,7

Карта епіцентрів землетрусів довкола Дністровського енергокомплексу водосховища за 2012-2021 роки показана на рисунку 3.16

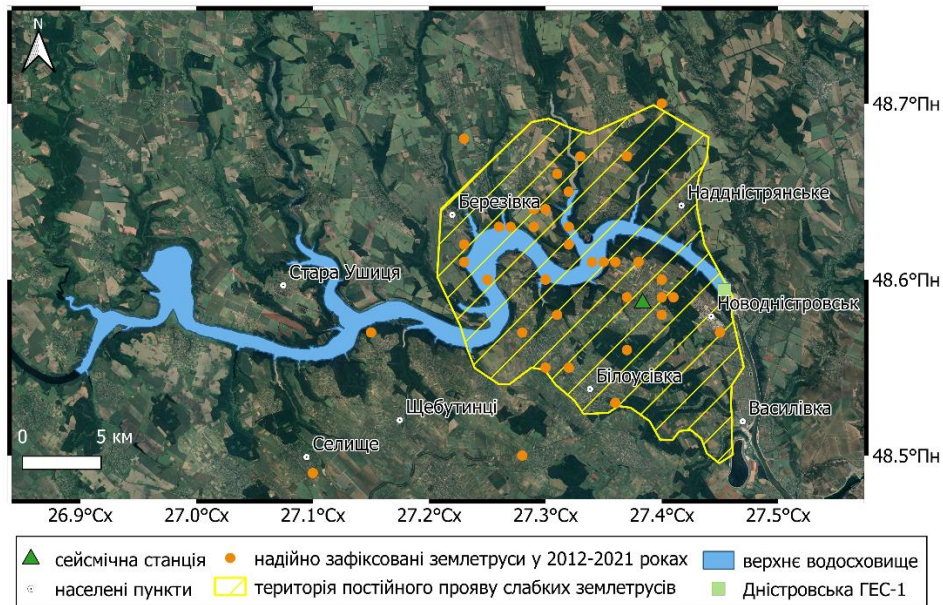


Рисунок 3.16 - Карта епіцентрів землетрусів довкола верхнього Дністровського водосховища з 2012 по 2021 роки

Бачимо, що зафіксовані землетруси тяжіють до східної частини верхнього Дністровського водосховища. Територія постійного прояву слабких землетрусів виділена за понад 900-ма землетрусами з 2012 до 2021 року, які зафіксувала сейсмічна станція «Новодністровськ». Ці землетруси не зафіксовані іншими сейсмічними станціями, оскільки вони є слабкими. Натомість надійно зафіксовані землетруси показані точками.

Розглядаючи зміни добових координат ГНСС-приймачів на греблі Дністровської ГЕС-1 та зафіксовані землетруси у регіоні, чітких взаємозв'язків не виявлено. Це пов'язано з рядом факторів. У регіоні зафіксовані лише слабкі землетруси: для більшості з них енергетичний клас становить менше 6. Також зауважимо, що частота запису ГНСС-приймачів на греблі становить 30 секунд, а землетруси здійснюють поштовхи в межах декількох секунд. При розгляді коротких рядів координат таких зміщень не помітно. Натомість помітний ймовірний взаємозв'язок між змінами об'ємів води у водосховищі та енергією землетрусів.

3.2.2. Взаємозв'язок сейсмічності регіону та зміни об'ємів верхнього Дністровського водосховища

Для цього дослідження відберемо лише ті землетруси, які розташовані близько до верхнього Дністровського водосховища. Встановлено межу до 5 км від нього.

З метою огляду ймовірної природи землетрусів розглянемо геологічну карту кристалічного фундаменту масштабу 1:200000 у цьому регіоні [5]. Регіон за схемою районування докембрійських утворень входить до Сокирянської підзони та Бахтинської трогової структури. На карті та профілі (рисунки 3.17, 3.18) виділяють наступні місцеві стратиграфічні підрозділи та комплекси докембрійського фундаменту (зверху до низу):

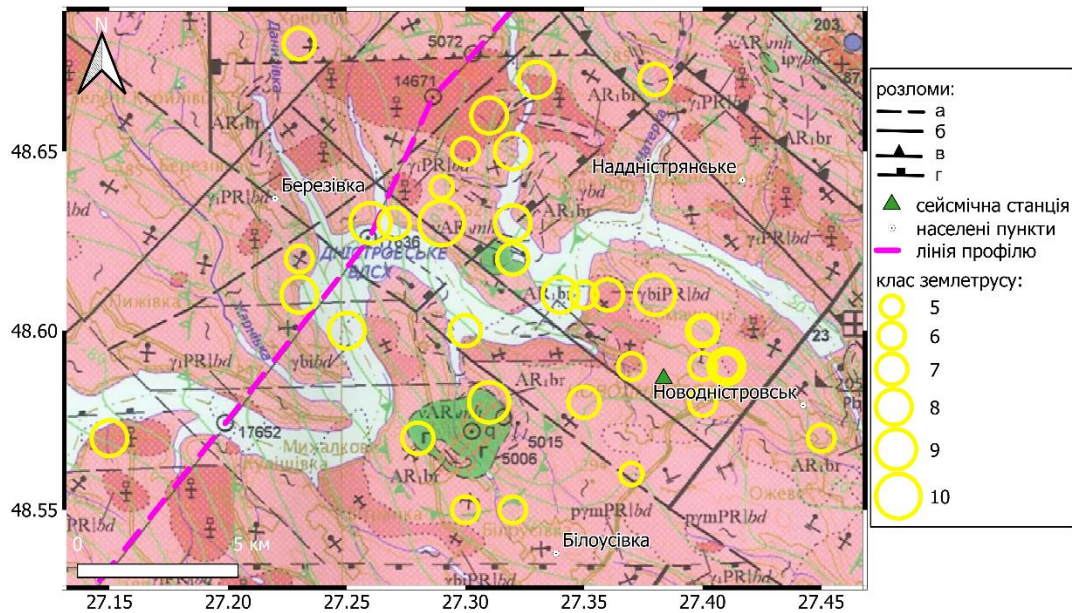
- Бердичівський комплекс палеопротерозойської ери протерозою ($PR|bd$) складений гранітами і мігматитами ($\gamma mPR|bd$), граніти порфіровидні біотитові з апатитом та магнетитом ($\gamma_1 PR|bd$), гіперстен-гранат-біотитові мігматити, іноді граніти-вінницити ($m\gamma nPR|bd$), чарнокітоїди та магматити ($\check{c}mPR|bd$).

- Михалківська асоціація базитів та ультрабазитів неоархейської ери архею, яка складена піроксенітами ($vAR_3mh?$).

- Літинський комплекс мезоархейської ери архею складений ендербітами, чарно-ендербітами (en_2AR_2lt).

- Березнинська товща палеоархейської ери архею переважно складена гнейсами гранат-біотитовими силіманіт - і кордієритвмісні, біотитовими, графіт-біотитовими, силіманіт-біотитовими (AR_1br).

На рисунку 3.17 нанесемо надійно зафіксовані землетруси на геологічну карту кристалічного фундаменту масштабу 1:200000 [5], а на рисунку 3.18 надійно зафіксовані землетруси спроектовані на відповідний геологічний профіль (рожева лінія на рисунку 3.17).



Розломи: а - достовірні, б – ймовірні; морфологічні різновиди розломів: в – підкиди, г - скиди

Рисунок 3.17. – Епіцентри надійно зафіксованих землетрусів з 2012 по 2021 роки довкола верхнього Дністровського водосховища на геологічній карті кристалічного фундаменту [5]

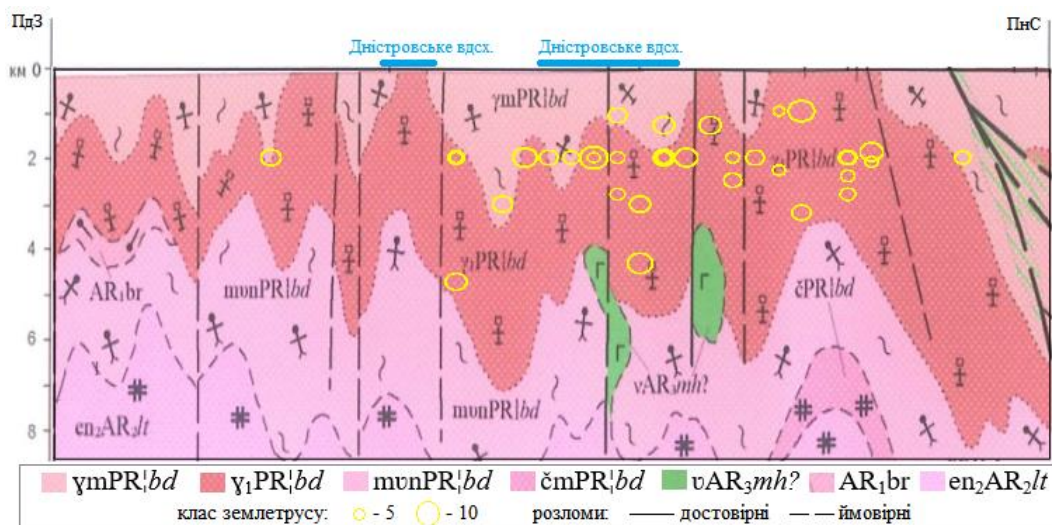


Рисунок 3.18. – Епіцентри надійно зафіксованих землетрусів з 2012 по 2021 роки на геологічному профілі кристалічного фундаменту [5]

Детальніший опис умовних позначень до геологічної карти і карти корисних копалин кристалічного фундаменту міститься у відповідній пояснювальній записці [5].

З рисунків 3.17, 3.18 видно, що розташування землетрусів лише частково відповідає зафіксованим чи ймовірним розломам. Проте на профілі видно, що частина землетрусів знаходиться між двома структурами утворених у протерозої, які мають різний склад. Це характерно саме для регіону, де лінія профілю перетинає Дністровське водосховище. Більша частина землетрусів зосереджена в зоні контакту гірських порід складених гранітами і мігматитами ($\gamma_{mPR|bd}$) та порфіровидними біотитові граніти з апатитом та магнетитом ($\gamma_1PR|bd$). Можна припустити, що постійні зміни рівня води у водосховищі спричинюють надлишковий тиск на земну поверхню. І вона викликає тертя між структурами і відповідне виділення енергії саме у зоні контакту двох структур.

Рівень води у водосховищі залежить перш за все від роботи ГЕС-1 та Дністровського енергокомплексу в цілому. Дані про зміну рівня верхнього б'єфу Дністровської ГЕС-1 автоматично записується кожну годину з вересня 2016 року. Також використано архівні дані запису рівня води, що збиралися щоденно з 2012 року. На рисунку 3.19 приведена часова серія зміни рівня води та прояви усіх землетрусів на віддалі до 5 км від верхнього Дністровського водосховища з 2012 до 2021 року. Синя крива відображає зміни рівня води у водосховищі, а червоні точки - енергетичний клас зафіксованих землетрусів.

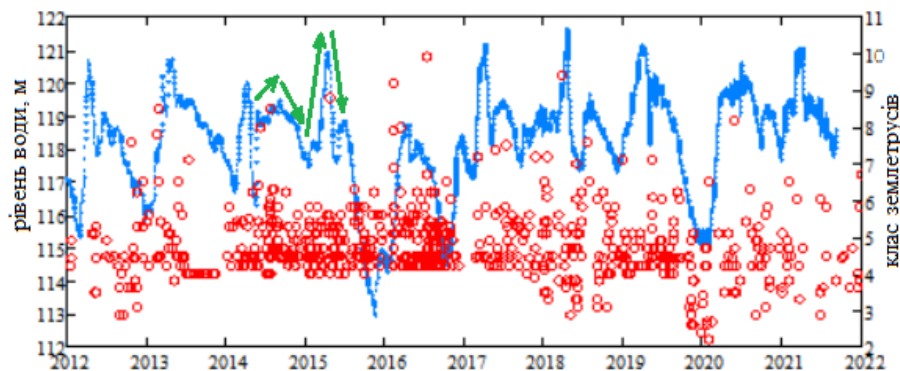


Рисунок 3.19 – Часова серія зміни рівня води та прояв землетрусів в районі верхнього Дністровського водосховища з 2012 до 2021 року

З рисунку видно, що зміни рівня води у водосховищі не мають чіткого сезонного характеру. З 2012 по 2021 рік найнижчий рівень у водосховищі зафіксовано у 2015 році і становить 112,92 м. Найвищий рівень зафіксовано у 2018 році – 121,62 м. Таким чином, різниця між найвищим і найнижчим рівнем за час спостережень становить 8,70 м. Середнє арифметичне значення рівня води за ці роки становить 118,56 м.

Наповнення водосховища зумовлює підвищення рівня тиску бортів долини Дністра і призводить до прогину ложа та збільшення нахилу схилів та може викликати корові землетруси [16]. Також зазначимо, що глибина зафіксованих землетрусів не є значною, а переважно становить 1-3 км що дозволяє припустити, що сейсмічність є напрямленою, тобто є результатом зміни навантажень на земну кору створених водними масами верхнього Дністровського водосховища.

Для того щоб знайти ймовірний взаємозв'язок потрібно обчислити зміни об'ємів у водосховищі. Оскільки відома зміна висотної складової, то необхідним є визначення площі дзеркала водосховища. Для цього у середовищі QGIS встановлено межі Дністровського водосховища-1 та на основі відкритої топографічної моделі місцевості (OpenTopoMap) виділено приблизну зону її затоплення на 10 метрів вище за рівень води. За допомогою калькулятора площ визначено, що площа Дністровського водосховища-1 становить 75,9 кв. км, а площа його затоплення на 10 метрів становить 82,1 кв. км. Тобто зміна площі затоплення на 10 метрів становить $\Delta S_{10\text{м}} = 82,1 - 75,9 = 6,2$ кв. км. Відповідно в середньому збільшення рівня води на 1 м збільшує площу дзеркала на 0,62 кв. км. Відповідно при максимальній зміні рівня води на 8,70 м дзеркало водосховища збільшується від $S_{\text{min}}=75,9$ кв. км на $\Delta S_{8,7\text{м}} = 8,7 * 0,62 = 5,4$ кв. км. Таким чином $S_{\text{max}} = 75,9 + 5,4 = 81,3$ кв. км.

Переобчислимо зміни рівня води в зміни об'ємів та тиску на земну поверхню.

Припустимо, що найнижчий рівень води є умовним нульовим рівнем. Оскільки оцінка є приблизною, то припустимо, що у перерізі водосховище можна представити як перевернуту рівнобічну трапецію. Врахуємо, що зміна площі дзеркала при збільшенні рівня води у водосховищі збільшує об'єм не рівнопропорційно. Враховуючи відомі співвідношення (3.2) переобчислимо зміни рівня води у зміни об'єму водосховища.

$$V = S_{\min} * h + \Delta S * h, \quad (3.2)$$

де, S_{\min} – початкова площа поверхні, ΔS – площа, що характеризує затоплення берегів водосховища, h – зміна рівня води

Тоді при максимальному зростанню рівня води наповненні з 2012 до 2021 року об'єм збільшується до $707 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ або $0,7 \text{ км}^3$, що відповідно до формули (3.3.)

$$F = V \cdot \rho \cdot g, \quad (3.3)$$

де F – сила, V – об'єм, g – прискорення вільного падіння ($9,8 \text{ м/с}^2$), ρ – густина води 997 кг/м^3

створює додаткову силу рівну $6,9 \cdot 10^{12} \text{ Н}$, яка тисне на площу водосховища $81,3 \text{ кв. км}$.

Для того, щоб обчислити зміни об'ємів потрібно виділити однонаправлені зміни рівня води у водосховищі. Виділимо точки, опираючись на які графік можна чітко розбити на послідовні наповнення та спуски водосховища (зелена крива на рис. 3.19). Такі точки були відібрані вручну. За відповідні періоди наповнення та спуски водосховища обчислено суму енергетичних класів землетрусів. Таким чином на рисунку 3.20 приведено зміну об'єму водосховища та відповідну суму енергетичних класів землетрусів за ці періоди.

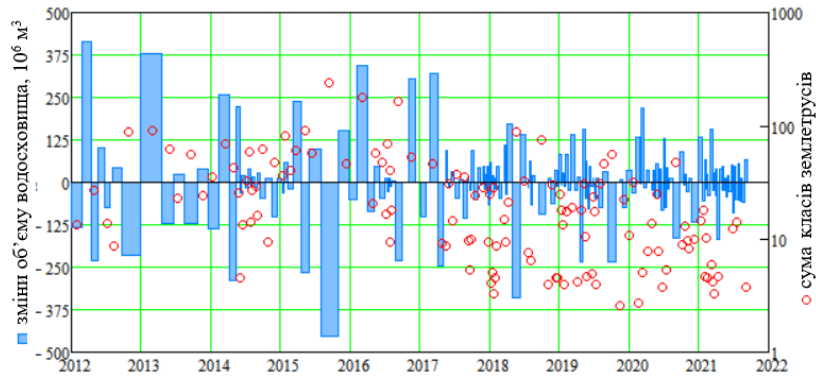


Рисунок 3.20. – Зміни об’ємів верхнього Дністровського водосховища та суми енергетичних класів землетрусів за відповідний період з 2012 до 2021 років

Для встановлення кореляційних взаємозв’язків між цими параметрами найперше видалено ті зміни об’ємів верхнього Дністровського водосховища, впродовж яких не відбувалося жодного землетрусу. Щоб оглянути поведінку параметрів на рисунку 3.21 наведено графік зміни обраних параметрів посортованих в порядку зростання модуля зміни об’ємів.

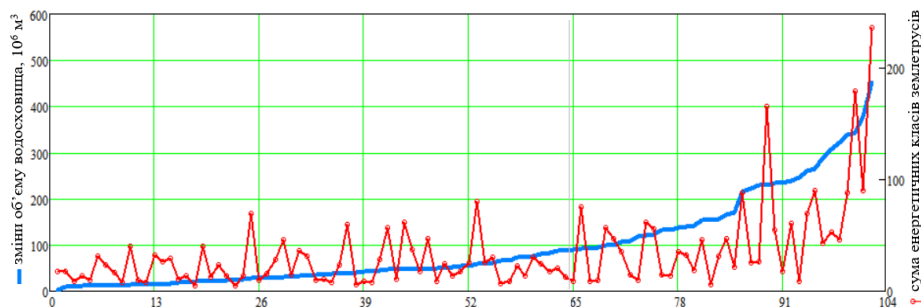


Рисунок 3.21. – Впорядковані по зростанню зміни модуля об’єму та суми енергетичних класів землетрусів за період з 2012 до 2021 років

Обчислено коефіцієнт кореляції Пірсона між масивами модуля зміни об’єму водосховища та сумарною сейсмічністю вираженою через клас землетрусів. Коефіцієнт становить $r=0,64$, що може свідчити про взаємозв’язок між параметрами.

Для коефіцієнта кореляції, визначеного за методом Пірсона важливою є перевірка надійності (істотності), оскільки залишається певна

імовірність, що отримане значення $r=0,64$ є випадковим. Для виключення цього необхідно визначити ступінь його наближення до показника генеральної сукупності значень ρ . Перевірку істотності кореляційного зв'язку будемо виконувати з використанням нульової гіпотези.

Припустимо, що $\rho = 0$, тобто, що між випадковими величинами x (сума енергетичних класів) і y (зміна модуля об'єму водосховища) кореляція відсутня. Виконуємо перевірку нульової гіпотези, шляхом співставлення з критерієм t -Стюдента (t_s). В розглянутій задачі кількість парних значень, для яких було знайдено регресійну модель $N=102$. Оскільки $N>100$, то значення t визначаємо як відношенням коефіцієнта кореляції до своєї помилки (m_r), із використанням формул (3.4-3.4):

$$t = \frac{r}{m_r} = \frac{r\sqrt{N-1}}{1-r^2}. \quad (3.4)$$

Якщо $t_s < t$, то нульова гіпотеза відкидається і приймаємо, що в генеральній сукупності $\rho \neq 0$, отриманий коефіцієнт кореляції істотно відрізняється від 0, а між розглянутими значеннями y і x існує кореляційний зв'язок.

Після підстановки чисельних значень ($r=0,64$; $N=102$), отримаємо $t=10,894$.

За таблицями Стюдента при числі ступенів волі $f=N-2=102-2=100$ і приймаючи рівень значущості $q=0,01$, отримуємо:

$$t_s = 2,63 < t = 10,894. \quad (3.5)$$

Отже, маємо підстави для відхилення нульової гіпотези. Отримане значення коефіцієнта кореляції $r=0,64$ є достовірним на 0,01 рівні значущості.

Функціональний зв'язок між параметрами оцінено лінійною функцією, яка краще описує ці взаємозв'язки у порівнянні зі степеневою чи експонентною функцією. Розглянемо взаємозв'язок параметрів виражений

лінійною функцією, яка відповідно для зміни модуля об'єму водосховища становить (3.6).

$$y = 0,5581x + 5,1083, \quad (3.6)$$

де y - зміни модуля об'єму водосховища, x - суми енергетичних класів

Для оцінки точності за формулою Бесселя обчислено середньоквадратичне відхилення, яке становить 11,0 К. Враховуючи що для періодів однонаправленої зміни об'ємів середнім арифметичним значенням є 33,8 К, то ця похибка становить 32,6 %. Для максимального значення, що становить 236,6 К ця похибка становить 4,6 %.

Обчислена функція показує обґрунтований зв'язок між змінами об'єму води у водосховищі та енергією землетрусів утворених у регіоні верхнього Дністровського водосховища. Цей зв'язок може бути достовірним для землетрусів зосереджених на малих глибинах в 1-3 км в зоні контакту гірських порід складених гранітами і мігматитами ($\gamma_m PR|bd$) та порфіровидними біотитовими гранітами з апатитом та магнетитом ($\gamma_1 PR|bd$).

3.2.3 Результати впливу неприпливних атмосферних навантажень на мережу моніторингу Дністровської ГЕС-1

У цьому дослідженні ми зосередилися на розгляді і детальному аналізі впливу NTAL на ГНСС-мережу ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 для встановлення їх кінематики та реакції на атмосферні навантаження. Провівши аналіз впливів геодинамічного явища, яке проявилось у кінці грудня 2019 року [42], видно, що на території заходу України станції можна поділити на 2 групи у залежності від того чи корелюють зміщення з моделями NTAL [43].

На низці перманентних ГНСС станцій цей висотний зсув корелює з моделями неприпливних атмосферних навантажень у європейському

регіоні. Проте, у роботі [31] показано, що для регіональних мереж було б доцільним враховувати геологічні особливості територій. Так, на рисунку 3.22 показано умовний поділ території заходу України за величиною їх висотного зсуву. Лінія поділу на дві групи розділяє ГНСС станції зі зміщеннями до та понад 15 мм. Висотний зсув менший 15 мм не відповідає модельним значенням атмосферних навантажень.

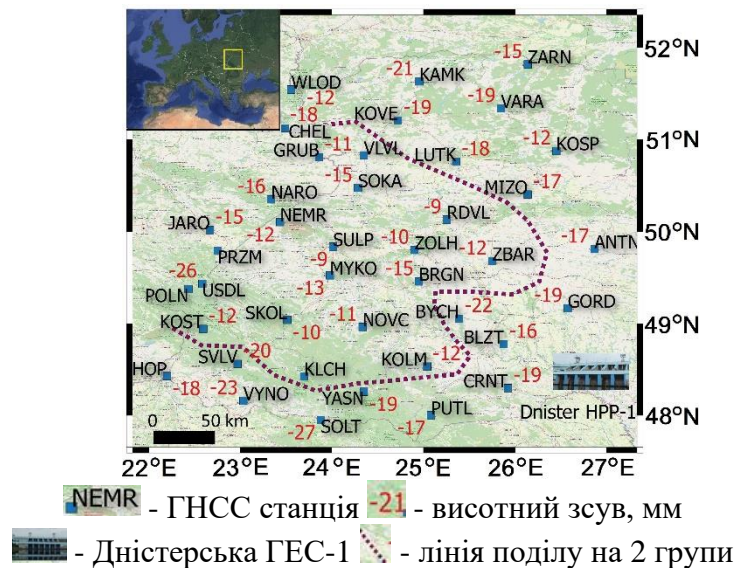


Рисунок 3.22 – Аналіз динаміки вертикального зсуву ГНСС станцій мережі Геотераса у грудні 2019 року [43]

У цьому дослідженні використано моделі обчислені Німецьким дослідницьким центром геонаук GFZ Потсдам для центру фігури Землі. Модель визначена на основі непреливного атмосферного приземного тиску і оновлюється кожні 3 години. Грід моделі становить $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Висотний зсув з 23 по 30 грудня 2019 року

Також у дослідженні [43] встановлено, що для ГНСС станцій на відстані менше 100 км мережі Геотераса, а саме CRNT (Чернівці), BLZT (Більче-Золоте) та GORD (Городок) такі просідання сягають 16-19 мм, що в межах похибок відповідає моделі NTAL. Станом на 2019 рік перманентної ГНСС станції в безпосередній близькості до Дністровської ГЕС-1 ще не було встановлено. Розглянувши значення NTAL для цього регіону, бачимо, що воно не співпадає з просіданням пунктів мережі

ССМПЗС Дністровської ГЕС-1. На рисунку 3.23 показано графіки висотних рядів ГНСС-станцій DSR1, ACP1, ACP2 та MP03 з відповідним модельним значенням NTAL в цьому регіоні.

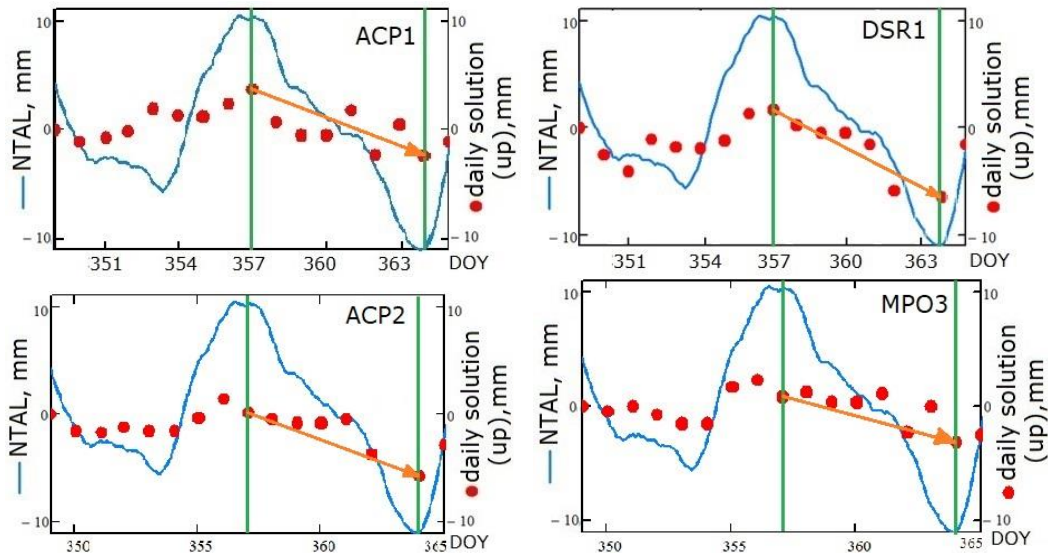
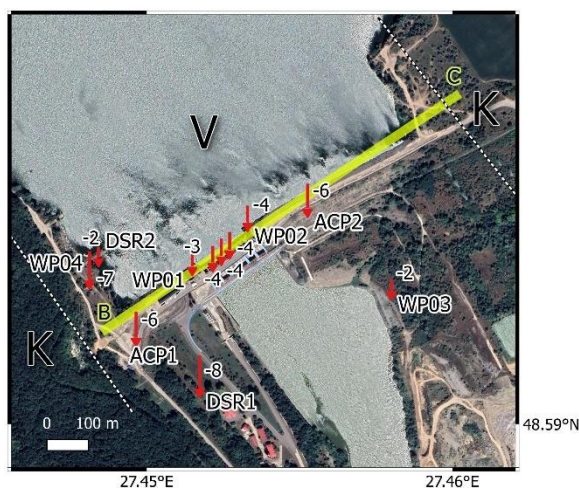


Рисунок 3.23 – Часовий висотний ряд ГНСС-станцій DSR1, ACP1, ACP2, MP03 Дністровської ГЕС-1 та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) за період 15-31.12.2019 (349-365 день року)

Відповідно для усіх пунктів мережі побудуємо карту висотного зсуву пунктів мережі з 23 по 30 грудня 2019 року (357-364 день року), оскільки цей період відповідає найбільшому зменшенню NTAL. На рисунку 3.24 показана карта висотного зсуву пунктів ГНСС мережі з 23 по 30 грудня 2019 року.



DSR1 - GNSS-станція, - величина висотного зсуву, Вік відкладів: **V** - венд
K - крейда - Інженерно-геологічний профіль (додаток Г)

Рисунок 3.24 – Карта висотного зсуву пунктів GNSS-мережі
 Дністровської ГЕС-1 з 23 по 30 грудня 2019 року

З рисунку видно, що пункти по-різному відреагували на пружні деформації, зумовлені NTAL. Зокрема, найбільші просідання становлять 6-8 мм для пунктів DSR1, ACP1, WP04, ACP2. Проте, пункти греблі WP02-WP04 просіли на 4 мм. Найменші просідання для пунктів WP01, WP03, DSR2 – 2-3 мм. Це можна частково пояснити геологічною будовою території та інженерною конструкцією споруди. Зокрема, пунктам з більшим просіданням відповідають структури, які залягають на породах венду, які мають природне залягання з тріщинами і відповідно є більш піддатливими до просідань на відміну від бетонної греблі, яка стоїть на гранітах. Детальний аналіз геологічної будови з відповідними профілями приведений у дослідженні далі.

Висотний зсув з 9 по 18 лютого 2021 року

У лютому 2021 року відбувся висотний зсув подібний до грудневого 2019 року, проте вдвічі слабший за амплітудою, що також підтверджується моделями NTAL [57, 148]. Станом на 2021 рік в досліджуваному регіоні встановлено ряд нових станцій мережі Geoterrace, зокрема перманентна GNSS станція NDST (Новодністровськ), що є у безпосередній близькості

(до 2 км) до Дністровської ГЕС-1. Також до розгляду взяті станції KLMN, GORD, VOVK мережі Геотераса та станції TULC, EDIN, SORO, які опрацьовує мережа System Solutions. Розташування ГНСС станцій показано на рисунку 3.25 RINEX-файли вимірів цих станцій за вказаний період також опрацьовані у Bernese GNSS за ГНСС-стратегією приведеною у підрозділі 2.1.

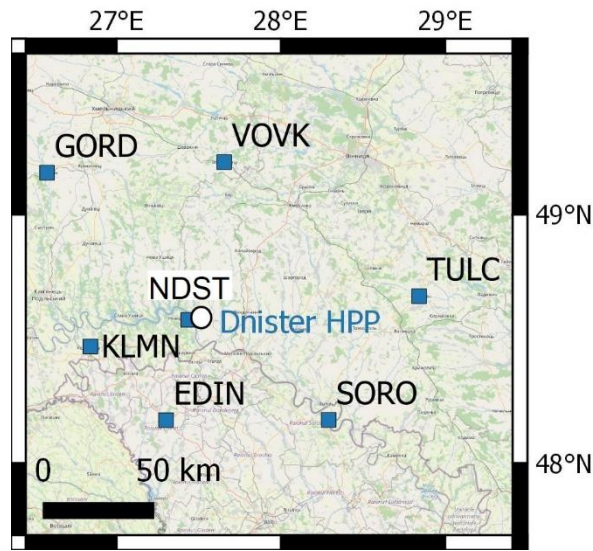


Рисунок 3.25 – Перманентні ГНСС-станції довкола Дністерської ГЕС-1, в часових серіях яких зафіксований висотний зсув, що корелює з NTAL

На цих ГНСС-станціях помітна кореляція між висотними зміщеннями станцій та впливом неприпливного атмосферного навантаження у період з 9 по 18 лютого 2021 року (40-49 день року). Для прикладу на рисунку 3.26 показано висотні часові ряди ГНСС-станцій EDIN, KLMN, VOVK та TULC, зсув на яких співпадає або є близьким до модельного значення NTAL за цей період.

На рисунку 3.27 показано часовий висотний ряд ГНСС станцій NDST, DSR1, ACP2, WP02 та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL).

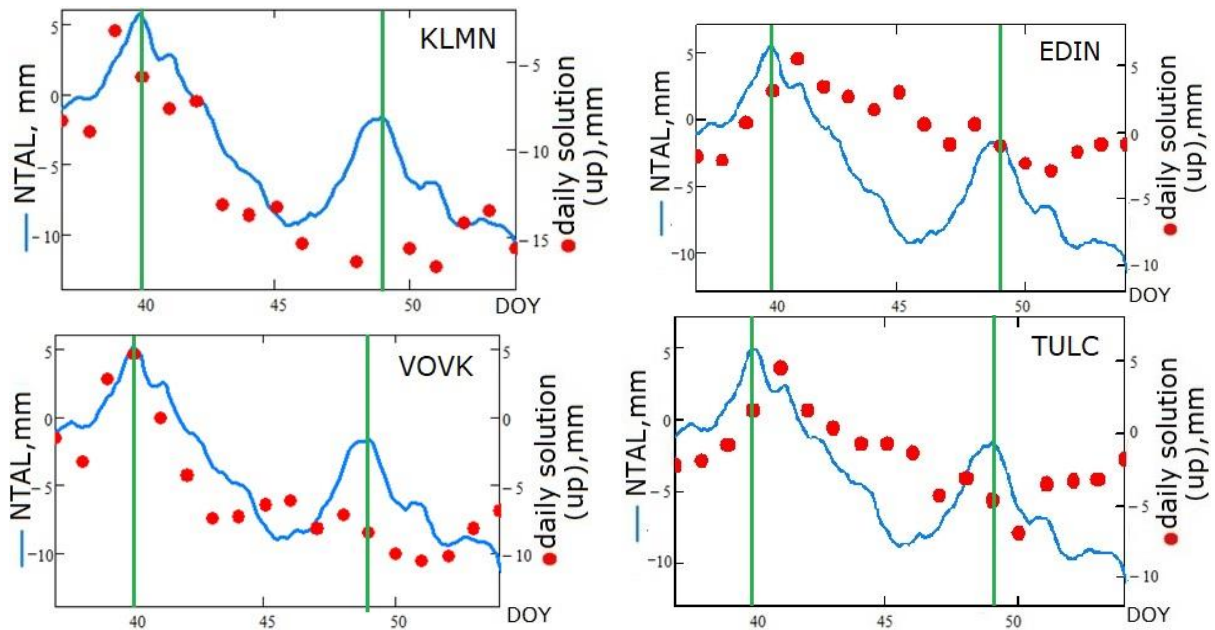


Рисунок 3.26 – Часовий висотний ряд ГНСС станцій EDIN, KLMN, VOVK, TULC та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) за період 06-23.02.2021 (37-54 день року)

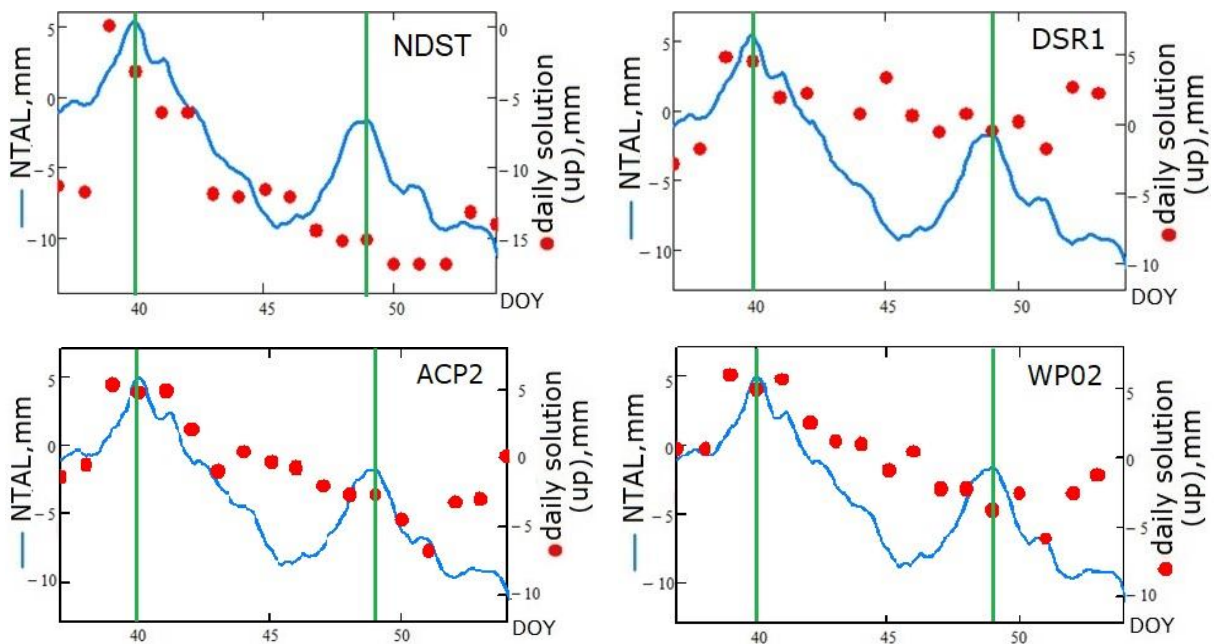
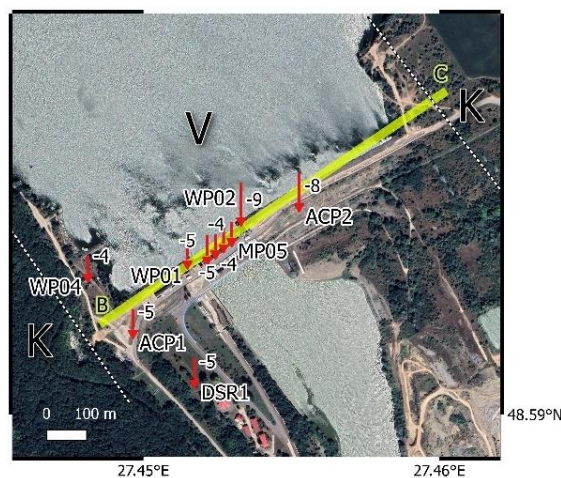


Рисунок 3.27 – Часовий висотний ряд ГНСС станцій NDST, DSR1, ACP2, WP02 та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) за період 06-23.02.2021 (37-54 день року)

Порівнюючи висотний зсув між перманентною ГНСС станцією NDST та станціями KLMN та VOVK, помітна спільна кінематика їх реакції на деформації, зумовлені NTAL. Натомість, аналізуючи висотний зсув

станцій NDST та DSR1, ACP2, WP02, помітно, що динаміка їх висотного зміщення є різною: висота станції за період з 9 по 18 лютого 2021 року (40-49 день року) поступово зменшується, навіть незважаючи на те, що модельне значення NTAL показує короткочасне зменшення навантаження на земну поверхню, натомість станція DSR1 зазнає менших просідань. Така динаміка схожа для більшості ГНСС станцій на Дністровській ГЕС-1.

На рисунку 3.28 показана карта висотного зсуву пунктів мережі з 9 по 18 лютого 2021 року (40-49 день року).



DSR1 - ГНСС-станція, **8** - величина висотного зсуву, Вік відкладів: **V** - венд **K** - крейда **Г** - Інженерно-геологічний профіль (додаток Г)

Рисунок 3.28 – Карта висотного зсуву пунктів мережі з 9 по 18 лютого 2021 року

З метою підтвердження цих просідань альтернативним способом розглянуте зміщення пунктів CP01-CP18. Ці пункти обладнані відбивачами, які моніторяться з пункту DSR1 роботизованим тахеометром Leica TM30 з інтервалом 6 годин. Розташування пунктів показане на рис. 12, пункти CP01-CP06 розташовані у тілі греблі зі сторони нижнього б'єфу, а пункти MP01-MP06 розташовані на гребені греблі. Кінематика зміщень усіх пунктів CP01-CP18 схожа на кінематику просідань ГНСС-станцій MP02-MP05.

У таблиці 3.6 приведені характеристики висотного зсуву пунктів ГНСС мережі Дністровської ГЕС-1. Виконана оцінка точності тренду висотного зсуву. Середні квадратичні похибки становлять 2-3 мм, що для більшості пунктів становить половину від величини зсуву.

Таблиця 3.6

Висотний зсув пунктів ГНСС мережі Дністровської ГЕС-1

ГНСС-станція	Висотний зсув (з 23 по 30 грудня 2019), мм	Висотний зсув (з 9 по 18 лютого 2021), мм
ACP1	-6.1	-4.8
ACP2	-5.8	-7.5
DSR1	-8.1	-5
DSR2	-2.1	*
MP02	-3.8	-5.2
MP03	-4.1	-3.6
MP04	-4.1	-4.5
MP05	*	-3.6
WP01	-3.3	-4.6
WP02	-3.8	-8.7
WP03	-2.4	*
WP04	-7.1	-4.2

* Недостатньо даних на період спостережень в зв'язку з завадами під час ремонтних та регламентних робіт, зокрема руху вузлового крану

Висотний зсув пунктів на лівому березі ACP2 та WP02 з 9 по 18 лютого 2021 року (40-49 день року) становить -8 та -9 мм, що вдвічі більше за висотний зсув пунктів греблі та правого берега.

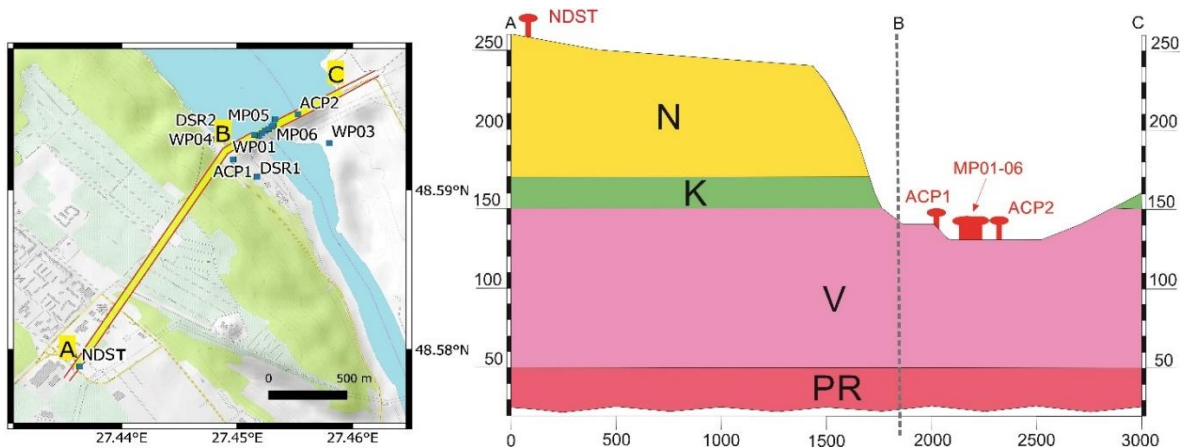
Ці зміщення матимуть вплив на результати та точність прецизійних інженерно-геодезичних робіт, які систематично ведуться на території ГЕС, особливо під час прояву NTAL, оскільки відстані між пунктами з різним висотним зсувом (3-5 мм) є у межах 100-500 м. Величини різниць висотного зсуву сусідніх геодезичних пунктів в рази перевищують можливі похибки високоточного нівелювання I та II класів чи необхідної точності для ряду монтажних робіт з встановлення спеціального обладнання. Тому, для великих інженерних об'єктів варто застосовувати спеціальні моделі чи поправки для врахування NTAL, в основу яких

потрібно включати геологічну основу об'єкту спостережень. Висотний зсув геодезичних пунктів на берегах також вдвічі більший за пункти греблі з 23 по 30 грудня 2019 року. Ця закономірність ілюструється тим, що більша частина тріщин та просідань греблі переважно розташована у зонах контакту греблі та берега.

Також проаналізовано зміни рівня води у верхньому водосховищі та динаміку вертикальних зміщень ГНСС-станцій. На нашу думку, підвищення рівня води у верхньому водосховищі повинно чинити більший тиск на дамбу, і висота ГНСС станцій буде зменшуватися. Такі зміни рівня води сягають до 5-7 метрів у річному циклі. Проте за період 2019-2021 року не виявлено взаємозв'язку динаміки вертикальних зміщень пунктів на греблі та зміни рівня води.

Взаємозв'язок зміщень та геологічної будови території

З метою аналізу різниці динаміки зміщень між перманентною ГНСС станцією NDST та пунктами мережі Дністровської ГЕС-1 нами побудований геологічний профіль по точках АВС за даними геологічної карти регіону. На рисунку 3.29 справа показаний геологічний профіль по лінії АВС, а зліва положення профілю на топокарті місцевості. Довжина профілю АВС становить 3000 м, з яких частина АВ становить 1800 м, ВС – 1200 м. Профіль простягається з Пд.-Зх на Пн-Сх.



Умовні позначення (для профілю): Вік відкладів: **N**- Неоген **K**- Крейда **V** - Венд **PR**- Протерозой; **T** - ГНСС станції спроектовані на профіль

Рисунок 3.29 – Геологічний профіль по лінії ABC зі схематичним зображенням залягання відкладів за віком, за [5] (справа) та його положення (зліва)

З рисунку 3.29 видно, що в загальному ГНСС-станції NDST розташовані на відкладах (зверху до низу) неогену, крейди, венду, які залягають на фундаменті Східноєвропейської платформи (СЄП). Натомість станції ГНСС-мережі Дністровської ГЕС-1 розміщені на вендських відкладах.

Якщо розглянути детальніше, то частина ГНСС-мережі Дністровської ГЕС-1 на греблі безпосередньо встановлена на греблі, яка встановлена на СЄП, представлена протерозойськими гранітами бердичівського ультра метаморфічного комплексу (γmPR1bd). Інша частина станцій (DSR1, ACP1, ACP2, WP03, WP04) розташовані на вендській утвореннях поверх СЄП. В літологічному відношенні ці стратиграфічні комплекси представлені пісковиками, алевролітами та аргілітами. Переважають алевроліти та аргіліти. У цілому в регіоні залягання цих комплексів близьке до горизонтального з незначним падінням на південний захід.

Натомість ГНСС- станція NDST окрім відкладів протерозою та венду розташована на відкладах крейди потужністю близько 20-ти метрів та

неогену потужністю близько 90-та метрів. Крейдові відклади представлені пелипчанською світою нижньокрейдового крейдового періоду (K1-2nz+pl). Вони складені кварц-глауконітовими пісковиками, пісками, вапняками. Вік незвиської світи на підставі фауністичних решток визначений як сеноманський, озаринецька світа (K2oz) складена вапняками з прошарками глин та стяжіннями кремнію. Неогенові утворення складені породами баденського (N1pd) та Сарматського (N1p+v) віків. Породи бадену складаються з пісків та пісковиків, у верхній частині – глинистих пісковиків. Сарматські відклади представлені різними генетичними типами – морськими, лагунними та континентальними. Літологічно вони представлені глинами, пісками та вапняками. Описані вище породи розбиті системою розривних порушень північно-західної та південно-східної орієнтації. Ці розломи переважно належать до скидів. Також попередніми дослідженнями тут виявлено досить густу сітку лінеаментів [44].

У додатку Г показано інженерно-геологічний профіль по лінії ВС. З інженерно-геологічного профілю видно, що основа греблі знаходиться на перешаруванні алевролітів, аргілітів та пісковиків.

Встановлена відмінність у значеннях висотних зміщень, зафіксованих під впливом NTAL для станції NDST та ГНСС-станціями мережі Дністровської ГЕС-1. З 9 по 18 лютого 2021 року ГНСС станція NDST зазнає просідання близько 15 мм, а станції ГНСС мережі Дністровської ГЕС-1 – 4-8 мм. На нашу думку, це можна пояснити наступним чином. Породи венду є досить щільними (алевроліти, аргіліти, частково пісковики). Вони залягають на гранітах. А породи неогену і крейди представлені вапняками, пісками, глинами, які мають суттєво інші фізичні властивості щодо пружних деформацій (ущільнення).

Також є відмінності висотного зсуву між ГНСС-станціями греблі та ГНСС-станціями на берегах Дністра. Найменші опускання характерні для станцій греблі (MP01-06), а опускання на берегах переважно вдвічі більші

(DSR1, ACP1, ACP2, WP02). Знову ж таки, простежується зв'язок пружних деформацій з геологічною будовою. ГНСС-станції на греблі знаходяться на умовно монолітній та однорідній бетонній конструкції, яка в свою чергу накладена на граніти, на яких залягають малопотужні (15 м) вендські відклади. ГНСС-станції на берегах знаходяться на гірських породах вендського віку товщиною 80 м. Ці породи перешаровуються (алевроліти, аргеліти, пісковики). Також в багатьох випадках вони розбиті тріщинами. Зазначені фактори будуть впливати на динаміку деформацій та нерівномірного просідання. А це, в свою чергу, призводить до утворення тріщин та руйнувань тіла дамби в зонах контакту з берегами.

Підсумовуючи зазначаємо, що пункти мережі Дністровської ГЕС-1 зазнають менших змін за висотою, ніж перманентні ГНСС станції в радіусі 100 км. Показано, що це відповідає різниці потужностей та щільності гірських порід під відповідними пунктами, які зазнають різних пружних деформацій під впливами однакового навантаження NTAL. Оскільки геодезична основа неоднорідно реагує на NTAL, то це призводить до зміни перевищень між пунктами і має вплив на точність прецезійних інженерно-геодезичних робіт, що проводяться на об'єкті у такі періоди. Важливим питанням є аналіз впливу NTAL на виконання робіт, які пов'язані з високоточним визначенням висот. Під час аномального впливу NTAL висоти навіть близько розташованих пунктів можуть змінитися, якщо геологічна будова під ним є різною. Але вплив інших факторів не можна виключати. У дослідженні помітно, що пункти, між якими близько 100-500 метрів, зазнають різних просідань. Такі різниці висотних зсувів пунктів становлять до 3-5 мм, що значно перевищує допуски для високоточного нівелювання на такі відстані. На основі виконаних досліджень ми припускаємо, що варто застосовувати спеціальні моделі для врахування NTAL для інженерних об'єктів, які мають складну геологічну будову.

Потрібно також провести подальші дослідження на території інших ГЕС України.

Висновки до розділу 3

1. Розроблений метод виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій ГНСС-станцій. Він полягає у пошуку ковзних кореляційних і коваріаційних зв'язків між часовими рядами декількох ГНСС-станцій за короткі періоди, які зміщуються вздовж усієї часової серії та дозволяє за виділенням аномальних зміщень пар ГНСС-станцій показати характер зміщень на усій досліджуваній території. Розроблену методику можна використовувати для диференціації динаміки конструктивних елементів інженерних споруд, промислових територій, геодинамічних полігонів на території яких встановленні ГНСС-станції. Аномальні зміщення можуть бути викликані не лише атмосферними чи сейсмічними факторами, які аналізується у роботі, а й іншими. Апробація методики дає такі результати:

- виконано узагальнення диференціації кінематики греблі Дністровської ГЕС-1 за період з 01.07.2017 по 31.03.2021. Встановлено, що екстремальні значення коефіцієнтів коваріації часових серій між контрольними пунктами греблі Дністровської ГЕС-1 припадають на епохи 2017.8, 2019.0, 2019.4, а розмах коливань висотного зміщення контрольного пункту МР01 є в 3-8 раз більший від розмаху на інших контрольних пунктах на аналогічні епохи;

- для ГНСС-станцій мережі Геотерраса підтверджені зміщення зафіксовані у грудні 2019 року [42] та проаналізовано спільні зміщення у часових рядах координат ГНСС-станцій на епоху 2018.5 та побудовано відповідні карти [43].

2. Розглянуто сейсмічну активність довкола Дністровського енергокомплексу з 2012 до 2021 року. Вогнища землетрусів тяжіють до

встановлених розломів та контактів залягання структур різного літологічного складу на глибині 1-3 км. Правдоподібно, що наповнення верхнього Дністровського водосховища спричиняє зміни навантажень на земну поверхню та додаткове тертя структурами, що може спричинити додаткове вивільнення енергії та утворення корових землетрусів. Оцінено зв'язок між змінами об'єму води у водосховищі та енергією землетрусів. Коефіцієнт кореляції Пірсона між модулем зміни об'єму водосховища та сейсмічністю, вираженою через енергетичний клас землетрусів, становить 0,64. Також обчислено функцію для визначення спричинених землетрусів за зміною модуля об'єму води у водосховищі.

3. Встановлено, що пункти мережі Дністровської ГЕС-1 зазнають менших змін за висотою, ніж перманентні ГНСС станції в радіусі 100 км під впливом неприпливних атмосферних навантажень. Показано, що це відповідає різниці потужностей та щільності гірських порід під відповідними пунктами, які зазнають різних пружних деформацій під впливом NTAL. Встановлено диференціацію висотного зсуву ГНСС-станцій, розташованих на різних об'єктах Дністровської ГЕС-1 (гребля та береги). Пункти на греблі просідають менше, ніж значення з моделі NTAL. Це обумовлено тим, що для модельних значень NTAL використовують середню густину Землі, а пункти греблі розташовані на щільних породах венду (алевроліти, аргіліти, частково пісковики), які залягають на гранітах. Дані ГНСС також підтверджуються системою моніторингу лінійно-кутових вимірів. Неоднорідність динаміки пунктів очевидно призводить до зафіксованих тріщин в конструктивних елементах ГЕС, особливо в ділянках контакту греблі з берегом.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання цієї дисертаційної роботи з метою дослідження впливу сейсмічності та неприпливних атмосферних навантажень на деформації земної кори, оцінено такі впливи для досліджуваних регіональних та локальних територій, знайдені їх взаємозв'язки та розроблено методика для пошуку одночасних геодинамічних зміщень за декількома ГНСС-станціями.

У рамках завдань дисертації зроблені наступні висновки:

1. Неприпливні атмосферні навантаження можуть змінювати висотне положення пунктів на земній поверхні до 20-30 мм. Розгляд моделей неприпливних навантажень показує, що для моделювання навантаження не враховується вплив геологічної будови територій, а береться середня густина Землі. Виявлено просторово-часовий розподіл вертикальних деформацій земної поверхні континентальної Європи тривалістю декілька днів у кінці грудня 2019 року. Величина зміщень змінюється від -6 до -30 мм, тривалість від 5 до 8 діб, а середньодобові зміщення 2-5 мм у різних районах Європи. Цей процес практично повністю співпадає з розрахунковими моделями неприпливних атмосферних навантажень на цей період.

2. Адаптовано методика для визначення просторово-часових взаємозв'язків між величинами узагальнених критеріїв поля горизонтальних швидкостей земної кори та узагальненої сейсмічності для Карпато-Балканського регіону. Виділено зони з високим ступенем кореляції ($>0,84$) між абсолютною дилатацією $|\Delta|$ та великою піввіссю а еліпсів розсіювання землетрусів. У Карпато-Балканському регіоні усі виділені території з багаторічним високим ступенем кореляцій (понад 5 років з 10) розташовані по одну зі сторін активних тектонічних розломів, які є зонами субдукції.

3. Встановлено правдоподібний зв'язок між змінами об'єму Дністровського водосховища та проявами землетрусів. Побудовано лінійну модель взаємозв'язку. Коефіцієнт кореляції між модулем зміни об'єму водосховища та сумарною сейсмічністю вираженою через енергетичний клас землетрусів становить 0,64. Показано, що вогнища землетрусів виникають у контакті залягання структур різного літологічного складу на глибині 1-3 км, ймовірно внаслідок їх тертя викликаних змінами навантажень. Циклічність роботи великих інженерних споруд, на прикладі Дністровської ГЕС-1, призводить до активізації сейсмічності, що потрібно враховувати при їх побудові чи розширенні.

4. Розроблений метод виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій зміни координат ГНСС-станцій, який дозволяє автоматизувати цей процес. Алгоритм можна використовувати для диференціації кінематики конструктивних елементів інженерних споруд, промислових територій, геодинамічних полігонів, на території яких встановленні ГНСС-станції. Апробація методики виконана для узагальнення диференціації кінематики греблі Дністровської ГЕС-1, ГНСС-станцій мережі Геотерраса.

5. Встановлено диференціацію висотного зсуву ГНСС-станцій розташованих на різних об'єктах Дністровської ГЕС-1. Попри однаковий вплив неприпливних атмосферних навантажень, встановлено що кінематика ГНСС-станцій розташованих на греблі є більш повільною, ніж для ГНСС-станцій розташованих на берегах. Пункти ГНСС-мережі на греблі розташовані на бетонній структурі, під якою розташовані щільні породи венду (алевроліти, аргіліти, частково пісковики) товщого до 30 м, які залягають на гранітах. Пункти ГНСС-мережі на берегах розташовані на значно більшій товщі природних порід венду, що може сягати до 80 м і відповідно мають природні тріщини між гірськими породами на відміну від тіла бетонної греблі. Неоднорідність будови верхнього прошарку кори,

ймовірно, призводить до зафіксованих тріщин в конструктивних елементах ГЕС, особливо в ділянках контакту греблі з берегом.

6. Максимальні зафіксовані різниці висотного зсуву під дією NTAL між пунктами геодезичної мережі, відстань між якими становить 100-500 м, досягають 3-5 мм. Необхідно для великих гідротехнічних споруд розробити моделі для розрахунку поправок у результати геодезичних вимірів для врахування NTAL. Ці моделі повинні враховувати неоднорідність геологічної будови об'єкту спостережень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бисовецкий Ю.А., Третьак К.Р., Щучик Э.С. (2011) Автоматизация геодезических наблюдений за гидротехническими сооружениями гидроэлектростанций Укрэнерго. Гідроенергетика України, 2, 45-51.
2. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Романюк Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит // Весник КРАУНЦ. Нау-ки о Земле. – 2008. – № 1. Вып. № 11. – С. 32-47.
3. Геотерраса. Мережа активних перманентних ГНСС- станцій – Режим доступу: <https://geoterrace.lpnu.ua>
4. Гинтов, О. В., Муровская, А. В., Егорова, Т. П., Вольфман, Ю. М., Цветкова, Т. А., Вугаенко, И. В., ... & Амашукели, Т. А. (2015). Глубинная сейсмогенная зона Вранча как индикатор геодинамического процесса. Геофизический журнал.
5. Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000, аркуші М-35-XXVIII (Бар), М-35-XXXIV (Могилів-Подільський (в межах України)). К.:Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Державна геологічна служба. УкрДГРІ 2007. 206 с.
6. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. – М. Наука, 1982. – 273 с.
7. Калинин В. В., Устинов А. В., & Косарев Н. С. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания стационарного узла Загорской ГАЭС-2 методом РРР. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 2020. Вып. 25(3), 34-41. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-34-41

8. Кузьмин, Ю. О. (2014). Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени. Геодинамика и тектонофизика, 5(2), 401-443.
9. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли (Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН). – М.: Наука, 2006. – 390 с.
10. Маламуд А.С. Использование длительности колебаний для энергетической классификации землетрясений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений, т. II. – М.: АН СССР, 1974. – С.180–194.
11. Малкин З.М. Влияние атмосферной нагрузки на координаты и скорости ГНСС-станций // Геодезия и картография. – 2008. – № 4. – С. 31–34
12. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
13. Могильный С., Шоломицкий А., Шморгун Е., Пригаров В. (2010) Автоматизированная система геодезического мониторинга. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 19, 193—197
14. ПАТ «Укргідропроєкт». Правила експлуатації водосховищ Дністровського каскаду ГЕС і ГАЕС при НПР 77,10 м буферного водосховища. 2017. 732-39-Т48. 106 с.
15. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. (Труды ИФЗ АН СССР; №9(176)). – М.: АН СССР, 1960. – С.75–114.
16. Сарнавський В., Овсянніков М. Тектонічна структура і геодинамічний режим масивів порід у зоні взаємодії з гідротехнічними спорудами ГЕС і ГАЕС (на прикладі Дністровського комплексного гідро-вузла). Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2005. С. 193-206.

17. Сосонка І.І. Аналіз та оцінка якості часових серій координат референцних GNSS-станцій України. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 «Науки про Землю». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021, 173 с.

18. Третяк К. Р. & Брусак І.В. (2021) Метод виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій GNSS станцій Геодезія, картографія та аерофотознімання, 93(1), 27-34.

19. Третяк К. Р., Максимчук В. Ю., Кутас Р. І. Геодинаміка та геофізичні поля Карпат та суміжних територій: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 250.

20. Третяк К.Р., Заяць О.С., Смірнова О. М. (2016) Створення автоматизованої системи геодезичного моніторингу деформацій. Матеріали VI Міжнародної наукової конференції «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища», 272-275.

21. Третяк К.Р., Краненброк Д.Ж., Балан А.Ю., Ломпас О.В., Савчин І.Р. (2014) Апостеріорна оптимізація точності та надійності активної геодезичної мережі моніторингу Дністровської ГЕС. Геодезія, картографія та аерофотознімання, 79, 5-14.

22. Третяк, К. (2008). Зв'язок між горизонтальними деформаціями Земної поверхні та сейсмічною активністю Центральної Європи. Третяк. О. Серант. О. Смірнова//Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, (1), 15.

23. Третяк, К. Р., & Вовк, А. І. (2014). Результати визначення горизонтальних деформацій земної кори Європи за даними ГНС-спостережень та їх зв'язок з тектонічною будовою. Геодинаміка, (1), 21-33.

24. Третяк, К. Р., & Романюк, В. В. (2014). Дослідження взаємозв'язку між сучасними вертикальними зміщеннями земної кори і сейсмічною активністю Європи. Геодинаміка, (1), 7-20.

25. Третяк, К. Р., Савчин, І. Р., Заяць, О. С., Голубінка, Ю. І., Ломпас, О. В., & Бісовецький, Ю. А. (2017). Встановлення та супровід автоматизованих систем контролю просторових зміщень інженерних споруд українських гідроелектростанцій. *Гідроенергетика України*, (1-2), 33-41.
26. Третяк, К., Корлятович, Т., Брусак І., Смірнова О. Диференціація кінематики греблі Дністровської ГЕС-1 (за даними ГНСС-моніторингу просторових зміщень). *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2021. Вип. 42. С. 57–66.
27. Третяк, К.Р.; Смірнова, О.М.; Бределєва, Т.М. (2012). Дослідження періодичних змін висотного положення супутникових перманентних станцій світу. *Геодинаміка*, (1), 11-29.
28. Шерман С.И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений // *Геофизический журнал*. 2005. Т.27. №1. С.20-38.
29. Altamimi, Z., Métivier, L., & Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7).
30. Ashby, N. (2003). Relativity in the global positioning system. *Living Reviews in relativity*, 6(1), 1-42.
31. Barzaghi, R., Cazzaniga, N. E., De Gaetani, C. I., Pinto, L., & Tornatore, V. (2018). Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques. *Sensors*, 18(3), 756.
32. Behr, J. A., Hudnut, K. W., & King, N. E. (1998, September). Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California using continuous GPS. In *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1998)* (pp. 59-68).
33. Beyerle, G. (2009). Carrier phase wind-up in GPS reflectometry. *GPS solutions*, 13(3), 191.

34. Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W. C., & Gazeaux, J. (2016). MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), 2054-2068.
35. Blewitt, G., W. C. Hammond, and C. Kreemer (2018), Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science, *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>
36. Bocchini, G. M., Brüstle, A., Becker, D., Meier, T., van Keken, P. E., Ruscic, M., ... & Friederich, W. (2018). Tearing, segmentation, and backstepping of subduction in the Aegean: New insights from seismicity. *Tectonophysics*, 734, 96-118.
37. Bock, O., & Doerflinger, E. (2001). Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), 373-383.
38. Bogusz J (2015) Geodetic aspects of GPS permanent station non-linearity studies. *Acta Geodyn Geomater* 12(4):323–333. <https://doi.org/10.13168/AGG.2015.0033>
39. Böhm J. and Schuh H. *Atmospheric Effects in Space Geodesy*. Springer Atmospheric Sciences. Springer, 2013. ISBN 9783642369322.
40. Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of geophysical research: solid earth*, 111(B2).
41. Bos, M., Fernandes, R., & Bastos, L. (2019). Hector user manual version 1.7. 2.
42. Brusak, I., & Tretyak, K. (2020, December). About the phenomenon of subsidence in continental Europe in December 2019 based on the GNSS stations data. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020»* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

43. Brusak, I., & Tretyak, K. (2021, October). On the impact of non-tidal atmospheric loading on the GNSS stations of regional networks and engineering facilities. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021». European Association of Geoscientists & Engineers.
44. Bubniak, A. M., Bubniak, I. M., & Zyhar, A. I. (2020, May). Lineaments analysis of the Dniester area (between Bakota and Novodnistrovsk). In Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020 (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-4). European Association of Geoscientists & Engineers.
45. Burchfiel, B. C., King, R. W., Todosov, A., Kotzev, V., Durmurdzanov, N., Serafimovski, T., & Nurce, B. (2006). GPS results for Macedonia and its importance for the tectonics of the Southern Balkan extensional regime. *Tectonophysics*, 413(3-4), 239-248.
46. Bury, G., Sośnica, K., & Zajdel, R. (2019). Impact of the atmospheric non-tidal pressure loading on global geodetic parameters based on Satellite Laser Ranging to GNSS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6), 3574-3590.
47. C3S – Copernicus Climate Change Service: State of the European climate: December 2019 – Access mode: <https://surfobs.climate.copernicus.eu/stateofthecclimate/december2019.php>
48. Caporali, A., Aichhorn, C., Barlik, M., Becker, M., Fejes, I., Gerhatova, L., ... & Medak, D. (2009). Surface kinematics in the Alpine–Carpathian–Dinaric and Balkan region inferred from a new multi-network GPS combination solution. *Tectonophysics*, 474(1-2), 295-321.
49. Cenni, N., Viti, M., & Mantovani, E. (2015). Space geodetic data (GPS) and earthquake forecasting: examples from the Italian geodetic network. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(2).
50. Centre Sismologique Euro-Mediterraneen. (n.d.) Retrived from: <https://www.emsc-csem.org>

51. Chousianitis, K., Ganas, A., & Gianniou, M. (2013). Kinematic interpretation of present-day crustal deformation in central Greece from continuous GPS measurements. *Journal of Geodynamics*, 71, 1-13.
52. Collilieux X., Altamimi Z., Coulot D., van Dam T., and Ray J. Impact of loading effects on determination of the International Terrestrial Reference Frame. *Advances in Space Research*, 45(1):144 – 154, 2010. ISSN 0273-1177.
53. Dach, R., Böhm, J., Lutz, S., Steigenberger, P., & Beutler, G. (2011). Evaluation of the impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis. *Journal of geodesy*, 85(2), 75-91.
54. Dach, R., S. Lutz, P. Fridez, and P. Walser (2015), Bernese GNSS Software, Version 5.2, Astronomical Institute, University of Bern.
55. Dardanelli, G., La Loggia, G., Perfetti, N., Capodici, F., Puccio, L., & Maltese, A. (2014, October). Monitoring displacements of an earthen dam using GNSS and remote sensing. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI* (Vol. 9239, p. 923928). International Society for Optics and Photonics.
56. Dong D, Fang P, Bock Y, Cheng MK, Miyazaki S (2002) Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *J Geophys Res.* <https://doi.org/10.1029/2001JB000573>
57. ESMGFZ; Earth System Modelling at. Online Access: <http://esmdata.gfz-potsdam.de:8080/repository>
58. Farrell, W.E. (1972), Deformation of the Earth by surface loads, *Rev. Geophys.*, 10, 751– 797.
59. Fukahata, Y., Meneses-Gutierrez, A., & Sagiya, T. (2020). Detection of plastic strain using GNSS data of pre-and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Earth, Planets and Space*, 72(1), 1-10.

60. Glomsda, M., Bloßfeld, M., Seitz, M. et al. Benefits of non-tidal loading applied at distinct levels in VLBI analysis. *J Geod* 94, 90 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01418-z>
61. Gobron, K., Rebischung, P., de Viron, O., Van Camp, M., & Demoulin, A. (2021, April). Influence of non-tidal atmospheric and oceanic loading deformation on the stochastic properties of over 10,000 GNSS vertical land motion time series. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU21-9860).
62. Görres, B., Campbell, J., Becker, M., & Siemes, M. (2006). Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques. *GPS solutions*, 10(2), 136-145
63. Grenerczy, G., Sella, G., Stein, S., & Kenyeres, A. (2005). Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. *Geophysical Research Letters*, 32(16).
64. Griffiths, J., & Ray, J. R. (2013). Sub-daily alias and draconitic errors in the IGS orbits. *GPS solutions*, 17(3), 413-422.
65. Gulal, E., Tiryakioglu, I., Kalyoncuoglu, U. Y., Erdogan, S., Dolmaz, M. N., & Elitok, O. (2016). The determination of relations between statistical seismicity data and geodetic strain analysis, and the analysis of seismic hazard in southwest Anatolia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), 138-155.
66. Halpaap, F., Rondenay, S., & Ottemöller, L. (2018). Seismicity, deformation, and metamorphism in the Western Hellenic subduction zone: New constraints from tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(4), 3000-3026.
67. Handy, M. R., Giese, J., Schmid, S. M., Pleuger, J., Spakman, W., Onuzi, K., & Ustaszewski, K. (2019). Coupled Crust-Mantle Response to Slab Tearing, Bending, and Rollback Along the Dinaride-Hellenide Orogen. *Tectonics*, 38(8), 2803-2828.

68. Haritonova, D. (2021). Non-tidal loading of the Baltic Sea in Latvian GNSS time series. *Journal of Applied Geodesy*, 15(4), 293–304. doi:10.1515/jag-2021-0024
69. He, X., Yu, K., Montillet, J. P., Xiong, C., Lu, T., Zhou, S., ... & Ming, F. (2020). GNSS-TS-NRS: An Open-Source MATLAB-Based GNSS Time Series Noise Reduction Software. *Remote Sensing*, 12(21), 3532.
70. Heinkelmann, R., Böhm, J., Schuh, H., & Tesmer, V. (2009). The effect of meteorological input data on the VLBI reference frames. In *Geodetic Reference Frames* (pp. 245-251). Springer, Berlin, Heidelberg.
71. Hodgkinson, K. M., Mencin, D. J., Feaux, K., Sievers, C., & Mattioli, G. S. (2020). Evaluation of earthquake magnitude estimation and event detection thresholds for real-time GNSS networks: Examples from recent events captured by the network of the Americas. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1628-1645.
72. Hollenstein, C., Müller, M. D., Geiger, A., & Kahle, H. G. (2008). Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993–2003. *Tectonophysics*, 449(1-4), 17-40.
73. Hoque MM, Jakowski N (2007) Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. *Journal of Geodesy* 81(4):259–268, DOI 10.1007/s00190-006-0106-0
74. International GNSS service : <http://www.igs.org/products>
75. Ioane, D., & Stanciu, I. M. (2018). Extensional tectonics in Vrancea zone (Romania) interpreted on recent seismicity, geophysical and GPS data. *Proc. SGEM 2018*, 18, 939-946.
76. Ismail-Zadeh, A., Matenco, L., Radulian, M., Cloetingh, S., & Panza, G. (2012). Geodynamics and intermediate-depth seismicity in Vrancea (the south-eastern Carpathians): current state-of-the art. *Tectonophysics*, 530, 50-79.

77. Jiang W., Li Z., van Dam T., and Ding W. Comparative analysis of different environmental loading methods and their impacts on the GPS height time series. *Journal of Geodesy*, 87(7):687–703, 2013. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-013-0642-3.
78. Jouanne, F., Mugnier, J. L., Koci, R., Bushati, S., Matev, K., Kuka, N., ... & Duni, L. (2012). GPS constraints on current tectonics of Albania. *Tectonophysics*, 554, 50-62.
79. Kao, H., Hyndman, R., Jiang, Y., Visser, R., Smith, B., Babaie Mahani, A., ... & He, J. (2018). Induced seismicity in western Canada linked to tectonic strain rate: Implications for regional seismic hazard. *Geophysical Research Letters*, 45(20), 11-104.
80. Karaim, M., Elsheikh, M., Noureldin, A., Rustamov, R. B. (2018). GNSS error sources. *Multifunctional Operation and Application of GPS*; Rustamov, RB, Hashimov, AM, Eds, 69-85
81. King, M. A., & Williams, S. D. (2009). Apparent stability of GPS monumentation from short-baseline time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B10)
82. Klos, A., Olivares, G., Teferle, F. N., Hunegnaw, A., & Bogusz, J. (2017). On the combined effect of periodic signals and colored noise on velocity uncertainties. *GPS Solutions*, 22(1). doi:10.1007/s10291-017-0674-x
83. Knowles, L. A., Bennett, R. A. and Harig, C.: 2020, Vertical displacements of the Amazon basin from GRACE and GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2), DOI: 10.1029/2019JB018105.
84. Komjathy, A., Langley, R. B., & Bilitza, D. (1998). Ingesting GPS-derived TEC data into the International Reference Ionosphere for single frequency radar altimeter ionospheric delay corrections. *Advances in Space Research*, 22(6), 793-801

85. Kotzev, V., Nakov, R., Georgiev, T., Burchfiel, B. C., & King, R. W. (2006). Crustal motion and strain accumulation in western Bulgaria. *Tectonophysics*, 413(3-4), 127-145.
86. Kuzmin, Y. O. (2015). Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2), 401-443.
87. Langbein, J., Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B1), 591-603 doi: 10.1029/96JB02945
88. Langbein, J., Murray, J. R. & Snyder, H. A. (2006) Coseismic and initial postseismic deformation from the 2004 Parkfield, California, earthquake, observed by Global Positioning System, electronic distance meter, creepmeters, and borehole strainmeters. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, S304–S320.
89. Lavallée, D. A., Moore, P., Clarke, P. J., Petrie, E. J., van Dam, T., & King, M. A. (2010). J2: An evaluation of new estimates from GPS, GRACE, and load models compared to SLR. *Geophysical Research Letters*, 37(22).
90. Li, S., Shen, W., Pan, Y. and Zhang, T.: 2020, Surface seasonal mass changes and vertical crustal deformation in North China from GPS and GRACE measurements. *Geodesy and Geodynamics*, 11(1), 46-55. DOI: 10.1016/j.geog.2019.05.002
91. Marcell Ferenc. GPS observation of geophysical deformations induced by non tidal loading. *Climatology*. Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2014. English. ffNNT : 2014CNAM0977ff. fftel-01644807f
92. Materna, K., Feng, L., Lindsey, E. O., Hill, E. M., Ahsan, A., Alam, A. K. M. K., ... Bürgmann, R. (2020). GNSS characterization of hydrological loading in South and Southeast Asia. *Geophysical Journal International*. doi:10.1093/gji/ggaa500
93. Mathews, P. M., Dehant, V., & Gipson, J. M. (1997). Tidal station displacements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20469-20477

94. Mazzotti, S., Leonard, L. J., Cassidy, J. F., Rogers, G. C., & Halchuk, S. (2011). Seismic hazard in western Canada from GPS strain rates versus earthquake catalog. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B12).
95. Melachroinos, S. A., Biancale, R., Llubes, M., Perosanz, F., Lyard, F., Vergnolle, M., ... & Durand, S. (2008). Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids: comparisons to GPS estimates over the shelf of Brittany, France. *Journal of geodesy*, 82(6), 357-371.
96. Melgar, D., Melbourne, T. I., Crowell, B. W. et al.: 2020, Real-time high-rate GNSS displacements: Performance demonstration during the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes. *Seismological Research Letters*, 91(4), 1943-1951. DOI: 10.31223/osf.io/pdxqw
97. Mémin, A., Boy, J. P., & Santamaria-Gomez, A. (2020). Correcting GPS measurements for non-tidal loading. *GPS Solutions*, 24(2), 1-13.
98. Métivier, L., Collilieux, X., Lercier, D., Altamimi, Z. and Beauducel, F. (2014). Global coseismic deformations, GNSS time series analysis, and earthquake scaling laws. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(12), 9095-9109. DOI: 10.1002/2014JB011280
99. Meyer, M. B. (2011). GPS constrains on current tectonics of southwest bulgaria, northern greece, and albania (Doctoral dissertation, University of Grenoble).
100. Montillet, J. P., & Bos, M. S. (Eds.). (2019). *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences*. Springer.
101. Morton, Y. T., van Graas, F., Zhou, Q., & Herdtner, J. (2009). Assessment of the higher order ionosphere error on position solutions. *Navigation*, 56(3), 185-193.
102. Munekane H, Tobita M. and Takashima K.: 2004, Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan. *Geophys Res Lett* 31(12). DOI: 10.1029/2004GL020158

103. Nagel, T. J., Schmidt, S., Janák, M., Froitzheim, N., Jahn-Awe, S., & Georgiev, N. (2011). The exposed base of a collapsing wedge: the Nestos shear zone (Rhodope Metamorphic Province, Greece). *Tectonics*, 30(4).
104. Nevada Geodetic Laboratory <http://geodesy.unr.edu>
105. Nilsson, T., Böhm, J., Wijaya, D. D., Tresch, A., Nafisi, V., & Schuh, H. (2013). Path delays in the neutral atmosphere. In *Atmospheric effects in space geodesy* (pp. 73-136). Springer, Berlin, Heidelberg.
106. Nordman, M., Virtanen, H., Nyberg, S., & Mäkinen, J. (2015). Non-tidal loading by the Baltic Sea: Comparison of modelled deformation with GNSS time series. *GeoResJ*, 7, 14-21.
107. Pamić, J. (2002). The Sava-Vardar Zone of the Dinarides and Hellenides versus the Vardar Ocean. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 95, 99–113.
108. Pearce, F. D., Rondenay, S., Sachpazi, M., Charalampakis, M., & Royden, L. H. (2012). Seismic investigation of the transition from continental to oceanic subduction along the western Hellenic Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7).
109. Pena Castellnou, S. (2018). Present-day 3D GPS velocity field of the Iberian Peninsula and implications for seismic hazard.
110. Petit G. and Luzum B. IERS Conventions (2010). Technical report, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. (IERS Technical Note ; 36), 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6.
111. Petrov, L. & Boy, J.-P. (2004). Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *Journal of Geophysical Research*, 109(B3). doi:10.1029/2003jb002500
112. International mass loading service <http://massloading.net>
113. Pospisil, L., Bartonek, D., Hefty, J., & Machotka, R. (2019, January). Geodetic Signs of the Recent Kinematical and Geodynamical Deformation of the Carpathian Arc. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 221, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

114. Ray, J., Altamimi, Z., Collilieux, X., & van Dam, T. (2008). Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates. *GPS solutions*, 12(1), 55-64.
115. Riguzzi, F., Crespi, M., Devoti, R., Doglioni, C., Pietrantonio, G., & Pisani, A. R. (2012). Geodetic strain rate and earthquake size: New clues for seismic hazard studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 206, 67-75.
116. Rodrigues, E. P. (2007). Estimation of crustal vertical movements due to atmospheric loading effects by GPS observations. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25, 45-50.
117. Rodriguez-Solano, C. J., Hugentobler, U., Steigenberger, P., Bloßfeld, M., & Fritsche, M. (2014). Reducing the draconitic errors in GNSS geodetic products. *Journal of Geodesy*, 88(6), 559-574
118. Rost, C. (2012). Modelling and Correction of Carrier Phase Multipath Effects
119. Ruhl, C. J., Melgar, D., Grapenthin, R., & Allen, R. M. (2017). The value of real-time GNSS to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 44(16), 8311-8319.
120. Santamaría-Gómez, A. (2019). SARI: interactive GNSS position time series analysis software. *GPS solutions*, 23(2), 1-6.
121. Savchyn, I., & Pronyshyn R. (2020) Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dnister Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and Geodynamics*, 11 (5), 391-400
122. Savchyn, I., & Vaskovets, S. (2018). Local geodynamics of the territory of Dniester pumped storage power plant. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 15(1), 41-47. <http://dx.doi.org/10.13168/AGG.2018.0002>
123. Savchyn, I., Tretyak, K., Petrov, S., Zaiats, O., & Brusak, I. (2019, June). Monitoring of mine fields at Stebnyk potassium deposit area by a geodetic and geotechnical method. In First EAGE Workshop on Assessment of

Landslide and Debris Flows Hazards in the Carpathians (Vol. 2019, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

124. Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M., & Rothacher, M. (2007). Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *Journal of Geodesy*, 81(12), 781-798.

125. Shih DCF, Wu YM, Lin GF, Hu JC, Chen YG, Chang CH (2008) Assessment of long-term variation in displacement for a GPS site adjacent to a transition zone between collision and subduction. *Stoch Environ Res Risk Assess* 22(3):401–410. <https://doi.org/10.1007/s00477-007-0128-z>

126. Sidorov D (2016) Receiver antenna and empirical multipath correction models for GNSS solutions. Ph.D., University of Luxembourg

127. Steigenberger, P. (2016). Accuracy of Current and Future Satellite Navigation Systems.

128. Steigenberger, P., Rothacher, M., Dietrich, R., Fritsche, M., Rülke, A., Vey, S. (2006). Reprocessing of a global GPS network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5).

129. Teke, K., Böhm, J., Nilsson, T., Schuh, H., Steigenberger, P., Dach, R., Shimizu, S. (2011). Multi-technique comparison of troposphere zenith delays and gradients during CONT08. *Journal of Geodesy*, 85(7), 395-413.

130. Tesmer V., Steigenberger P., van Dam T., and Mayer-Gürr T. Vertical deformations from homogeneously processed GRACE and global GPS long-term series. *Journal of Geodesy*, 85(5):291–310, 2011. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-010-0437-8.

131. Tian Y. (2011) iGPS: IDL tool package for GPS position time series analysis., *GPS Solution*, Vol. 15, No. 3, 299-303

132. Toksöz, M. N., Shakal, A. F., & Michael, A. J. (1979). Space-time migration of earthquakes along the North Anatolian fault zone and seismic gaps. *Pure and Applied Geophysics*, 117(6), 1258-1270.

133. Tregoning P., Watson C., Ramillien G., McQueen H., Zhang J.

(2009) Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS // Geophysical Research Letters. 36, L15401. DOI: 10.1029/2009GL038718..

134. Tregoning, P., & van Dam, T. (2005). Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level. Geophysical Research Letters, 32(22). doi:10.1029/2005gl024104

135. Tregoning, P., & Watson, C. (2009). Atmospheric effects and spurious signals in GPS analyses. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114(B9).

136. Tregoning, P., Burgette, R., McClusky, S. C., Lejeune, S., Watson, C. S. and McQueen, H.: (2013) A decade of horizontal deformation from great earthquakes. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(5), 2371-2381. DOI: 10.1002/jgrb.50154

137. Tretyak K., Periy S., Sidorov I., Babiy L. (2015) Complex High Accuracy Satellite and Field Measurements of Horizontal and Vertical Displacements of Control Geodetic Network on Dniester Hydroelectric Pumped Power Station (HPPS). Geomatics and environmental engineering, 9 (1), 83-96.

138. Tretyak, K., & Brusak, I. (2020). The research of interrelation between seismic activity and modern horizontal movements of the Carpathian-Balkan region based on the data from permanent GNSS stations. *Geodynamics*, 1(28), 5-18. DOI:10.23939/jgd2020.01.005.

139. Tretyak, K., & Romaniuk, V. (2018). The research on the interrelation between seismic activity and modern vertical movements of the european permanent gnss-stations. *Acta Geodynamica et Geomaterial*, 15(2), 143-164.

140. Tretyak, K., Brusak, I., Bubniak, I., Zablotskyi F. (2021). Impact of non-tidal atmospheric loading on civil engineering structures. *Geodynamics*, 2(31), 16-28, DOI:10.23939/jgd2021.02.016

141. Tretyak, K., Korliatovych, T., Brusak, I., (2021, October). Applying the statistical method of GNSS time series analysis for the detection of vertical

displacements of Dnister HPP-1 dam. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021». European Association of Geoscientists & Engineers.

142. Twardzik, C., Vergnolle, M., Sladen, A. and Avallone, A.: 2019, Unravelling the contribution of early postseismic deformation using sub-daily GNSS positioning. *Scientific reports*, 9(1), 1-12. DOI: 10.1038/s41598-019-39038-z

143. Ustaszewski, K., Herak, M., Tomljenović, B., Herak, D., & Matej, S. (2014). Neotectonics of the Dinarides–Pannonian Basin transition and possible earthquake sources in the Banja Luka epicentral area. *Journal of Geodynamics*, 82, 52-68.

144. van Dam T. M., Blewitt G., and Heflin M. B. (1994) Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B12):23939–23950,. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/94JB02122.

145. van Dam T., Collilieux X., Wuite J., Altamimi Z. and Ray J. (2012) Nontidal ocean loading: amplitudes and potential effects in GPS height time series. *J Geod* 86(11), 1043–1057. DOI: 10.1007/s00190-012-0564-5

146. Van Dam T., Wahr J., Milly C., Shmakin A., Blewitt G., Lavallée D., Larson K. Crustal displacements due to continental water loading // *Geophys. Res. Lett.* 28, 651–654. – 2001.

147. Van der Hoeven, A. G. A., Mocanu, V., Spakman, W., Nutto, M., Nuckelt, A., Matenco, L., ... & Ambrosius, B. A. C. (2005). Observation of present-day tectonic motions in the Southeastern Carpathians: results of the ISES/CRC-461 GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 239(3-4), 177-184.

148. VMF Data Server <https://vmf.geo.tuwien.ac.at>

149. Vrabec, M., Preseren, P. P., & Stopar, B. O. J. A. N. (2006). GPS study (1996-2002) of active deformation along the Periadriatic fault system in

northeastern Slovenia: tectonic model. *Geologica Carpathica-Bratislava-*, 57(1), 57.

150. Wahr J, Khan SA, van Dam T, Liu L, van Angelen JH, van den Broeke MR, Meertens CM (2013) The use of GPS horizontals for loading studies, with applications to northern California and southeast Greenland. *J Geophys Res Solid Earth* 118(4):1795–1806. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50104>

151. Ward, P. W., Betz, J. W., Hegarty, C. J., & Kaplan, E. D. (2006). Satellite signal acquisition, tracking, and data demodulation. *Understanding GPS: principles and applications*, 153-241.

152. Wdowinski S, Bock Y, Baer G, Prawirodirdjo L, Bechor N, Naaman S, Knafo R, Forrai Y, Melzer Y (2004) GPS measurements of GPS Solut (2018) 22:1 1 3 Page 13 of 13 1 current crustal movements along the Dead Sea Fault. *J Geophys Res* 109(B05403):1–16. <https://doi.org/10.1029/2003JB002640>

153. Wilkinson, M. W., McCaffrey, K. J., Jones, R. R., Roberts, G. P., Holdsworth, R. E., Gregory, L. C., ... & Iezzi, F. (2017). Near-field fault slip of the 2016 Vettore M w 6.6 earthquake (Central Italy) measured using low-cost GNSS. *Scientific Reports*, 7(1), 1-7.

154. Williams S. D. P. and Penna N. T. Non-tidal ocean loading effects on geodetic GPS heights. *Geophysical Research Letters*, 38(9), 2011. ISSN 1944-8007. doi: 10.1029/2011GL046940.

155. Wu, D., Yan, H., & Shen, Y. (2017). TSAalyzer, a GNSS time series analysis software. *Gps Solutions*, 21(3), 1389-1394.

156. Wunsch C. and Stammer D. Atmospheric loading and the oceanic "inverted barometer" effect. *Reviews of Geophysics*, 35(1):79–107, 1997. ISSN 1944-9208. doi: 10.1029/96RG03037.

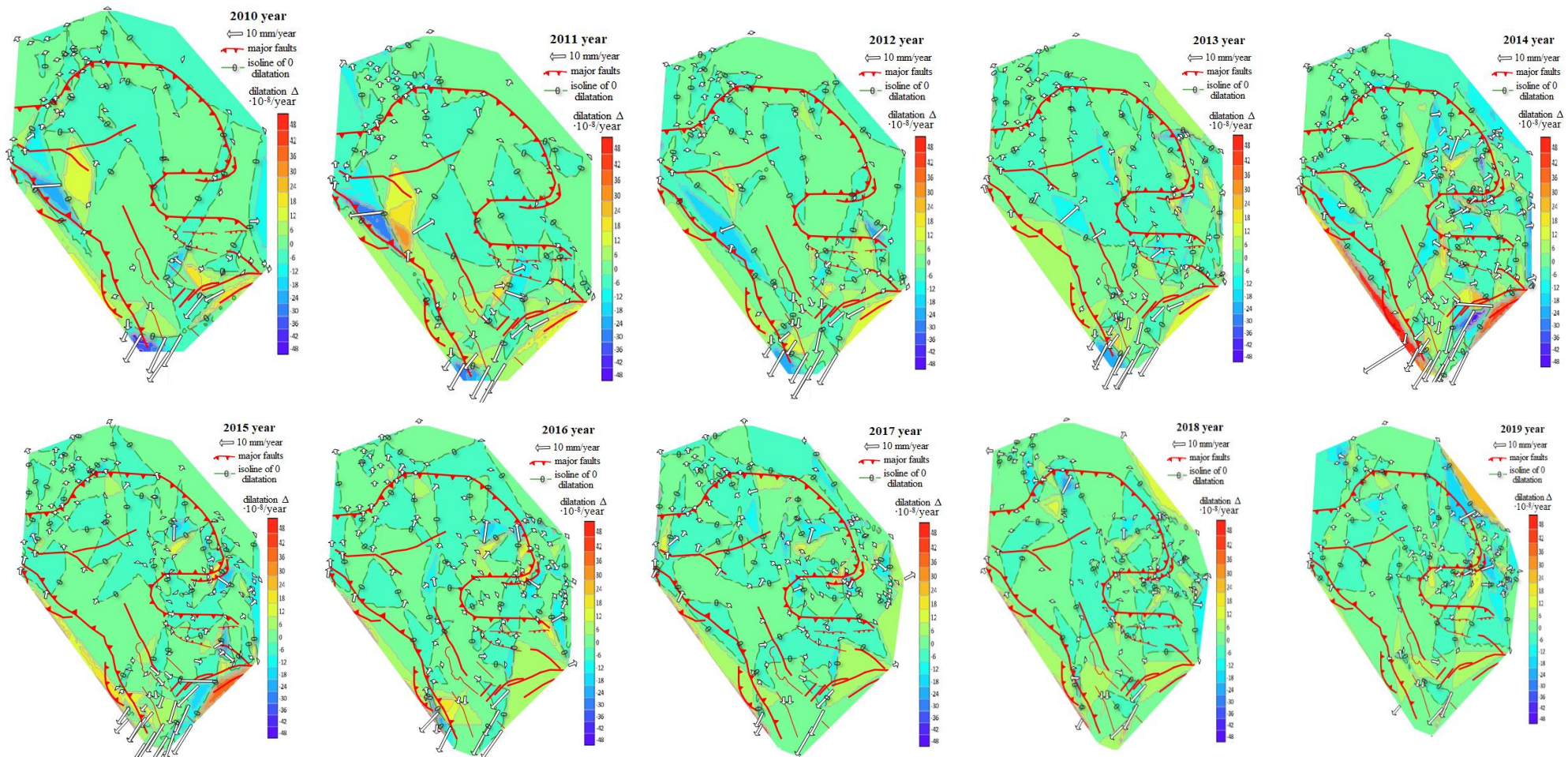
157. Yavaşoğlu, H. H., Kalkan, Y., Tiryakioğlu, İ., Yigit, C. O., Özbey, V., Alkan, M. N., Bilgi S. & Alkan, R. M. (2018). Monitoring the deformation

and strain analysis on the Ataturk Dam, Turkey. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 94-107. DOI: 10.1080/19475705.2017.1411400

158. Yue, C., Dang, Y., Xu, C., Gu, S., & Dai, H. (2020). Effects and Correction of Atmospheric Pressure Loading Deformation on GNSS Reference Stations in Mainland China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.

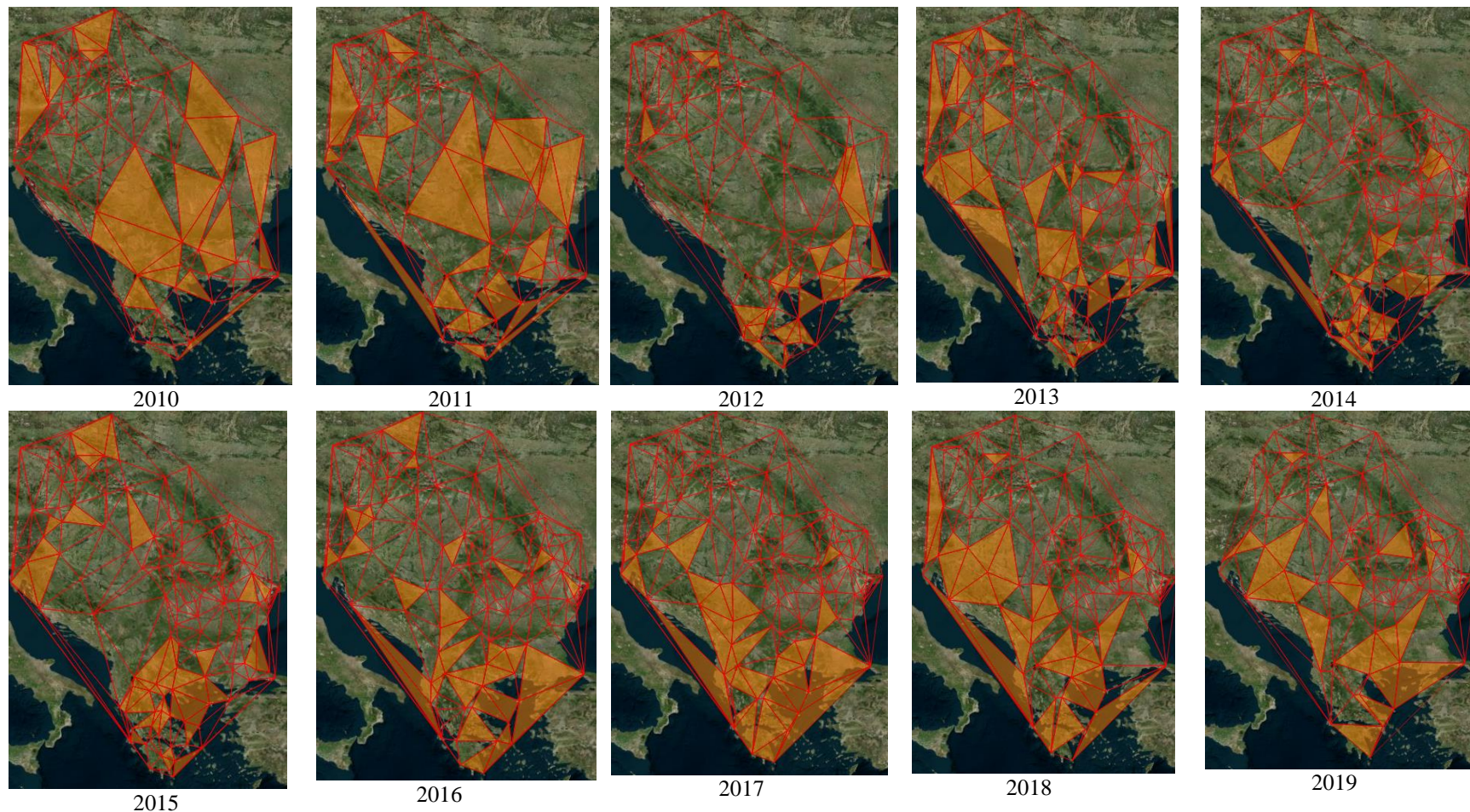
159. Zahran, K. H., Jentzsch, G., & Seeber, G. (2005). World-wide synthetic tide parameters for gravity and vertical and horizontal displacements. *Journal of Geodesy*, 79(6), 293-299.

Карто-схеми Карпато-Балкан з параметрами швидкості дилатації та зміщеннями ГНСС-станцій з 2010 по 2019 роки



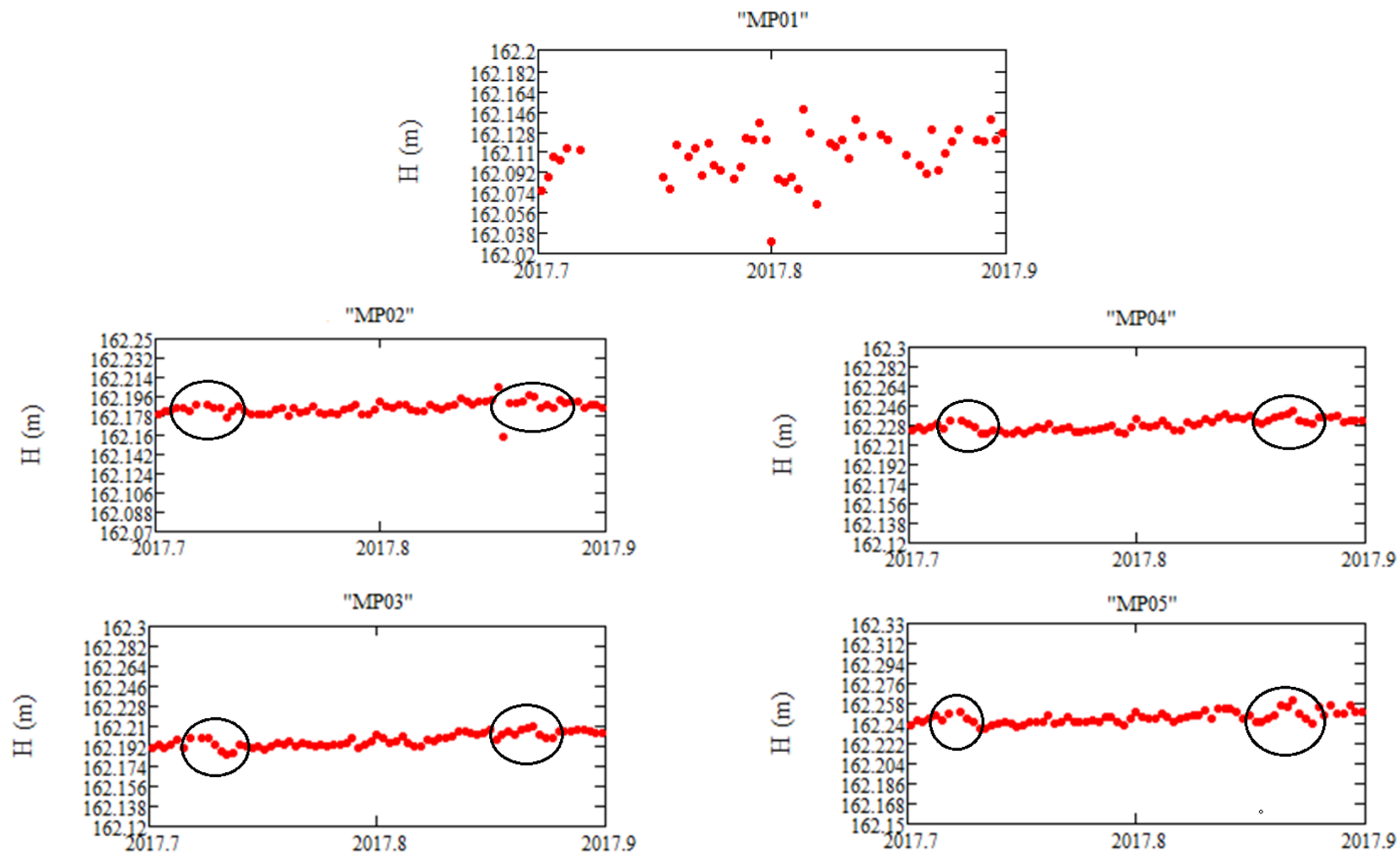
Додаток Б

Карто-схеми територій Карпато-Балкан, охоплених високим ступенем кореляції між a та $|\Delta|$ у 2010-2019 роках

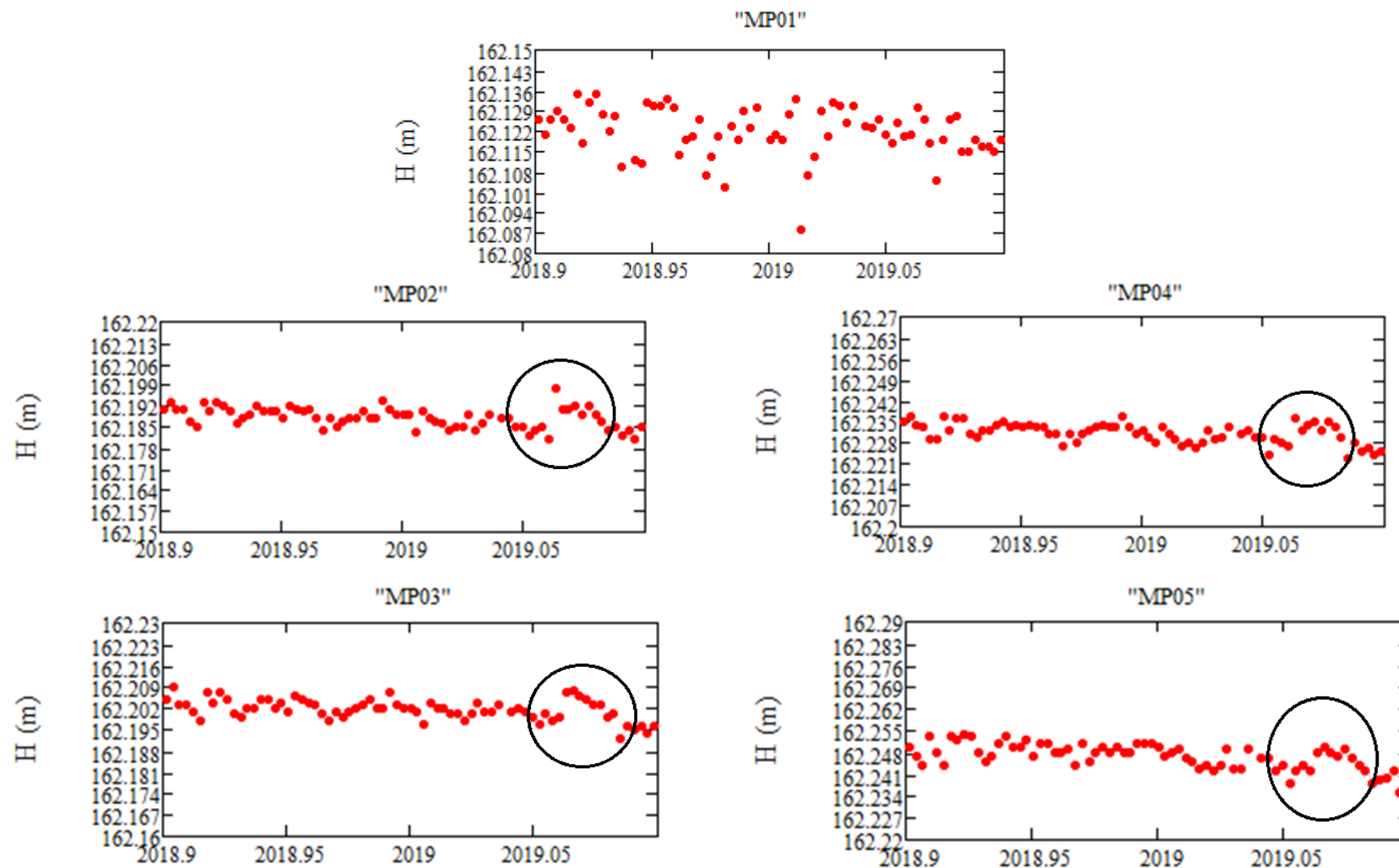


△ – Території без кореляції між параметрами a та $|\Delta|$ ▽ – Відібрані території з високим показником кореляції між параметрами a та $|\Delta|$

Часовий ряд зміни висоти контрольних пунктів МР01-МР05 на епоху 2017.8 ±0.1 року

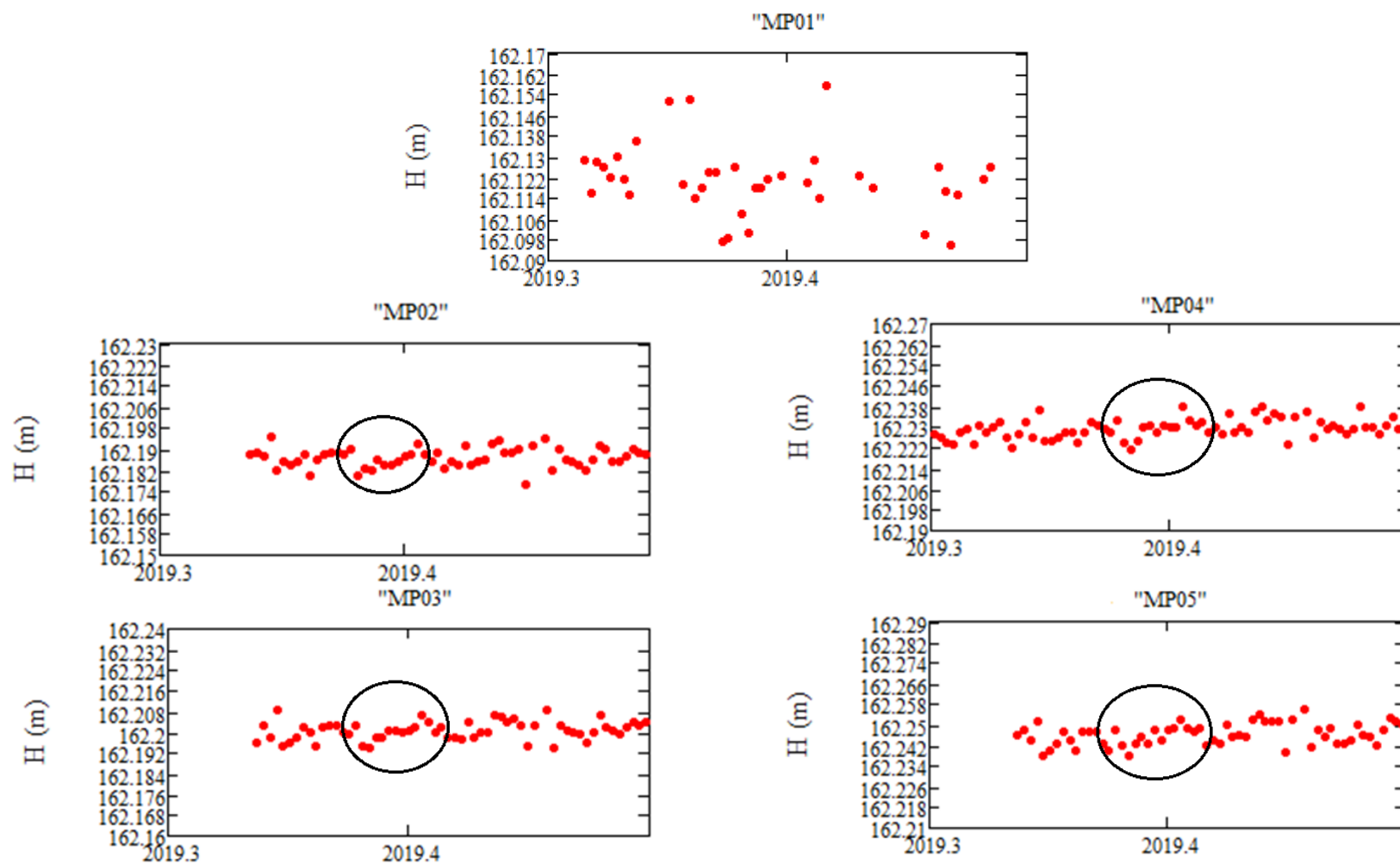


Часовий ряд зміни висоти контрольних пунктів МР01-МР05 на епоху 2019.0 ± 0.1 року

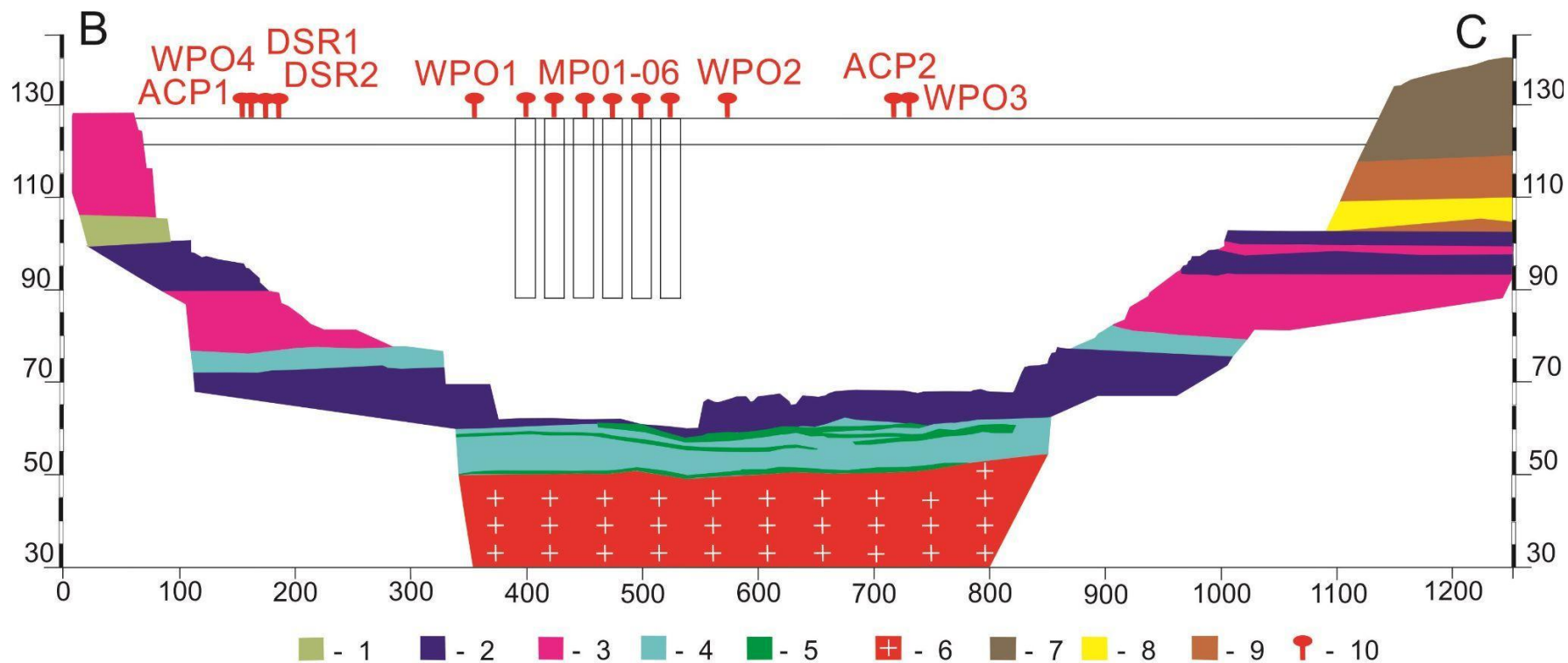


Додаток В.3

Часовий ряд зміни висоти контрольних пунктів MP01-MP05 на епоху 2019.4 ± 0.1 року



Інженерно-геологічний профіль по лінії ВС, паралельно дамбі греблі Дністровської ГЕС-1, за матеріалами [14]



Умовні позначення: 1 - аргіліт; 2 - пісковик; 3 - алевроліт; 4 - нерівномірне перешарування алевроліту та пісковика з аргелітами; 5 - гравеліт; 6 - граніт; 7 - суглинок і глина; 8 - гравій і галька в піщаному заповнювачі; 9 - гравій і галька в супіщано-суглинистому заповнювачі; 10 – ГНСС-станції спроектовані на профіль