

**Остан-Михайло Володимирович Серант**

Кафедра вищої геодезії та астрономії

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: [ostap-mykhailo.v.serant@lpnu.ua](mailto:ostap-mykhailo.v.serant@lpnu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6150-3280>

## МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ РЕФЕРЕНЦНИХ ГНСС СТАНЦІЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

У статті подано методику підготовки, формування та опрацювання добових RINEX-даних референцних ГНСС-станцій для визначення параметрів деформації земної поверхні. Використано 44 референцних ГНСС-станцій мережі GeoTerrace за період 01.01.2017 – 16.03.2024. Дані проходять контроль повноти, точності та стабільності спостережень, опрацьовуються в програмному комплексі GipsyX методом точного позиціонування (PPP), унаслідок чого отримано координати в ITRF2014 (епоха 2024) які перетворені в систему ETRF2014. Для вибраної мережі за координатами станцій створено триангуляцію Делоне (47 трикутників) і для центру кожного трикутника визначено параметри деформації (дилатація, відносний зсув, максимальний стиск або розтяг, обертання), це дає основу для аналізу просторової неоднорідності деформації поверхні та подальшої геодинамічної інтерпретації.

**Ключові слова:** ГНСС спостереження; GipsyX; ITRF2014; ETRF2014; часові ряди координат; вектори швидкостей; точне позиціонування (PPP); триангуляція Делоне; деформації земної кори.

Рис.: 3. Табл.: 4. Бібл.: 13.

**Актуальність теми дослідження.** ГНСС-мережі референцних станцій забезпечують неперервні часові ряди координат і дозволяють кількісно оцінювати сучасні рухи та деформації земної поверхні. Сучасні задачі геодинамічного моніторингу та моніторингу інженерних споруд потребують послідовної технології підготовки й опрацювання даних референцних ГНСС-станцій, оскільки саме довготривалі часові ряди координат відображають як повільні трендові зміщення, так і короткочасні аномалії, що формують деформаційні індикатори земної поверхні. Метод /Precise Point Positioning/ був описаний як ефективний підхід для опрацювання спостережень великих мереж без побудови відносних векторів і забезпечує отримання добових розв'язків координат, придатних для оцінювання швидкостей та подальшого деформаційного аналізу [1]. Достовірність таких результатів залежить від узгодженого застосування глобальної системи відліку та точних продуктів міжнародних сервісів; внесок IGS у реалізацію ITRF2014 визначає принципову основу для порівнюваності результатів між різними наборами даних і часовими інтервалами [2]. Для забезпечення метрологічної коректності опрацювання необхідно використовувати стандартизовані моделі та процедури (припливні ефекти, релятивістські поправки, параметри орієнтації Землі тощо), які регламентуються IERS Conventions (2010) [3], а також точні тропосферні моделі [4]. Таким чином, технологія підготовки даних і єдність моделей опрацювання прямо визначає якість швидкісних оцінок і похідних деформаційних параметрів.

ГНСС-часові ряди мають складну шумову структуру та сезонні компоненти, які впливають на оцінювання швидкостей і можуть маскувати слабкі деформаційні сигнали. Класичні дослідження показують наявність комбінації шуму в щоденних координатних розв'язках і демонструють, що ігнорування реалістичних шумових моделей призводить до завищення точності трендів та неоднозначної інтерпретації результатів [5, 6]. У задачах деформаційного аналізу додатковий ризик створює перехід від точкових швидкостей до площинних деформаційних полів: сегментні підходи на основі триангуляції (зокрема Делоне) є простими для реалізації, але мають підвищену чутливість до похибок вихідних швидкостей і потребують ретельної попередньої фільтрації та контролю якості [7]. Практичні дослідження локальних деформацій на трикутниках показують, що навіть у тектонічно стабільних регіонах нестабільність окремих станцій здатна суттєво спотворювати деформаційні оцінки, тому саме етапи підготовки та верифікації даних визначають на-

дійність кінцевих параметрів деформації [8]. Отже, розроблення та опис методики підготовки даних опрацювання референцних ГНСС-спостережень є актуальним, оскільки воно забезпечує відтворюваний перехід від «сирих» добових файлів до кількісних параметрів деформацій, придатних для подальшої геодинамічної інтерпретації.

**Постановка проблеми.** Необхідно створити послідовну методику переходу від великого масиву добових ГНСС-спостережень референцних станцій до кількісних параметрів деформацій земної поверхні, які придатні для геодинамічної інтерпретації. Добові RINEX-файли формують неоднорідні за якістю часові ряди, тому технологія підготовки даних повинна включати контроль повноти, стабільності спостережень і виявлення аномалій, оскільки ці чинники безпосередньо впливають на оцінювання швидкостей [5; 6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Опрацювання ГНСС-даних у геодинаміці зводиться до двох послідовних задач: формування однорідних координатних часових рядів і швидкостей у стабільній системі відліку та перетворення цих швидкостей у деформаційні індикатори, що відображають просторові рухи. Метод PPP /Precise Point Positioning/ забезпечує опрацювання великих мереж із використанням точних орбіт і годинників та формування добових розв'язків без побудови відносних векторів [1], а порівнюваність швидкостей між епохами визначається узгодженістю ITRF/IGS і застосуванням стандартизованих моделей редуцій (IERS Conventions) та коректного моделювання тропосфери (наприклад, VMF1) [2–4, 9]. Оскільки ГНСС-часові ряди містять сезонні компоненти та поєднання білого і корельованого шуму, оцінювання швидкостей потребує реалістичних моделей невизначеностей, а якість підготовки даних прямо впливає на стабільність трендів [5, 6]. Для деформаційного аналізу з дискретних швидкостей застосовують різні підходи, серед яких триангуляція Делоне є зручною для локальної оцінки тензора деформацій на елементарних ділянках, але вимагає контролю надійності через чутливість до геометрії мережі та похибок швидкостей [7,8]. Отже, сучасний стан досліджень формує чіткий висновок: деформаційний аналіз є коректним лише тоді, коли він спирається на однорідно підготовлені дані та на швидкості з адекватними похибками, отриманими з урахуванням шумових властивостей ряду.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У сучасних публікаціях широко описуються методи точного позиціонування та загальні принципи формування ГНСС-часових рядів, однак недостатньо системно представлено саме технологічний ланцюг підготовки даних, який забезпечує відтворюваний перехід від добових файлів спостережень до деформаційних показників земної поверхні.

Практично важливі етапи (контроль повноти і стабільності, узгодження вхідних продуктів, відбір станцій, фіксація проміжних результатів) часто описуються фрагментарно, тому опрацювання складно повторити для іншої мережі або інтервалу. Отже, невирішеною частиною загальної проблеми залишається методика, яка на прикладі показує етапи підготовки даних референцних ГНСС-станцій, прецизійного опрацювання, оцінювання швидкостей і розрахунку деформацій у локальних елементарних ділянках з обов'язковим контролем якості та відтворюваності результатів.

**Мета дослідження** полягає у формуванні відтворюваної технології підготовки та опрацювання добових спостережень референцних ГНСС-станцій, яка забезпечує отримання однорідних часових рядів координат і надійних оцінок швидкостей зміщення земної поверхні. Дослідження демонструє типові вихідні та проміжні продукти опрацювання і приклад їх використання в деформаційному аналізі шляхом формування елементарних ділянок за триангуляцією Делоне та обчислення деформаційних характеристик для вибраних трикутників.

**Виклад основного матеріалу.**

### 1. Вихідні дані та попередня підготовка.

Вихідними даними слугують добові файли спостережень у форматі RINEX за період з 1 січня 2017 року по березень 2024 року, що містять фазові та кодові вимірювання, а

також допоміжні навігаційні та антенні відомості. До аналізу залучаються 44 станції мережі GeoTerrace, розташовані у західній Україні та суміжних регіонах Польщі й Румунії (рис. 1, табл. 1).

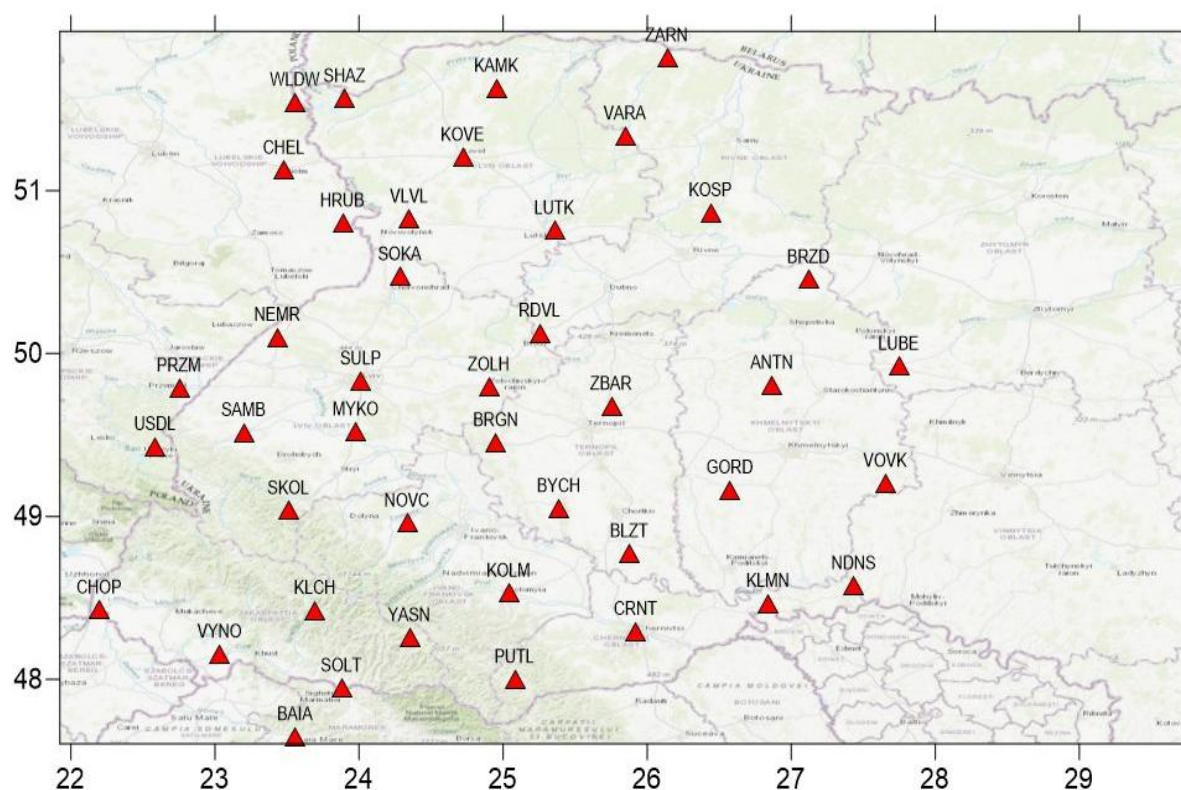


Рис. 1. Розташування ГНСС станцій мережі Geo Terrace вибраних для опрацювання  
Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 1 – Розподіл станцій за територією

Територія	Кількість станцій
Західна Україна	37
Польща	5
Румунія	2
Разом	44

Джерело: розроблено авторами.

На етапі підготовки дані впорядковуються за станціями та датами, перевіряється повнота добових файлів і наявність пропусків, а також фіксуються можливі аномалії, які впливають на стабільність часових рядів (стрибки, викиди, перерви у спостереженнях). Така попередня процедура забезпечує контроль якості вхідної інформації та зменшує ризик появи локальних похибок у швидкостях і деформаційних оцінках, що є критичним для подальшого деформаційного аналізу за нерегулярною мережею пунктів. Більшість станцій демонструє повноту спостережень на рівні 90–95 %, але окремі пункти мають недостатню кількість даних, такі станції не беруться для подальшого дослідження.

## 2. Опрацювання RINEX-даних у GipsyX методом PPP та приведення координат до ETRF2014.

Після сортування та контролю якості добові RINEX-файли опрацьовуються у програмному комплексі GipsyX, який реалізує прецизійні схеми супутникового позиціонування для наукових та прикладних задач геодезії. GipsyX орієнтується на задачі позиціонування, навігації, часу та геодинаміки; він підтримує ГНСС (а також SLR і DORIS) і

реалізує узгоджені моделі та алгоритми оцінювання параметрів у глобальній системі відліку. У практичному застосуванні GipsyX формує добові координатні розв'язки та супровідні статистики якості, а також оцінює параметри моделі (зокрема тропосферні складові) у межах єдиної конфігурації запуску, що підсилює відтворюваність результатів у довгих часових інтервалах [10].

Опрацювання виконується методом точного позиціонування PPP /Precise Point Positioning/, у межах якого координати станції визначаються на основі фазових і кодових вимірювань у поєднанні з точними супутниковими продуктами; такий підхід є придатним для довготривалих мереж, оскільки забезпечує однорідні добові розв'язки без залежності від вибору опорної станції, а отже підтримує надійне оцінювання лінійних трендів (швидкостей), які далі використовуються як основа деформаційних показників [1]. Приклад застосування точного позиціонування для мережі GeoTerrace з подальшим аналізом сучасних горизонтальних рухів демонструється у [13], а попередня верифікація та відбір станцій як елемент підготовки даних висвітлюються у [12].

У результаті PPP-опрацювання формуються добові координатні розв'язки станцій у системі ITRF2014, приведені до епохи 2024 (частину результатів, для прикладу, наведено в табл. 2). Узгодженість результатів у глобальній системі відліку є необхідною умовою коректного порівняння координатних часових рядів і швидкостей у межах регіону та між різними часовими інтервалами [9]. Для коректного визначення параметрів деформацій координати перетворено в ETRF2014 на епоху 2024 (табл. 3). Перетворення виконано за допомогою онлайн-інструмента EPN CB ETRF/ITRF Coordinate Transformation Tool ([https://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/coord\\_trans/](https://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/)), який підтримує трансформацію координат та швидкостей руху між реалізаціями ITRF та ETRF з урахуванням епохи [11].

Таблиця 2 – Координати та швидкості руху референцих ГНСС станцій у системі ITRF2014 (епоха 2024)

Станція	X, м	Y, м	Z, м	Vx, м/рік	Vy, м/рік	Vz, м/рік
ANTN	3679010	1863895	4849448	0.0219	0.0135	-0.0036
BAIA	3945839	1720429	4691083	0.0228	0.0151	0.0028
BLZT	3789086	1838002	4774355	0.0236	0.0135	-0.0040
BRGN	3766420	1752408	4824043	0.0223	0.0140	-0.0006
BRZD	3621398	1854955	4895618	0.0216	0.0143	-0.0030
BYCH	3783671	1795776	4794768	0.0225	0.0134	-0.0023

Джерело: сформовано за результатами опрацювання.

Для забезпечення відтворюваності опрацювання доцільно зберігати такі проміжні продукти: а) добові координатні розв'язки з оцінками невизначеностей; б) узгоджені часові ряди координат у локальній системі (East–North–Up) та параметри їх трендів; в) оцінені модельні параметри (зокрема тропосферні складові) і файли налаштувань/журнали виконання, що дозволяють відтворити конфігурацію запуску, (г) результати трансформації ITRF2014→ETRF2014 із зазначенням епохи. Такий набір проміжних продуктів спрощує контроль якості, інтерпретацію аномалій часових рядів і подальше визначення деформацій на елементарних ділянках (трикутниках) [10; 11; 13].

Таблиця 3 – Координати та швидкості руху референцих ГНСС станцій у системі ETRF2014 (епоха 2024)

Станція	X, м	Y, м	Z, м	Vx, м/рік	Vy, м/рік	Vz, м/рік
ANTN	3679010.89	1863894.3	4849447.5	0.0435	0.0125	0.0101
BAIA	3945840.09	1720428	4691082.6	0.0241	-0.0092	0.0142
BLZT	3789086.35	1838001.2	4774354.6	0.0379	0.0073	0.0788
BRGN	3766420.82	1752407	4824043	0.0276	-0.004	0.0289
BRZD	3621399	1854954.8	4895617.8	0.0472	0.0203	0.1181
BYCH	3783671.94	1795775.2	4794768	0.0366	0.0056	0.0721

Джерело: сформовано за результатами опрацювання.

Після приведення координат до ETRF2014 (епоха 2024) формуються узгоджені часові ряди координат у топоцентричній системі (East–North–Up), для яких оцінюються лінійні тренди та їх невизначеності, що визначають швидкості зміщення станцій. Далі дискретні швидкості пунктів використовуються для побудови просторового деформаційного поля шляхом формування елементарних ділянок за триангуляцією Делоне та обчислення параметрів деформації для кожного трикутника [7; 8].

#### 4. Триангуляція Делоне та розрахунок параметрів деформації.

Для переходу від точкових швидкостей до площинного подання деформацій застосовується триангуляція Делоне, яка формує розбиття мережі станцій на трикутники з властивістю «порожнього описаного кола» та зазвичай мінімізує появу надто витягнутих елементів. Кожен трикутник розглядається як елементарна ділянка, у межах якої поле швидкостей вважається лінійним, що дозволяє локально апроксимувати поле швидкостей лінійною моделлю та обчислювати основні параметри деформацій (дилатацію, зсув, обертання) у центрах трикутників. У прикладних роботах трикутне моделювання широко використовується для локального деформаційного аналізу, але водночас потребує контролю надійності, оскільки чутливе до похибок швидкостей і геометрії мережі; саме тому воно найкраще працює в парі з фільтрацією нестабільних станцій і коректними оцінками невизначеностей швидкостей.

Така геометрія є доцільною для локального деформаційного аналізу на нерегулярній мережі пунктів, оскільки забезпечує природну топологію сусідства між станціями та прозору інтерпретацію результатів у межах елементарних ділянок [7,8]. На рис.2 наведена схема триангуляції Делоне, сформована за координатами 44 референційних ГНСС-станцій мережі GeoTerrace.

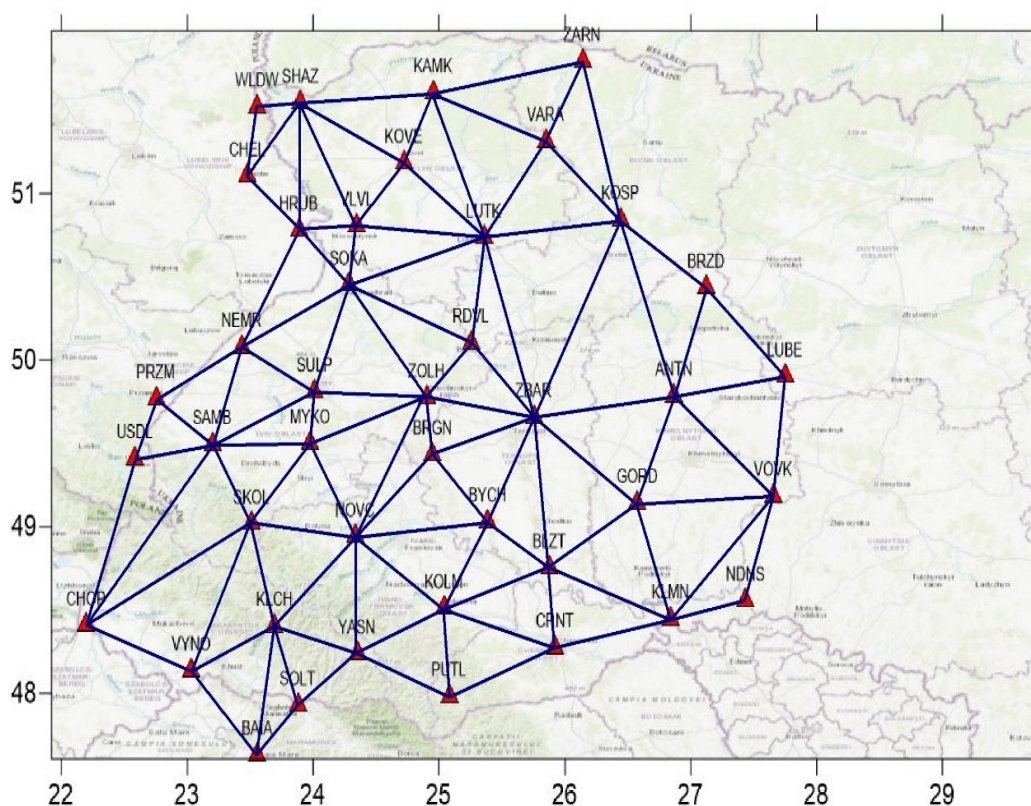


Рис. 2. Триангуляційна мережа Делоне, сформована за референційними ГНСС-станціями мережі GeoTerrace

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3, для прикладу, наведено один із трикутників утвореної мережі – трикутник FOLM–PUTL–YASN, який ілюструє елементарну ділянку, для центру якої визначаються параметри деформацій.

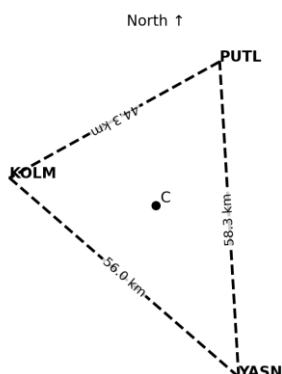


Рис. 3. Приклад елементарного трикутника триангуляції Делоне (трикутник FOLM–PUTL–YASN) та його центру С.

Джерело: розроблено авторами.

Для кожного трикутника Делоне побудовано окрему геометричну схему, на якій відображено конфігурацію мережі, довжини сторін, орієнтацію відносно півночі та вектори горизонтальних швидкостей ГНСС-станцій (рис. 3). Такі схеми використано для візуального контролю коректності деформаційних розрахунків.

Для кожного трикутника Делоне з вершинами  $i = 1, 2, 3$  за відомими координатами вершин  $(X_i, Y_i)$  (у системі (East–North) та горизонтальними швидкостями  $(V_{xi}, V_{yi})$ , де  $V_x$  відповідає складовій на схід (E), а  $V_y$  – на північ (N)) обчислено параметри горизонтальних деформації, які належить до обчисленого центру трикутника: відносний зсув  $\gamma_1, \gamma_2$ , по осях координат X, Y;  $\gamma$  - загальний відносний зсув; дилатація  $\Delta$ ; максимальний і мінімальний стиск, або розтяг  $E_1, E_2$ , ( $\Theta$  - азимут головної осі деформації  $E_1$ ). Для обчислень  $\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega$  використовуються формули:

$$\gamma_1 = \frac{x_j v_k + y_j u_k - x_k v_j - y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j};$$

$$\gamma_2 = \frac{x_j u_k - y_j v_k - x_k u_j + y_k v_j}{x_j y_k - x_k y_j};$$

$$\Delta = \frac{x_j v_k - y_j u_k - x_k v_j + y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j};$$

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

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2};$$

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

У написаних рівняннях величини  $x_j$  і  $y_j$  є приростками координат вершин трикутників 2 і 3 відносно вершини 1, тобто  $x_j = X_j - X_1, y_j = Y_j - Y_1$  і т. д. Аналогічно:  $u_j = V_{xj} - V_{x1}, v_j = V_{yj} - V_{y1}$ ...

Азимути напрямків осей головних деформацій визначаються за формулою:

$$\operatorname{tg} 2\theta_0 = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}.$$

Обчислені швидкості деформацій для кожного з трикутників, відносяться до їх центрів ваги і є безрозмірними величинами, що забезпечує єдину просторову прив'язку результатів і дозволяє надалі будувати карти дилатації/зсуву в центрах елементарних трикутників. Для прикладу в таблиці 4 наведено визначені параметри деформацій для частини трикутників мережі.

Таблиця 4 – Приклад визначених параметрів деформацій за трикутниками Делоне

Трикутник	центр тр. X (м)	центр тр. Y (м)	$\gamma_1$ $\cdot 10^{-10}$ /рік	$\gamma_2$ $\cdot 10^{-10}$ /рік	$\gamma$ $\cdot 10^{-10}$ /рік	$\Delta$ $\cdot 10^{-10}$ /рік	$E_1$ $\cdot 10^{-10}$ /рік	$E_2$ $\cdot 10^{-10}$ /рік	$E$ $\cdot 10^{-10}$ /рік	$\Theta$ °	$\omega \cdot 10^{-10}$ рад/рік
KOSP-ANTN-BRZD	3637302	1838278	-0.86	1.94	-0.14	1.08	1.95	-0.86	2.81	177.21	-1.5
ANTN-LUBE-BRZD	3647184	1878151	-1.09	2.03	0.60	0.94	2.14	-1.20	3.34	190.60	-2.3
SOLT-VYNO-BAIA	3927409	1706993	-2.77	-0.69	-1.89	-3.47	0.43	-3.89	4.32	149.38	-1.4
VOVK-LUBE-ANTN	3672811	1905795	-3.71	1.15	-0.96	-2.56	1.33	-3.90	5.23	169.28	-1.9
VYNO-KOST-CHOP	3907986	1627544	-0.31	0.51	0.09	0.20	0.52	-0.32	0.84	185.92	-4.9

Джерело: розроблено авторами.

За результатами спостережень швидкостей перманентних ГНСС-станцій мережі GeoTerrace побудовано триангуляційну схему, яка складається з 47 трикутників Делоне. Для центру кожного трикутника визначено параметри деформацій, зокрема відносний зсув  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ;  $\square$  - загальний відносний зсув; дилатація  $\square$ ; максимальний і мінімальний стиск, або розтяг  $E_1$ ,  $E_2$  та параметр обертання  $\omega$ . Отриманий масив значень формує основу для подальшого аналізу просторової неоднорідності деформацій земної поверхні та їх інтерпретації в контексті сучасних геодинамічних процесів.

**Висновки.** Запропонована методика забезпечує послідовний і відтворюваний перехід від добових RINEX-даних референціальних ГНСС-станцій до кількісних параметрів деформацій земної поверхні на основі контролю повноти, точності та стабільності спостережень.

Дані ГНСС-спостережень опрацьовані у програмному комплексі GipsyX методом точного позиціонування (PPP), що забезпечило формування однорідних координатних розв'язків. Формування координатних часових рядів і векторів швидкостей для 44 станцій за період 01.01.2017–16.03.2024 створило вихідну основу для просторового деформаційного аналізу. Створено мережу із 47 трикутників за принципом Делоне, яка забезпечує локальне подання поля швидкостей, та визначено для цих центрів трикутників дилатацію, відносний зсув, максимальний стиск або розтяг і параметр обертання. Визначені параметри горизонтальних деформацій формують якісну основу для аналізу просторової неоднорідності деформацій земної поверхні та будуть використані для подальшої геодинамічної інтерпретації.

### Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час підготовки цього матеріалу автор використовував ChatGPT для мовного редагування та структурування викладу. Автор перевіряв і відредагував зміст та бере на себе повну відповідальність за результати та інтерпретації, наведені у статті.

### Список використаних джерел

- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.

2. Rebischung, P., Altamimi, Z., Ray, J., & Garayt, B. (2016). The IGS contribution to ITRF2014. *Journal of Geodesy*, 90(7), 611–630. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0897-6>.
3. Petit, G., & Luzum, B. (Eds.). (2010). *IERS conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36)*. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
4. Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B02406. <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>.
5. Williams, S. D. P. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B03412. <https://doi.org/10.1029/2003JB002741>.
6. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS coordinate time series. *Journal of Geodesy*, 87(4), 351–360. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0600-4>.
7. Wu, Y., & Jiang, Z. (2011). Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophysical Journal International*, 185(2), 703–717. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04976.x>.
8. Bogusz, J., Kłos, A., Figurski, M., Jarosiński, M., & Kontny, B. (2013). Investigation of the reliability of local strain analysis by means of the triangle modelling. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 10(3), 293–305. <https://doi.org/10.13168/AGG.2013.0029>.
9. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.
10. Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., et al. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research*, 66(3), 469–489. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015>.
11. EPN CB. (n.d.). *ETRF/ITRF Coordinate Transformation Tool (ECTT)*. Royal Observatory of Belgium. Retrieved March 15, 2026, from [https://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/coord\\_trans/](https://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/).
12. Doskich, S., & Serant, O.-M. (2024). Verification of GNSS stations from the GeoTerrace network for further geodynamic studies using PS-NETM software. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510008>.
13. Доскіч, С., Серант, О.-М., & Серант, О. (2025). Опрацювання спостережень ГНСС мережі «GeoTerrace» методом точного позиціонування для дослідження сучасних горизонтальних рухів земної кори Західної України. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1(49), 84–90. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-49-84-90>.

## References

1. Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.
2. Rebischung, P., Altamimi, Z., Ray, J., & Garayt, B. (2016). The IGS contribution to ITRF2014. *Journal of Geodesy*, 90(7), 611–630. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0897-6>.
3. Petit, G., & Luzum, B. (Eds.). (2010). *IERS conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36)*. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
4. Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B02406. <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>.
5. Williams, S. D. P. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B03412. <https://doi.org/10.1029/2003JB002741>.
6. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS coordinate time series. *Journal of Geodesy*, 87(4), 351–360. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0600-4>.
7. Wu, Y., & Jiang, Z. (2011). Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophysical Journal International*, 185(2), 703–717. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04976.x>.

8. Bogusz, J., Kłos, A., Figurski, M., Jarosiński, M., & Kontny, B. (2013). Investigation of the reliability of local strain analysis by means of the triangle modelling. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 10(3), 293–305. <https://doi.org/10.13168/AGG.2013.0029>.
9. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.
10. Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., et al. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research*, 66(3), 469–489. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015>.
11. EPN CB. (n.d.). *ETRF/ITRF Coordinate Transformation Tool (ECTT)*. Royal Observatory of Belgium. Retrieved March 15, 2026, from [https://www.epncb.oma.be/\\_productservices/coord\\_trans/](https://www.epncb.oma.be/_productservices/coord_trans/).
12. Doskich, S., & Serant, O.-M. (2024). Verification of GNSS stations from the GeoTerrace network for further geodynamic studies using PS-NETM software. *International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2024”*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510008>.
13. Doskich, S., Serant, O.-M., & Serant, O. (2025). *Opratsiuvannia sposterezhen HNSS merezhi “GeoTerrace” metodom tochnoho pozytsionuvannia dlia doslidzhennia suchasnykh horizontalnykh rukhiv zemnoi kory Zakhidnoi Ukrainy* [Processing GNSS observations of the “GeoTerrace” network by precise positioning to study modern horizontal crustal movements of Western Ukraine]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Recent advances in surveying science and technology*, I(49), 84–90. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-49-84-90>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.03.2026

UDC 528. 481; 528.06

### ***Ostap-Mykhailo Serant***

Department of Higher Geodesy and Astronomy

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: [ostap-mykhailo.v.serant@lpnu.ua](mailto:ostap-mykhailo.v.serant@lpnu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6150-3280>

## **METHODOLOGY FOR PREPARING OBSERVATION DATA FROM REFERENCE GNSS STATIONS FOR EARTH SURFACE DEFORMATION ANALYSIS**

*This paper presents a methodology for the preparation, structuring, and processing of daily RINEX data from reference GNSS stations in order to derive quantitative parameters of Earth surface deformation. The study uses observations from 44 reference stations of the GeoTerrace network collected over the period 01.01.2017–16.03.2024. The input data undergo quality control focused on completeness, accuracy, and stability of observations, including the identification of gaps and anomalous daily solutions that may affect the reliability of coordinate time series. The processing stage is performed in the GipsyX software suite using the Precise Point Positioning (PPP) approach, which provides homogeneous daily coordinate solutions suitable for long-term velocity estimation. As an output of PPP processing, station coordinates are obtained in ITRF2014 (epoch 2024) and subsequently transformed to the ETRF2014 system to support regional interpretation within the European reference-frame context. Based on the station coordinates, a Delaunay triangulation is constructed for the selected network (47 triangles). For the centroid of each triangle, deformation parameters are computed from the locally linear approximation of the horizontal velocity field, including dilatation, relative shear, maximum compression or extension (principal strain), and rotation. The resulting set of deformation characteristics provides a consistent basis for analysing spatial heterogeneity of surface deformation and supports further geodynamic interpretation within the study region.*

**Keywords:** GNSS observations; GipsyX; ITRF2014; ETRF2014; coordinate time series; velocity vectors; Precise Point Positioning (PPP); Delaunay triangulation; crustal deformation; strain parameters.

Fig.: 3. Table: 4. References: 13.