УДК 528.22, 551.242

Корнилій ТРЕТЯК, Іван БРУСАК

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна.

https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.027

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ КОРОТКОТРИВАЛИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЗА СТАТИСТИЧНИМ АНАЛІЗОМ ЧАСОВИХ СЕРІЙ GNSS-СТАНЦІЙ

Короткотривалі геодинамічні зміщення земної поверхні сьогодні недостатньо вивчені, адже їх однозначна ідентифікація є доволі складною задачею. Такі геодинамічні процеси можна помітити, розглядаючи низку спостережень GNSS-станцій тривалістю до 2 місяців, а при порівнянні річних рядів ці зміщення координат візуально практично непомітні. З метою пошуку таких короткотривалих геодинамічних зміщень земної поверхні у цій роботі розроблений метод їх виявлення за статистичним аналізом часових серій GNSS-станцій. Запропонований метод, який полягає у пошуку ковзаючих кореляційних і коваріаційних зв'язків між часовими рядами двох GNSS-станцій за короткі періоди, що зміщуються вздовж усієї часової серії. Такий підхід дозволяє за виділенням аномальних зміщень окремих GNSS-станцій показати характер зміщень на усій досліджуваній території. Високий коефіцієнт кореляції між рядами станцій свідчить про наявність одночасних та однакових за абсолютною величиною зміщень. Високе значення коваріації свідчить про синхронність та однонаправленість таких зміщень. У результаті за представленою методикою досліджено часові ряди 8-ми GNSS-станцій мережі Geoterrace за період з кінця 2017 до початку 2021 року. Досліджено ймовірний аномальний висотний зсув на цій території на епоху 185 дня 2018 року. За результатами опрацювання GNSS-станцій побудовано карти просторового розподілу коефіцієнтів кореляції та коваріації. Запропоновану методику доцільно вдосконалювати та застосувати для дослідження кінематичних процесів на територіях з густою мережею GNSS-станцій та тривалими часовими рядами спостережень. Це можуть бути GNSS-мережі, призначені для моніторингу великих інженерних об'єктів, таких як ГЕС, ГАЕС.

Ключові слова: короткотривалі геодинамічні зміщення, часові серії GNSS-станцій, статистичний аналіз, висотний зсув.

Вступ

На основі аналізу коротких інтервалів часових рядів добових розв'язків GNSS-станцій тривалістю 10-15 днів іноді можна виявити різкі зміни просторового положення станції а також одночасні подібні зміщення на сусідніх станціях чи мережах, які охоплюють значні території. Одним із таких геодинамічних процесів є висотний зсув перманентних станцій Європейського регіону зафіксований у грудні 2019 року тривалістю 4-10 днів [Brusak, & Tretyak, 2020]. У роботі досліджено висотний зсув, континентальність його поширення, встановлено просторову лінійність розгортання процесу та виконано аналіз величин і швидкостей добових зміщень понад 500 GNSS-станцій Європи. Варто зазначити, що виявлення цього процесу було випадковим і автори звернули на нього увагу саме через зростання СКП визначення висотного положення станцій після прояву цього явища.

Важливо зазначити, що такі геодинамічні процеси можна помітити, розглядаючи короткі ряди спостережень GNSS-станцій (до 2 мі-

сяців), натомість, при порівнянні річних рядів ці зсуви координат візуально практично непомітні.

Серед автоматичних алгоритмів аналізу часових рядів GNSS-станцій відома середня міжрічна різниця з урахуванням асиметричності (MIDAS) [Blewitt, et al.,2016] та Hector [Bos, et al., 2019]. Ці програми створені для аналізу трендів часових рядів станцій з тимчасово корельованим шумом. MIDAS – це медіанний оцінювач тренду, заснований на методах Theil-Sen, який включає якості, необхідні для точної оцінки швидкості станцій та виключає сезонні коливання [Blewitt, et al., 2016]. Нестог, своєю чергою, використовує функцію максимальної правдоподібності [Bos, et al., 2019].

Оскільки ці програми слугують лише для виділення річних трендів, то проблема дослідження коротших періодів часових рядів GNSSстанцій не була вирішена. Розгляд та порівняння зміщень станцій присутні у програмі FODITS, застосованій у середовищі Bernese GNSS Software [Dach, et al., 2015]. Рішення, отримані від FODITS, повинні слугувати для надання метаданих для виявлення епох, в яких відбувалися розриви та аномальні зміщення.

У літературі за останні роки з'являються комплексні програми чи алгоритми аналізу часових рядів GNSS-станцій з подальшою геодинамічною інтерпретацією, проте, вони переважно присвячені розгляду окремих станцій [Tian, 2011; Wu, et al., 2017; Montillet & Bos, 2019; Santamaría-Gómez, 2019; Не, et al., 2020]. Програмне забезпечення TSAnalyzer для аналізу часових рядів GNSS-станцій дозволяє візуалізовувати часові ряди, застосовувуючи метод найменших квадратів, спектральний аналіз, інтерактивну перевірку даних на зсуви, тощо [Wu, et al., 2017]. Програмне забезпечення SARI окрім візуалізації серії також включає такі математичні способи опрацювання: обробка з використанням методу найменших квадратів, фільтрації Кальмана, смугового фільтра, запропонованого Vondrak та методу максимальної правдоподібності для аналізу шумів [Santamaría-Gómez, 2019]. Проте, сьогодні відсутні комплексні програми для аналізу короткотривалих зміщень та зсувів GNSS-мереж.

Це дослідження присвячене розробці алгоритму, який би дозволяв виявляти корельовані зміщення координат пари GNSS-станцій на коротких часових серіях. Виявлення таких зміщень та одночасне підтвердження між різними парами станцій дозволить автоматизувати пошук локальних чи регіональних геодинамічних процесів на цій території, а в подальшому допомогти в дослідженнях причин та оцінці впливів схожих просторових зсувів. Особливий вплив такі геодинамічні процеси можуть мати на результати GNSS-моніторингу великих інженерних об'єктів, таких як ГЕС [Третяк та ін., 2014, 2017], ГАЕС, АЕС, адже раптові зміщення можуть бути інтерпретовані як небезпечна ситуація на об'єкті, а також регіонів, де відбуваються акивні зсуви чи провалля [Savchyn et al., 2019].

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є мережа перманентних GNSS-станцій в Україні Geoterrace [https://geoterrace.lpnu.ua]. Мережа створена та обслуговується лабораторією «Опрацювання супутникових вимірів» Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка». Серед задач мережі є забезпечення роботи активних перманентних GNSS-станцій, тобто роздача користувачам RTK-поправок, та проведення геодинамічних досліджень щодо стабільності великих інженерних об'єктів таких як ГЕС, ГАЕС, АЕС та інших зміщень на охопленій мережею території. Перша задача виконується з використанням комплексного програмного забезпечення Leica GNSS Spider та Sino GNSS CDC.NET, а друга – з обчисленням добових розв'язків станцій у Bernese GNSS Software [Dach, et al., 2015].

Створення мережі розпочалося у Львівській області, але найбільше розширення мережі відбулося впродовж 2019–2021 років. GNSSстанції утворюють рівномірну мережу, відстань між якими в середньому становить 70 км. Мережа Geoterrace станом на травень 2021 року налічує понад 50 станцій і повністю або частково охоплює 12 областей України.

Для дослідження використано просторовочасові ряди 8-ми GNSS-станцій мережі Geoterrace (рис. 1). Ці станції працюють найдовше та з більшою надійністю можуть бути використані для геодинамічних досліджень.

У табл. 1 наведено GNSS антени та приймачі, що працюють на досліджуваних станціях.





Рис. 1. Розташування GNSS-станцій мережі Geoterrace, використаних у цьому дослідженні, на карті Європи (а) та детальніше (б)

Добові координати станцій обчислені у Bernese GNSS Software версія 5.2 [Dach et al., 2015] з використанням автоматичного модуля Bernese Processing Engine. Як референцні станції обрано станції IGS, що розташовані довкола мережі Geoterrace. Результатом є мережеве рішення за стратегією подвійних різниць. Тривалість та цілісність результатів часових серій розв'язків перманентних GNSS-станцій мережі Geoterrace, які практично постійно діють з кінця 2017 до початку 2021 року, показані на рис. 2.

Таблиця 1 GNSS обладнання на досліджуваних станціях

Назва станції	Приймач	Код антени IGS
BRGN	GR10	LEAIR10 NONE
МҮКО	GRX1200 GG Pro	LEIAX1202GG
		NONE
RDVL	NovAtel DL-V3	TPSPG_A1 TPSD
SAMB	GRX1200	LEIAX1202GG
	+GNSS	NONE
SOKA	GR10	LEAIS10 NONE
SULP	Trimble NetR9	TPSCR.G5 TPSH
VLVL	GR10	LEAIR10 NONE
ZOLH	GRX1200 GG Pro	LEIAX1202GG
		NONE





У грудні 2019 року у мережі Geoterrace зафіксований висотний зсув на усіх станціях мережі тривалістю 4–10 днів [Brusak & Tretyak, 2020]. 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 GNSS-станцій.

Алгоритм пошуку геодинамічних процесів

Для аналізу просторово-часових рядів пари GNSS-станцій виконуємо поданий нижче алго-

ритм. Спочатку визначаємо тривалість періоду Δt , у межах якого порівнюються результати двох часових серій. Довжину цього періоду можна змінювати. Найкраще короткотривалі тренди зміщень проявляються за довжини 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 $T_{cep} = T_{nov} + \frac{\Delta t}{2}$, де T_{nov} – епоха початку часової серії. При зміщенні періоду Δt по часовій серії з інтервалом в одну добу Т_{сер} також змінюватиметься на одну добу. Для кожної епохи T_{cen} у межах періоду Δt визначаємо коефіцієнти кореляції та коваріації за даними зміщень часової серії по одній з координат. Коефіцієнт кореляції покаже ступінь лінійної залежності між рядами координат на двох GNSS-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 саме однієї направленості, то судити про наявність процесу лише за коефіцієнтом кореляції складно. Саме з метою пошуку одночасних і співнаправлених зміщень використовуємо коефіцієнт коваріації. На основі виконаних розрахунків для кожної епохи Т_{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.

Тестування алгоритму на відомому геодинамічному процесі

З метою апробації цього методу застосуємо його для вже відомого висотного зсуву у грудні 2019 року [Brusak and Tretyak, 2020]. Використаємо дані станцій мережі Geoterrace SULP та МҮКО. На рис. 1 наведене розташування цих станцій. Часова серія з висотним зсувом GNSSстанцій SULP та МҮКО у грудні 2019 року показана на рис 3. Щодобова зміна коефіцієнтів кореляції та коваріації між висотними часовими рядами станцій за період з 2019.5 по 2020.5 при $\Delta t = 20$ днів показані на рис. 4.



Рис. 3. Висотний зсув GNSS-станцій SULP та МҮКО мережі Geoterrace у грудні 2019 року



Рис. 4. Щодобова зміна коефіцієнтів кореляції (а) та коваріації (б) між висотними часовими рядами станцій SULP і МҮКО за період 2019.5 по 2020.5, за Δt = 20 днів

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

Дослідження мережі GNSS-станцій Geoterrace

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



Рис. 5. Кореляційний та екстремальний коваріаційний зв'язок висотного зміщення станцій SULP та RDVL на enoxy T_{cep} (185 день 2018 року) при $\Delta t = 20$ днів

На основі опрацювання за представленою методикою часових серій вибраних пунктів мережі Geoterrace за період з кінця 2017 по початок 2021 року за $\Delta t = 20$ днів виділяється ймовірне одночасне та однонаправлене висотне зміщення частини станцій на середню епоху T_{cep} (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 рис. 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. У табл. 2 приведено коефіцієнти кореляції та коваріації часових серій висотного зміщення на епоху T_{cep} (185 день 2018 року) за $\Delta t = 20$ днів між усіма можливими парами GNSS-станцій мережі Geoterrace.

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції та коваріації часових серій висотного зміщення на епоху *T*_{cen}

(185 день 2018 року) за $\Delta t = 20$ днів між усіма
можливими парами GNSS-станцій мережі
Geoterrace

N⁰	GNSS-станції		Коефіцієнт	Коефіцієнт
3/П			кореляції	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 табл. 2 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 мають однакову інтенсивність зміщень. У цілому значення коваріації найвище між станціями SULP та SOKA, що показує однонаправленість висотних зміщень на цих станціях відносно інших.

На рис. 6 показано часові серії висотного зміщення GNSS-станцій RDVL та SULP за період $\Delta t = 20$ днів, з середньою епохою T_{cep} (185 день 2018 року), між якими визначена найвища коваріація (31,68).





Рис. 6. Часові серії висотного зміщення GNSSстанцій RDVL та SULP за період $\Delta t = 20$ днів, з середньою епохою T_{cep} (185 день 2018 року)

Як видно з рис. 6, лінії тренду висотних зміщень обох GNSS-станцій є практично одинакові та мають одночасний прояв.

Для узагальнення отриманих результатів обчислимо за даними табл. 2 середні значення кореляції та коваріації для кожної GNSS-станції. Однак, для вивчення просторового розподілу взаємозв'язків часових серій GNSS-станцій доцільно обчислювати середні значення кореляції та коваріації за даними пар сусідніх GNSS-станцій. Для цього мережа GNSS-станцій була розбита на суміжні трикутники за тріангуляцією Делоне. Для обчислень використаємо лише сторони, які утворюють ці трикутники (рис. 7). У табл. З наведено середні значення кореляції та коваріації висотного зміщення GNSS-станцій на епоху *Т*_{сер} (185 день 2018 року).





Таблиця 3

Середні значення кореляції та коваріації висотного зміщення GNSS-станції на епоху *T_{cep}* (185 день 2018 року)

GNSS crouvin	середнє значення		
Опоб-станція	кореляції	коваріації	
BRGN	0,77	20,42	
МҮКО	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 рис. 7 показано розподіл середніх значень кореляції та коваріації висотного зміщення GNSSстанцій на епоху (185 день 2018 року). Аналізуючи рис. 7 і табл. 2 бачимо, що прослідковуються кращі кореляційні взаємозв'язки 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 різнорідною. GNSS-станції SULP і SOKA мають максимально синхронні коливання між собою та із навколишніми GNSSстанціями.

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. 7, а). Натомість територія, прилегла до GNSS-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.

Необхідно зауважити, що застосування запропонованої методики є ефективним при опрацюванні довготривалих часових серій значної кількості GNSS-станцій, які покривають значні за площею території із різнорідною тектонічною будовою. Основною метою даної статті є лише представлення можливості застосування запропонованої методики опрацювання часових серій GNSS-станцій.

Висновки

У роботі запропонований метод пошуку ковзаючих кореляційних і коваріаційних зв'язків між часовими рядами двох GNSS-станцій при їх поділі на короткі періоди. Такий підхід дозволяє за виділенням аномальних зміщень окремих GNSS-станцій показати характер зміщень на усій досліджуваній території. Високий коефіцієнт кореляції між рядами станцій свідчить про наявність одночасних та однакових за абсолютною величиною зміщень. Проте, ці зміщення можуть бути різнонапрвлені. Високе значення коваріації свідчить про синхронність та однонаправленість таких зміщень. Виявлення таких зв'язків та підтвердження їх одночасності між різними парами GNSS-станцій дозволяє виявляти візуально невидимі короткочасні зміщення територій та автоматизувати пошук локальних чи регіональних геодинамічних процесів.

За представленою методикою досліджено часові ряди 8-ми GNSS-станцій мережі Geoterгасе за період з кінця 2017 до початку 2021 року. Для прикладу виділено ймовірний аномальний висотний зсув на цій території на епоху 185 дня 2018 року. За результатами опрацювання GNSS-станцій побудовано карти просторового розподілу коефіцієнтів кореляції та коваріації. Виділені території за кінематичними характеристиками узгоджуються з тектонічними розломами.

Запропоновану методику доцільно вдосконалювати та застосувати для дослідження кінематичних процесів на територіях з густою мережею GNSS-станцій та тривалими часовими рядами спостережень. Це можуть бути GNSS-мережі, призначені для моніторингу великих інженерних об'єктів, таких як ГЕС, ГАЕС. Варто також розглянути впровадження ваг у вектори залежно від їхньої довжини для пошуку локальних чи регіональних геодинамічних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Третяк К. Р., Краненброек Д. Ж., Балан А. Ю., Ломпас О. В. & Савчин І. Р. Апостеріорна оптимізація точності та надійності активної геодезичної мережі моніторингу Дністровської ГЕС. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2014. Вип. 79. С. 1–14.
- Третяк К. Р., Савчин І. Р., Заяць О. С., Голубінка Ю. І., Ломпас О. В. & Бісовецький Ю. А. Встановлення та супровід автоматизованих систем контролю просторових зміщень інженерних споруд українських гідроелектростанцій. *Гідроенергетика України*, 2017. Вип. 1–2. С. 33–41.
- Geoterrace. Мережа активних перманентних GNSSстанцій. Режим доступу: https://geoterrace.lpnu.ua.
- 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.
- Bos M., Fernandes R. & Bastos L. (2019). Hector user manual version 1.7.2.
- 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.

- Dach R., Lutz S., Walser P. & Fridez P. (2015). Bernese GNSS software version 5.2.
- 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.
- Montillet J. P. & Bos M. S. (Eds.). (2019). Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences. Springer.
- Santamaría-Gómez A. (2019). SARI: interactive GNSS position time series analysis software. GPS solutions, 23(2), 1–6.
- 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.
- Tian Y. (2011) iGPS: IDL tool package for GPS position time series analysis. GPS Solution, Vol. 15, No. 3, 299–303.
- Wu D., Yan H. & Shen Y. (2017). TSAnalyzer, a GNSS time series analysis software. Gps Solutions, 21(3), 1389–1394.

KORNYLIY TRETYAK^{1A}, IVAN BRUSAK^{1B}

¹ Department of High Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine. ^{1A} https://orcid.org/0000-0001-5231-3517.

^{1B} https://orcid.org/0000-0001-5434-4931.

METHOD FOR OF DETECTING SHORT-TERM DISPLACEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE BY STATISTICAL ANALYSIS OF GNSS TIME SERIES

Short-term geodynamic displacements of the Earth's surface are studied insufficiently because the unambiguous identification of such geodynamic processes is quite a difficult task. Short-term geodynamic processes can be observed by considering GNSS time series lasting up to 2 months. The coordinate displacements are visually almost unnoticeable comparing annual time series. In this work, an algorithm based on the results of statistical analysis of time series of several GNSS stations on purpose to find simultaneous displacements of the Earth's surface is developed. Authors propose a method for detecting short-term displacements based on sliding correlation and covariance interrelationships between the time series of two GNSS stations for short periods, which are shifted along with the entire time series. The approach allows showing the characteristic of the displacements throughout the study area based on the selection of anomalous displacements of selected GNSS stations. The high correlation coefficient between the periods of stations indicates the presence of simultaneous and identical in absolute value offsets. The high value of covariance indicates the synchronicity and unidirectionality of such displacements. As a result, the time series of 8 GNSS stations of the Geoterrace network for the period from the end of 2017 to the beginning of 2021 are studied according to the presented method. The anomalous altitude displacements in the region for the epoch of 185th day of 2018 and 20 days period is investigated. Based on the processing, maps of the spatial distribution of correlation and covariance coefficients are constructed. The proposed method could be improved and applied to the study of kinematic processes in areas with a dense network of GNSS stations with long time series similarly GNSS networks for monitoring of large electricity produced objects such as HPPs and PSPs.

Key words: Short-term geodynamic displacements, GNSS time series, statistical analysis, altitude displacements.

Надійшла 04.04.2021 р.