

УДК 528.3

## ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТА GAMIT-GLOBK ДЛЯ СТВОРЕННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ КОМБІНОВАНИХ GNSS РОЗВ'ЯЗКІВ

С. Доск'яч

Національний університет "Львівська політехніка"

**Ключові слова:** методи космічної геодезії, згущення ITRF, комбінований розв'язок.

### Постановка проблеми

За рекомендацією Міжнародної служби обертання Землі та референцних систем (IERS) сьогодні використовується міжнародна земна система відліку ITRS, що являє собою прямокутну геоцентричну систему координат з початком у центрі мас Землі, а її практичною реалізацією є система ITRF. Ця система є результатом об'єднання реалізацій глобальних земних референцних систем, які отримують за допомогою п'яти методів космічної геодезії: радіоінтерферометрії з наддовгими базами (VLBI), лазерної локації супутників (SLR) та Місяця (LLR), глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) і доплерівських спостережень супутників (DORIS). Для отримання реалізації загальноземної референцної системи глобального масштабу шляхом комбінованого розв'язку від окремих реалізацій, пов'язаних із різними технологіями космічної геодезії, сьогодні вже є певні напрацювання у вигляді спеціалізованих програмних пакетів.

Під згущенням ITRF розуміють представлення позицій станції (і швидкості) регіональних чи локальних мереж в ITRF. Сьогодні, завдяки легкості використання, низькій вартості й доступності продуктів Міжнародної GNSS служби (IGS) для усіх користувачів, найефективнішим для згущення ITRF є, відповідно, GNSS метод. Для згущення ITRF у національних масштабах використовують аналогічні спеціалізовані програмні пакети, що й для реалізації загальноземної референцної системи, хоча у цих задач є істотні особливості (відмінності), а саме: постійна зміна конфігурації мережі та кількості станцій, різноманіття моделей антен з проблемним калібруванням фазового центра деяких з них тощо.

Отже, згущення ITRF у національних масштабах, а саме отримання комбінованого розв'язку (однорідних часових рядів координат) регіональних мереж активних референцних станцій України має важливе значення для їх ефективного використання.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Комбінованим розв'язком у геодезії називають спільне опрацювання сукупності результатів багатовимірних вимірювань тієї самої величини. Математично цей процес зводиться до урівнювання.

Вже створено окремі наукові програмні пакети, які можуть опрацювати великі обсяги даних, отриманих різними методами космічної геодезії, для формування комбінованого розв'язку (отримання реалізації загальноземної референцної системи чи для

її згущення в національних масштабах). Серед них найпоширеніші два програмні пакети:

1. Bernese.
2. GAMIT-GLOBK.

Програмне забезпечення Bernese розроблене в Астрономічному інституті Бернського університету (Швейцарія). Воно вважається еталонним, оскільки переважна більшість центрів опрацювання GNSS даних або центрів аналізу (Analysis Centres) EPN (EUREF Permanent Network) використовуює його для високоточного опрацювання спостережень, виконаних на перманентних GNSS станціях. Для отримання багатосесійних розв'язків з комбінації серії односесійних Bernese GPS Software розробили додаткову програму ADDNEQ. Методи послідовного опрацювання загалом незалежні від типів спостережень окремих розв'язків. Навіть результати з різних методів (наземні геодезичні методи або космічні методи SLR, VLBI, DORIS) можуть бути об'єднані. Програма ADDNEQ уможливує розв'язання лінійних рівнянь, що містять велику кількість параметрів (координати, елементи орбіти тощо). Параметри, отримані з розв'язання нормальних рівнянь, представлені без будь-яких обмежень. SINEX файл, генерований програмою ADDNEQ, є також вільним від обмежень, якщо вибрано представлення на рівні нормальних рівнянь. Якщо вибрано COV представлення, то можливі обмеження явних параметрів можна знайти в блоці SINEX файла SOLUTION/MATRIX APRIORI [Dach R., 2007].

Програмне забезпечення GAMIT-GLOBK, яке розробив Массачусетський технологічний інститут (MIT), є набором програм для обробки фазових даних, оцінки тривимірного відносного положення наземних станцій і супутникових орбіт, атмосферних зенітних затримок і параметрів орієнтації Землі (GAMIT). Підпрограма GLOBK є фільтром Кальмана, основна мета якого полягає в тому, щоб об'єднати розв'язки різних методів космічної геодезії, такі як GNSS, VLBI і SLR. Вони приймаються як дані, або "квазіспостереження" оцінки і коваріаційних матриць для координат станції, параметрів орієнтації Землі, орбітальних параметрів і вихідних позицій, згенерованих з аналізу основних спостережень. Вхідні розв'язки зазвичай отримують з вільною апріорною невизначеністю всіх глобальних параметрів так, щоб обмеження могли бути однорідно застосовані в об'єднаному розв'язку [Herring T., King R., McCluskey S., 2016].

Процедура створення загальноєвропейського комбінованого розв'язку передбачає, що станції мережі EPN умовно розділені на декілька підмереж так, щоб кожна станція спостереження була як мінімум у трьох підмережах. Дані спостережень з кожної підмережі обробляє один локальний центр аналізу (LAC) за

допомогою програмного пакета Bernese. Вже працюють 12 таких центрів аналізу, які регулярно оцінюють щоденні й щотижневі позиції станцій і зенітні тропосферні затримки.

Відомі два основні методи отримання координат станцій регіональних мереж (таких як європейська мережа EUREF) у системі ITRF:

1. Накладання обмежень на координати вибраної підмножини станцій ITRF до значень центральної епохи спостережень, тобто прирівнювання, з деякою невеликою дисперсією, координат опорних станцій до їхніх значень в каталозі ITRF. До 1302 GPS-тижня (грудень 2004 р.) офіційний розв'язок EUREF обчислювали з використанням саме цього підходу. На жаль, такий розв'язок EUREF був непридатний для геодинамічних досліджень, оскільки використання під час опрацювання опорних станцій і послідовні зміни реалізацій ITRF призводять до стрибків у координатах і можуть спричинити спотворення координат всіх станцій мережі [Панафідина Н., Малкин З., 2007].

2. Урівнювання регіональних розв'язків до ITRF за допомогою параметрів трансформації (метод мінімальних обмежень). Параметри трансформації повинні бути обчислені з використанням вибраної підмножини станцій ITRF [Altamimi et al. 2002 a, b; Altamimi and Dermanis, 2009; Sillard and Boucher, 2001]. Для досягнення оптимальної оцінки рекомендується забезпечити зв'язок між ITRF та регіональними розв'язками через вибір станцій ITRF високої якості (класу А) [Kenyeres A., 2010].

Розв'язки, що надають локальні центри аналізу, об'єднує Аналітичний комбінаційний центр (ACC) з метою забезпечення щоденних і щотижневих комбінованих розв'язків EPN, прив'язаних до останньої реалізації ITRS. Для створення комбінованих розв'язків використовують комбінаційну стратегію EPN [10].

Комбінації генеруються програмою ADDNEQ у програмному забезпеченні Bernese. Спершу окремі SINEX розв'язки з LAC трансформують, використовуючи SNX2NEQ, у внутрішній формат Bernese, що містить нормальні рівняння і мінімальні обмеження, які вилучаються з кожного розв'язку. На цьому етапі перевіряють, чи всі станції, які повинні були вилучені, не входять у розв'язок. Якщо ця станція не була пропущена якимось LAC, то вона усувається тут. Після цього за допомогою ADDNEQ всі нормальні рівняння об'єднують. Урівнювання до IGB08 виконується додаванням мінімальних умов обмеження на множину референсних станцій (IGb08 та/або станцій EPN класу А). Отримані результати аналізують, порівнюючи всі координати станцій, характерних для різних LAC, з їхніми середніми значеннями, розрахованими на основі всіх надходжень. У випадку, якщо різниці більші, ніж 8 мм по горизонталі або 16 мм по вертикалі (ці значення вибрані на основі аналізу довгострокових розв'язків), то позначену станцію вилучають з конкретного розв'язку, і об'єднання повторюється. Зрештою, перетворення Гельмерта між щотижневими комбінаціями і мережею референсних станцій виконується після того, як координати референсних станцій порівнюють з їхніми вихідними

координатами. Референсні станції, для яких різниця перевищує 8 мм по горизонталі або 15 мм по вертикалі, видаляються зі списку референсних станцій, і поєднання повторюється. Результати представлені в регіональному центрі опрацювання даних BKG [Ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/products] і в IGS.

### Постановка завдання

Мета роботи – оцінити точність отриманого комбінованого розв'язку регіональної мережі перманентних GNSS станцій у програмному пакеті GAMIT-GLOBK.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Робота мереж активних референсних GNSS станцій локального чи регіонального масштабів потребує науково обгрунтованої реалізації відповідної референсної системи координат. Національну реалізацію такої системи, наприклад для України, можна створити згущенням міжнародної/європейської системи відліку. Оскільки для згущення системи ITRF в регіональному масштабі рекомендують брати станції класу А, то ми вибрали 20 таких перманентних GNSS станцій, які входять в мережі IGS/EPN і найкраще охоплюють територію України. Територіально ці станції розміщені в: Румунії (BAIA, BUCU), Польщі (BYDG, JOZ2, LAMA, USDL), Австрії (GRAZ), Молдові (IGEO), Італії (MATE), Росії (MDVJ, ZECK), Німеччині (POTS, WTZR), Латвії (RIGA), Болгарії (SOFI), Литві (VLNS) та в Україні (MIKL, POLV, SULP, UZHL). Утворена мережа із цих станцій наведена на рис. 1.

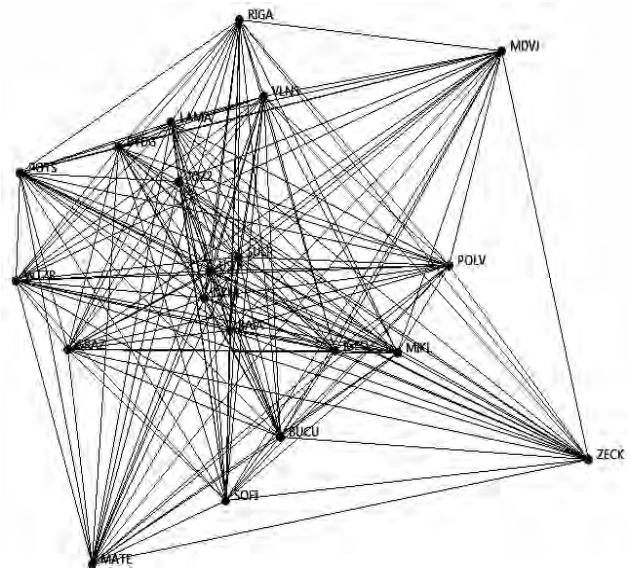


Рис. 1. Мережа перманентних GNSS станцій

Для отримання регіонального комбінованого розв'язку в центрі аналізу LPI (кафедра вищої геодезії та астрономії Львівської політехніки) проведено опрацювання GNSS спостережень, виконаних на 95 активних референсних станціях України. До цих станцій увійшли вибрані перманентні станції (див. рис. 1). Дані спостережень охоплювали чотири тижні (з 2 до 29 серпня 2015 р., або 1856–1859 GPS-тижнів).

З метою подальшого порівняння та оцінювання точності отриманих результатів підібрано дані опрацювання двох локальних аналітичних центрів EUREF-3 OLG (Австрія) і WUT (Польща) та загальноєвропейського Аналітичного комбінаційного центру ACC. Вибір цих двох локальних центрів аналізу зумовлений тим, що в результаті їхнього опрацювання входять дані вибраних 20 перманентних станцій.

Коротко охарактеризуємо зазначені центри аналізу GNSS даних.

**LPI (Львів, Україна).** Національний університет “Львівська політехніка”. Програмне забезпечення GAMIT-GLOBK. Основні моделі, що використовувались під час опрацювання:

- тропосфери: VMF (Vienne Mapping Function);
- калібрування фазового центра антени: Azimuth/Elevation-залежні поправки фазового центра від IGS;
- припливні зміщення: FES2004.

Мінімальні обмеження накладались на всі 20 станцій, мережа яких наведена на рис. 1.

**OLG (Грац, Австрія).** Інститут космічних досліджень (ISR/ASS) в м. Грац є офіційним центром збирання і аналізу GNSS даних і одним з центрів аналізу CERGOP/CEI. Тут із 1996 р. розпочалося створення щоденних розв’язків підмережі для всіх австрійських перманентних GNSS станцій і деяких сусідніх IGS і CEGRN станцій. З травня 1996 р. щотижневий розв’язок входять у розв’язок EPN. Програмне забезпечення Bernese GPS Software Version 5.2. Основні моделі, що використовувались під час опрацювання: тропосфери: VMF (Vienne Mapping Function);

- іоносфери: CODE глобальні іоносферні моделі,
- калібрування фазового центра антени: Azimuth/Elevation-залежні поправки фазового центра від IGS.

Добовий розв’язок охоплює 93 перманентні GNSS станції.

**WUT (Варшава, Польща).** Варшавський технологічний університет є локальним центром аналізу з січня 1996 р. Програмне забезпечення Bernese GPS Software Version 5.2. Основні моделі, що використовувались під час опрацювання:

- тропосфери: GMF/GPT;
- іоносфери: CODE глобальні іоносферні моделі;
- припливні зміщення: FES2004.

Добовий розв’язок охоплює 100 перманентних GNSS станцій.

За результатами опрацювань у центрах аналізу LPI, OLG та WUT визначено середні квадратичні похибки (СКП) різниць відповідних координат за всіма тижнями спостережень. Значення цих похибок подано у табл. 1 (LPI-WUT) та табл. 2 (LPI-OLG).

Таблиця 1  
СКП різниць координат LPI – WUT, мм

GPS-тиждень	LPI – WUT		
	СКП X	СКП Y	СКП Z
1856	1,8	1,6	2,7
1857	2,1	1,7	3,1
1858	2,2	1,4	2,5
1859	2,0	1,6	2,9

Таблиця 2  
СКП різниць координат LPI – OLG, мм

GPS-тиждень	LPI – OLG		
	СКП X	СКП Y	СКП Z
1856	1,9	1,3	3,2
1857	1,7	1,4	3,0
1858	1,5	1,0	3,0
1859	2,4	1,7	3,7

Характерною особливістю даних, наведених у табл. 1 та табл. 2, є “регіоналізація” станцій спостережень, тобто у кожного із зазначених центрів аналізу є певна локальна спрямованість розташування станцій. Щоб усунути цей ефект, ми порівнювали також результати нашого опрацювання із даними загальноєвропейського розв’язку, що наданий ACC EPN. Результати порівняння даних центрів аналізу LPI і Аналітичного комбінаційного центру EUREF подано в табл. 3.

Таблиця 3  
СКП різниць координат LPI – EUREF, мм

GPS-тиждень	LPI-EUREF		
	СКП X	СКП Y	СКП Z
1856	2,6	1,8	3,7
1857	2,9	1,5	3,3
1858	2,5	1,1	2,4
1859	2,7	1,2	3,3

На підставі отриманих результатів можемо зробити висновки, що СКП комбінованих розв’язків, отриманих локальними центрами аналізу EPN, Аналітичним комбінаційним центром EUREF і центром аналізу LPI, мають схожі величини до 4 мм. Відповідно вважаємо, що з такою точністю і будуть визначені координати наших активних референціальних станцій.

Наступним етапом нашої роботи було порівняння різнотижневих комбінованих розв’язків LPI з багаторічними розв’язками всієї європейської мережі. Для цього були утворені різниці координат та визначені їхні СКП між: тижневим комбінованим розв’язком LPI (1856 GPS-тиждень, епоха 2015.593), комбінованим із двох GPS-тижнів (1856–1857, епоха 2015.603) розв’язком LPI, комбінованим із чотирьох GPS-тижнів (1856–1859, епоха 2015.622, розв’язком LPI, і аналогічних багаторічних даних опрацювання з EPN (IGb08) [ftp://epncb.oma.be/epncb/station/coord/EPN/EPN\_A\_IGb08.SSC].

У табл. 4 подано середньоквадратичні похибки отриманих різниць координат.

Таблиця 4  
СКП різниць координат EUREF – LPI, мм

Кількість тижнів у комбінованому розв’язку	EUR – LPI		
	СКП X	СКП Y	СКП Z
1	2,6	1,8	3,7
2	2,6	1,8	3,6
4	2,6	1,7	3,3

З отриманих результатів можемо зробити висновок, що похибка визначення координат не перевищує

4 мм і простежити певну тенденцію щодо характеру цих похибок: що більше тижнів охоплює опрацювання, то меншою є похибка визначення координат регіонального комбінованого розв'язку.

#### Висновки

1. З отриманих СКП різниць координат між центрами аналізу OLG, WUT, LPI та EUREF виявлено схожі результати (в межах 4 мм). Вважаємо, що з такою точністю і визначено координати активних референцних станцій України.

2. З отриманих СКП різниць координат між LPI для одного, двох і чотирьох GPS-тижнів (на епохи 2015.593, 2015.603 і 2015.622 відповідно) та аналогічними багаторічними даними EUREF похибка визначення координат є меншою за 4 мм і що більше тижнів охоплює опрацювання, то вона стає меншою.

#### Література

1. Панафидина Н. А. Комбинированное решение для координат станций европейской GPS-сети / Н. А. Панафидина, З. М. Малкин // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 5. – С. 21–30.
2. Altamimi Z. ITRF2000: A new release of the international terrestrial reference frame for earth science applications / Z. Altamimi, P. Sillard, C. Boucher // J Geophys Res (Solid Earth) 107(10):1–19, 2002a. – P.1–19.
3. Altamimi Z. New trends for the realization of the International Terrestrial Reference System / Z. Altamimi, C. Boucher, P. Sillard // Advanced Space Research 30(2), 2002b. – P. 175–184.
4. Altamimi Z. The choice of reference system in ITRF formulation / Z. Altamimi, A. Dermanis // IAG Symposia, vol 137. Springer, Berlin, 2009 – P. 329–334.
5. Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. Bernese GPS Software Version 5.0 / Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland, 2007.
6. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT – Release 10.6 / Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science MIT, USA, 2016.
7. Kenyeres A. Categorization of permanent GNSS reference stations. – Режим доступу: [http://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/coordinates/kenyeres\\_2010.pdf](http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coordinates/kenyeres_2010.pdf).
8. Seitz M. The 2008 DGFI realization of the ITRS: DTRF2008 / M. Seitz, D. Angermann, M. Bloßfeld, H. Drewes, M. Gerstl // J Geod, Volume 86, Issue 12, DOI: 10.1007/s00190–2012–0567–2, 2012a – P. 1097–1123.
9. Sillard P. A review of algebraic constraints in terrestrial reference frame datum definition / P. Sillard, C. Boucher // Journal of Geodesy 75(2–3): 63–73, 2001.
10. Комбінаційна стратегія EPN. – Режим доступу: [http://www.epncb.oma.be/\\_productsservices/analysis/centres/CombinationStrategy.pdf](http://www.epncb.oma.be/_productsservices/analysis/centres/CombinationStrategy.pdf)

#### Застосування програмного пакета GAMIT-GLOBK для створення регіональних комбінованих GNSS розв'язків С. Доскіч

Під час досліджень встановлено, що оцінка результатів, отриманих з регіонального комбінованого розв'язку в програмному пакеті GAMIT-GLOBK, і комбінованих розв'язків з центрів аналізу EPN у програмному пакеті Bernese дає схожі величини і в межах норм EPN.

#### Применение программного пакета GAMIT-GLOBK для создания региональных комбинированных GNSS решений С. Доскич

В ходе исследований установлено, что оценка результатов, полученных по региональному комбинированному решению в программном пакете GAMITGLOBK, и по комбинированным решениям из центров анализа EPN в программном пакете Bernese, дает схожие величины и находится в пределах норм EPN.

#### Using the software application GAMIT-GLOBK for creating regional combined GNSS solutions S. Doskich

During the research it was found that the estimation of results obtained from the regional combined solution in the software GAMIT-GLOBK and combined solutions from EPN analysis centers in the software Bernese gives similar values that are in the norms EPN.

**MundoGEO**  
**#connect**  
LatinAmerica 2016

**CONFERENCIA & FEIRA**

**10 A 12 DE MAIO DE 2016**

**SAO PAULO - BRASIL**

[www.mundogeoconnect.com/2016/mundogeoconnect2016-latin-america-en](http://www.mundogeoconnect.com/2016/mundogeoconnect2016-latin-america-en)