

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Іщенко Марина Вікторівна

УДК 529.2:629.78

**ЗВЕДЕНА ОБРОБКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ РЕГІОНАЛЬНОЇ
GPS-МЕРЕЖІ ТА ЇЇ РЕЗУЛЬТАТИ**

01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук

Хода Олег Олександрович,

Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
старший науковий співробітник.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор

Железняк Олег Олександрович,

Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри аерокосмічної геодезії;

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Чолій Василь Ярославович,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
доцент кафедри астрономії та фізики космосу.

Захист відбудеться «26» квітня 2013 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680 МСП, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27. Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680 МСП, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий «13» березня 2013 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради

кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку науки є низка проблем, які знаходяться на стику різних напрямів науки. До таких проблем відносяться вивчення обертання Землі та побудова координатних систем на Землі та в космосі. Для їх розв'язання використовуються методи і засоби астрометрії, небесної механіки, геодезії, радіоінтерферометрії, лазерної техніки тощо. У світовому масштабі ці проблеми координуються Міжнародною службою обертання Землі та систем відліку (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS), до складу якої входить Міжнародна ГНСС-служба (International GNSS Service, IGS).

IGS було створено в 1994 р. Міжнародною геодезичною службою (International Association of Geodesy, IAG). Головними завданнями нової організації було проведення постійних спостережень ГНСС-супутників за єдиними стандартами та забезпечення користувачів точними ефемеридами ГНСС-супутників.

Протягом років покращувались інструменти аналізу, моделювання фізики Землі та взаємодії між супутниковим сигналом, атмосферними рефракціями та ГНСС-обладнанням. Наприклад, зменшувався кут місця спостережень супутників, вдосконалювались моделі океанічного навантаження на постійнодіючі станції, покращувались алгоритми фіксування невизначеностей, розроблювались абсолютні моделі варіацій фазових центрів комбінацій антена–купол тощо. В той же час різні моделі, стратегії та реалізації Міжнародної земної системи відліку (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) вносили свої корекції у точність визначення координат ГНСС-станцій.

Починаючи з GPS-тижня 1400 (з 5 листопада 2006 р.) IGS впровадила нові моделі та методики обробки ГНСС-спостережень. Рекомендовано використовувати абсолютні моделі варіацій фазових центрів комбінацій антена-купол замість відносних, модель океанічного навантаження FES2004 замість GOT00.2_P тощо. З того ж часу комбіновані точні ефемериди ГНСС-супутників, координати та швидкості постійнодіючих ГНСС-станцій (продукти IGS) представлено в системі координат IGS05 (IGS-реалізація системи координат ITRF2005).

Ефекти, що були внесені відмінностями в методиках обробки, моделях, апіорних даних та програмному забезпеченні, що використовувались, призвели до неузгодженості до і після 2006 р. у отримання координатних рядів постійнодіючих ГНСС-станцій.

У 2008 р. IGS починає кампанію репроцесингу (переобробки) архівних GPS-спостережень з використанням нових моделей, методик обробки та оновленого програмного забезпечення. Першим етапом кампанії було отримання точних ефемерид GPS-супутників в системі координат IGS05.

У Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України була виконана регулярна обробка GPS-спостережень для 29 GPS-станцій, що розташовані на території Східної Європи (12 з яких – на території України) для GPS-тижнів 1236–1399 (14 вересня 2003 р. – 4 листопада 2006 р.). Обробка виконувалась за рекомендаціями Центрального бюро Європейської перманентної ГНСС-мережі (EUREF Permanent GNSS Network, EPN), які діяли до GPS-тижня 1400.

Наявність точних ефемерид GPS-супутників в системі координат IGS05, що були отримані в результаті кампанії IGS, надала можливість організувати

репроцесинг архівних спостережень GPS-супутників у Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України (ГАО НАН України). Репроцесинг виконувався у відповідності до нових рекомендацій IGS, що почали діяти з GPS-тижня 1400.

Вищеназване визначає актуальність та перспективність використання узгоджених координатних рядів та зенітної тропосферної рефракції для вирішення широкого спектру наукових завдань, що пов'язані з вивченням Землі: визначення параметрів обертання Землі (ПОЗ), дослідження деформацій земної кори та атмосфери Землі, створення земної системи координат, що задається координатами та швидкостями ГНСС-станцій, тощо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені в даній роботі, виконувалися за планом науково-дослідних тем відділу космічної геодинаміки ГАО НАН України:

- конкурсна тема «Наукові основи, програмно-технічне забезпечення функціонування Української постійнодіючої ГНСС-мережі для досліджень регіональної та локальної динаміки» (етап 2, «Дослідження локальної геодинаміки на геодезичному полігоні «Сімеїз–Кацівелі») відповідно до державної цільової програми «Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)», 2009 р., номер державної реєстрації – 0109U004073, шифр – 264;
- конкурсна тема «Наукові основи, програмно-технічне забезпечення функціонування Української постійнодіючої ГНСС-мережі для досліджень регіональної та локальної динаміки» (етап 3, «Обробка даних зі станцій Української постійнодіючої ГНСС-мережі») відповідно до державної цільової програми «Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)», 2010 р., номер державної реєстрації – 0110U005123, шифр – 281;
- конкурсна тема «Дослідження регіональної та локальної динаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» відповідно до Цільової комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України «Дослідження сонячно-земних зв'язків та їх впливу на функціонування геосистем (ГЕОКОСМОС)», 2011 р., номер державної реєстрації – 0111U004676, шифр – 286;
- конкурсна тема «Дослідження регіональної та локальної динаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр., номер державної реєстрації – 0112U005030, шифр – 305.

Мета, задачі дослідження. *Мета* роботи полягає в отриманні узгоджених координатних рядів в системі координат IGS05 та значень зенітної тропосферної

рефракції, насамперед для українських GPS-станцій. Для її досягнення були поставлені такі *задачі*:

- отримати однорідні часові ряди координат українських постійнодіючих GPS-станцій для GPS-тижнів 1236–1399 (14 вересня 2003 р. – 4 листопада 2006 р.);
- отримати значення зенітної тропосферної рефракції для постійнодіючих GPS-станцій;
- проаналізувати якість отриманих даних, порівнюючи з комбінованими розв’язками, що були отримані в ході кампаній репроцесингу IGS та EPN;
- визначити значення «зовнішніх» похибок та коефіцієнтів кореляції для виконаного розв’язку репроцесингу та комбінованих розв’язків IGS та EPN;
- проаналізувати отримані координатні ряди та значення тропосферної рефракції, порівняти отримані результати з результатами регулярної обробки;
- перевірити координатні ряди та значення зенітної тропосферної рефракції на розриви на момент початку GPS-тижня 1400 з метою оцінки якості отриманих результатів репроцесингу;
- визначити вплив зміни моделей калібровок комбінацій антена–купол на координати GPS-станцій.

Об’єкт дослідження – дані GPS-спостережень ГАО НАН України; комбіновані каталоги розв’язків репроцесингів IGS і EPN.

Предмет дослідження – координати та зенітна тропосферна рефракція GPS-станцій; вплив моделей та методик обробки на визначення координат та зенітної тропосферної рефракції GPS-станцій.

Методи дослідження – радіонавігаційні системи; ГНСС-спостереження та їх обробка методом найменших квадратів, порівняльний аналіз отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. В рамках роботи *вперше отримано*:

- узгоджені ряди координат українських станцій в системі відліку IGS05, перш за все для українських GPS-станцій;
- значення зенітної тропосферної рефракції для українських постійнодіючих GPS-станцій за результатами репроцесингу;
- значення «зовнішніх» похибок та коефіцієнтів кореляції для виконаного репроцесингу та комбінованих розв’язків репроцесингів IGS та EPN;

та *вперше проаналізовано*:

- координатні ряди та тропосферну зенітну рефракцію, отримані в результаті розв’язку репроцесингу у порівнянні, з розв’язками репроцесингів IGS та EPN. Аналіз виконувався з метою визначення ролі репроцесингу для подальшого використання його результатів в IERS;
- якість координатних рядів, отриманих в результаті репроцесингу, з координатними рядами, що були отримані в ході регулярної обробки;
- часові ряди координат та значення зенітної тропосферної рефракції на розриви на момент початку GPS-тижня 1400 для GPS-тижнів 1236–1631 (14 вересня 2003 р. – 10 квітня 2011 р.);
- вплив моделей калібровок комбінацій антена–купол на координати GPS-станцій.

Достовірність і обґрунтованість результатів дослідження підтверджується порівнянням розв'язку репроцесингу з комбінованими розв'язками репроцесингів міжнародних служб; апробацією результатів у фахових журналах, а також на міжнародних науково-практичних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення результатів полягає в наступному:

- координати постійнодіючих GPS-станцій можуть бути використані для оцінки зміни положень станцій з часом;
- координати станцій можна використовувати для високоточних геодезичних вимірів в геодезії, картографії тощо;
- отримані координати не містять похибок, привнесених координатними реалізаціями, впливом калібровок комбінацій антена–купол тощо, що дає змогу дослідити поведінку постійнодіючих GPS-станцій.

Особистий внесок автора. З десяти опублікованих робіт за тематикою дисертаційної роботи, сім робіт [1–4, 6, 8, 10] виконано самостійно, три – у співавторстві. В роботах [5, 7, 9] автор брав участь у постановці задачі, виконував репроцесинг GPS-спостережень, проводив аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів. Результати, включені в дисертацію, доповідалися і обговорювалися на наступних міжнародних конференціях:

- V науково-практична конференція «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні» (2010 р., м. Ужгород);
- XIII міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (2011 р., м. Чернігів);
- VII та VIII міжнародні науково-практичні конференції «Нові досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід» (2011 та 2012 рр., м. Чернігів);
- 19th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (2012 р., м. Київ),

а також на семінарах відділу космічної геодинаміки ГАО НАН України.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у десяти роботах: п'ять статей в реферованих журналах [1–5], три в матеріалах конференцій [7–9] та дві у збірниках тез конференцій [6, 10].

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (93 найменування) та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 146 сторінок, у тому числі 30 рисунків, 19 таблиць та два додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету, задачі дослідження, наукову новизну та практичну цінність. Наведено відомості стосовно апробації роботи та публікацій.

У першому розділі **«GPS – Глобальна система визначення місцеположення»** наведено огляд Глобальної системи визначення місцеположення (GPS). У першій частині цього розділу описано архітектуру системи, принципи її роботи, інформацію, що отримується з супутника (навігаційне повідомлення, альманах, ефемериди тощо), та структуру сигналів, які передають GPS-супутники (кодові та фазові псевдовіддалі).

У другій частині розділу наведено основні рівняння для величин, що спостерігаються, та основні джерела похибок, що впливають на сигнал з супутника. Також описано міжнародні служби, що пов'язані з GPS.

У другому розділі **«Програмний комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» як основний інструментарій обробки GPS-спостережень»** наведено принцип використання програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0» в якості інструмента обробки та репроцесингу GPS-спостережень згідно стандартів Європейської перманентної ГНСС-мережі та Міжнародної ГНСС-служби.

У пункті 2.1 розглянуто програмний комплекс (ПК), який було обрано для виконання репроцесингу GPS-спостережень у Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України – «Bernese GPS Software ver. 5.0». Цей вибір був зумовлений тим, що даний ПК використовується переважною більшістю центрів аналізу Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі і одним із центрів аналізу Міжнародної ГНСС-служби, розповсюджується серед приватних та наукових установ, активно розвивається, існує зворотний зв'язок із командою розробників.

Комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» було розроблено в Астрономічному інституті Бернського університету (AIUB, м. Берн, Швейцарія) у 1995 р. Цей комплекс дозволяє обробляти як кодові, так і фазові спостереження ГНСС-супутників на пунктах локального, регіонального і глобального масштабів. У результаті обробки стає можливим отримати з високою точністю координати станцій, параметри орбіт супутників, поправки до годинників на супутниках та на приймачах, тропосферну рефракцію тощо.

У пункті 2.2 наведено основні важливі формати, які підтримує ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0». Найбільш важливим та широко поширеним є формат апаратно-незалежного обміну спостережень – RINEX. Також важливу частину інформації містять наступні формати даних:

- SP3 – формат даних для отримання інформації про точні ефемериди ГНСС-супутників та годинникової інформації з супутників;
- SINEX – формат даних, що містить розв'язок, коваріаційну інформацію, тропосферні параметри та дозволяє вилучити цю інформацію;
- IERS та IGS – формати даних для отримання параметрів обертання Землі;
- IONEX – формат даних для отримання іоносферної карти;
- ANTEX – формат даних для надання інформації про калібровку фазових центрів комбінацій антена–купол.

У пункті 2.3 подано принцип роботи модуля автоматизації роботи ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0» – «Bernese Processing Engine» (BPE). Завдяки цьому модулю стало можливим забезпечити автоматизацію обробки спостережень на високому рівні. BPE можна використовувати не тільки для обробки мереж, а й для завдань, які потребують високого ступеня автоматизації.

Третій розділ «Репроцесинг GPS-спостережень для GPS-тижнів 1236–1399» присвячено зведеній обробці (репроцесингу) архівних GPS-спостережень, що була виконана автором у Центрі аналізу ГНСС-даних у ГАО НАН України.

У пункті 3.1 наведено загальні характеристики мережі та вхідних даних. Репроцесинг виконано для GPS-тижнів 1236–1399 (14 вересня 2003 р. – 4 листопада 2006 р.) для 29 GPS-станцій, що розташовані на території Східної Європи, 12 з яких – на території України, рис. 1. Розв’язок репроцесингу позначено як *MA1*.

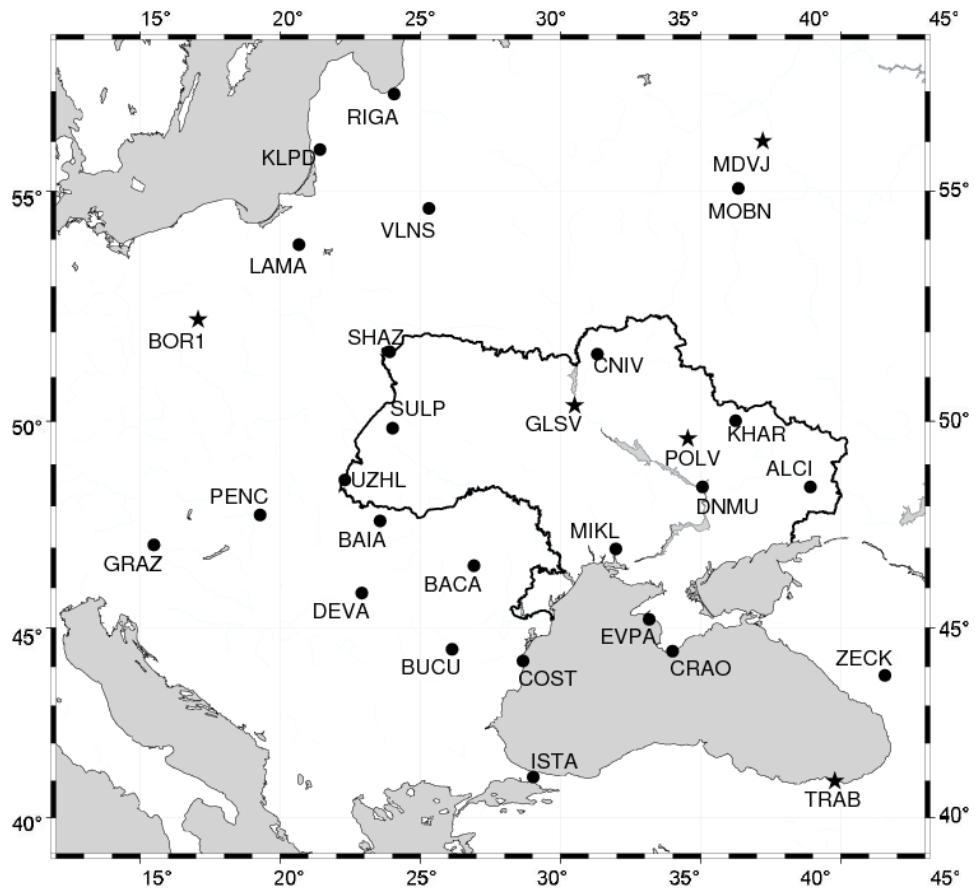


Рис. 1. Розташування GPS-станцій

У пункті 3.2 розглянуто основні відмінності між репроцесингом та регулярною обробкою, що була виконана у Центрі аналізу ГНСС-даних для тих самих GPS-тижнів та для тих самих GPS-станцій. Регулярна обробка була виконана за рекомендаціями EPN, що діяли до GPS-тижня 1400. Розв’язок регулярної обробки позначено як *MA0*. Загальні різниці між моделями та апіорними даними при виконанні постійної обробки та репроцесингу наведено в табл. 1.

У пункті 3.3 наведено методику виконання репроцесингу.

Процес отримання розв’язку для окремого GPS-тижня можна розділити на чотири етапи.

1. Попередня обробка добових сесій спостережень.
2. Отримання оцінок координат для окремої доби спостережень.
3. Отримання оцінок координат для окремого тижня.
4. Отримання фінальних значень зенітних тропосферних рефракцій для всіх GPS-станцій.

Основні моделі та апріорні дані, що використовувались
для розв'язків *MAO* та *MAI*

Дані та моделі	Розв'язок <i>MAO</i>	Розв'язок <i>MAI</i>
Система координат точних ефемерид	IGS00b	IGS05
Система апріорних координат та швидкостей станцій	IGS00b	IGS05
Метод встановлення системи координат	Жорсткі обмеження на координати станції GLSV	Обмеження «No-net translation» на координати станцій GLSV, POLV, MDVJ, BOR1 та TRAB
Модель океанічних навантажень	GOT00.2_PP	FES2004
Іоносферна модель	Формувалася під час обробки	CODE
Апріорна модель тропосфери	Не використовувалася	Опція DRY_NIELL для задавання моделі Саастамойнена
Моделі калібровок фазових центрів комбінацій антена–купол	Відносні	Абсолютні
Мінімальний кут місця GPS-спостережень	10°	3°
Програмне забезпечення	«Bernese GPS Software ver. 4.2»	«Bernese GPS Software ver. 5.0»

На етапі попередньої обробки спочатку виконувалась перевірка якості спостережень на рівні RINEX-файлів та перетворення вхідних даних до внутрішніх форматів. Після цього виконувалось оцінювання поправок до годинників на приймачах, що розташовані на GPS-станціях. Файли перших різниць формувались відповідно до набору баз з розв'язку *MAO*, щоб виключити можливий вплив на оцінки координат станцій. Попередня обробка дозволила визначити моменти стрибків фази, виявити малі інтервали спостережень та спостереження супутників з кутом місця менше 3°, які маркувалися на наступному кроці. Супутники з великою кількістю маркувань спостережень виключалися з подальшої обробки. Також виключалися з обробки станції, що мали велику кількість поганих спостережень.

На наступному етапі отримувалися добові розв'язки з дійсними значеннями фазових невизначеностей. Поряд із цим виконувалась оцінка параметрів тропосфери. Фіксування фазових невизначеностей виконувалось за допомогою методики QIF. Для цього використовувалась глобальна модель іоносфери, що була надана CODE, та тропосферні параметри, що були отримані на попередньому кроці

обробки.

На другому етапі виконувалась обробка спостережень з зафіксованими фазовими невизначеностями з метою отримання нормальних рівнянь. Зенітна тропосферна рефракція оцінювалась з використанням апріорної моделі. Після зрівнювання виконувалась перевірка якості оцінки координат референцних станцій. Параметри перетворення Гельмерта (тільки зміщення) між системою координат, яка задавалась отриманими координатами референцних станцій, та системою координат, що задавалась координатами референцних станцій з каталогу IGS05, мають бути рівними нулю в межах похибок. Якщо залишки після перетворень для будь-якої компоненти координат будь-якої станції перевищували встановлені максимальні значення, то ця станція виключалася зі списку референцних станцій для цієї доби і виконувалось повторне зрівнювання з використанням меншої кількості референцних станцій. Фінальне зрівнювання дозволяло отримати оцінки координат для добового розв'язку та нормальні рівняння. Результати зберігалися у форматі SINEX.

Після того, як були отримані розв'язки для всіх днів тижня, виконувалось зрівнювання добових файлів нормальних рівнянь. Задавання системи координат та перевірка оцінки якості координат референцних станцій виконувалась так само, як і для добового розв'язку.

На останньому етапі виконувалась фінальна оцінка зенітної тропосферної рефракції окремо для кожної доби. При цьому фіксувалися координати всіх станцій, що були отримані на третьому кроці.

У пункті 3.3 наведено результати розв'язку репроцесингу – координати у системі координат IGS05 та значення зенітної тропосферної рефракції для 29 GPS-станцій. Отримані файли для розв'язку *MAI* у форматах SINEX та TROPEX розміщено на ftp-сервері ГАО НАН України¹.

У четвертому розділі «Аналіз результатів репроцесингу» наведено аналіз результатів зведеної обробки. У пункті 4.1 надано загальну характеристику щодо точності репроцесингу. Середні значення повторюваності координат наступні:

- для північної компоненти – 0,79 мм,
- для східної компоненти – 0,67 мм,
- для висотної компоненти – 2,51 мм.

Щоб оцінити якість отриманого розв'язку *MAI*, було виконано порівняння з комбінованими розв'язками міжнародних служб. Результати порівняння наведено у пункті 4.2. Наявність комбінованого розв'язку кампанії репроцесингу *EPN Reprol* (позначеного як *EU0*) дало можливість виконати оцінку отриманих результатів репроцесингу *MAI*. Порівняння розв'язків виконувалось шляхом визначення параметрів перетворення Гельмерта та різниці зенітної тропосферної рефракції для GPS-станцій, що наявні в обох розв'язках. Значення параметрів Гельмерта між розв'язками *MAI* та *EU0* представлено в табл. 2.

Середні значення залишків координат на постійнодіючих станціях після перетворень Гельмерта між розв'язками *MAI* та *EU0* для північної, східної та висотної компонент склали наступні значення:

¹ <ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/products/IGS05>

Значення параметрів Гельмерта між розв'язками *MAI* та *EU0*,
MAI та *IGB*, *MAI* та *MAO*

Параметри		<i>MAI</i> та <i>EU0</i>	<i>MAI</i> та <i>IGB</i>	<i>MAI</i> та <i>MAO</i>
Зсув, мм	<i>X</i>	від -21,2 до 9,8	від -14,0 до 24,2	від -89,8 до 23,9
	<i>Y</i>	від -23,3 до 15,7	від -8,3 до 26,7	від -32,4 до 62,5
	<i>Z</i>	від -16,2 до 23,4	від -5,1 до 29,7	від -61,9 до -1,2
Обертання, мс дуги	<i>X</i>	від -0,49 до 0,61	від -0,61 до 0,49	від -1,87 до 0,46
	<i>Y</i>	від -0,92 до 0,47	від -0,61 до 0,47	від -1,49 до 1,43
	<i>Z</i>	від -0,32 до 0,52	від -0,33 до 0,50	від -0,89 до 0,62
Масштабний множник, 10^{-9}		від -0,7 до 0,9	від -3,3 до 1,7	від 0,8 до 11,4

- північна компонента: від -0,60 мм (для станції DEVA) до 0,42 мм (для станції PENC),
- східна компонента: від -0,38 мм (для станції MDVJ) до 0,23 мм (для станції KHAR),
- висотна компонента: від -2,07 мм (для станції DEVA) до 1,22 мм (для станції BACA).

Несуттєва різниця залишків координат після перетворення Гельмерта пояснюється різними геометріями мереж та способами реалізації системи координат (різний набір референсних станцій).

Середні значення різниць тропосферної рефракції між розв'язками *MAI* та *EU0* лежать в межах від -0,95 мм (для станції DEVA) до 0,75 мм (для станції ZECK). Отримані значення різниць Zenітної тропосферної рефракції знаходяться в межах похибок.

Також, однією з характеристик якості отриманого розв'язку в результаті репроцесингу є повторюваність координат станцій. На рис. 2 зображено середні значення повторюваності координат для 29 GPS-станцій для північної, східної та висотної компонент для розв'язків *MAI* та *EU0*.

Як видно з графіків, повторюваність координат для обох розв'язків знаходиться майже на одному рівні за якістю. Спираючись на вищезазначене, можна стверджувати, що за якістю отриманий в результаті репроцесингу розв'язок *MAI* відповідає комбінованому розв'язку EPN.

Наявність комбінованого розв'язку кампанії репроцесингу *IGS Repro1* (позначеного як *IGB*) дозволила виконати ще одну оцінку отриманих результатів репроцесингу *MAI*.

Значення параметрів Гельмерта між розв'язками *MAI* та *IGB* представлено в табл. 2.

Середні значення залишків координат на постійнодіючих станціях після перетворень Гельмерта між розв'язками *MAI* та *IGB* для північної, східної та висотної компонент склали наступні величини:

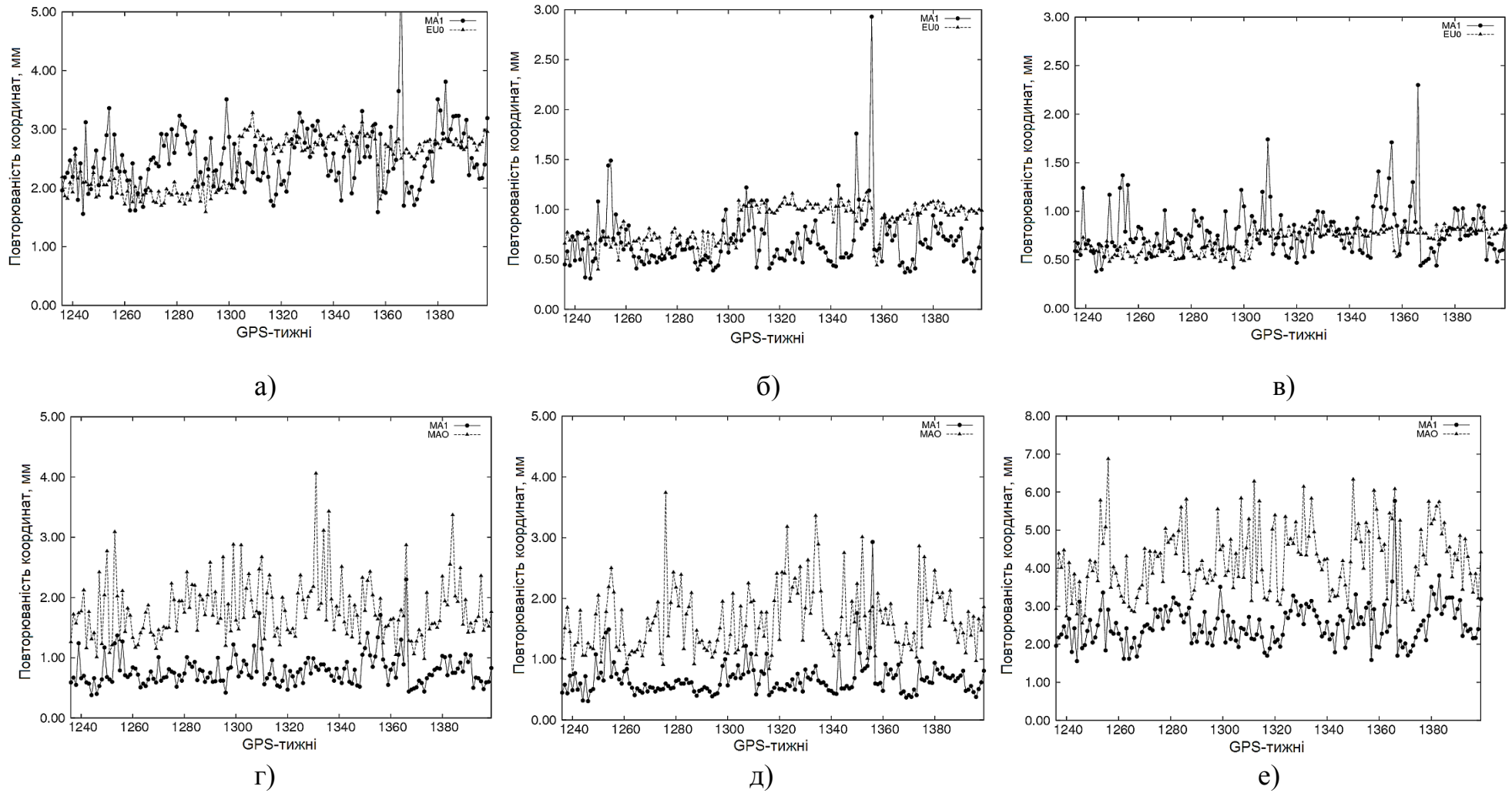


Рис. 2. Повторюваність координат станцій для розв'язків *MA1* та *EU0* (а – північна, б – східна, в – висотна компоненти) та для розв'язків *MA1* та *MAO* (г – північна, д – східна, е – висотна компоненти)

- північна компонента: від $-0,60$ мм (для станції MDVJ) до $0,40$ мм (для станції MIKL),
- східна компонента: від $-0,72$ мм (для станції COST) до $0,74$ мм (для станції MOBN),
- висотна компонента: від $-2,79$ мм (для станції SULP) до $4,58$ мм (для станції MOBN).

Основні причини для несуттєвих різниць між залишками ті ж самі, що для розв'язків *MAI* та *EU0* – різна геометрія мереж та способи реалізації системи координат (різний набір референціальних станцій).

При наявності трьох різних розв'язків стало можливим отримати «зовнішні» оцінки точності розв'язків. Оскільки, кожен розв'язок представляє свою координатну реалізацію, за допомогою трансформації Гельмерта координати станцій розв'язків *MAI* та *EU0* були приведені до системи координат, що реалізується розв'язком *IGB*. Це дозволило виключити систематичні похибки між розв'язками. Оскільки усі три розв'язки базується на одному і тому ж спостережувальному матеріалі, то між ними повинна існувати велика взаємна кореляція.

Для розрахунку «зовнішніх» похибок та коефіцієнтів кореляцій було використано метод, який було розроблено в ГАО НАН України. Ідея методу полягає в наступному. Нехай маємо M рішень з N спільними станціями. Позначимо одну з координат (X , Y або Z) через x .

Для i -ої станції знайдемо середні значення x_i^0 та похибку σ_i^0 :

$$x_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^M p_i^j x_i^j}{\sum_{j=1}^M p_i^j} \text{ та } (\sigma_i^0)^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^M p_i^j},$$

де $p_i^j = \sqrt{p_i^j}$ – ваги координати i -ої станції з j -го розв'язку x_i^j . Знайдемо для кожної спільної станції різниці координат $\Delta x_i^{j0} = x_i^j - x_i^0$ та будемо розглядати отримані величини $\{\Delta x_i^{j0}\}_{i=1, \dots, N}$ як випадкові. Перейдемо від них до центрованих величин та розглянемо систему рівнянь, що створена з математичних сподівань квадратів сум та різниць координат l -го та k -го розв'язків:

$$\begin{aligned} d_{kl} &= M [(\Delta \hat{x}^{k0} - \Delta \hat{x}^{l0})] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 - 2\rho_{kl} \sigma_k \sigma_l, \\ s_{kl} &= M [(\Delta \hat{x}^{k0} + \Delta \hat{x}^{l0})] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 + 2\rho_{kl} \sigma_k \sigma_l, \end{aligned}$$

де M – оператор математичного сподівання, σ_k та σ_l – «зовнішні» середньоквадратичні похибки визначення координат l -го та k -го розв'язків, ρ_{kl} – коефіцієнт кореляції між відповідними координатами l -го та k -го розв'язків, $\Delta \hat{x}^{kl}$ – центровані значення Δx_i^{k0} .

У випадку трьох розв'язків, створюючи суми величин d_{kl} та s_{kl} , отримаємо лінійну систему рівнянь відносно σ_k^2 , $k = 1, 2, 3$, розв'язком яких є:

$$\begin{aligned}\sigma_1^2 &= \frac{1}{4} (s_{12} + s_{13} - s_{23} + d_{12} + d_{13} - d_{23}), \\ \sigma_2^2 &= \frac{1}{4} (s_{12} + s_{23} - s_{13} + d_{12} + d_{23} - d_{13}), \\ \sigma_3^2 &= \frac{1}{4} (s_{23} + s_{13} - s_{12} + d_{23} + d_{13} - d_{12}).\end{aligned}$$

Створюючи різниці величин d_{kl} та s_{kl} , можемо отримати вирази для коефіцієнтів кореляції:

$$\begin{aligned}\rho_{12} &= \frac{s_{12} - d_{12}}{4\sigma_1\sigma_2}, \\ \rho_{13} &= \frac{s_{13} - d_{13}}{4\sigma_1\sigma_3}, \\ \rho_{23} &= \frac{s_{23} - d_{23}}{4\sigma_2\sigma_3}.\end{aligned}$$

Середні значення «зовнішніх» оцінок середньоквадратичних похибок та коефіцієнтів кореляцій розв'язків *MAI*, *EU0* та *IGB* наведено в табл. 3.

Таблиця 3

«Зовнішні» оцінки точності розв'язків: середні значення середньоквадратичних похибок та коефіцієнтів кореляцій

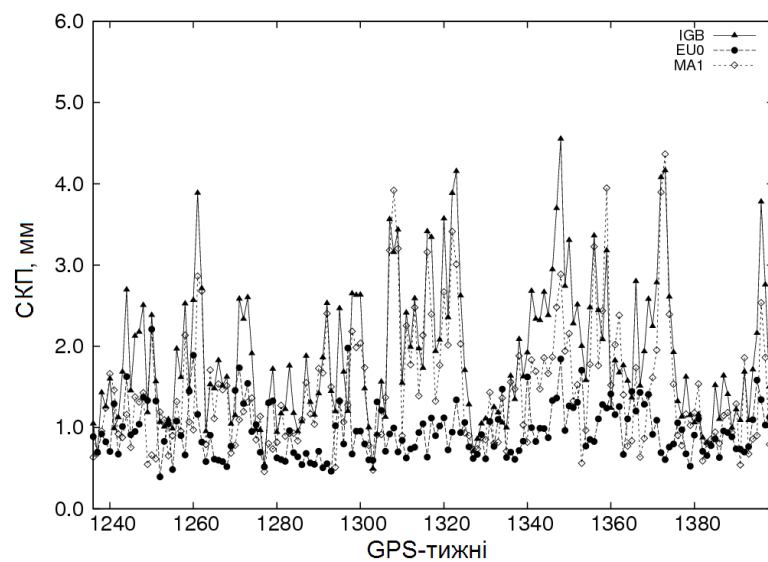
Координата	σ_{IGB} , мм	σ_{EU0} , мм	σ_{MAI} , мм	$\rho_{IGB-EU0}$	$\rho_{IGB-MAI}$	$\rho_{EU0-MAI}$
<i>X</i>	1,9	1,0	1,5	-0,608	-0,794	0,122
<i>Y</i>	1,6	1,6	1,4	-0,608	-0,418	-0,252
<i>Z</i>	2,3	1,3	2,1	-0,408	-0,752	-0,115

На рис. 3 зображено «зовнішні» середньоквадратичні похибки для координат *X*, *Y* і *Z* для розв'язків *MAI*, *EU0* і *IGB* для кожного GPS-тижня.

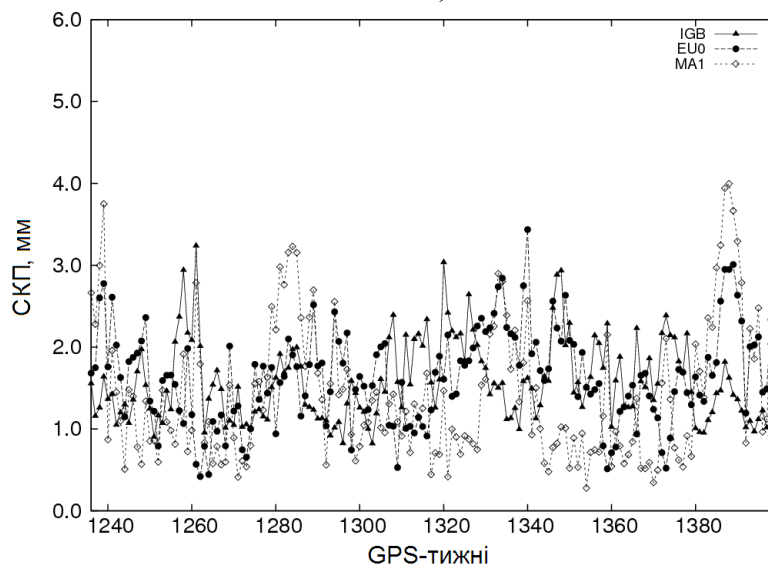
У пункті 4.3 наведено результати порівняння розв'язку репроцесингу з розв'язком регулярної обробки ГАО НАН України. Оскільки для розв'язку *MAO* координати були оцінені в системі відліку IGS00b, а для розв'язку *MAI* – в системі відліку IGS05, то для виконання порівняння необхідно було перетворити координати розв'язку *MAO* з системи координат IGS00b до IGS05. Перетворення було здійснено за допомогою сервісу, що надається на сайті Центрального бюро EPN². Параметри Гельмерта між розв'язками *MAI* та *MAO* наведено в табл. 2.

Середні значення різниць тропосферної рефракції між розв'язками *MAI* та *MAO* лежать в межах від -16,11 мм (для станції MDVJ) до -7,80 мм (для станції DNMU).

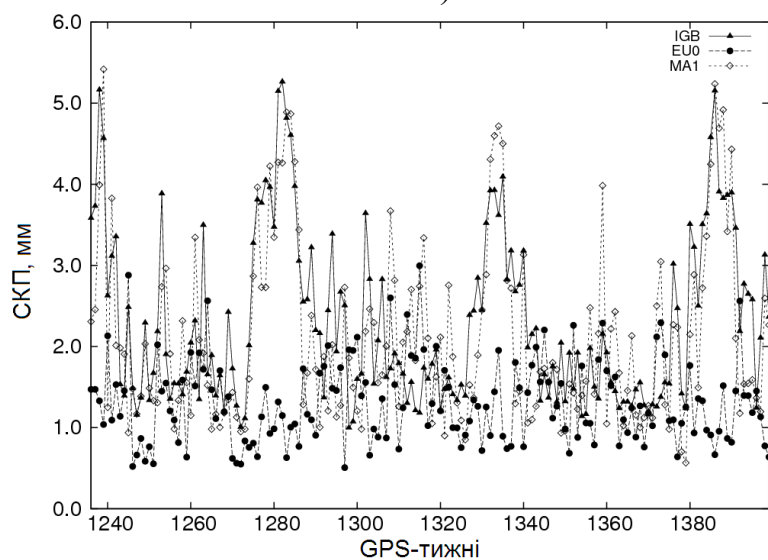
² http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/



а)



б)



в)

Рис. 3. Значення «зовнішніх» середньоквадратичних похибок розв'язків *MA1*, *EU0* та *IGB* (а – координата *X*, б – координата *Y*, в – координата *Z*)

Різниці зумовлено використанням апріорної моделі тропосфери, кращої функції нахилу та визначенням тропосферного градієнта, завдяки чому стало можливим використовувати спостереження супутників з кутом місця менш 10° .

Середні значення залишків координат на постійнодіючих станціях після перетворень Гельмерта між розв'язками *MAI* та *MAO* для північної, східної та висотної компонент склали наступні величини:

- північна компонента: від $-1,71$ мм (для станції TRAB) до $3,29$ мм (для станції MDVJ),
- східна компонента: від $-2,08$ мм (для станції MDVJ) до $2,18$ мм (для станції KHAR),
- висотна компонента: від $-7,41$ мм (для станції DNMU) до $13,79$ мм (для станції MDVJ).

Також була отримана повторюваність координат для розв'язків *MAI* та *MAO*. Відповідні значення представлено на рис. 2.

Видно, що значення повторюваності координат для розв'язку *MAI* майже в три рази менші для північної та східної компонент та у два рази менші для висотної компоненти, ніж для розв'язку *MAO*, що дозволяє зробити висновок, що використання покращених орбіт, нових моделей та методик обробки дозволило підвищити точність оцінки координат GPS-станцій.

Для додаткової оцінки якості отриманих результатів репроцесингу (координат станцій та значень зенітної тропосферної рефракції на станціях) ряди координат та зенітної тропосферної рефракції були перевірені на розриви на момент початку GPS-тижня 1400 та їх подальшу узгодженість. Для цього були взяті оцінки координат станцій та зенітної тропосферної рефракції з регулярної обробки Центру аналізу ГНСС-даних ГАО для GPS-тижнів 1400–1631 (5 листопада 2006 р. – 10 квітня 2011 р.).

Як можна бачити з графіків, що представлені в Додатку Б дисертації для широти, для довготи, для висоти та для зенітної тропосферної рефракції для станцій розривів на вказаній момент (GPS-тиждень 1400) не зафіксовано. Невеличкі зміни в поведінці часових рядів, скоріше за все, викликані різницями в геометрії мереж постійнодіючих станцій та формуванням різних наборів файлів перших різниць для репроцесингу та регулярної обробки.

У пункті 4.4 визначено вплив використаних абсолютних моделей калібровок комбінацій антена–купол на координати постійнодіючих GPS-станцій. Залишки після перетворень Гельмерта можуть надати інформацію про вплив переходу від відносних до абсолютних моделей калібровок фазових центрів комбінацій антена–купол на координати GPS-станцій.

Для порівняння в табл. 4 наведено залишки після перетворень Гельмерта для висотної компоненти між розв'язками *MAI* та *MAO* (позначено як M1) та залишки для тих самих комбінацій антена–купол з роботи Khoda O., Bruyninx C.³ (позначено як B3). Можна відмітити, що середні значення залишків для більшості комбінацій антена–купол близькі. Значні відмінності значень спостерігаються, здебільшого, у

³ Khoda O. Influence of changing GPS antenna calibrations on EPN station coordinates // Khoda O., Bruyninx C. // Presented at the Symposium of the IAG Sub commission for Europe (EUREF) held in Brussels, Belgium. – 2008

випадку різних кількостей станцій для окремих комбінацій антена–купол (мережа, яка використовувалась для отримання розв’язку ВЗ, складалась зі 134 ГНСС-станцій).

Отримані результати надають підстави стверджувати наступне: основний внесок у різниці координат викликано зміною моделей фазових центрів комбінацій антена–купол, що використовувались для розв’язку *MAI* (абсолютних замість відносних), та покращених орбіт GPS-супутників.

Таблиця 4

Залишки висотної компоненти після перетворень Гельмерта

Комбінація антена–купол		Кількість станцій	U (mm) $\pm$ dU (mm)
AOAD/M_T	NONE	1 (M1)	13,98 $\pm$ 1,24
		14 (B3)	-0,89 $\pm$ 7,51
AOAD/M_T	SCIS	1 (M1)	-4,86 $\pm$ 1,95
		0 (B3)	–
ASH700936A_M	NONE	1 (M1)	-3,07 $\pm$ 1,58
		3 (B3)	1,14 $\pm$ 3,57
ASH700936D_M	NONE	1 (M1)	-2,00 $\pm$ 1,70
		1 (B3)	8,80 $\pm$ 5,94
ASH700936D_M	SNOW	4 (M1)	9,84 $\pm$ 2,84
		8 (B3)	13,54 $\pm$ 10,39
ASH700936E	NONE	1 (M1)	-0,46 $\pm$ 0,93
		1 (B3)	-1,77 $\pm$ 1,81
ASH700936F_C	SNOW	1 (M1)	0,13 $\pm$ 1,34
		0 (B3)	–
ASH701945B_M	NONE	1 (M1)	-0,65 $\pm$ 1,28
		4 (B3)	-2,59 $\pm$ 3,55
ASH701945C_M	SCIS	1 (M1)	10,46 $\pm$ 2,44
		0 (B3)	–
JPSREGANT__DD_E	NONE	1 (M1)	13,79 $\pm$ 2,36
		3 (B3)	12,49 $\pm$ 7,08
LEIAT504	LEIS	4 (M1)	0,42 $\pm$ 1,23
		17 (B3)	-10,86 $\pm$ 3,15
TRM14532,00	NONE	1 (M1)	-7,41 $\pm$ 8,52
		2 (B3)	-10,56 $\pm$ 1,92
TRM29659,00	NONE	7 (M1)	-1,80 $\pm$ 1,52
		36 (B3)	1,12 $\pm$ 5,72
TRM41249,00	NONE	5 (M1)	-3,72 $\pm$ 1,50
		6 (B3)	-4,13 $\pm$ 3,78

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено результати зведеної обробки (репроцесингу) GPS-спостережень, що були отримані в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України. В рамках завдань дисертації зроблено та проаналізовано наступне.

1. За допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0» виконано репроцесинг GPS-спостережень для GPS-тижнів 1236–1399 та отримано однорідні координатні ряди для 29 GPS-станцій у системі координат IGS05 (розв'язок *MA1*). Визначено значення зенітної тропосферної рефракції для 29 GPS-станцій. Використання горизонтального тропосферного градієнта дозволило враховувати спостереження низьких супутників, що призвело до покращення оцінки параметрів зенітної тропосферної рефракції. Середні різниці зенітної тропосферної рефракції між розв'язками *MA1* та комбінованим розв'язком (*EU0*) знаходяться в межах похибок (від $-0,95$ мм до $1,17$ мм). Покращені результати значень тропосферної рефракції можна використовувати для фундаментальних та прикладних задач космічної геодинаміки.
2. Для перевірки якості розв'язку *MA1* були отримані параметри перетворення Гельмерта між розв'язком *MA1* та комбінованими розв'язками Міжнародної ГНСС-служби (*IGB*) та Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі (*EU0*). Розв'язок *MA1* відповідає за якістю комбінованим розв'язкам репроцесингів IGS та EPN. Основні відмінності викликані різницями в геометрії мереж та способами реалізації системи координат (різний набір референцних станцій). Середні значення «зовнішніх» похибок для розв'язків склали:
 для розв'язку *MA1* – $1,5$ мм; $1,4$ мм та $2,1$ мм,
 для розв'язку *IGB* – $1,9$ мм; $1,6$ мм та $2,3$ мм,
 для розв'язку *EU0* – $1,0$ мм; $1,6$ мм та $1,3$ мм
 для координат X , Y та Z відповідно. Отже, можна стверджувати що за точністю отримані координатні ряди в результаті репроцесингу, за якістю відповідає комбінованим розв'язкам IGS та EPN.
3. Перевірено часові ряди координат та значень зенітної тропосферної рефракції на розриви на момент початку GPS-тижня 1400. Розривів на вказаний момент часу не спостерігається. Невеликі зміни у поведінці координатних рядів викликані різницями у геометрії мереж, формуванням іншого набору файлів перших різниць та референцних станцій у регулярному розв'язку.
4. Виконано порівняння повторюваності координат між розв'язком *MA1* та регулярним розв'язком Центру аналізу ГНСС-даних (*MAO*). Для розв'язку *MA1* значення повторюваності координат майже в два рази менші для північної та східної компонент та у три рази менші для висотної компоненти у порівнянні з розв'язком *MAO*. Отримані координати дозволяють забезпечити більш точну координатну реалізацію ITRF на території України. Залишки після перетворення Гельмерта між розв'язками *MA1* та *MAO* надали інформацію про вплив переходу від відносних до абсолютних моделей

калібровок комбінацій антена–купол. Основний внесок у зміни координат та зенітної тропосферної рефракції для GPS-станцій викликано використанням абсолютних моделей калібровок комбінацій антена–купол та покращених орбіт GPS-супутників.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковано в наукових журналах:

1. *Ищенко М. В.* Обзор сетей перманентных ГНСС-станций / Ищенко М. В. // Вісник астрономічної школи. – 2009. – Т.6, № 1. – С. 114–117.
2. *Ищенко М. В.* Оценка качества репроцессинга GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 1236–1399 / Ищенко М. В. // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т.18. – № 4. – С. 66–73.
3. *Ищенко М. В.* Репроцессинг GPS-наблюдений: влияние моделей калибровки комбинаций антенна–купол на координаты перманентных GPS-станций / Ищенко М. В. // Кинематика и физика небесных тел. – 2012. – Т.28. – № 4. – С. 76–82.
4. *Ищенко М. В.* Центр анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины: результаты репроцессинга GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 1236–1399 / Ищенко М. В. // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т.18. – № 6. – С. 76–80.
5. *Ищенко М. В.* Репроцессинг GPS-наблюдений, выполненных на перманентных станциях региональной сети, для GPS-недель 1390–1399 / Ищенко М. В., Хода О. А. // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т.17. – № 5. – С. 40–49.

Опубліковано в працях та тезах конференцій:

6. *Ищенко М. В.* Оцінка зенітної тропосферної рефракції для постійнодіючих GPS-станцій з використанням різних методик та моделей / Іщенко М. В. // XIII міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених». – Чернігів, 2011. – С. 28–29.
7. *Ищенко М. В.* Влияние моделей калибровки комбинаций антенна–купол на координаты перманентных GPS-станций / Ищенко М. В., Хода О. А. // VII міжнародна науково-практична конференція «Нові досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід». – Чернігів, 2011. – С. 81–84.
8. *Ищенко М. В.* Репроцессинг GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети: сравнение повторяемости координат с регулярным решением / Ищенко М. В. // VIII міжнародно-практична конференція «Нові досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід». – Чернігів, 2012. – С. 41–45.
9. *Ищенко М. В.* О влиянии новых моделей и методик обработки на координаты украинских ГНСС-станций / Ищенко М. В., Хода О. А. // V науково-

практична конференція «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні». – Ужгород, 2010. – С. 93–96.

10. *Ischenko M.* GPS reprocessing campaign in the Main Astronomical Observatory of NAS Ukraine / *Ischenko M. V.* // 19-th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. – Kyiv, 2012. – 56 p.

АНОТАЦІЯ

Ищенко М. В. Зведена обробка спостережень регіональної GPS-мережі та її результати. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2012.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми отримання узгоджених координатних рядів перманентних GPS-станцій та параметрів зенітної тропосферного рефракції (насамперед, для українських станцій). Вирішення даної проблеми дозволяє отримати однорідний координатний розв'язок, вільний від ефектів, привнесених змінами в методиках обробки, моделях, апіорних даних та програмному забезпеченні.

Наведено результати зведеної обробки (репроцесингу) архівних GPS-спостережень, що виконана в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України для періоду спостережень з 14 вересня 2003 р. до 4 листопада 2006 р. (163 GPS-тижні) для 29 GPS-станцій, розташованих на території Східної Європи (12 з яких – на території України).

Вперше отримано однорідні координатні ряди в системі координат IGS05 і значення зенітної тропосферної рефракції для 29 GPS-станцій.

Незважаючи на використання різних моделей та методик обробки, наприклад, різні методи завдання системи координат, модель океанічних навантажень тощо, основний вплив на точність визначення координат і зенітної тропосферної рефракції на станціях зумовлено використанням абсолютних моделей калібровок комбінацій антена–купол замість відносних, покращених орбіт GPS-супутників та апіорної тропосферної моделі.

Ключові слова: Глобальна система визначення місцеположення (GPS), зведена обробка, репроцесинг, постійнодіюча ГНСС-станція, каталоги розв'язків, узгоджені координатні ряди, зенітна тропосферна рефракція.

ABSTRACT

Ishchenko M. V. Consistent processing of observations of the regional GPS network and its results. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree by speciality 01.03.01 – Astrometry and celestial mechanics. – Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2012.

The thesis is devoted to concerted about the problem of obtaining consistent coordinate series of permanent GNSS stations and parameters of zenith tropospheric refraction (primarily for Ukrainian stations). The solution of this problem allows to receive homogeneous coordinate solution free from effects introduced by changes in the methods of processing models, a priori data and software.

The results of the consistent processing (reprocessing) of archival GPS observations performed at the Centre for Analysis of GNSS data at MAO NAS of Ukraine for the observation period from September 14, 2003 to November 4, 2006 (163 GPS weeks) for 29 GPS stations located in the Eastern Europe (12 of them are on the territory of Ukraine) are presented.

For the first time, homogeneous coordinate solution in the IGS05 reference frame and the values of the zenith tropospheric refraction for 29 GPS stations are obtained.

Despite of the use of different models and processing techniques, for example, different methods of fixing of reference coordinate frames, the models of ocean loading etc., the main influence on the precision of positioning and zenith tropospheric refraction at stations is caused by the usage of absolute models of combination antenna/radome combinations instead of relative and improved orbits of the GPS satellites and a priori model of tropospheric.

Keywords: Global Positioning System (GPS), consistent processing, reprocessing, permanent GNSS station, catalogues, consistent coordinate solution, zenith tropospheric refraction.

АННОТАЦИЯ

Ищенко М. В. Сводная обработка наблюдений региональной GPS-сети и ее результаты. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 – Астрономия и небесная механика. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2012.

Диссертация посвящена решению проблемы получения согласованных координатных рядов перманентных GPS-станций и параметров зенитной тропосферной рефракции (прежде всего, для украинских станций). Разрешение данной проблемы позволяет получить однородное координатное решение, лишенное эффектов, привносимых изменениями в методиках обработки, моделях, априорных данных и программном обеспечении.

Наличие точных эфемерид GPS-спутников в системе координат IGS05, полученных в результате кампании репроцессинга, выполненной Международной ГНСС-службой (IGS), дало возможность организовать репроцессинг архивных наблюдений GPS-спутников в соответствии с новыми рекомендациями Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN), вступившими в силу с GPS-недели 1400 (5 ноября 2006 г.).

Приведены результаты сводной обработки (репроцессинга) архивных GPS-наблюдений, выполненной в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины для периода наблюдений с 14 сентября 2003 г. по 4 ноября 2006 г. (163 GPS-недели) для

29 GPS-станций, расположенных на территории Восточной Европы (12 из которых – на территории Украины). Обработка выполнялась с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» в соответствии с новыми рекомендациями EPN.

Впервые получены однородные координатные ряды в системе координат IGS05 и значения зенитной тропосферной рефракции для 29 GPS-станций (решение *MAI*).

Для проверки качества решения *MAI* были получены параметры трансформации Гельмерта между решением *MAI* и комбинированными решениями IGS (*IGB*) и EPN (*EU0*). Полученные результаты позволили сделать вывод, что репроцессинг, выполненный автором, по качеству соответствует репроцессингам IGS и EPN. Основные различия вызваны разностями в геометрии сети и наборе референчных станций для задания системы координат. Полученные средние разности зенитной тропосферной рефракции между решениями *MAI* и *EU0* для 29 GPS-станций находятся в пределах ошибок (от –0,95 мм до 1,17 мм).

Полученные средние значения «внешних» погрешностей для решений составили: *MAI* – 1,5 мм, 1,4 мм и 2,1 мм; *IGB*: 1,9 мм, 1,6 мм и 2,3 мм; *EU0*: 1,0 мм, 1,6 мм и 1,3 мм для координат *X*, *Y* и *Z* соответственно. Результаты говорят о том, что репроцессинг выполнен на уровне решений IGS и EPN.

Было выполнено сравнение координатной повторяемости между решениями *MAI* и регулярным решением Центра анализа ГНСС-данных (*MAO*). Для решения *MAI* значения повторяемости координат почти в три раза меньше для северной и восточной компонент и в два раза меньше для восточной компоненты в сравнении с решением *MAO*.

Полученные остатки после трансформации Гельмерта между решениями *MAI* и *MAO* дали информацию о влиянии перехода от относительных к абсолютным моделям калибровок комбинаций антенна–купол. Несмотря на использование различных моделей и методик обработки, к примеру, разные системы задания системы координат, модели океанической нагрузки и т.д., основное влияние на точность определения координат и зенитной тропосферной рефракции на станциях оказано использованием абсолютных моделей калибровок комбинаций антенна–купол вместо относительных и улучшенных орбит GPS-спутников.

Ключевые слова: Глобальная система определения местоположения (GPS), сводная обработка, репроцессинг, перманентная ГНСС-станция, каталоги решений, согласованные координатные ряды, зенитная тропосферная рефракция.