

Національна академія наук України

Головна астрономічна обсерваторія

На правах рукопису

Іщенко Марина Вікторівна

УДК 528.2:629.78

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

Спеціальність 01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук,

Хода Олег Олександрович

Київ – 2012

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. GPS – Глобальна система визначення	
місцеположення	14
1.1. Історія створення GPS	14
1.2. Архітектура системи	14
1.2.1. Космічний сегмент	14
1.2.2. Сегмент керування	17
1.2.3. Сегмент користувача	18
1.3. Структура сигналу GPS-супутника	20
1.4. Інформація з супутника	22
1.4.1. Навігаційне повідомлення	22
1.4.2. Альманах	23
1.4.3. Трансльовані ефемериди	25
1.4.4. Точні ефемериди	27
1.5. Основні рівняння	27
1.5.1. Загальні положення	27
1.5.2. Кодові псевдовіддалі	28
1.5.3. Фазові псевдовіддалі	28
1.5.4. Вплив атмосферних рефракцій	29
1.5.5. Формування різниць	30
1.5.6. Лінійні комбінації	31
1.6. Основні джерела похибок GPS-спостережень	33
1.6.1. Типи похибок	32
1.6.2. Атмосферні рефракції	34
1.6.3. Варіації фазового центру комбінацій антена–купол	36
1.6.4. Інші систематичні ефекти	38
1.7. Модернізація GPS	39

1.8.	Міжнародні служби	40
1.8.1.	Міжнародна ГНСС-служба (IGS)	40
1.8.2.	Європейська перманентна ГНСС-мережа (EPN)	44

РОЗДІЛ 2. Програмний комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» як основний інструментарій обробки GPS-спостережень

2.1.	Опис програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0»	47
2.2.	Вхідні дані	50
2.3.	Модуль «Bernese Processing Engine»	54
2.4.	Висновки	57

РОЗДІЛ 3. Репроцесинг GPS-спостережень для GPS-тижнів 1236-1399

3.1.	Опис мережі GPS-станцій та вхідних даних для репроцесингу	58
3.2.	Відмінності репроцесингу від попередньої регулярної обробки	62
3.3.	Методика репроцесингу	64
3.3.1.	Сценарій виконання репроцесингу	64
3.3.2.	Попередня обробка	67
3.3.3.	Добовий розв'язок	70
3.3.4.	Тижневий розв'язок	71
3.3.5.	Фінальна оцінка зенітної тропосферної рефракції	71
3.4.	Узгоджені координатні ряди та тропосферна зенітна рефракція на GPS-станціях	74
3.5.	Висновки	77

РОЗДІЛ 4. Аналіз результатів репроцесингу	79
4.1. Загальні зауваження щодо точності репроцесингу	79
4.2. Порівняння результатів репроцесингу з комбінованими розв'язками міжнародних служб	81
4.2.1. Порівняння результатів репроцесингу з комбінованим розв'язком Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі	81
4.2.2. Порівняння результатів репроцесингу з комбінованим розв'язком Міжнародної ГНСС- служби	90
4.2.3. Розрахунок «зовнішніх» похибок та коефіцієнтів кореляцій	96
4.3. Порівняння результатів репроцесингу з регулярною обробкою Центру аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України	100
4.3.1. Порівняння оцінок координат та zenітної тропосферної рефракції GPS-станцій	100
4.3.2. Аналіз узгодженості репроцесингу та подальшої регулярної обробки	109
4.4. Вплив використаних моделей калібровок антена-купол на координати постійнодіючих GPS-станцій	111
4.5. Висновки	115
ВИСНОВКИ	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	120
ДОДАТОК А	131
ДОДАТОК Б	144

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГАО	<u>Г</u> оловна <u>А</u> строномічна <u>О</u> бсерваторія
ГНСС	<u>Г</u> лобальні <u>Н</u> авігаційні <u>С</u> упутникові <u>С</u> истеми
ПК	<u>П</u> рограмний <u>К</u> омплекс
ПОЗ	<u>П</u> араметри <u>О</u> бертання <u>З</u> емлі
A-S	<u>A</u> nti- <u>S</u> poofing
ANTEX	<u>A</u> ntenna <u>E</u> xchange Format
ARP	<u>A</u> ntenna <u>R</u> eference <u>P</u> oint
AIUB	<u>A</u> stronomical <u>I</u> nstitute, <u>U</u> niversity of <u>B</u> ern
BPE	<u>B</u> ernese <u>P</u> rocessing <u>E</u> ngine
C/A	<u>C</u> oarse <u>A</u> cquisition
CODE	<u>C</u> enter for <u>O</u> rbit <u>D</u> etermination in <u>E</u> urope
DCB	<u>D</u> ifference <u>C</u> ode <u>B</u> iases
DOP	<u>D</u> ilution of <u>P</u> recision
ERP	<u>E</u> arth <u>R</u> otation <u>P</u> arameters
EUREF	<u>R</u> eference <u>F</u> rame Sub-Commission for <u>E</u> urope
GIM	<u>G</u> lobal <u>I</u> onosphere <u>M</u> ap
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
IAG	<u>I</u> nternational <u>A</u> ssociation of <u>G</u> eodesy
IERS	<u>I</u> nternational <u>E</u> arth <u>R</u> otation and Reference Systems <u>S</u> ervice
IGS	<u>I</u> nternational <u>G</u> NSS <u>S</u> ervice
IONEX	<u>I</u> onosphere <u>E</u> xchange Format
ITRF	<u>I</u> nternational <u>T</u> errestrial <u>R</u> eference <u>F</u> rame
LC	<u>L</u> inear <u>C</u> ombination
LOD	<u>L</u> ength of <u>D</u> ay
NMF	<u>N</u> iell <u>M</u> apping <u>F</u> unction
PCO	<u>P</u> hase <u>C</u> enter <u>O</u> ffset
PCV	<u>P</u> hase <u>C</u> enter <u>V</u> ariation
PID	<u>P</u> rocess <u>I</u> D

PM	<u>P</u> olar <u>M</u> otion
PRN	<u>P</u> seudo <u>R</u> ange <u>N</u> oise
QIF	<u>Q</u> uasi <u>I</u> onosphere <u>F</u> ree
RINEX	<u>R</u> eceiver <u>I</u> ndependent <u>E</u> xchange Format
SINEX	<u>S</u> olution <u>I</u> ndependent <u>E</u> xchange Format
SP3	<u>S</u> tandard <u>P</u> roduct v.3
TEC	<u>T</u> otal <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent
TVEC	<u>T</u> otal <u>V</u> ertical <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent
UTC	<u>U</u> niversal <u>T</u> ime <u>C</u> oordinated
WGS-84	<u>W</u> orld <u>G</u> eodetic <u>S</u> ystem 19 <u>84</u>

ВСТУП

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, апріорних 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 постійнодіючої 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 для мережі станцій, 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-станції; 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;
- порівняння 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 [5–10, 52] виконано самостійно, три – у співавторстві. В роботах [11–13] 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 [5, 7–8, 10, 13], три в матеріалах конференцій [9, 11–12] та дві у збірниках тез конференцій [6, 52].

Розділ 1

GPS – ГЛОБАЛЬНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ

У цьому розділі ми подаємо коротку інформацію з історії створення GPS та її використання для розв'язання наукових задач в астрометрії та геодезії.

1.1. Історія створення GPS

Глобальна система визначення місцеположення (Global Positioning System, GPS) – всепогодна навігаційна система космічного базування, що забезпечує високоточними даними про місцезнаходження користувача в будь-якому місці на поверхні Землі [2–3, 16, 50]. За функціонування GPS відповідає Офіс спільних програм, що є складовою космічно-ракетного центру в Ель-Сегундо, штат Каліфорнія, США. У 1973 р. Міністерство оборони США поставило перед Офісом спільних програм завдання встановити, розробити, випробувати та розгорнути навігаційну систему космічного базування. Із цієї початкової ініціативи виникла сучасна навігаційна система, здатна до вимірювання часу та віддалей. Оскільки ініціатором побудови GPS було Міністерство оборони США, то її завдання мали військове спрямування [2].

GPS створювалась як система вимірювання віддалей від відомих положень супутників у космосі до невідомих місцеположень на землі, у морі, в повітрі або навколоземному космосі. Спочатку перед GPS ставилася мета миттєвого визначення положення та швидкості на неперервній основі, а також високоточного координування часу (тобто поширення часу) [3].

1.2. Архітектура системи

1.2.1. Космічний сегмент. GPS-супутники мають приблизно колові орбіти висотою 20200 км над поверхнею Землі, тобто вони належать до класу супутників із середньою навколоземною орбітою, і мають період обертання приблизно 12 зоряних годин. Формально сузір'я складається із 24 працездатних

супутників, що розгорнуті у шести рівновіддалених площинах із нахилом 55° до екватора, по чотири супутники на одну площину, рис. 1.1.

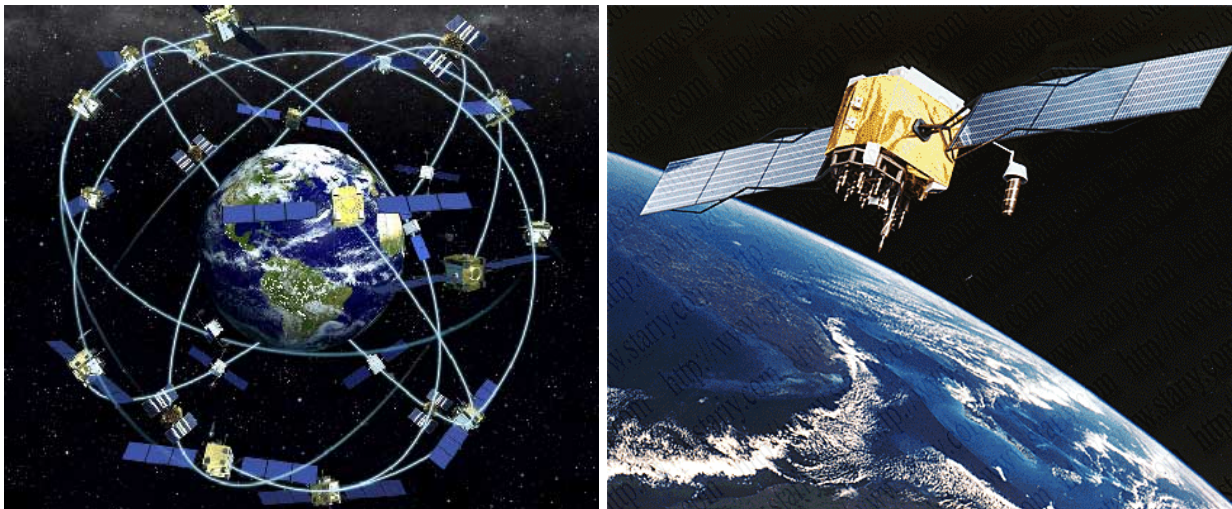


Рис. 1.1. Космічний GPS-сегмент та вигляд GPS-супутника Block II¹

Окрім цих супутників можуть працювати активні запасні супутники. За допомогою такої архітектури сузір'я супутників космічний сегмент забезпечує глобальне покриття: у будь-який момент доби у будь-якому місці на висоті понад 15° над горизонтом можна одночасно спостерігати від чотирьох до восьми супутників. Якщо мінімальний кут місця зменшити до 10° , то деколи буде видно до 10 супутників, а якщо мінімальний кут місця зменшити до 5° – до 12 супутників.

GPS-супутники є платформою для комплексу із трансиверів (приймачів-передавачів), атомних годинників, комп'ютерів та різноманітної допоміжної апаратури. Електронне обладнання кожного супутника дає користувачеві змогу вимірювати псевдовіддаль від приймача до супутника. Всі супутники несуть допоміжне обладнання, яке складається зі сонячних батарей для енергоживлення та реактивної системи для коригування орбіти й контролю її стабільності.

Існує сім класів, або типів, GPS-супутників, перелік яких наведено в табл. 1.1 [2–3, 50].

¹ http://www.ggos-portal.org/lang_en/GGOS-Portal/EN/Topics/Techniques/Techniques.html

Таблиця 1.1

Типи супутників та роки їх запусків

Тип	Роки запусків	Робочі супутники (станом на 2012 р.)
Block I	1978–1985	0 з 10
Block II	1989–1990	0 з 9
Block IIA	1990–1997	11 з 19
Block IIR	1997–2004	12 з 13
Block IIR-M	2005–2009	7 з 8
Block IIF	2010–2012	3 з 2 (готується 10)
Block IIIA	3 2014	Готується 12

Суттєва відмінність між супутниками типу Block I і супутниками типу Block II була спричинена питаннями національної безпеки США. Сигнали супутника типу Block I надавалися у відкритому доступі цивільним користувачам. Починаючи із супутників типів Block II та Block IIA, з'явилася можливість обмежувати доступ цивільних користувачів до сигналів супутника. Супутники типу Block II були оснащені засобами для здійснення двобічного зв'язку. Деякі з них несуть кутикові відбивачі, що дозволяє відстежити їх за допомогою лазерної локації.

Конструкції супутників типу Block IIR передбачають мінімум 10 років експлуатації. Вони обладнані удосконаленими засобами зв'язку та міжсупутникового стеження. Модернізовані супутники Block IIR-M мають надавати військовим та цивільним користувачам нові послуги. Нові сигнали та більша потужність у смузі *L* мають суттєво покращити експлуатаційні характеристики GPS для навігації.

Перший запуск на орбіту супутників типу Block IIF було здійснено у 2005 р. Супутники типу Block IIF перебувають на етапі збірки, а супутники Block IIIA наразі у стані проектування.

Починаючи з 1987 р. GPS використовує як опорну Всесвітню геодезичну референцну систему WGS-84 (World Geodetic System 1984). WGS-84 задає

координати відносно центру мас Землі. Нульовий меридіан розташований на 5,31" на схід від Гринвіцького меридіану. Поверхнею віднесення є геоцентричний екіпотенціальний еліпсоїд обертання, визначений великою піввіссю, зональною гармонікою другого степеня, кутовою швидкістю обертання Землі та гравітаційною сталою Землі [2].

1.2.2. Сегмент керування. Система оперативного керування GPS складається із головної станції керування, додаткової головної станції, чотирьох окремих наземних антен та шести виділених станцій моніторингу. Головні завдання системи оперативного керування наступні: стеження супутників з метою визначення і передбачення орбіт, годинникової синхронізації супутників та передача даних на супутники.

Головна станція керування розташована в Об'єднаному центрі космічних операцій на базі військово-повітряних сил Шрівер, Колорадо-Спрінгз, штат Колорадо, США. Цей центр збирає дані зі станцій стеження та обчислює орбіти супутників і параметри годинників за допомогою оцінки фільтра Калмана. Результати потім передаються на одну із трьох наземних станцій керування для остаточної передачі на супутники. Головна станція керування відповідальна також за контроль стану супутників і керування системою як цілим. Додаткова станція повністю дублює роботу контрольної станції [50].

Станції наземного керування розташовано поряд зі станціями стеження на о. Вознесіння, на о. Дієго-Гарсія і на атолі Кваджалейн. Вони виконують функцію каналу зв'язку зі супутниками і складаються, головним чином, з наземних антен. Ефемериди супутників та інформація про хід GPS-годинників, що обчислюються на головній станції керування та отримуються через канали зв'язку, передається на кожний GPS-супутник через радіоканал у S-смугі. За встановленими правилами, така передача має виконуватися кожну восьму годину, але згодом почала виконуватись лише раз або два на добу. Зараз знову виконується три завантаження на добу [50].

Існує п'ять станцій стеження, які розташовані на Гавайських островах, у Колорадо-Спрінгз, на о. Вознесіння у південній Атлантиці, на о. Дієго-Гарсія в

Індійському океані, на атолі Кваджалейн у Тихому океані. Кожна із цих станцій оснащена цезієвим стандартом часу і приймачами, які у неперервному режимі вимірюють псевдовіддалі до всіх супутників у зоні радіовидимості. Оцінка псевдовіддалей здійснюється кожні півтори секунди. Після цього для них виконується згладжування із застосуванням інформації про іоносферні та метеорологічні умови, і головна станція управління отримує усереднені за кожні 15 хв дані. Перелічена вище мережа станцій стеження є офіційною мережею для моделювання корекцій годинників на супутниках та визначення ефемерид, які передаються з супутників. Ще п'ять додаткових станцій, підпорядкованих Військовому картографічному агентству США, використовуються для обчислення високоточних ефемерид. Крім того, існує ще багато інших мереж станцій стеження. Вони не приймають участі в керуванні роботою системи, але визначають орбіти супутників.

1.2.3. Сегмент користувача. З самого початку розвитку системи планувалось оснастити GPS-приймачем практично кожен важливу військову одиницю. Передбачалось, що кожен літак, корабель, автомобіль і навіть кожна група піхоти будуть забезпечені GPS-приймачами для координації військових дій [3]. Чимало нових способів застосування GPS з військовою метою було розроблено зовсім недавно.

Цивільне використання GPS виникло на кілька років раніше, ніж це передбачали проектувальники системи. У перші роки розвитку системи головну увагу приділяли навігаційним приймачам.

Головна ідея використання інтерферометричного методу замість доплерівського привела до того, що GPS могла бути застосована не лише для вимірів великих відстаней, але й для високоточного визначення коротких відстаней, наприклад, у землемірних роботах.

Сьогодні використання GPS-приймачів стало звичайним під час наступних робіт.

1. Геодинаміка, тектоніка – можливість спостерігати та аналізувати рухи тектонічних плит та оцінювати їх коливання.

2. Геодезія – розповсюдження референцної системи координат та визначення координат з точністю у декілька міліметрів.
3. Картографія – моделювання та створення цифрових різноманітних карт.
4. Навігація – підвищення точності в авіаційній, морській, космічній та дорожній навігаціях.
5. Супутниковий моніторинг транспорту – можливість стеження за положенням, швидкістю та рухом автотранспорту.
6. Геотегування – прив'язка координат до фотографії.

В обігу є широкий вибір типів приймачів, тож завжди можна підібрати відповідний, щоб задовольнити різноманітні потреби військових і цивільних користувачів.

Професійне GPS-обладнання відрізняється вищою якістю виготовлення, програмним забезпеченням, системами усунення інтерференційних залежностей тощо. Класифікацію GPS-приймачів можна здійснити на основі типу спостережуваних величин (як приклад, кодові псевдовіддалі або фази носія), доступу до кодів (як приклад, C/A-код, P-код або Y-код).

У C/A-кодових приймачах вимірюються тільки кодові псевдовіддалі з використанням C/A-коду. Типові моделі, маючи від одного до шести незалежних каналів прийому, подають або просторові геоцентричні координати (довгота, широта та висота), або координати у певній картографічній проекції. Одноканальні приймачі цілком спроможні задовольнити користувача у випадку стаціонарної станції, коли можливий послідовний режим спостережень.

У P-кодових приймачах використовується P-код, що дає можливість стежити за несучими хвилями на частотах L_1 і L_2 . Дані P-коду отримуються з несучих хвиль шляхом кореляції з точною його копією, яка генерується у приймачі. Слід усунути кодові компоненти прийнятого з супутника сигналу, перш ніж стане можливим спостереження фази. Точність визначення великих за довжиною баз між станціями 100 км, стала дорівнювати кільком сантиметрам. Застосування методу лінійної комбінації величин фаз несучих хвиль на частотах L_1 та L_2 , яка носить назву широкосмугової, дає можливість обчислити бази

середньої довжини 20 км з тією ж точністю, але із даних відносно короткого десятихвилинного сеансу спостережень.

При увімкненому стані А-S здійснюється заміна відомого Р-коду невідомим Y-кодом, і традиційний метод кореляції більше використовуватись не може. Однак приймач з увімкненим режимом А-S може функціонувати в безкодовому або квазібезкодовому режимі, забезпечуючи даними фази несучої хвилі та кодових псевдовіддалей для частоти L_2 без знання Y-коду.

У Y-кодових приймачах забезпечується доступність Р-коду навіть за умови ввімкнення режиму А-S. Отже, за допомогою методу кореляції Р-коду із сигналів на частотах L_1 і L_2 можна отримати виміри кодових відстаней та фаз. Доступ до Р-коду досягається шляхом підключення додаткової інтегральної мікросхеми на виході кожного каналу. Ці мікросхеми дозволяють дешифрувати Y-код в Р-код, а також виправити зміни, внесені застосуванням S-A [2–3, 50].

1.3. Структура сигналу GPS-супутника

Осцилятори, встановлені на борту супутників, генерують фундаментальну частоту $f_0 = 10,23$ МГц стабільність якої протягом однієї доби становить 10^{-13} с [2–3, 14, 50, 92]. Генерація сигналів двох несучих частот у L -діапазоні здійснюється шляхом множення частоти f_0 на цілі числа. Щоб забезпечити мітками часу приймач та передати таку інформацію, як орбітальні параметри, ці несучі хвилі модулюються кодом. Код складається з послідовності станів «+1» та «-1», які відповідають двійковим (бінарним) значенням «0» та «1». Ця так звана біфазова модуляція (з двома стійкими станами) здійснюється зсуванням фази несучої хвилі на 180° тоді, коли відбувається зміна стану на протилежний.

У табл. 1.2 наведено перелік складових частин сигналу та відповідні значення частот.

Таблиця 1.2

Складові частини сигналу з GPS-супутника

Вид сигналу	Несуча частота, МГц	PRN-коди
L_1	1575,45	C/A, P(Y), M, L1C _D , L1C _P
L_2	1227,60	P(Y), L2C, M
L_3	1381,05	
L_4	1379,91	
L_5	1176,45	L5I, L5Q

Ключовим для питання точності системи є той факт, що всі складові сигналу з високою точністю контролюються атомними годинниками. Щоб забезпечити показ відліку міток часу, використовуються два коди (C/A-код та P-код), які за характером є псевдошумовими (pseudorandom noise, PRN) послідовностями.

До сигналів L_1 та L_2 входять наступні компоненти [2–3, 25, 14, 50, 92].

1. C/A-код, доступний для використання у цивільних цілях, має частоту $f_0/10$. Кожний C/A-код – це унікальна послідовність із 1023 бітів, її називають елементом сигналу, вона повторюється кожної мілісекунди. Відповідно, довжина елемента сигналу (також її називають довжиною хвилі або шириною елемента) становить приблизно 300 м. На сучасному етапі C/A-код накладається лише на частоту L_1 та спеціально не накладається на L_2 . Така вибіркковість у модуляції надає Офісові спільних програм можливість контролю на передавання супутником інформації і, відповідно, закриває невійськовим користувачам доступ до точної системи місцеположення.
2. P-код накладається на обидві хвилі-носії – L_1 та L_2 з метою шифрування сигналу. Код з частотою f_0 має інтервал повторення приблизно один раз за кожні 266,4 доби. Кодування навігаційного повідомлення потребує 1500 біт. За умови, що частота кодування дорівнює 50 Гц, необхідний для передачі час становить 30 с. C/A-код накладається на хвилю L_1 із зсувом 90° відносно P-коду.

Позначаючи немодульовану несучу хвилю як $L_i(t) = a_i \cos(f_i t)$, а послідовності зміни стану Р-коду, С/А-коду та навігаційного повідомлення відповідно як $P(t)$, $C/A(t)$ та $D(t)$, модульовані несучі хвилі виражаються за допомогою таких рівнянь:

$$L_i(t) = a_1 P(t) D(t) \cos(f_1 t) + a_1 C/A(t) D(t) \sin(f_1 t),$$

$$L_i(t) = a_2 P(t) D(t) \cos(f_2 t).$$

Окрім кодів псевдовипадкового шуму на носії накладається блок даних, що містить інформацію про стан супутника, інформацію годинника, встановленого на борту, та ефемериди супутників [3].

1.4. Інформація з супутника

1.4.1. Навігаційне повідомлення. Навігаційне повідомлення, головним чином, вміщує інформацію про годинник, орбіту і технічний стан апаратури GPS-супутника, а також дані різноманітних поправок. Як наведено в табл. 1.3, усе повідомлення поділено на кілька сегментів.

Таблиця 1.3

Схема навігаційного повідомлення

Повідомлення	Кількість бітів	Тривалість передачі, с
Все повідомлення	1500 бітів	30
Сегменти (1–5)	300 бітів	6
Слово (1–10)	30 бітів	0,6

Кожен із цих сегментів передається протягом шести секунд і містить 10 слів по 30 бітів кожне.

Кожен сегмент починається зі слова телеметричної інформації (Telemetry Word, TW), яке містить синхронізуючі імпульси, а також деякі діагностичні повідомлення. Друге слово у кожному сегменті є синхронізуючим (Hand Over Word, HOW). Крім ідентифікації воно містить номер, який після множення на

чотири дає час тижня, який показує лічильник (Time of Week, TOW). Для епохи початку наступного сегмента лічильник TOW дає півтори секунди з моменту початку поточного GPS-тижня. Перший сегмент містить номер GPS-тижня, прогноз точності визначення відстані користувачем, показники справності супутника та моменту останнього оновлення даних, а також три коефіцієнти квадратичного полінома для моделювання поправок годинника на супутнику.

У другому та третьому сегментах передаються ефемериди супутника. Зміст четвертого та п'ятого сегментів змінюється кожної передачі і має інтервал повторення 25 с. Таким чином, уся інформація містить 25 так званих сторінок і потребує для передачі 12,5 хв. Багато сторінок четвертого сегменту зарезервовано для військових потреб. Решта містить інформацію про іоносферу, дані про координований всесвітній час (Universal Time Coordinated, UTC), різноманітні показники, а також дані альманаху (тобто низькоточні орбітальні дані) для всіх супутників, кількість яких може перевищувати номінальну конфігурацію. Сторінки п'ятого сегмента призначені, головним чином, для альманаху та інформації про стан перших 24 супутників, які є на орбіті. Сторінки четвертого та п'ятого сегментів передаються кожним супутником. Тому навіть спостереження за одним супутником можуть дати інформацію про дані альманаху для всіх супутників, що знаходяться на орбіті [50].

1.4.2. Альманах. Для визначення векторів місцеположення та швидкості супутників у геоцентричній системі відліку в будь-який момент часу можна використати три набори даних. Це дані альманаху, ефемериди, що передаються із супутника, та точні ефемериди. Дані відрізняються за точністю і за часом доступності, табл. 1.4.

Похибки ефемерид

Ефемериди	Похибки
Альманах	Кілька кілометрів
Трансльовані ефемериди (у реальному часі)	близько 1м
Точні ефемериди (постобробка)	0,05–0,20 м

Мета альманаху полягає у забезпеченні користувача менш точними даними про орбіти супутників, щоб полегшити користувачеві пошук видимих супутників або для розв'язання задач, як обчислення діаграм видимих місцеположень супутників. Дані альманаху передаються із сигналом супутника. Вони містять інформацію про параметри орбіт, поправки годинників супутників та деякі інші величини, табл. 1.5.

Параметр l_0 позначає різницю між прямим сходженням у епоху t_a та гринвіцьким зоряним часом t_0 , початком поточного GPS-тижня. Обчислити параметри Кеплера на момент спостережень можна за формулами [3]:

$$\begin{aligned}
 M &= M_0 + n(t - t_a), \\
 i &= 55^\circ + \sigma_i, \\
 l &= l_0 + \Omega(t - t_a) - \omega_E(t - t_0).
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

де ω_E – кутова швидкість обертання Землі.

Зазначимо, що для l в рівнянні (1.1) другий доданок у правій частині враховує регресію (еволюцію) вузла, а третій – відображає однорідну зміну зоряного часу з моменту t_0 . Зсув годинника на супутнику обчислюється за співвідношенням:

$$\sigma^i = a_0 + a_1(t - t_a).$$

Дані альманаху

Параметр	Зміст
ID	Ідентифікаційний номер супутника
HEALTH	Стан супутника
WEEK	Поточний GPS-тиждень
t_a	Опорна епоха у секундах від початку поточного тижня
\sqrt{a}	Корінь квадратний з великої піввісі
e	Ексцентриситет
M_0	Середня аномалія
ω	Аргумент перигею
σ_i	Відхилення нахилу орбіти від номінального кута 55°
l_0	Довгота вузла на початок GPS-тижня
Ω	Швидкість зміни положення вузла прямого сходження
a_0	Зсув шкали годинника
a_1	Зсув частоти годинника

1.4.3. Трансльовані ефемериди. Ці ефемериди формуються за спостереженнями п'яти станцій стеження, які входять до сегменту управління GPS. Останні за часом виміри використовуються для обчислення опорної орбіти супутників. Результати додаткових вимірів вводяться у фільтр Калмана і, уточнені у такий спосіб орбіти, потім використовуються для екстраполяції ефемерид на найближчий час. Ці дані про орбіти мають точність на рівні п'яти метрів за умови, що такі оновлення виконуються не менше трьох разів за добу. Якщо ж складати прогноз ефемериди тільки один раз за добу, то очікувана точність становить приблизно 10 м. Дані, що передаються з ефемеридами, наведено в табл. 1.6.

Головна станція управління відповідає за обчислення ефемерид та оновлення відповідних даних на супутниках. Суттєвим є те, що ефемеридна інформація містить шість параметрів для відображення згладженого еліпса

Кеплера на вибрану (опорну) епоху, а також параметри деяких вікових та періодичних поправок. Параметри, що перераховані в табл. 1.6, передаються із супутника кожної години і можуть бути використані приблизно протягом наступних чотирьох годин.

Таблиця 1.6

Зміст ефемериди, що передається з супутника

Параметр	Зміст
ID	Номер супутника
WEEK	Вік ефемериди (епоха її виходу)
t_E	Епоха моменту відліку ефемериди
$\sqrt{a}, e, M_0, \omega_0, i_0, l_0$	Параметри Кеплера на епоху t_E
Δn	Різниця параметрів середнього руху
\dot{i}	Швидкість зміни нахилу орбіти
Ω	Швидкість зміни положення вузла прямого сходження
C_{uc}, C_{us}	Коефіцієнт поправок для аргументу перигею
C_{rc}, C_{rs}	Коефіцієнти поправок для геоцентричної відстані
C_{ic}, C_{is}	Коефіцієнти поправок для нахилу орбіт

Останні дев'ять складових у таблиці 1.6 враховують вплив збурень через несферичність Землі, прямий припливний ефект, а також тиск сонячного випромінювання. Для того, щоб обчислити місцеположення супутника, крім параметрів a та e потрібно знати значення величин:

$$M = M_0 + \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} (t - t_E),$$

$$l = l_0 + \Omega (t - t_E) + \omega_E (t - t_0),$$

$$\omega = \omega_0 + C_{uc} \cos 2u + C_{us} \sin 2u,$$

$$r = r_0 + C_{rc} \cos 2u + C_{rs} \sin 2u,$$

$$\dot{i} = \dot{i}_0 + C_{ic} \cos 2u + C_{is} \sin 2u + \dot{i}(t - t_E).$$

де $u = \omega + V$ – аргумент перигею.

Використовуючи значення величин a, e та E на момент спостережень, обчислюємо геоцентричну відстань r_0 , де E – аномалія ексцентриситету. Знаючи епоху початку відліку ефемериди t_0 , отримуємо оцінку l , як у рівнянні 1.1. Знову зазначимо, що слід використовувати точне значення швидкості обертання Землі ω_E [3].

1.4.4. Точні ефемериди. Обчислення точних ефемерид виконується зусиллями кількох інститутів на базі результатів вимірювань, отриманих у мережах станцій стеження. Результати стають доступними з деякою затримкою після спостережень. Вони подаються у вигляді таблиць місцеположень та швидкостей супутників на моменти часу спостережень [3].

З 1989 р. точні ефемериди GPS-супутників доступні після обробки спостережень на постійнодіючих станціях мережі IGS. Точні ефемериди орбіт IGS подаються у геоцентричній фіксованій системі координат. Вектор місцезнаходження подається для усіх супутників у прямокутних координатах (вимірюється в кілометрах). Крім того, зазначено похибки годинників GPS-супутників. З введенням похибок годинників та включенням даних про швидкість у заголовок, був змінений формат файлів ефемерид на SP3-формат. Його бінарний варіант мав назву – ECF3. SP3-файли отримали широке використання та були схвалені IGS [49, 70].

1.5. Основні рівняння

1.5.1. Загальні положення. Спостережувальні величини GPS-супутників є відстані, одержані з вимірюного проміжку часу, або різниці фаз, одержані шляхом порівняння отриманого сигналу та сигналу, що генерується у приймачі. Оскільки використовується концепція однобічного зв'язку, в якій сигнал передається від фазового центру передавача GPS-супутника до фазового центру антени GPS-приймача, то отримані відстані мають певний зсув і мають назву псевдовіддалей.

1.5.2. Кодові псевдовіддалі. Знаючи кодові модуляції, можна виміряти кодові псевдовіддалі P_k^i між супутником i та приймачем k наступним чином [2–3, 25, 50, 92]:

$$P_k^i = c((t + \sigma_k) - (t - \tau + \sigma^i)), \quad (1.2)$$

де c – швидкість світла, σ^i та σ_k – похибки годинників приймача та супутника, t – час системи GPS, τ – час проходження сигналу від супутника до приймача.

Прийнявши до уваги геометричну відстань ρ_k^i від супутника до приймача на частоті f , вираз (1.2) запишемо наступним чином:

$$P_{fk}^i = \rho_k^i + c\sigma_k - c\sigma^i. \quad (1.3)$$

1.5.3. Фазові псевдовіддалі. GPS-приймач виконує виміри між фазами, що отримуються з супутника та генеруються в приймачі. Рівняння спостережень фазових псевдовіддалей L_{fk}^i можна записати в наступному вигляді (в циклах) [2–3, 25, 50, 92]:

$$\psi_{fk}^i = \varphi_{fk}(t) - \varphi_f^i(t - \tau) + N_{fk}^i, \quad (1.4)$$

де $\varphi_{fk}(t)$ – фаза, що згенерована приймачем у момент отримання сигналу t (в циклах), $\varphi_f^i(t - \tau)$ – значення фази за час проходження сигналу від супутника до приймача τ на момент часу t , N_{fk}^i – невідома кількість циклів (так звана фазова цілочислова невизначеність).

Переписавши рівняння (1.4), отримаємо:

$$\psi_{fk}^i(t) = \varphi_{fk}(t) - \varphi_f^i(t) + \tau f + N_{fk}^i, \quad (1.4)$$

де f – значення несучої частоти. Різниця виразу $\varphi_{fk}(t) - \varphi_f^i(t)$ у рівнянні (1.4) в ідеальних умовах має дорівнювати нулю, тоді похибки годинників на

супутнику та приймачі запишемо наступним чином: $(\sigma_k - \sigma^i)f$. Рівняння фазових спостережень матиме вигляд:

$$\psi_{fk}^i(t) = (\sigma_k - \sigma^i)f + \tau f + N_{fk}^i. \quad (1.5)$$

Беручи до уваги довжину хвилі λ_f та геометричну відстань від супутника до приймача ρ_k^i , рівняння (1.5) наступним чином (в метрах):

$$L_{fk}^i = \rho_k^i + c \sigma_k - c\sigma^i + \lambda_f N_{fk}^i. \quad (1.6)$$

1.5.4. Вплив атмосферних рефракцій. На вимірювання кодових та фазових псевдовіддалей впливають різноманітні систематичні та випадкові ефекти, серед яких найбільш важливими є тропосферна та іоносферна рефракції [2–3, 25, 40, 51, 54, 73–74, 92].

Тропосферна рефракція – це вплив неіонізованої частини атмосфери на проходження GPS-сигналу, що здійснюється на фазові та кодові виміри і не залежить від частот L_1 та L_2 , на яких виконуються вимірювання. Позначимо вплив тропосферної рефракції як $\Delta\rho_k^i$ (більш детально наведено у підрозділі 1.6.2).

Іоносферна рефракція – це вплив електронів та іонів, які створюють перешкоди проходженню GPS-сигналу. Позначимо I_k^i як вплив іоносфери на несучу частоту L_1 . Враховуючи, що сигнал з супутника приймається на частотах L_1 та L_2 , їх співвідношення запишеться як $\frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i$ (детальніше наведено у підрозділі 1.6.2).

Беручи до уваги систематичні похибки, можна уточнити рівняння спостереження (1.2) та (1.6) для частот L_1 та L_2 :

$$P_{1k}^i = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + I_k^i + \Delta\rho_k^i, \quad (1.7a)$$

$$P_{2k}^i = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i + \Delta\rho_k^i, \quad (1.7b)$$

$$L_{1k}^i = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i - I_k^i + \Delta\rho_k^i + \lambda_1 N_{1k}^i, \quad (1.8a)$$

$$L_{2k}^i = \rho_k^i + c\delta_k - c\delta^i - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i + \Delta\rho_k^i + \lambda_2 N_{2k}^i. \quad (1.8b)$$

1.5.5. Формування різниць. Похибки годинників супутників та приймачів є невідомими параметрами і повинні оцінюватись як додаткові невизначені величини при обробці даних. Оскільки похибки годинників оцінюються для кожної епохи спостережень, кількість параметрів досягає великих значень.

Похибку годинника на супутнику можна усунути різницею спостережень, що виконуються на двох приймачах, що приймають сигнал з одного і того ж супутника в той же час. Між приймачами k та l і супутником i формуються перші різниці (бази) [2, 25, 50]:

$$L_{fkl}^i = L_{fk}^i - L_{fl}^i.$$

В подальшому виконується формування подвійних різниць між приймачами k та l і супутниками i та j :

$$L_{fkl}^{ij} = L_{fkl}^i - L_{fkl}^j. \quad (1.9)$$

Відповідно, рівняння для кодових (1.7a), (1.7b) та фазових (1.8a), (1.8b) спостережень матимуть вигляд:

$$P_{1kl}^{ij} = \sigma_{kl}^{ij} + I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij}, \quad (1.10a)$$

$$P_{2kl}^{ij} = \sigma_{kl}^{ij} + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij}, \quad (1.10b)$$

$$L_{1kl}^{ij} = \sigma_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij} + \lambda_1 N_{1kl}^{ij}, \quad (1.11a)$$

$$L_{2kl}^{ij} = \sigma_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij} + \lambda_2 N_{2kl}^{ij}. \quad (1.11b)$$

Якщо використати дві різні епохи t_1 та t_2 , отримаємо потрібні різниці, які представлені наступними рівняннями:

$$L_{1kl}^{ij}(t_2) - L_{1kl}^{ij}(t_1) = \sigma_{kl}^{ij}(t_2) - \sigma_{kl}^{ij}(t_1) - \left\{ I_{kl}^{ij}(t_2) - I_{kl}^{ij}(t_1) \right\},$$

$$L_{2kl}^{ij}(t_2) - L_{2kl}^{ij}(t_1) = \sigma_{kl}^{ij}(t_2) - \sigma_{kl}^{ij}(t_1) - \frac{f_1^2}{f_2^2} \left\{ I_{kl}^{ij}(t_2) - I_{kl}^{ij}(t_1) \right\}.$$

В наведених вище рівняннях припускається, що невідомі параметри $\frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij}$ та $N_{f_{kl}}^{ij}$ знаходяться в одному інтервалі спостережень $(t_2 - t_1)$ і фазова невизначеність усувається (у чому і полягає перевага цього методу).

1.5.6. Лінійні комбінації. Лінійні комбінації (Linear Combination, LC) несучої фази формуються шляхом додавання або віднімання значень вимірів несучої фази на двох або більше частотах. Така комбінація використовується для поліпшення результатів вимірів в порівнянні з вихідними вимірами. Тобто, для усунення похибок спостережень GPS-супутників або зведення їх до незначної величини. У загальному вигляді лінійна комбінація для кодів чи фазових спостережень визначається формулою:

$$LC = k_1 L_1 + k_2 L_2,$$

де k_1 та k_2 – коефіцієнти лінійної комбінації (довільні числа), L_1 та L_2 – частоти, на яких виконуються спостереження. Частоту та довжину хвилі LC запишемо наступним чином:

$$f_{LC} = k_1 f_1 + k_2 f_2,$$

$$\lambda_{LC} = \frac{c}{f_{LC}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{k_1 \lambda_1 + k_2 \lambda_2},$$

де f_1, f_2 – несучі частоти для L_1 та L_2 , λ_1, λ_2 – довжини хвиль для L_1 та L_2 .

Існує багато лінійних комбінацій, але найбільш значущими є чотири види лінійних комбінацій [25, 33, 50, 92].

1. Комбінація, що вільна від іоносфери (LC_3);
2. Комбінація, що вільна від геометрії (LC_4);
3. Широкопугмова комбінація (LC_5);

4. Комбінація Мельбурн-Вюбена (LC_6).

Розглянемо більш детально кожен з цих комбінацій.

Для вільної від іоносфери комбінації (LC_3) використовуються коефіцієнти, що дорівнюють $k_{1,3} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$ та $k_{2,3} = \frac{-f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$. Вона має наступний вигляд для кодових та фазових вимірювань відповідно: [25, 29]:

$$P_{LC3} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2), \quad (1.12)$$

$$L_{LC3} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2), \quad (1.13)$$

відповідно. Виходячи з назви цієї комбінації, іоносферна зенітна затримка в ній виключається (точніше, її значення сильно зменшується). Беручи до уваги виміри подвійних фазових різниць та виключаючи тропосферною рефракцією в рівняннях (1.11a) та (1.11b), комбінацію LC_3 запишемо у такому вигляді:

$$L_{LC3kl}^{ij} = \sigma_{kl}^{ij} + B_{LC3kl}^{ij}, \quad (1.13)$$

де безіоносферне зміщення B_{LC3kl}^{ij} запишеться наступним чином [25]:

$$B_{LC3kl}^{ij} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 N_{1kl}^{ij} - f_2^2 \lambda_2 N_{2kl}^{ij}). \quad (1.14)$$

Комбінація LC_4 не залежить від точності годинників на супутниках, приймачах та геометрії (орбіти GPS-супутників та координати GPS-станцій) і має вигляд:

$$LC_4 = L_1 - L_2.$$

Вона містить тільки іоносферні затримки та початкові фазові невизначеності, які можуть бути використані для оцінки іоносферної моделі.

Комбінація LC_5 використовує подвійні різниці фазових спостережень, щоб усунути помилки в циклі і виконати фіксування невизначеності (для кодових спостережень):

$$LC_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2). \quad (1.15)$$

Використовуючи рівняння (1.11a) та (1.11b) і виключаючи іоносферну I_{kl}^{ij} та тропосферну Δ_{kl}^{ij} рефракції, запишемо рівняння наступним чином:

$$L_{LC5kl}^{ij} = \sigma_{kl}^{ij} + \frac{c}{f_1 - f_2} (N_{1kl}^{ij} - N_{2kl}^{ij}).$$

Комбінація Мельбурн-Вюбена поєднує в собі кодові та фазові спостереження на обох частотах. Комбінація LC_6 зменшує вплив іоносфери, тропосфери, геометрії та похибки годинників і має наступний вигляд:

$$CL_6 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 + f_2 P_2).$$

1.6. Основні джерела похибок GPS-сигналу

1.6.1. Типи похибок. На кодові (1.3) та фазові (1.6) псевдовіддалі впливають як систематичні похибки, так і випадковий шум, спричинений апаратурою або середовищем, через яке проходить сигнал. Зазначимо, що доплерівські виміри підпадають лише під вплив швидкостей змін систематичних зсувів [54]. Окрім зміщення годинників супутників і приймачів, всі інші джерела похибок можна класифікувати у три групи, що наведені у табл. 1.7. Крім переліку вищенаведених похибок слід відмітити вплив релятивістських ефектів на проходження сигналу.

Таблиця 1.7

Джерела похибок GPS-сигналів

Джерело	Вплив
GPS-супутник	Похибки орбіт, варіації фазового центру антени, похибки годинників
Середовище поширення	Тропосферна та іоносферна рефракції
GPS-приймач	Варіації фазового центру антени, похибки годинників, багатопроміневість поширення сигналу

1.6.2. Атмосферні рефракції

Розглянемо більш детально вплив тропосферної рефракції, тобто неіонізованої частини атмосфери, на спостереження. Тропосферну зенітну рефракцію можна поділити на суху та вологу складові за формулою [2–3, 25, 50, 64, 74]:

$$\Delta\rho = N_d^{trop} + N_w^{trop}. \quad (1.16)$$

Приблизно 90% величини тропосферної рефракції складає вплив сухої складової, а решта 10% – вологої. Використовуючи моделі коефіцієнту заломлювальної здатності та інтегрування, виконані за допомогою чисельних або аналітичних методів, були отримані моделі сухої та вологої складових [25]:

$$N_{d,0}^{trop} = \bar{c}_1 \frac{P}{T}, \quad \bar{c}_1 = 77,64 \text{ К/мбар},$$

$$N_{w,0}^{trop} = \bar{c}_2 \frac{e}{T} + \bar{c}_3 \frac{e}{T^2}, \quad \bar{c}_2 = -12,96, \text{ К/мбар та } \bar{c}_3 = 3,718 \cdot 10^5 \text{ К}^2/\text{мбар},$$

де P – атмосферний тиск, T – температура, e – питомий тиск пари води, \bar{c}_1 , \bar{c}_2 та \bar{c}_3 визначаються емпірично. Більш детально про визначення зенітної тропосферної рефракції при обробці GPS-спостережень наведено у підрозділі 3.3.5.

Перейдемо до іоносферної рефракції. Коефіцієнт рефракції залежить від величини TEC , яка позначає кількість електронів n_e на кубічний метр, тобто

електрону концентрацію (Total Electron Content, TEC) і має наступний запис [25]:

$$TEC = \int_S^R n_e(s) ds. \quad (1.17)$$

Параметр TEC виражає інтегральний вміст електронів уздовж шляху поширення сигналу між супутником S та приймачем R . Припускається, що при інтегруванні враховується кількість електронів у стовпі з поперечним перерізом 1 м^2 від приймача до супутника. Звичайно моделюється zenітна інтегральна концентрація електронів (Total Vertical Electron Content, TVEC) [2–3, 25, 39, 50, 92]. Якщо ввести параметр $TVEC$ у формулу (1.17), то вказані величини стосуються лише супутників у zenіті:

$$TVEC = TEC \cos z'. \quad (1.18)$$

Враховуючи те, що zenітна іоносферна рефракція залежить від довжини хвилі GPS-сигналу, можна записати коефіцієнт для несучої частоти вимірювань:

$$n_1 = 1 - \frac{an_e}{f^2}, \quad (1.19)$$

де, a – константа, n_e – вміст електронів під час проходження сигналу, f – несуча частота. Виконавши інтегрування відповідно до рівняння (1.17) отримаємо формулу іоносферної рефракції для фазових вимірювань між супутником i та приймачем k :

$$I_k^i = \int_S (n_1 - 1) ds = -\frac{aTEC}{f^2}, \quad (1.20)$$

де $a = 4,03 \cdot 10^{17} \frac{m}{s^2 TVEC}$.

Якщо спостереження виконуються на двох частотах, тоді іоносферну рефракцію можна виключити за допомогою лінійної комбінації LC_3 , рівняння (1.12) та (1.13). Позначивши іоносферну рефракцію як I_k^i у рівняннях (1.7) та (1.8), отримаємо:

$$I_k^i = \frac{\alpha \text{TEC}}{f_1^2},$$

де $f_1 = 1,57542 \cdot 10^9$ Гц. Тоді отримаємо: $I_k^i = \frac{f_1^2}{f_2^2} I_k^i$. Для усунення впливу іоносферної рефракції на GPS-вимірювання для LC_3 , фазові спостереження будуть мати знак «+», кодові – позначатися як «-».

Для довільних кутів спостережень супутників (рис. 1.2) іоносферну рефракцію можна визначити за наступним виразом:

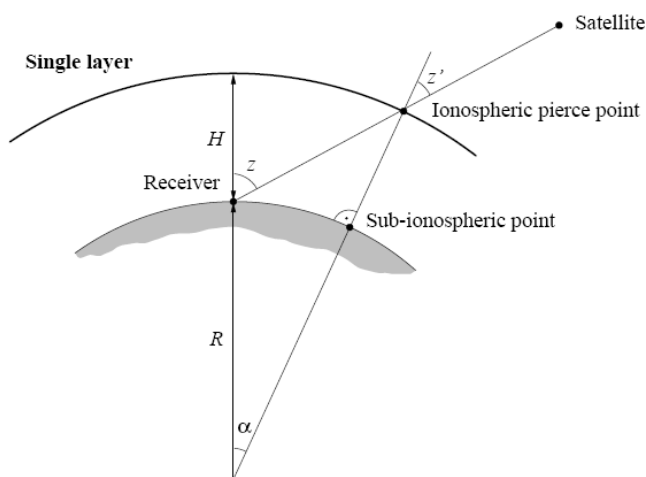


Рис. 1.2. Геометрична модель іоносферної рефракції

$$I_k^i(z) = \frac{\text{TEC}}{\text{TVTEC}} = \frac{1}{\cos z'},$$

де $\sin z' = \frac{R_E}{R+H} \sin z$, z та z' – зенітна відстань в точці спостережень та так званій іоносферній точці, R_E – середній радіус Землі, H – середнє значення висоти іоносфери.

1.6.3. Варіації фазового центру комбінацій антена–купол. Точка, місцезнаходження якої вимірюється GPS-приймачем, є фазовим центром антени GPS-приймача. В ідеалі фазовий центр має співпадати з фізичним центром антени, але на практиці вони не співпадають. Необхідно розрізняти два ефекти: зміщення фазового центру (Phase Center Offset, PCO) та варіації

фазового центру антени (Phase Center Variation, PCV). PCO антени визначається різницею між референчною точкою (Antenna Reference Point, ARP) та середнім значенням фазового центру антени. В більшості випадків значення PCO наведено в просторових координатах ARP і, як правило, надаються виробником або визначаються третьою стороною [50].

Місцеположення фазового центру антени залежить від напрямку на GPS-супутник і не є постійним. Ця залежність має назву варіації фазового центру антени. Загалом ці варіації залежать від кута місця супутника, залежність від азимута супутника набагато менша. Необхідно відмітити, що варіації центру антени не співпадають для частот L_1 та L_2 і змінюються при наявності у антени купола. В результаті чого кожний прийнятий сигнал з GPS-супутника має свій власний фазовий центр.

Для врахування впливу варіацій фазових центрів при обробці спостережень GPS-супутників необхідні комбінації антена–купол повинні бути відкалібровані.

До листопада 2006 р. при обробці GPS-спостережень використовувались відносні моделі калібровок антен, що залежали лише від кута місця супутників (більше 10°). Ці моделі базувалися на довільному припущенні, що варіації фазового центру референчної антени AOAD/M_T дорівнюють нулю. В основі метода полягало формування залишків перших різниць, отриманих з тестів антени AOAD/M_T по визначенню середнього значення PCO. Ця процедура виконувалась для частот L_1 та L_2 . В даній моделі не враховувались варіації фазових центрів GPS-супутників. Калібровки антен інших специфікацій виконувалось відносно вказаної вище моделі антени [68].

Починаючи з GPS-тижня 1400 (5 листопада 2006 р.) Міжнародна ГНСС-служба рекомендує використовувати абсолютні моделі фазових центрів комбінацій антена–купол поряд з новими моделями та стандартами обробки. В цьому випадку PCV визначались незалежно від референчної антени. В ідеалі всі комбінації антена–купол повинні бути відкалібровані, наприклад, роботизованою системою, розробленою Університетом Гановера та фірмою «GEO++» [71, 91].

Таким чином, PCV антени оцінюється без розподілу фазових зміщень і відноситься до постійної точки, яка регулюється системою в процесі калібрування антени. На практиці для багатьох комбінацій антена–купол виникає необхідність використовувати переобчислені абсолютні варіації фазових центрів комбінацій антена–купол згідно формули [41, 55]:

$$PCV_{abs} = PCV_{rel} + PCV_{abs} (AOAD/M_T).$$

Необхідно відмітити, що для деяких комбінацій антена–купол не існує навіть відносних калібровок, і в таких випадках при обробці не враховується наявність купола.

1.6.4. Інші систематичні ефекти. Нерухома система відліку пов'язана із центром мас Землі, а прискорена система відліку – з кожним супутником GPS. Тому потрібно враховувати ефекти спеціальної та загальної теорії відносності. Релятивістські ефекти мають вплив на орбіти супутників, на поширення сигналу, а також на годинники на приймачі та супутнику [22].

Гравітаційне поле збільшує просторово-часову кривину в області поширення сигналу супутника. Тому необхідно вносити поправку у відстань, яка вираховується наступним чином [2, 23, 93].:

$$\rho_{rel} = \frac{2\mu}{c^2} \ln \frac{\rho^i + \rho_k + \rho_k^i}{\rho^i + \rho_k - \rho_k^i},$$

де – μ гравітаційна стала Землі, ρ^i – геометрична відстань до супутника, ρ_k – геометрична відстань до приймача, ρ_k^i – відстань між супутником та приймачем.

Згідно до работ [2, 93], приблизне значення поправки у відстань ρ_{rel} дорівнює 18,7 мм.

Сигнал GPS-супутника підпадає під вплив руху супутника та різниці гравітаційного поля між супутником та пунктом спостережень. Відповідні

ефекти спеціальної та загальної теорій відносності малі і їх можна додати лінійно [56]. Ці ефекти можуть бути розділені на постійний та періодичний ефекти. Постійний ефект корегується шляхом переведення номінальної частоти сигналу супутника до сигналу, прийнятому на станції і становить $-4,55 \cdot 10^{-3}$ Гц. Однак бажано приймати номінальну частоту, що досягається введенням зсуву фундаментальної частоти супутникового годинника, так що передається значення 10,22999999545 МГц [79].

Періодичний ефект виникає через припущення про те, що орбіти – колові. Формула відповідної поправки має вигляд [2, 43]:

$$\rho_{rel} = \frac{2}{c} \sqrt{a GM e \sin E}, \quad (1.20)$$

де a – велика піввісь, e – ексцентриситет, E – ексцентрична аномалія.

Годинник приймача, розташований на поверхні Землі, обертається відносно нерухомої системи відліку. Знаючи лінійну швидкість обертання Землі в місці спостережень, можна отримати відносній зсув частоти на рівні 10^{-12} , який через три доби буде близький до похибки годинника і дорівнює 10 нс [22].

1.7. Модернізація GPS

У порівнянні з сучасними супутниками наступне покоління матиме багато удосконалень. Планується додати функції міжсупутникового обміну даними, щоб зробити систему більш незалежною. Здатність до автономної навігації через перехресну міжсупутникову віддалеметрію дасть супутникам можливість визначати власне положення самостійно, без пильного стеження із землі. У результаті майбутні супутники матимуть такі переваги: точність навігації буде утримуватися стабільною протягом шести місяців без наземної підтримки та керування, проблеми із перевантаженням супутникових каналів зв'язку будуть мінімізовані, буде здійснюватися одне відвантаження даних на

один космічний апарат на місяць замість одного або більше на добу, потреба у закордонних станціях для підтримки навігації буде зменшена.

1.8. Міжнародні служби

1.8.1. Міжнародна ГНСС-служба. До 1989 р. різко зросла кількість GPS-приймачів, які використовувалися для наукових, насамперед, геофізичних, цілей. Однак GPS-спостереження та наступна обробка даних цих спостережень не ґрунтувалися на загальних стандартах, що ускладнювало геодинамічну інтерпретацію отриманих результатів. Іншою проблемою було забезпечення наукового співтовариства точними ефемеридами GPS-супутників, параметрами обертання Землі (Earth Orientation Parameters, EOP) та точною інформацією про годинники GPS-супутників [5].

Для вирішення цих проблем Міжнародна геодезична асоціація вирішила створити Міжнародну GPS-службу² (IGS) для завдань з геодинаміки [26]. Крім зазначених цілей розглядалися можливості географічного розширення ITRF і моніторингу глобальних деформацій земної кори.

Більше 100 організацій взяли участь у тестовій GPS-кампанії з 21 червня по 23 вересня 1992 р. [28]. У ході кампанії перевірялися готовність IGS до функціонування, можливість регулярного одержання точних ефемерид і параметрів обертання Землі (ПОЗ). Третій з'їзд організаційного комітету IGS у жовтні 1992 р., прагнучи покрити пробіл між тестовою кампанією й початком регулярної роботи IGS, почав з 1 листопада 1992 р. проект «IGS Pilot Service», у ході якого тривали обчислення орбіт GPS-супутників.

Ґрунтуючись на успіхах тестової кампанії та проекту «IGS Pilot Service», організаційний комітет IGS на своєму четвертому з'їзді в березні 1993 р. вирішив почати офіційне функціонування IGS з 1 січня 1994 р., займаючись не тільки питаннями геодинаміки [27–28, 30].

З розвитком навігаційної системи ГЛОАНСС, IGS почала включати в обробку спостереження цих супутників та надавати їх ефемериди. В результаті

² <http://igscb.jpl.nasa.gov/>

чого Міжнародну GPS-службу було вирішено перейменувати на Міжнародну ГНСС-службу. Надалі планується включити в обробку супутникові системи Галілео та Бейдоу.

У структурі IGS (рис. 1.3) кожен компонент має свої специфічні обов'язки, але його робота залежить від роботи інших структурних одиниць. Серед структур IGS можна виділити наступні [38, 62]:

- мережа станцій спостереження;
- операційні центри;
- регіональні центри збору даних;
- глобальні центри збору даних;
- центри аналізу;
- координатор центрів аналізу;
- Центральне бюро IGS;
- Міжнародна керуюча рада.

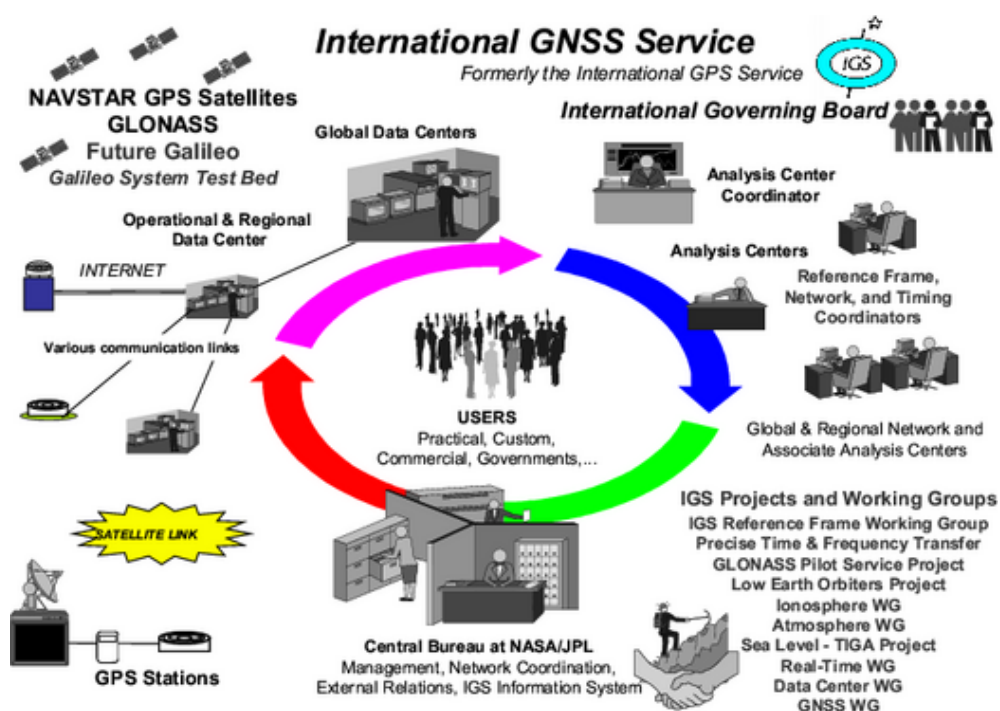


Рис.1.3. Схема структури IGS³

На сьогодні в IGS входить більше 200 організацій з більш ніж 80 країн світу, що співпрацюють між собою. На 23 липня 2012 р. глобальна

³ http://www-app2.gfz-postdam.de/pb1/igs/index_IGSAC.html

мережа нараховує більше 369 станцій, які реєструють і зберігають дані з GPS- і ГЛОНАСС-супутників [37]. На рис. 1.4 зображено розташування станцій в Європі.

Центри аналізу даних обробляють спостереження, одержуючи як результат [36–37]:

- точні, швидкі та ультрашвидкі ефемериди ГНСС-супутників;
- координати та швидкості станцій спостереження;
- поправки до годинників ГНСС-супутників і приймачів;
- параметри обертання Землі;
- параметри іоносферної та тропосферної рефракції.

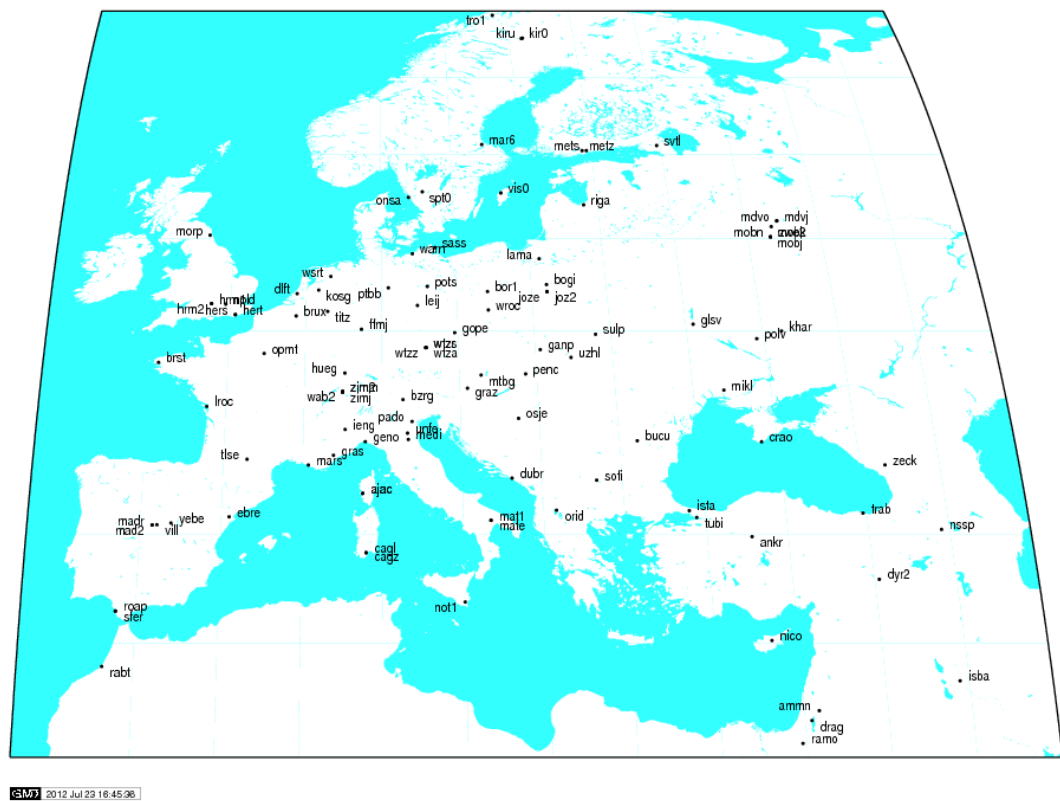


Рис. 1.4. Розташування IGS-станцій в Європейському регіоні⁴

Координатор центрів аналізу даних поєднує розв'язки окремих центрів для одержання класичних продуктів IGS (ефемериди супутників, поправки до годинників). Інші продукти IGS (координати станцій, швидкості, атмосферні параметри тощо) одержують інші координатори.

⁴ http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/maps/all_eur.html

Основним завданням центрів збору даних є архівування даних зі станцій спостережень, перевірка їхньої якості, перетворення файлів у формат Comrac RINEX, забезпечення вільного доступу до даних спостережень і продуктам IGS у режимі он-лайн.

Міжнародна керуюча рада виконує загальний контроль за діяльністю IGS та зміну її структури. Більшість рішень приймається при досягненні консенсусу або голосуванням. Міжнародна керуюча рада збирається приблизно один раз на рік.

Центральне бюро IGS займається загальним координуванням роботи, а також щоденним керуванням IGS, гарантує сумісність координатних систем відліку IGS з Міжнародною земною системою відліку, створенням річних звітів IGS, встановлює стандарти та специфіку роботи, гарантує послідовність і виконання стандартів IGS для всіх учасників даної мережі.

Крім виконання вимірів IGS займається визначенням та уточненням параметрів ITRF, її реалізацією, визначенням точних ефемерид GPS- і ГЛОНАСС-супутників, поправок у годинники приймачів і супутників, дослідженням обертання Землі й стану різних шарів атмосфери. Також IGS виконує моніторинг руху і деформацій тектонічних плит, синхронізацію тимчасових шкал, визначення точних траєкторій низькоорбітальних космічних апаратів, відслідковує зміни середнього рівня моря.

IGS, поряд з іншими організаціями, зайнятими в області космічної геодезії, входить до складу Міжнародного Комітету із Глобальних Навігаційних Супутникових Систем, заснованого ООН у грудні 2005 р. IGS у ньому займається координуванням взаємодії окремих служб у галузі супутникових систем, контролем за поширенням інформації, а також взаємодією з державними, місцевими та міжнародними структурами.

1.8.2. Європейська постійнодіюча ГНСС-мережа (EPN). Європейська постійнодіюча GPS-мережа⁵ виникла в 1995 р. для підтримки Європейської системи відліку на базі вже існуювшої у той час організації – Регіональної підкомісії Європейської референцної системи відліку (Regional Reference Frame

⁵ <http://www.epncb.oma.be>

Sub-Commission for Europe, EUREF). З розвитком навігаційної системи ГЛОАНСС, EPN почала включати в обробку спостереження цих супутників. В результаті чого Європейську постійнодіючу GPS-мережу було вирішено перейменувати на Європейську постійнодіючу ГНСС-мережу.

EUREF входить до структури Міжнародної Асоціації Геодезії (IAG), заснованої в 1987 р. Генеральною Асамблеєю, що проводилася у Ванкувері. Мета EUREF полягає в тому, щоб встановити об'єднану геодезичну систему відліку (ETRS89) та підтримувати роботу Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі. Структуру EPN представлено на рис. 1.5.

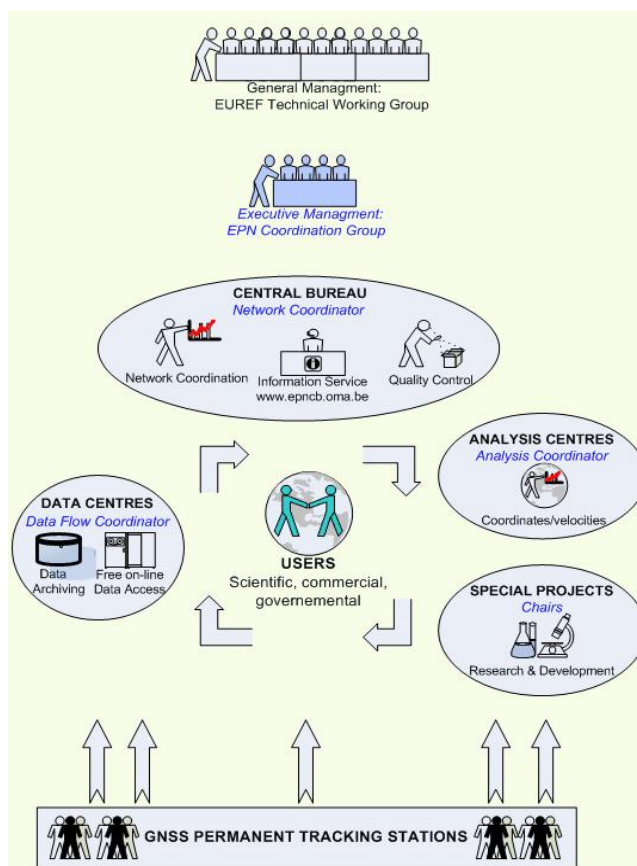


Рис. 1.5. Структура EPN⁶

У EPN входять наступні структурні одиниці:

–станції спостереження ГНСС-супутників (станом на 24 липня 2012 р. – 243 ГНСС-станцій, рис. 1.6)

⁶ http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationmaps.php

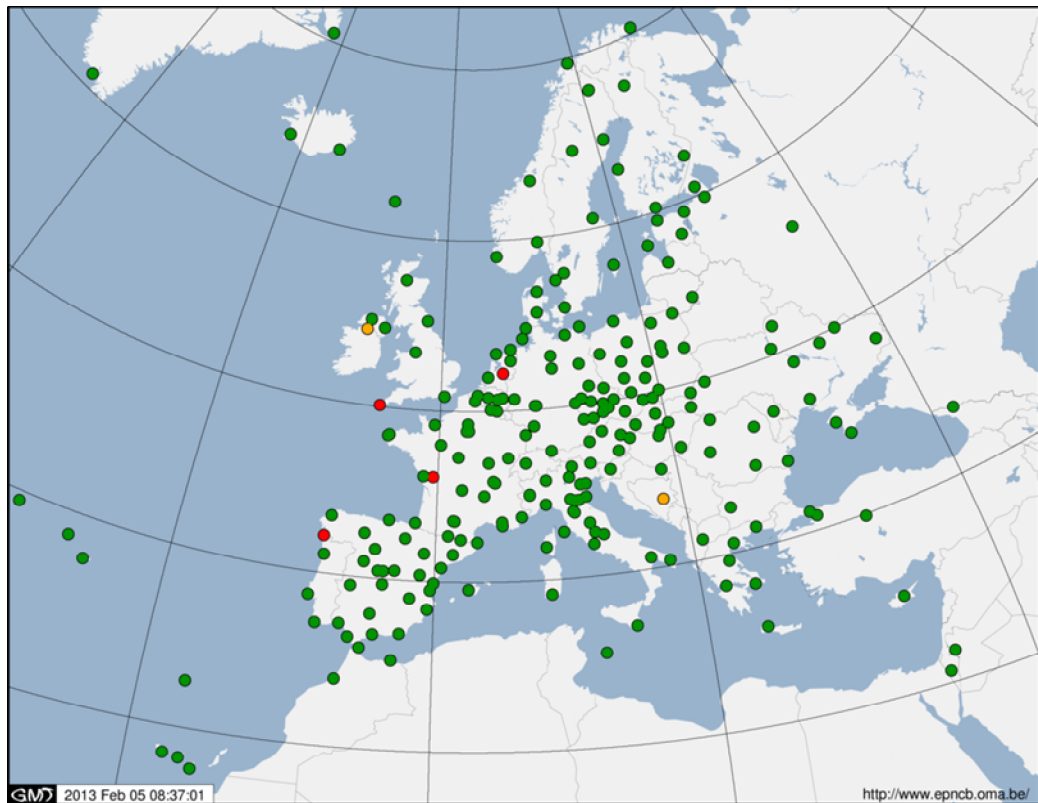


Рис. 1.6. Розташування ГНСС-станцій, що входять до EPN⁷

- операційні центри (виконують перевірку якості даних, перетворення «сирих» даних у формат Compact RINEX та їхнє пересилання в локальні центри збору даних);
- локальні центри збору (збирають дані станцій мережі, можуть забезпечуючи користувачам доступ як до даних спостережень, так і до отриманих розв’язків);
- локальні центри аналізу (кожен локальний центр обробляє свою підмережу станцій EPN і надає щотижневі розв’язки до Центру комбінації);
- регіональні центри збору даних (збирають дані всіх станцій мережі та забезпечують доступ до них);
- Центр комбінації (на підставі розв’язків локальних центрів формує офіційний комбінований розв’язок EPN) [46];
- Центральне бюро (координує діяльність компонентів EPN, визначає стандарти їхньої роботи тощо).

⁷ http://www.epncb.oma.be/_organisation/structure.php

На цей час офіційними продуктами EPN є [47]:

- комбінований розв’язок EPN з тижневими оцінками координат ГНСС-станцій та допоміжною інформацією;
- координатні ряди, які поновлюється кожні 15 тижнів;
- параметри тропосферної рефракції на ГНСС-станціях.

Починаючи із травня 1996 р., як регіональне відділення мережі Міжнародної ГНСС-служби, Європейська постійнодіюча ГНСС-мережа вирішує на регіональному рівні ті ж завдання, що й IGS. Щотижневі розв’язки EPN для європейського регіону поєднуються із глобальними розв’язками IGS при створенні координатної реалізації ITRF [34].

Розділ 2

ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС «BERNESE GPS SOFTWARE ver. 5.0» ЯК ОСНОВНИЙ ІНСТРУМЕНАРІЙ ОБРОБКИ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

2.1. Опис програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0»

Інструментом для виконання репроцесингу GPS-спостережень в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України було обрано програмний комплекс (ПК) «Bernese GPS Software ver. 5.0»⁸ [25]. Цей вибір було зумовлено тим, що даний ПК використовується переважно більшістю центрів аналізу Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі і одним центром аналізу Міжнародної ГНСС-служби, розповсюджується між приватних та наукових установ, активно розвивається, існує зворотній зв'язок із командою розробників.

Комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» було розроблено в Астрономічному інституті Бернського університету (AIUB, м. Берн, Швейцарія) у 2006 р. Цей комплекс дозволяє обробляти як кодові, так і фазові спостереження ГНСС-супутників на пунктах локального, регіонального і глобального масштабів. В результаті обробки стає можливим отримати з високою точністю координати станцій, параметри орбіт супутників, поправки до годинників на супутниках та на приймачах, тропосферну рефракцію тощо.

Програмний комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» використовується приблизно 400 установами для широкого спектру задач. Даний програмний комплекс підходить для наступних цілей:

- 1) швидкої обробки невеликих інтервалів спостережень;
- 2) автоматичної обробки постійнодіючих мереж;
- 3) обробки даних з великої кількості приймачів;

⁸ <http://www.bernese.unibe.ch/>

- 4) обробки даних вимірювань з різних типів приймачів з використанням моделей фазових центрів комбінацій антена–купол;
- 5) комбінування GPS- та GPS+ГЛОНАСС-спостережень у обробці;
- 6) фіксування невизначеностей на довгих базах;
- 7) різних методик завдання системи координат;
- 8) іоносферного та тропосферного моніторингу;
- 9) визначення похибок годинників ГНСС-супутників;
- 10) визначення орбіт ГНСС-супутників та параметрів обертання Землі тощо.

У програмному комплексі «Bernese GPS Software ver. 5.0» впроваджено наступні можливості [25].

1. Обробка фазових та кодових спостережень з високоточних геодезичних приймачів з використанням частот L_1 та L_2 . Врахування диференційного кодового зміщення для супутників та приймачів.

2. Одно- та двочастотні спостереження можуть оброблятися одночасно. Можливість використання іоносферної моделі, що зменшує вплив іоносферної рефракції на визначення координат станцій та інших параметрів.

3. Можливість точної обробки комбінованих спостережень супутників GPS, ГЛОНАСС та GPS+ГЛОНАСС.

4. Обробка даних в режимі подвійних, потрійних, потрійних або нульових різниць (зокрема, для передачі точного часу та точного позиціонування).

5. Використання різних комбінацій для частот L_1 та L_2 : ширококутової, Мельбурн-Вюбени, вільних від іоносфери та геометрії тощо.

6. Обробка та комбінація даних з різних приймачів.

7. Різноманітність методів дозволяє виконувати фіксування фазових невизначеностей наддовгих баз (декілька сотень кілометрів).

8. Програмне забезпечення дозволяє обробляти дані з усіх статичних та багатьох кінематичних методів спостережень, у тому числі, для визначення низьких орбіт штучних супутників Землі.

9. Моделювання руху літосферних плит, океанічного навантаження та

припливів, що відповідає останнім стандартам IERS.

10. Використання різних функцій нахилу та тропосферного градієнту для визначення зенітної тропосферної рефракції.

11. Врахування моделей фазового центру комбінацій антена–купол для приймачів та супутників.

12. Моделювання усіх параметрів, що залежать від часу, таких як зенітна тропосферна рефракція та її градієнт, параметри обертання Землі, глобальна іоносферна модель тощо.

Технічно «Bernese GPS Software ver. 5.0» можна характеризувати наступними показниками [24].

1. Підтримка операційними системами UNIX/Linux та MS-Windows.
2. Підтримка крос-платформеної скриптової мови Perl.
3. Використання Fortran 90 (структурний, динамічний розподіл пам'яті).
4. Незалежний від операційної системи інтерфейс, виконаний на мові C++ з використанням бібліотек Qt.
5. Спрощена структура каталогів: програма–користувач–данні.

ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0» включає приблизно 100 програм, які можуть логічно групуватися у п'ять частин.

1. Конвертація даних. Включає в себе усі програми, які виконують перетворення вхідних даних RINEX (спостереження, навігаційні повідомлення, метеорологічні дані, параметри годинників) у внутрішній формат «Bernese GPS Software ver. 5.0» та вилучення відповідної інформації.

2. Перетворення файлів ефемерид. Ця частина містить усі програми, пов'язані з орбітами супутників та параметрами обертання Землі. Включає в себе програми оперування та перетворення даних про положення супутників, виходячи з даних точних ефемерид, трансльованої, оновленої інформації тощо та опрацювання файлів полюсу.

3. Обробка спостережень. Містить основні програми для обробки ГНСС-спостережень. Тобто програми попередньої обробки та синхронізації годинників приймачів та супутників, створення баз між станціями, перевірки попередніх фазових спостережень та створення нормальних рівнянь.

4. Сервісна частина. Передбачає набір програм, що забезпечують перегляд бінарних файлів спостережень, перевірку залишків, порівняння координат тощо. Дозволяє переглядати файли з повідомленнями про помилки при виконанні інших програм.

5. Частина перетворень. Дозволяє перетворювати бінарні файли у ASCII-формат та навпаки. Додаткові програми дозволяють виконувати конвертацію формату SINEX для отримання файлів нормальних рівнянь та інформацію про станції. Також, можливо перетворення файлів версії «Bernese GPS Software ver. 4.2» [24] у файли нової версії програмного комплексу.

2.2. Вхідні дані

На цей час існує багато різноманітних форматів для даних, продуктів та розв'язків. Найбільш важливим та широко поширеним, безумовно, є формат апаратно-незалежного обміну навігаційними даними – RINEX (Receiver Independent Exchange Format, RINEX) [45, 48]. ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0» підтримує всі важливі формати і надає можливість виконувати конвертацію даних з одного формату в інший. Окрім RINEX-файлів, також важливу частину інформації містить наступні формати даних.

1. SP3 (Standard Product 3, SP3) – формат даних для отримання інформації про точні ефемериди ГНСС-супутників та годинникової інформації з супутників [49, 69].

2. SINEX (Solution Independent Exchange Format, SINEX) – формат даних для збереження розв'язку, коваріаційної інформації, можливості вилучення цієї інформації для подальшого використання тощо [72].

3. Формати IERS та IGS для отримання параметрів обертання Землі [63].

4. IONEX (Ionosphere Exchange Format, IONEX) – формат даних для отримання іоносферної карти [75].

5. ANTEX (Antenna Exchange Format, ANTEX) – формат даних для надання інформації про калібровки фазових центрів комбінацій антена–купол [72].

Передумовою для розробки формату RINEX в Астрономічному інституті Бернського університету була необхідність спрощення обміну GPS-даними, які були зібрані протягом великої Європейської кампанії «GPS EUREF 89» за допомогою більш ніж 60 приймачів чотирьох різних виробників [25]. Опис формату було опубліковано у Бюлетені CSTG GPS 1989 та 1990 рр. На цей час широке застосування має друга версія цього формату, яка була обговорена та прийнята на Другому Міжнародному симпозиумі по GPS у Канаді, у 1990 р (версія 2.0). У квітні 1997 р. до формату були включені спостереження ГЛОНАСС (версія 2.1). Формат RINEX містить наступні типи файлів: дані спостережень, навігаційні повідомлення, метеорологічні дані та дані годинників супутників та приймачів.

Формат SP3 містить точні значення місцезнаходження супутників на певний момент часу. Формат підтримує дані з GPS- та ГЛОНАСС-супутників. Місцезнаходження супутника зберігається у фіксованій системі відліку відносно Землі і відповідно до певної епохи.

Формат SINEX було впроваджено для незалежного обміну даними, що містять всю необхідну інформацію про координати та швидкості GPS-станцій, та параметри орієнтації Землі. Також, аналітичним центром IGS було впроваджено додавання у формат параметри зенітної тропосферної рефракції. Він був прийнятий у 1994 р. на семінарі IGS, присвяченому ущільненню системи координат IERS.

Параметри обертання Землі, що надаються службами IERS та IGS, містить часові ряди координат полюсу, тривалість дня тощо, що необхідно для виконання перетворень між земною та небесною системами відліку.

Формат IONEX було розроблено для надання інформації та обміну даними параметрів іоносфери. Перший варіант цього формату з'явився у 1996 р. [77]. На цей час поширеною є версія №1, яка була затверджена на семінарі IGS у 1998. [76]. Формат підтримує дво- та тривимірні карти вмісту електронів.

Формат ANTEX було впроваджено у 2002 р. на семінарі IGS у Канаді. У форматі зазначено корекції фазових центрів комбінацій антена–купол для антен

супутників та приймачів.

Обчислення точних ефемерид виконується зусиллями кількох центрів аналізу IGS на базі результатів вимірювань, отриманих у мережах станцій стеження. Результати стають доступними з деякою затримкою після спостережень (окрім трансльованих та передбачених), вони подаються у вигляді таблиць місцеположень та швидкостей супутників. ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0» підтримує декілька форматів орбіт [69].

1. PRE (Precise Orbit File, PRE) – надає точне місцеположення супутника у геоцентричній фіксованій системі координат.

2. TAB (Tabular Orbit File, TAB) – містить так зване табличне місцеположення та геоцентричне положення супутника.

3. STD (Standard Orbit File, STD) – містить поліномінальне положення та швидкості, дані чисельного інтегрування та похідні вищих порядків для кожного супутника.

В табл. 2.1 наведено доступні характеристики видів файлів ефемерид, що надає IGS для супутників GPS (також наявні і для ГЛОНАСС).

У 1988 р. було утворено Міжнародну службу обертання Землі, що займається оцінкою параметрів обертання Землі (Earth rotation parameters, ERP). Вона розпочала координувати не тільки дослідження руху полюсів і зміни швидкості обертання, а й створення узгоджених між собою небесної та земної систем координат [4]. Фінальні ефемериди IGS також містять інформацію про параметри обертання Землі. У файлі ERP, що використовується «Bernese GPS Software ver. 5.0», також наведено дані про рух полюсу та параметри всесвітнього часу UT1 [36]. В табл. 2.2 наведено характеристики точності параметрів значень руху полюсу (Polar Motion, PM) та довжини доби (Length of day, LOD).

Таблиця 2.1

Види орбіт, що надаються IGS⁹

Види ефемерид		Точність	Доступність	Інтервал вибірки
Трансльовані	Орбіта	~ 100 см	У реальному часі	
	Годинник	~ 5 нс		
Ультрашвидкі (передбачені)	Орбіта	~ 5 см	У реальному часі	15 хв
	Годинник	~ 3 нс		
Ультрашвидкі (спостережувальні)	Орбіта	~ 3см	Через 3–9 годин	15 хв
	Годинник	~ 5 пс		
Швидкі	Орбіта	~ 2.5 см	Через 17–41 годину	15 хв
	Годинник	~ 75 пс		5 хв
Фінальні	Орбіта	~ 2.5 см	Через 12–18 діб	15 хв
	Годинник	~ 75 пс		5 хв

Таблиця 2.2

Параметри обертання Землі

Види ЕОР	Параметри	Точність	Доступність
Ультрашвидкі (передбачені)	PM	~ 200 с дуги	У реальному часі
	LOD	~ 50 мс	
Ультрашвидкі (спостережувальні)	PM	~ 50 с дуги	Через 3–9 годин
	LOD	~ 10 мс	
Швидкі	PM	~ 40 с дуги	Через 17–41 годину
	LOD	~ 10 мс	
Фінальні	PM	~ 30 с дуги	Через 11–17 діб
	LOD	~ 10 мс	

⁹ <http://igsd.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

2.3. Модуль «Bernese Processing Engine»

В останні роки створюється все більше і більше постійнодіючих мереж в багатьох регіонах світу. Кількість даних, що отримується за одну добу, досягає великих значень, що потребує високого ступеня автоматизації обробки GPS-спостережень. Астрономічним інститутом Бернського Університету було розроблено програмний модуль «Bernese Processing Engine» (BPE) [25], який дозволив забезпечити високий рівень автоматизації обробки GPS-спостережень. Крім того BPE можливо використовувати не тільки для обробки мереж, а й для завдань, які потребують високого ступеня автоматизації. З 1995 р. BPE використовується Центром аналізу CODE для регулярної обробки глобальної мережі IGS. Великі кампанії, такі як *IGS Repr01* [84–85] та *EPN Repr01* [88], де кількість ГНСС-станцій сягає від декількох десятків до декількох сотень, також використовують програмний модуль BPE для автоматизації обробок таких мереж.

BPE може використовуватись для виконання завдань у послідовному або паралельному режимах. Завдання для модуля BPE визначені у так званому Process Control File (PCF). В CPU Control File надається інформація про параметри процесорів комп'ютера. Модуль BPE дозволяє запускати кілька завдань одночасно з використанням різних процесорів і навіть є можливість розділення однієї задачі на декілька процесорів. У новій версії BPE є можливість контролю виконання PCF-файлу, що дозволяє робити умовний стрибок вперед та назад у послідовності обробки.

«Bernese Processing Engine» складається з трьох основних частин: сервера, клієнта та Process Control File. На рис. 2.1 наведено схему функціонування BPE-сервера.

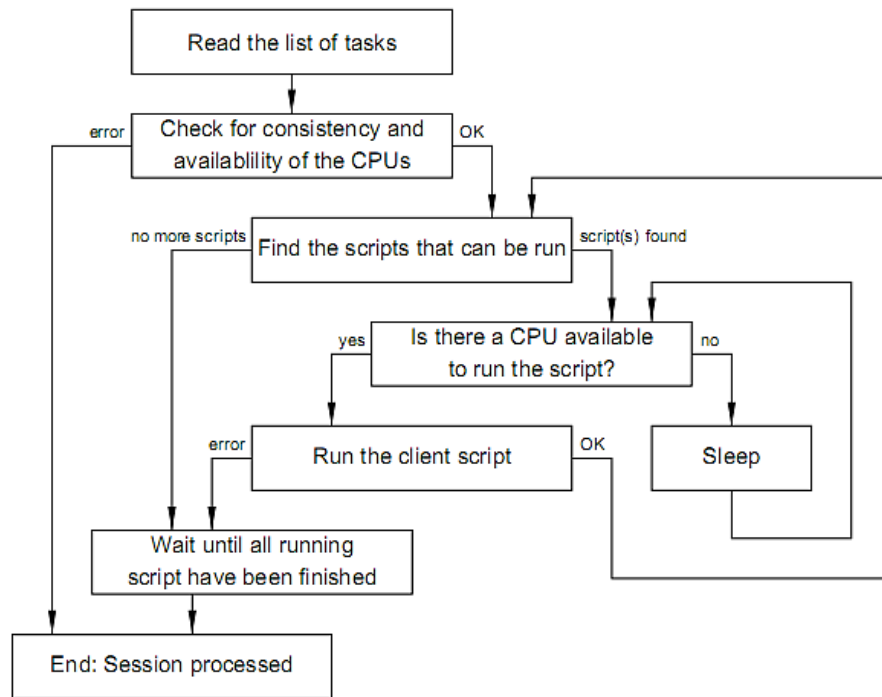


Рис. 2.1. Схема роботи VPE-сервера

Після запуску модуля VPE-сервер виконує наступну послідовність дій.

1. Зчитування вхідних опцій, що містяться у PCF та CPU Control File. Перший файл містить послідовність дій, які будуть виконуватись, другий – на який процесор буде віддано виконання завдання.

2. У відповідності до PCF- та CPU-файлів, сервер починає запуск клієнта (також можливий запуск декількох клієнтів одночасно). CPU-файл визначає параметри, з якими буде виконуватись клієнт.

3. Першим завданням, яке виконає при старті клієнт – це відкриття TCP/IP-з'єднання з сервером. З того моменту, як виконалось з'єднання з сервером, клієнт не буде відключений, доки не виконається PCF-файл. На рис. 2.2 наведено послідовність з'єднання клієнта з сервером.

4. Після успішного встановлення з'єднання між сервером та клієнтом, сервер починає надсилати команди клієнту і отримувати відповіді про виконання. Перше повідомлення сервера містить команду на запуск конкретного сценарію користувача. Остання команда від клієнта повідомляє про закінчення виконання сценарію і припиняється.

5. VPE-сервер зберігає інформацію про всі клієнти, що мають

виконуватись. Після закінчення дії одного з клієнтів, сервер, у відповідності до РСФ-файлу, вирішує, який клієнт буде виконуватись наступним.

Кроки 2-5 повторюються, доки не буде закінчено роботу сервера згідно з РСФ-файлом. Сервер та клієнт зберігають звіт про своє виконання у вихідних файлах.

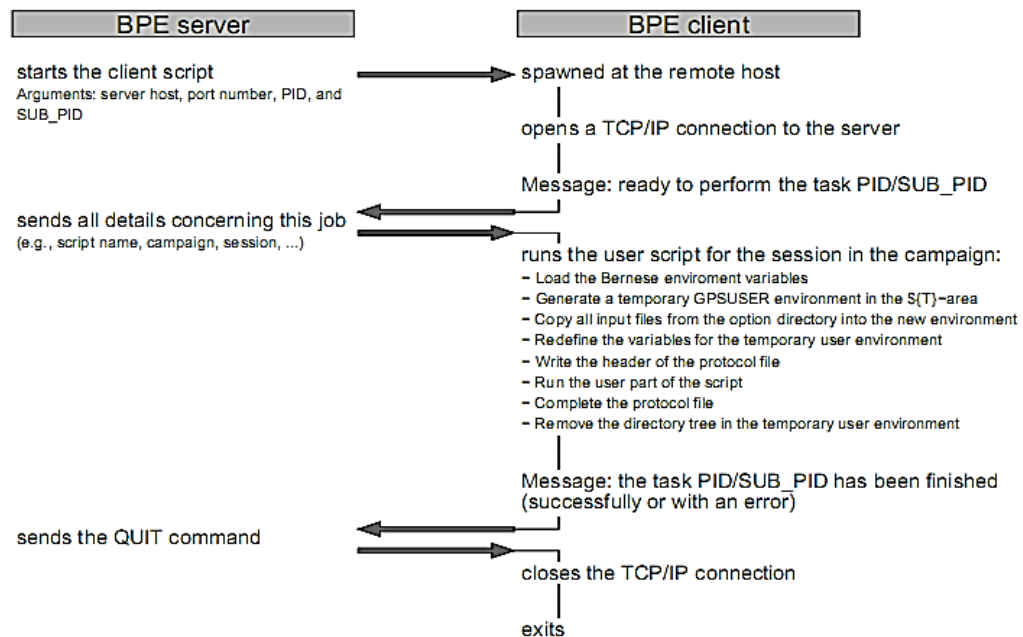


Рис. 2.2. Зв'язок між ВРЕ-сервером та ВРЕ-клієнтом

Після запуску сервером клієнта, останній виконує таку послідовність дій.

1. Встановлюється TCP/IP з'єднання з сервером.
2. Виконання сценарію.
3. Повідомлення від клієнта про закінчення виконання сценарію та закриття сервером з'єднання.

РСФ зазначає, в якій послідовності будуть виконуватись програми. За своєю структурою виконання РСФ-файлу є лінійним, тобто програми в ньому виконуються послідовно, проте деякі програми можуть виконуватись паралельно. РСФ-файл складається з трьох частин.

1. Послідовність програм, що будуть використовуватись при обробці з вказаними каталогами та опціями.
2. Визначення параметрів для запуску програми ВРЕ.

3. Наведено список змінних, що будуть надаватися програмам.

2.4. Висновки

Даний розділ присвячено використанню програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0» в якості інструмента обробки та репроцесингу GPS-спостережень згідно стандартів Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі та Міжнародної ГНСС-служби.

Програмний комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» став фактично стандартом при обробці даних Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі: 14 з 16-ти центрів обробки EPN використовують цей програмний комплекс. Крім того інструкції та рекомендації EPN розроблено відносно опцій «Bernese GPS Software ver. 5.0».

Близько 400 інститутів та наукових установ використовують програмний комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» для широкого спектру робіт, а саме для швидкої обробки коротких сесій спостережень на одній або двох частотах, автоматичної обробки постійнодіючих ГНСС-мереж, комбінованої обробки ГЛОНАСС- та GPS-спостережень тощо.

Саме завдяки цьому «Bernese GPS Software ver. 5.0» використовується в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України, як основний інструментарій обробки ГНСС-спостережень.

Розділ 3

РЕПРОЦЕСИНГ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ GPS-ТИЖНІВ 1236–1399

3.1. Опис мережі GPS-станцій та вхідних даних для репроцесингу

Автором у Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України виконано зведену обробку (репроцесинг) спостережень GPS-супутників для GPS-тижнів 1236–1399 (14 вересня 2003 р. – 4 листопада 2006 р.). Репроцесинг виконано для 29 GPS-станцій, що розташовані на території Східної Європи, 12 з яких – на території України. Перелік GPS-станцій наведено в табл. 3.1, а їх географічне розташування – на рис. 3.1.

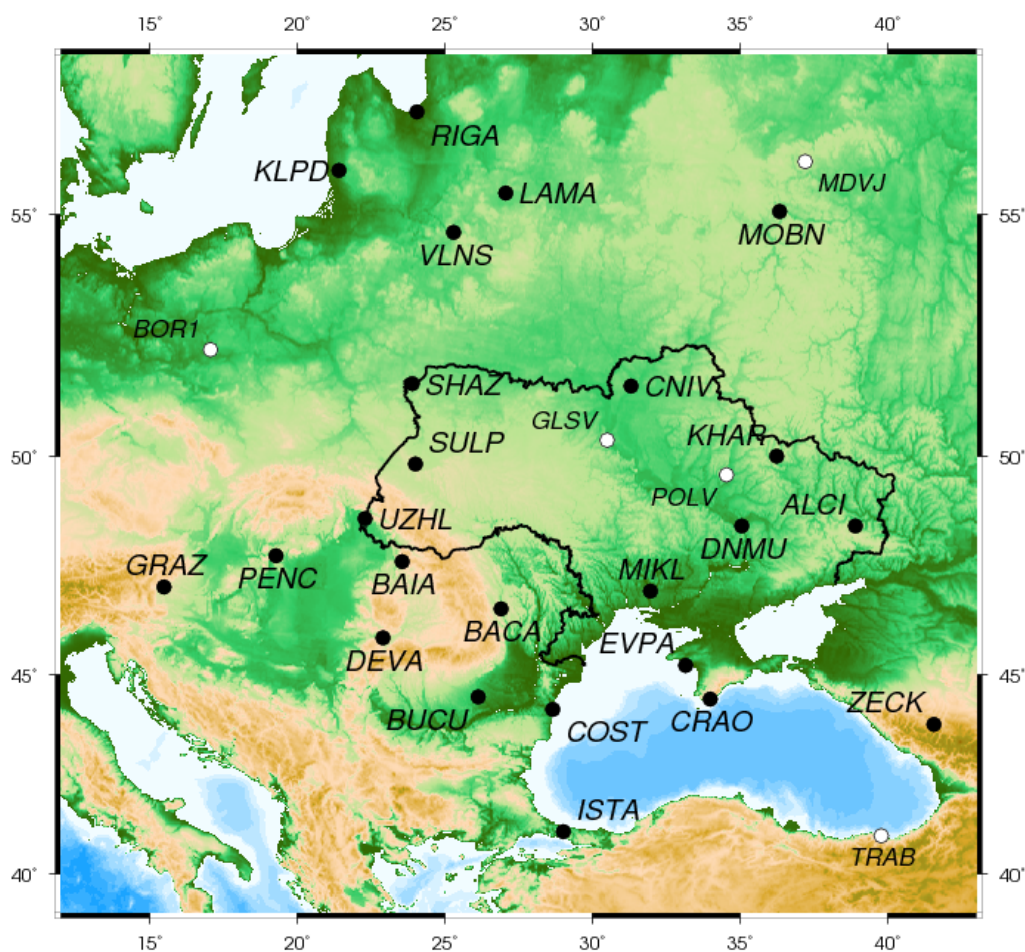


Рис. 3.1. Розташування GPS-станцій

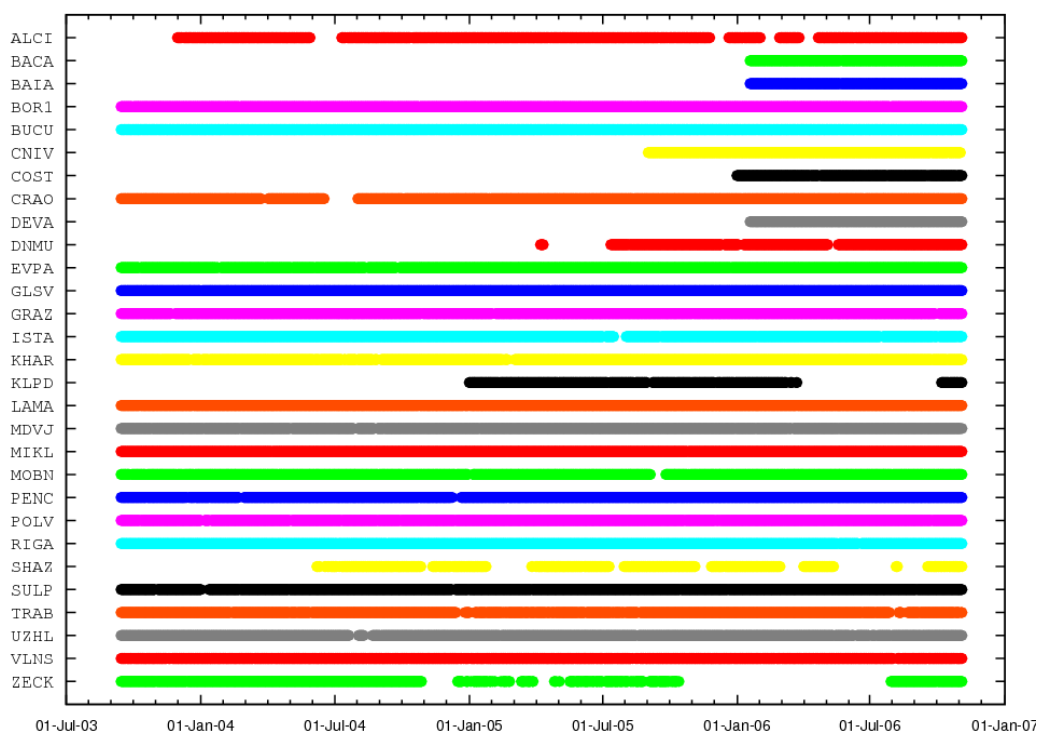


Рис. 3.2. Діаграма спостережень GPS-супутників

На рис. 3.2 представлено діаграму спостережень GPS-супутників на постійнодіючих станціях мережі.

Обробка виконувалась відповідно до нових рекомендацій Центрального бюро EPN, що вступили в дію з GPS-тижня 1400 (5 листопада 2006 р.) [44]. Відповідно до нових рекомендацій по обробці GPS-спостережень використовувалась система координат IGS05 [20], задавання координатної системи виконувалось за допомогою обмеження «No-net translation» [25] на референсні станції GLSV, POLV, TRAB, MDVJ та BOR1, модель океанічних навантажень FES2004 [57], моделі абсолютних калібровок фазових центрів комбінацій антена–купол [78] тощо.

Позначимо отриманий розв’язок як *MAI*.

Таблиця 3.1

Перелік GPS-станцій

Станція	Країна	Назва	№ DOMES	Мережі	Приймач	Антенa	Купол	Примітка
Київ/Голосіїв	Україна	GLSV	12356M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Ужгород	Україна	UZHL	12301M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Харків	Україна	KHAR	12314M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Полтава	Україна	POLV	12336M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	NONE	
Миколаїв	Україна	MIKL	12335M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Львів	Україна	SULP	12366M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Сімеїз	Україна	CRAO	12337M002	IGS, MGN	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	SCIS	
Чернігів	Україна	CNIV	15501M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Євпаторія	Україна	EVPA	12344M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Алчевськ	Україна	ALCI	12371S001		TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE	
Шацьк	Україна	SHAZ	12370M001		TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE	
Дніпропетровськ	Україна	DNMU	12369M001		TRIMBLE 7400MSI	TRM14532.00	NONE	
Менделєєво	Росія	MDVJ	12309M005	IGS, EPN	JPS LEGACY	JPSREGANT_DD_E	NONE	
Обнінськ	Росія	MOBN	12365M001	IGS	ASHTECH Z-XII3	ASH701945C_M	SCIS	
Зеленчукська	Росія	ZECK	12351M001	IGS, EPN	AOA SNR-8000 ACT ASHTECH Z-XII3	AOAD/M_T ASH700936D_M	NONE SNOW	по 18.10.2005 00:00 UTC з 30.07.2006 00:00 UTC
Трабзон	Туреччина	TRAB	20808M001	IGS, EPN	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Стамбул	Туреччина	ISTA	20807M001	IGS, EPN	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Бухарест	Румунія	BUCU	11401M001	IGS, EPN	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Констанца	Румунія	COST	11407M001	EPN	ASHTECH Z-X	ASH701945B_M	NONE	
Бакеу	Румунія	BACA	11405M001	EPN	LEICA RX1200PRO	LEIAT504	LEIS	

Продовження табл. 3.1

Баїя-Маре	Румунія	BAIA	11406M001	EPN	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Дева	Румунія	DEVA	11408M001	EPN	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Грац	Австрія	GRAZ	11001M002	IGS, EPN, ECGN	ASHTECH UZ-12 TRIMBLE NETRS TRIMBLE NETRS	ASH701945C_M ASH701945C_M TRM29659.00	NONE NONE NONE	по 17.03.2005 09:00 UTC 17.03.2005 10:00 UTC - 22.03.2005 10:50 UTC з 22.03.2005 10:50 UTC
Пенц	Угорщина	PENC	11206M006	IGS, EPN	TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE	
Боровець	Польща	BOR1	12205M002	IGS, EPN	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	NONE	
Ольштин	Польща	LAMA	12209M001	IGS, EPN	ASHTECH Z-XII3	ASH700936F_C	SNOW	
Вільнюс	Литва	VLNS	10801M001	EPN, ECGN	ASHTECH Z-XII3	ASH700936A_M	NONE	
Клайпеда	Литва	KLPD	10802M001		ASHTECH Z-XII3	ASH700936E	NONE	
Рига	Латвія	RIGA	12302M002	IGS, EPN, ECGN	ROGUE SNR-8000 AOA BENCHMARK ACT AOA BENCHMARK ACT ROGUE SNR-8000	ASH700936D_M AOAD/M_T ASH700936D_M ASH700936D_M	NONE NONE NONE NONE	по 13.01.2005 00:30 UTC 13.01.2005 10:08 UTC - 20.05.2006 06:00 UTC 22.05.2006 00:00 UTC - 17.06.2006 00:00 UTC з 18.06.2006 00:00 UTC

Для виконання репроцесингу були взяті файли спостережень GPS-супутників у форматі RINEX. Дані спостережень на українських станціях доступні на ftp-сервері Головної астрономічної обсерваторії НАН України¹⁰.

Використовувались комбіновані точні ефемериди GPS-супутників та параметри обертання Землі, що були обчислені IGS в межах кампанії репроцесингу *IGS Repr01* [66, 81, 86].

Абсолютні калібровки фазових центрів комбінацій антена–купол були взяті зі стандартного файлу у форматі ANTEX, який рекомендовано використовувати IGS при обробці ГНСС-спостережень [72].

Океанічні навантаження для станцій, чиї спостереження використовувались для обробки, були пораховані по моделі FES2004 [35, 57].

Використовувалась гравітаційна модель JGM3 та ефемериди Сонця та Місяця DE200 від Лабораторії реактивного руху (JPL, США) [80].

При врахуванні поправок до показів годинників GPS-супутників використано оцінки різностей кодових спостережень, що є продуктом Центру аналізу CODE [53]. Оцінки представлені у вигляді DCB-файлів (Difference Code Biases, DCB) [90].

Координати та швидкості апріорних станцій на епоху 2000.0, що задавали систему координат, були отримані з каталогу IGS05. В табл. 3.2 наведено значення апріорних координат та швидкостей для GPS-станцій GLSV, POLV, MDVJ, BOR1 та TRAB.

Для моделювання значень зенітної тропосферної рефракції використовувалась апріорна модель Саастамойнена [73–74], що задавалась опцією DRY_NIELL. Для обчислення рефракції на інших висотах використовувалась опція NIELL та функція нахилу nmfh2.0 [65]. Для врахування спостережень з кутом місця спостережень супутників до 3°, використовувався тропосферний градієнт. Також використовувалась глобальна модель іоносфери на кожен день, яка була представлена Центром аналізу CODE [75].

¹⁰<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/data>

Апріорні координати та швидкості GPS-станцій
(з каталогу IGS05 на епоху 2000.0)

Станція	Координати		Швидкості	
	X, м	Y, м	V _X , м/рік	V _Y , м/рік
GLSV	3512889,0509	2068979,8074	-0,0194	0,0141
	4888903,1612		0,0083	
POLV	3411557,4503	2348463,9223	-0,0211	0,0129
	4834396,8425		0,0076	
MDVJ	2845456,1887	2160954,1827	-0,0211	0,0128
	5265993,1839		0,0090	
BOR1	3738358,5380	1148173,6323	-0,0167	0,0156
	5021815,7236		0,0095	
TRAB	3705250,4858	3084421,6286	-0,0230	0,0135
	4162044,7216		0,0104	

Іоносферна модель, що надана Центром аналізу CODE [77].

Для врахування нутації та прецесії використовувалась модель IAU2000, що необхідна при перетворенні ефемерид у табличні орбіти. Модель включає в себе коефіцієнти для місячно-сонячних та планетарних нутацій, а також обчислені аргументи нутацій. Модель IAU2000 рекомендовано для використання IERS у 2003 р. [58].

3.2. Відмінності репроцесингу від попередньої регулярної обробки

У Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України було виконано регулярну обробку спостережень GPS-супутників для тих же GPS-тижнів (1236–1399) та для тих же GPS-станцій. Обробку було виконано у відповідності до вимог Центрального Бюро EPN, які діяли до GPS-тижня 1400 за допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 4.2» [24], розробленого в

Астрономічному інституті Бернського університету (Швейцарія).

Для регулярної обробки використовувались комбіновані точні ефемериди GPS-супутників і параметри обертання Землі, отримані IGS. Відносні моделі фазових центрів комбінацій антена–купол буди взяті зі стандартного файлу ANTEX від IGS. Океанічні навантаження для станцій, що використовувались, було пораховано по моделі GOT00.2_PP [67]. Модель створена у Космічній обсерваторії Онсала, Швеція. Використовувались спостереження GPS-супутників з мінімальним кутом місця 10° .

В якості апріорних координат станцій для поточного тижня використовувались координати, що отримані з обробки даних для попереднього тижня. Координати та швидкості для станції GLSV на епоху 1998,0 отримано з каталогу IGS00b (друга IGS-реалізація ITRF2000) [32], представлено в табл. 3.3. Система координат задавалася шляхом «жорсткого» обмеження на координати станції GLSV (0,1 мм).

У результаті виконаної постійної обробки було отримано координати для GPS-мережі в системі відліку IGS00b [15, 18].

Таблиця 3.3

Апріорні координати та швидкості для станції GLSV

GPS-станція	Координати, м	Швидкості, м/рік
GLSV	$X = 3512889,0969$ $Y = 2068979,7777$ $Z = 4888903,1494$	$V_x = -0,0190$ $V_y = 0,0147$ $V_z = 0,0066$

Параметри тропосфери визначались на кожну годину для кожної GPS-станції. Використовувалась опція DRY_NIELL, що задавала функцію схилення $nmfh2.0$. Значення зенітної тропосферної рефракції для кожної GPS-станції зберігались в форматі TROPEX [16].

Розв'язок, що було отримано в результаті регулярної обробки в ГАО НАН України, позначено як *МАО*.

Загальні різниці між моделями та апріорними даними при виконанні постійної обробки та репроцесингу наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

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, що задавала модель 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»

3.4. Методика репроцесингу

3.4.1. Сценарій виконання репроцесингу. Репроцесинг спостережень GPS-супутників виконано за допомогою програмного забезпечення «Bernese GPS Software ver. 5.0». Для автоматизації виконання репроцесингу в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України створено PCF-файл «MAO_LAC.PCF», що використовувався ВРЕ. Код PCF-файлу, що використовувався при виконанні репроцесингу *MAI*, наведено нижче.

```

# =====
# MAO_LAC.PCF
# =====
#
# Author : O. Khoda
# Created : 28-Oct-2009
#
# Based on : RNX2SNX.PCF by M. Meindl, S. Schaer (AIUB);
# ROB.PCF by C. Bruyninx (ROB)
#
# Changes :
# =====
#
#
PID SCRIPT OPT_DIR CAMPAIGN CPU P WAIT FOR...
3** 8***** 8***** 8***** 8***** 1 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3**
#
# Copy required files and create a priori CRD file
# -----
001 LAC_INI          LAC_GEN ANY 1
#002 PHCCNV         LAC_GEN ANY 1 001
#
# Prepare pole, orbit, and clock information
# -----
101 POLUPD          LAC_GEN ANY 1 001
111 PRETAB          LAC_GEN ANY 1 101
112 ORBGEN         LAC_GEN ANY 1 111
#
# Convert and synchronize observation data
# -----
201 RNXGRA          LAC_GEN ANY 1 001
211 RXOBV3AP       LAC_GEN ANY 1 201
212 RXOBV3_P       LAC_GEN ANY 1 211
213 CRDMERGE       LAC_GEN ANY 1 212
214 NUVELO         LAC_GEN ANY 1 213
215 CRDMERGE       LAC_VEL ANY 1 214
216 COOVEL         LAC_GEN ANY 1 215
221 CODSPAP        LAC_GEN ANY 1 216
222 CODSP_P        LAC_GEN ANY 1 112 221
223 CODXTR         LAC_GEN ANY 1 222
224 CRDMERGE       LAC_CRD ANY 1 223
#
# Form baselines, preprocess and screen phase data, save cluster NEQ files
# -----
301 SNGDIF          LAC_GEN ANY 1 224
311 MAUPRPAP       LAC_GEN ANY 1 301
312 MAUPRP_P       LAC_GEN ANY 1 311
313 MPRXTR         LAC_GEN ANY 1 312
314 CRDMERGE       LAC_QIF ANY 1 312
321 GPSEDTP        LAC_GEN ANY 1 314
322 GPSEDTP_P      LAC_EDT ANY 1 321
331 GPSCHK         LAC_GEN ANY 1 322
#
# Compute ambiguity-float network solution, resolve, phase ambiguities
# -----
401 ADDNEQ2        LAC_GEN ANY 1 331
402 GPSXTR         LAC_GEN ANY 1 401
411 GPSQIFAP       LAC_QIF ANY 1 402
412 GPSQIF_P       LAC_QIF ANY 1 411
413 GPSXTR         LAC_QIF ANY 1 412
#
# Compute ambiguity-fixed network solution, create final NEQ/SNX/TRO files
# -----
501 GPSEST         LAC_FIN ANY 1 413
502 CPNEQ          LAC_FIN ANY 1 501
511 ADDNEQ2        LAC_FIN ANY 1 502
512 GPSXTR         LAC_FIN ANY 1 511
513 CPCR           LAC_FIN ANY 1 511
514 COOVEL         LAC_FIN ANY 1 513
515 CRDMERGE       LAC_FIN ANY 1 514
516 CPCR           LAC_FIN ANY 1 515
517 COMPAR         LAC_FIN ANY 1 516
518 HELMR1         LAC_FIN ANY 1 517
521 ADDNEQ2        LAC_RED ANY 1 518
522 GPSXTR         LAC_RED ANY 1 521
523 CPNEQ          LAC_RED ANY 1 521
#
#
# Create weekly solution
# -----

```

```

601 CPNEQ          LAC_MC ANY 1 523
602 ADDNEQ2       LAC_MC ANY 1 601
603 HELMR1W       LAC_MC ANY 1 602
604 CPCRD         LAC_MC ANY 1 603
610 ADDNEQ2       LAC_MA1 ANY 1 604
620 NEQ2TRO       LAC_TR1 ANY 1 610
#
# Create summary file, save results, and delete files
# -----
901 LAC_SUM        LAC_GEN ANY 1 620
902 LAC_SAV        LAC_GEN ANY 1 901
903 LAC_DEL        LAC_GEN ANY 1 902
904 LAC_CLN        LAC_GEN ANY 1 903
#
# End of BPE
# -----
999 DUMMY          NO_OPT ANY 1 904
#
#
#
PID USER          PASSWORD PARAM1  PARAM2  PARAM3  PARAM4  PARAM5  PARAM6  PARAM7
3** 12***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8*****
211
212              PARALLEL $211
221              $221
222              PARALLEL $221
311              $311
312              PARALLEL $311
321              $321
322              PARALLEL $321
331              NEXTJOB 301
411              $411
412              PARALLEL $411
502              V_E      D      TO_ARC
513              V_Z      D      TO_ARC
516              V_Z      D_ALL  FROM_ARC
518              NEXTJOB 511
523              V_Z      D      TO_ARC
601              V_Z      D_ALL  FROM_ARC
603              NEXTJOB 602
604              V_Z      W      TO_ARC
#
VARIABLE DESCRIPTION DEFAULT
8***** 40***** 16*****
V_A      A priori information APR
V_B      Orbit/ERP, DCB, ION information IGS
V_C      Preliminary (ambiguity-float) results AFL
V_E      Final (ambiguity-fixed) results FIN
V_F      Size-reduced NEQ information RED
V_G      GLONASS orbit information IGL
V_O      Data directory /home/DATA
V_R      Results directory /home/RESULTS
V_T      Type of solution (LAC/LAC_A) LAC
V_Z      MA1 solution MA1
V_MINUS  Session range begin (for COMPAR) -6
V_PLUS   Session range end +0
V_CLU    Maximum number of files per cluster 3
V_STAINF Station information file name EUREF
V_PLDINF Tectonic plate definition file name MA1_REP
V_BLQINF Ocean loading correction file name MA1_FES2004
V_ABBINF Station name abbreviation file name MA1_REP
V_BSLINF Predefined baselines file name MA1_REP
V_CRDREF A Priori CRD/VEL file name IGS05
V_CRDMAS Master CRD file name (IGS05 only) IGS05MAS
V_FIX    Fiducial stations file name IGS05
V_PCVFIL GNSS PCV file PHAS_MA1
V_PCVMOD GNSS PCV model I05
#
# DO NOT USE V_D, V_J, V_M, V_Y VARIABLES

```

Процес отримання розв'язку для окремого GPS-тижня можна розділити на чотири етапи (рис. 3.3 та 3.4).

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.

3.4.2. Попередня обробка. На етапі попередньої обробки спочатку виконувалась перевірка якості спостережень на рівні RINEX-файлів і перетворення вхідних даних до внутрішніх форматів ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0».

Програмою «POLUPD», Process ID 101 (PID 101) виконувалося перетворення до внутрішнього формату файлу параметрів обертання Землі. За допомогою програм «PRETAB» (PID 111) та «ORBGEN» (PID 112) виконувалось перетворення та інтегрування точних ефемерид GPS-супутників з земної системи координат до небесної. В результаті чого були отримані так звані табличні орбіти. Файли стандартних орбіт створювались за допомогою інтегрування руху GPS-супутників. Координати супутників з файлів табличних орбіт використовувались як псевдоспостереження.

За допомогою програми «RNXGRA» (PID 201) з RINEX-файлів даних спостережень збиралась інформація про кількість та якість спостережень для кожної GPS-станції. У відповідності до встановлених параметрів, станції, чий спостереження не відповідали мінімальним встановленим критеріям, виключалися з подальшої обробки. Програма «RXOBV3_P» (PID 212) перетворювала вже перевірені RINEX-файли до внутрішнього формату ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0». На наступному етапі виконувалось об'єднання декількох файлів з координатами/швидкостями в один повний набір координат/швидкостей з можливістю додавання нових станцій за допомогою програми «CRDMERGE» (PID 213). Програма «NUVELO» (PID 214) обчислювала швидкості станцій з урахуванням моделі руху тектонічних плит.

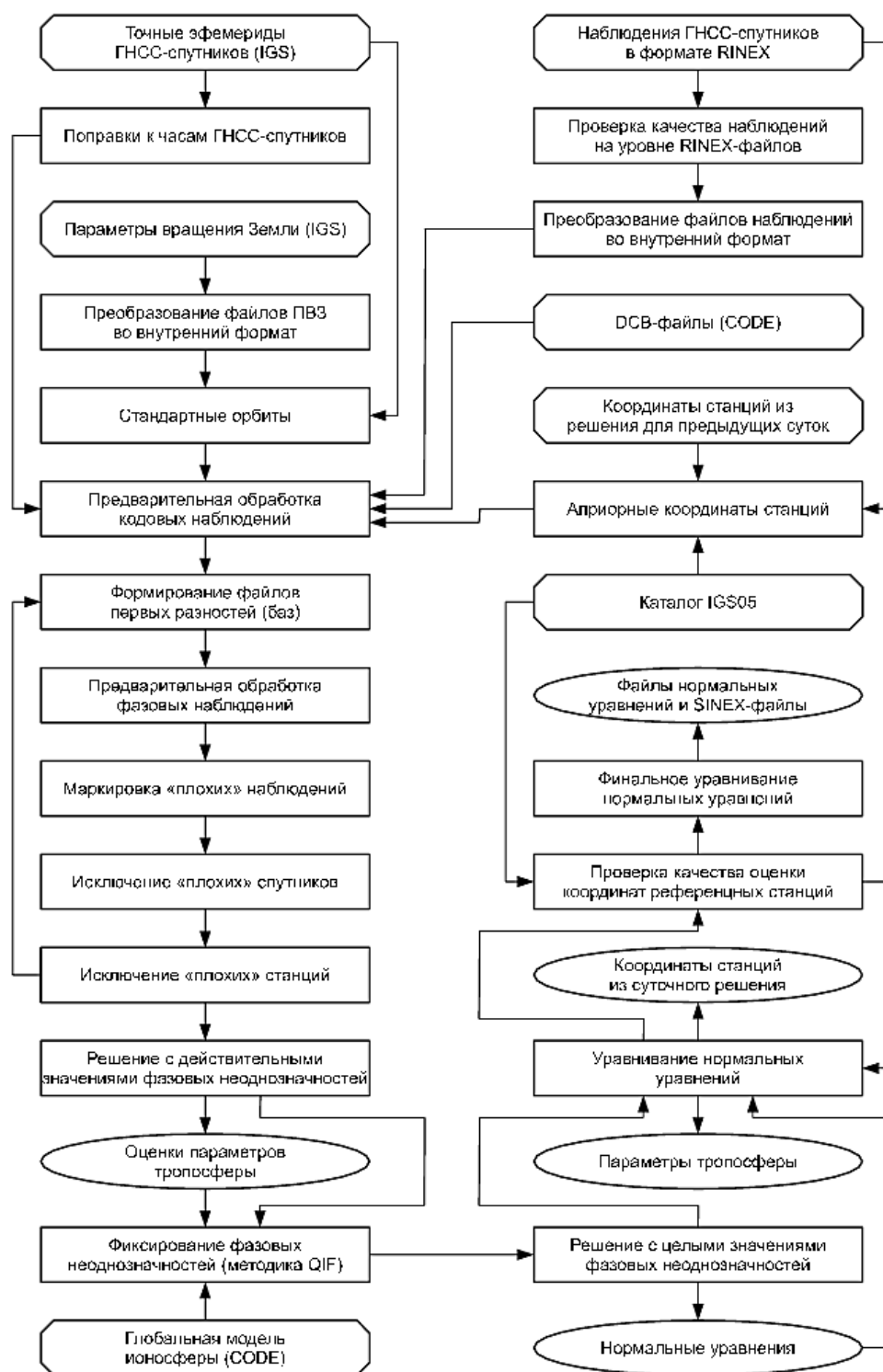


Рис. 3.3. Схема отримання добового розв'язку

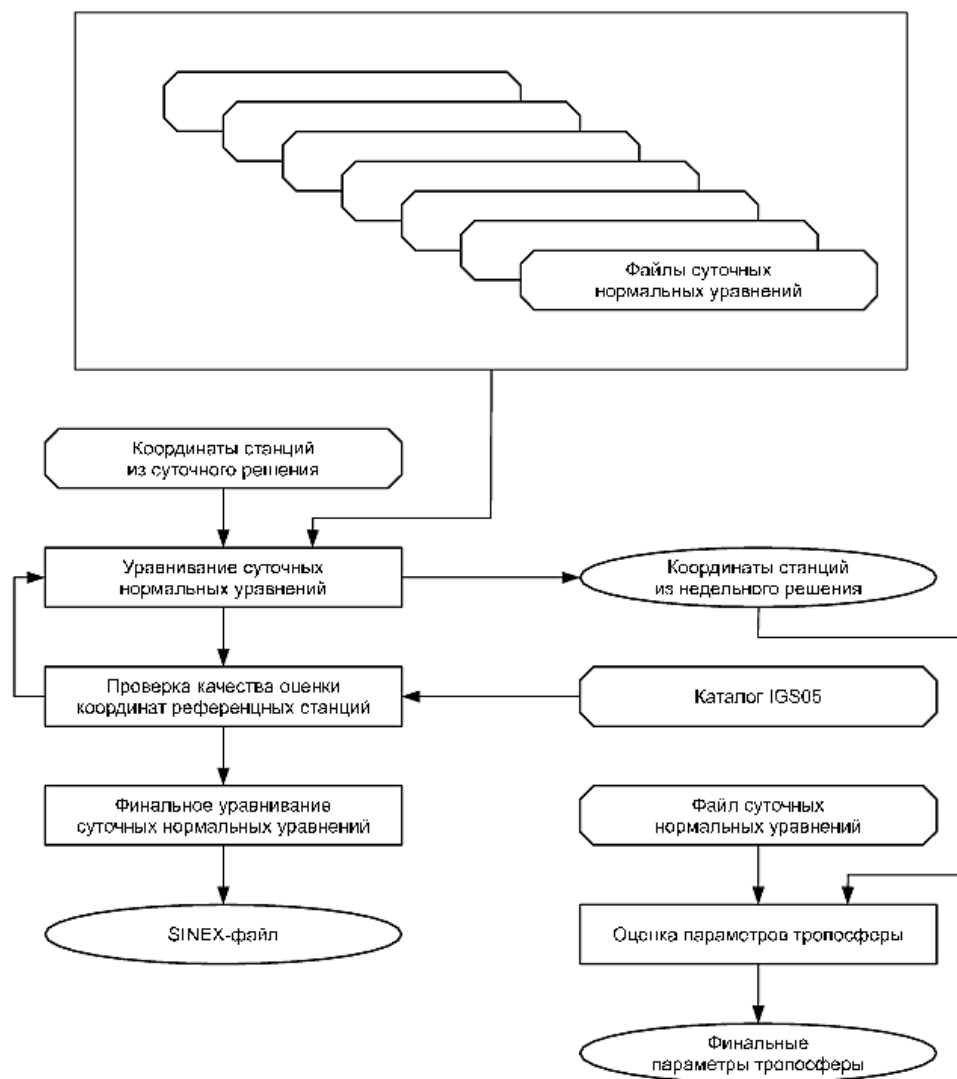


Рис. 3.4. Схема отримання тижневого розв'язку

Однією з моделей для врахування руху плит є модель NNR-NUVEL-1A, яку було прийнято на зібранні IERS2004 [21].

Після отримання нових значень швидкостей руху GPS-станцій знову виконувався етап «CRGMERGE» (PID 215). На наступному кроці відбувалось перетворення файлу координат з однієї епохи до іншої за допомогою відповідних значень швидкостей для станції, що були оновлені на етапі PID 215. Після цього вираховувались поправки до годинника на приймачах, що розташовані на GPS-станціях, за це відповідала програма «CODSPP» (PID 222). Файли перших різниць використовувались відповідно до набору баз з розв'язку постійної обробки (розв'язок *MAO*), щоб уникнути впливу іншого набору формувань баз між станціями. Попередня обробка фазових спостережень

дозволила визначити моменти стрибків фаз та зафіксувати фазові невизначеності. Далі виконувалось маркування спостережень з короткими інтервалами та спостережень супутників з кутом місця менше трьох градусів. Крім цього, виключалися з обробки станції, які мали багато поганих спостережень. За це відповідала програма «MAUPRP» (PID 312). За допомогою програми «CRDMERGE» (PID 314) виконувались подібні операції, що зазначені на етапі PID 215.

На наступному етапі обробки за допомогою програми «GPSEST» (PID 501) був отриманий розв'язок з дійсними значеннями фазової невизначеності за допомогою лінійної комбінації *LC3*. Поряд з цим виконувалась оцінка параметрів тропосфери.

Для задавання апріорної моделі використовувалась опція *DRY_NIELL*, що задавала апріорну модель Саастамойнена, та функція нахилу *nmfh2.0* для приведення до зеніту. Для задавання функції нахилу для параметру зенітної тропосферної рефракції, що оцінювався, використовувалась опція *WET_NIELL*. Для оцінки горизонтального тропосферного градієнту задавалася опція *TILTING*.

Фіксування фазових невизначеностей виконувалось за допомогою *QIF* [25, 60–61]. Для зменшення впливу іоносфери використовувалась детермінована модель іоносфери, що заснована на розкладанні загального вмісту електронів в ряд за сферичними гармоніками в залежності від географічної широти та часового кута Сонця [25].

3.4.3. Добовий розв'язок. Далі виконувалась обробка спостережень з фіксованими фазовими невизначеностями з метою отримання нормальних рівнянь. Зенітна тропосферна рефракція була оцінена з використанням апріорної моделі та опцій нахилу. За допомогою програми «ADDNEQ» (PID 511) створювались файли нормальних рівнянь. На координати станцій *GLSV*, *POLV*, *MDVJ*, *BOR1* та *TRAB* накладалася умова «No-net translation».

На наступному кроці виконувалась програма «COOVEL» (PID 514), яка надавала значення референцних координат станцій референцної епохи на

координати станцій поточної сесії обробки відповідної епохи спостережень. Знову виконувалась програма «CRDMERGE» (PID 515), принцип виконання якої подібний до PID 213. Програма «COMPAR» (PID 517) вираховує середньоквадратичну похибку. Також виконується перевірка баз.

Параметри перетворення Гельмерта між системою координат, яка задавалася оціненими координатами референцних станцій, та системою координат, що задавалася координатами референцних станцій з каталогу IGS05, мають дорівнювати нулю в межах похибки. Перевірка виконувалась за допомогою програми «HELMR1» (PID 518). Якщо залишки після перетворення для будь-якої компоненти координат будь-якої референцної станції перевищували задані максимальні значення, то ця станція виключалась зі списку референцних станцій для цієї доби і виконувалось повторне зрівнювання з використанням нового набору референцних станцій (програма «ADDNEQ2» (PID 521)). Фінальне зрівнювання дозволило отримати оцінки координат для добових розв'язків та нормальні рівняння, які зберігались у форматі SINEX. Також зберігались значення оцінок параметрів тропосфери, отримані для кожної доби у форматі TROPEX.

3.3.4. Тижневий розв'язок. Після того, як було отримано розв'язки для всіх днів тижня, виконувалось зрівнювання добових файлів нормальних рівнянь за допомогою програми «ADDNEQ2» (PID 602). Встановлення системи координат і перевірка якості оцінки координат референцних станцій виконувалась так само, як і для добового розв'язку за допомогою програми «HELMR1W» (PID 603). Зберігався файл тижневих значень координат. Далі виконувалась програма «ADDNEQ2» (PID 610), результат зберігався у форматі SINEX.

3.3.5. Фінальна оцінка тропосферної рефракції. На останньому етапі виконувалась фінальна оцінка зенітної тропосферної рефракції окремо для кожної доби та GPS-станції за допомогою програми «NEQ2TRO» (PID 620). При цьому фіксувались координати всіх станцій, що були отримані на третьому

к році. Зберігався фінальний файл оцінки параметрів тропосфери у форматі TROPEX.

В програмному комплексі «Bernese GPS Software ver. 5.0» зенітна тропосферна рефракція визначається наступним чином [25]:

$$\begin{aligned} \Delta\rho_k^i(t, A, z) = \\ = \Delta\rho_{apr,k}(z_k^i) + \Delta^h\rho_k(t)f(z_k^i) + \Delta^n\rho_k(t)\frac{\delta f}{\delta z}\cos A_k^i + \Delta^e\rho_k(t)\frac{\delta f}{\delta z}\sin A_k^i, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де $\Delta\rho_{apr,k}(z_k^i)$ – апріорна зенітна тропосферна модель, що залежить від кута азимута між станцією k та супутником i , $\Delta^h\rho_k(t)$ – параметр тропосферної рефракції у зеніті, що залежить від часу, $f(z_k^i)$ – функція нахилу до параметру зенітної тропосферної рефракції, $\Delta^n\rho_k(t)$ та $\Delta^e\rho_k(t)$ – північний та східний параметри горизонтального тропосферного градієнту, що залежать від часу, A_k^i – азимутальна відстань між станцією k та супутником i .

У зв'язку з непередбачуваними та швидкоплинними змінами вологості складової, апріорна модель використовується лише для гідростатичної складової [65]. В якості такої моделі при виконанні репроцесингу використовується модель Саастамойнена.

Параметри моделі було уточнено шляхом введення двох поправкових членів, один з яких залежить від висоти пункту спостережень, а другий – від цієї висоти та зенітної відстані. При визначенні параметру зенітної тропосферної рефракції суха компонента за апріорною моделлю, що обчислюється, та волога, що оцінюється, використовуються разом з функцією нахилу. В загальному вигляді, тропосферна модель NIELL включає в себе функцію нахилу і має наступний вид:

$$\Delta\rho_k^i(z) \cong \Delta\rho_{apr,k}f_{apr}(z_k^i). \quad (3.2)$$

В якості функцій нахилу використовуються функції DRY_NIELL та WET_NIELL [64]. Функція нахилу для гідростатичної частини зенітної

тропосферної рефракції обчислюється в залежності від широти для зміщень, амплітуди та фази щорічного сигналу. Волога компонента залежить тільки від широти розміщення станції. Крім того функції нахилу NIELL рекомендовано використовувати для спостережень супутників з малим кутом місця нахилу.

Один із шляхів представлення змін тропосферної рефракції залежно від азимута (тропосферного градієнту), зображено на рис. 3.5.

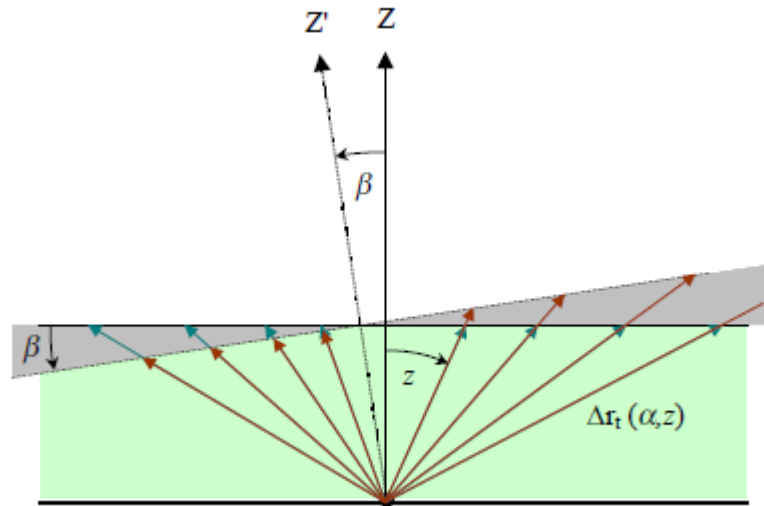


Рис. 3.5. Тропосферний градієнт

Як видно на рис. 3.5, геометрично, тропосферний градієнт Z' не співпадає з напрямком зенітної тропосферної рефракції Z (кут напрямку, при якому зенітна тропосферна рефракція має найменше значення). Якщо представити параметр тропосферного градієнту як функцію нахилу, рівняння (3.2) запишемо наступним чином:

$$\Delta \rho_k^i(t, z) = \Delta \rho_{apr, k}(Z_k^i) + \Delta \rho_k(t) f(Z_k^i). \quad (3.3)$$

Використовуючи геометричну відстань до зеніту як апіорну, запишемо рівняння (3.3) наступним чином:

$$\Delta \rho_k^i(t, z) = \Delta \rho_{apr, k}(Z_k^i) + \Delta \rho_k(t) f(Z_k^i). \quad (3.4)$$

Беручи до уваги те, що кут β між тропосферною та геометричною рефракціями однаковий, отримаємо:

$$Z_k^i = Z_k^i + \beta = Z_k^i + x_k \cos(A_k^i) + y_k \sin(A_k^i),$$

де A_k^i – азимутальна відстань між супутником i та станцією k , x_k та y_k – параметри станцій. Виконавши лінійну апроксимацію за залежністю від часу рівняння (3.4), отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_k^i(t, z) f(Z_k^i) &= \Delta \rho_k(t) f(Z_k^i + x_k \cos(A_k^i) + y_k \sin(A_k^i)) = \\ &= \Delta \rho_k(t) f(Z_k^i) + \Delta \rho_k(t) \frac{\delta f}{\delta z} x_k \cos A_k^i + \Delta \rho_k(t) \frac{\delta f}{\delta z} y_k \sin(A_k^i). \end{aligned}$$

де $\Delta^h \rho_k(t) = \Delta \rho_k(t)$ – параметр зенітної рефракції, $\Delta^n \rho_k(t) = \Delta \rho_k(t) x_k$ – тропосферний градієнт напрямку північ-південь, $\Delta^e \rho_k(t) = \Delta \rho_k(t) y_k$ – тропосферний градієнт напрямку схід-захід. Таким чином, ми отримали рівняння (3.1) для визначення тропосферної рефракції, яке використовується в ПК «Bernese GPS Software ver. 5.0».

3.4. Узгоджені координатні ряди та зенітна тропосферна рефракція на GPS-станціях

У результаті узгодженої обробки (репроцесингу) в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України автором отримано однорідні координатні ряди та значення зенітної тропосферної рефракції GPS-станцій для GPS-тижнів 1236–1399 (розв'язок *MA1*). Як приклад, в табл. 3.5 наведено значення отриманих координат для GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 в системі координат IGS05.

У Додатку А зображено зміни значень широти, довготи, висоти та зенітної тропосферної рефракції для 12 українських станцій.

Отримані файли для розв'язку *MA1* у форматах SINEX та TROPЕХ розміщено на ftp-сервері ГАО НАН України¹¹.

¹¹ ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/products/IGS05

Таблиця 3.5

Координати GPS-станцій для розв'язку MAI для
GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 (система координат: IGS05)

Станція	GPS-тиждень 1236	GPS-тиждень 1300	GPS-тиждень 1399
	$X_{MAI}, \text{м}$ $Y_{MAI}, \text{м}$ $Z_{MAI}, \text{м}$	$X_{MAI}, \text{м}$ $Y_{MAI}, \text{м}$ $Z_{MAI}, \text{м}$	$X_{MAI}, \text{м}$ $Y_{MAI}, \text{м}$ $Z_{MAI}, \text{м}$
GLSV	3512888, 9808 2068979, 8594 4888903, 1924	3512888, 9539 2068979, 8765 4888903, 2000	3512888, 9164 2068979, 9021 4888903, 2181
UZHL	3907587, 4794 1602428, 6716 4763783, 7456	3907587, 4541 1602428, 6920 4763783, 7555	3907587, 4231 1602428, 7224 4763783, 7753
KHAR	3312984, 3529 2428203, 4176 4863307, 8162	3312984, 3236 2428203, 4337 4863307, 8203	3312984, 2903 2428203, 4624 4863307, 8359
POLV	3411557, 3721 2348463, 9724 4834396, 8720	3411557, 3463 2348463, 9894 4834396, 8820	3411557, 3074 2348464, 0129 4834396, 9000
MIKL	3698554, 0136 2308675, 9845 4639769, 4799	3698553, 9862 2308676, 0020 4639769, 4891	3698553, 9493 2308676, 0304 4639769, 5066
SULP	3765297, 0177 1677559, 1841 4851297, 3975	3765296, 9918 1677559, 2019 4851297, 4049	3765296, 9567 1677559, 2308 4851297, 4224
CNIV	3397787, 8634 2066988, 2955 4966988, 7057	3397823, 0905 2066958, 4288 4969799, 0273	3397785, 1825 2066990, 5707 4969811, 5963
EVPA	3767253, 5152 2461876, 3287 4504591, 7831	3767253, 4853 2461876, 3445 4504591, 7927	3767253, 4523 2461876, 3777 4504591, 8160
CRAO	3783897, 1343 2551404, 3964 4441264, 2691	3783897, 1024 2551404, 4089 4441264, 2762	3783897, 0719 2551404, 4460 4441264, 2960
ALCI	3297848, 5410 2661606, 9378 4750829, 6469	3297847, 9325 2661607, 4063 4750829, 8144	3297847, 8933 2661607, 4363 4750829, 8351
SHAZ	3631978, 5224 1609613, 9814 4973372, 8492	3631977, 9976 1609614, 4858 4973373, 0683	3631977, 9598 1609614, 5120 4973373, 0815

Продовження табл. 3.5

DNMU	3468979,3793 2434667,2974 4750719,3508	3469015,8918 2434637,3252 4750708,0180	3468976,8727 2434669,3590 4750720,1331
MDVJ	2845456,1059 2160954,2295 5265993,2194	2845456,0885 2160954,2471 5265993,2341	2845456,0430 2160954,2681 5265993,2439
MOBN	2936432,0802 2178364,5343 5208854,2320	2936432,0550 2178364,5500 5208858,2416	2936432,0167 2178364,5752 5208858,2602
ZECK	3451174,7341 3060335,4205 4391955,6333	3451179,5683 3060332,3358 4391953,6852	3451174,6703 3060335,4675 4391955,6673
TRAB	3705250,4012 3084421,6806 4162044,7559	3705250,3697 3084421,6928 4162044,7680	3705250,3326 3084421,7262 4162044,7907
ISTA	4208830,3307 2334850,2773 4171267,2327	4208830,3047 2334850,3003 4171267,2457	4208830,2732 2334850,3360 4171267,2604
BUCU	4093760,8840 2007793,7802 4445129,9530	4093760,8633 2007793,8034 4445129,9682	4093760,8361 2007793,8385 4445129,9896
COST	4021615,9766 2197894,1165 4421013,7212	4021649,6059 2197861,4551 4420999,3152	4021613,6689 2197896,3639 4421014,7147
BACA	3917527,2157 1988521,8974 4608584,6433	3917560,4585 1988489,4277 4608570,4278	3917524,9356 1988524,1326 4608585,6250
BAIA	3945841,9387 1720426,0464 4691081,7075	3945873,8331 1720393,3824 4691066,9118	3945839,7481 1720428,2930 4691082,7247
DEVA	4097212,6274 1731868,1173 4556025,6976	4097244,1385 1731834,6852 4556010,1354	4097210,4635 1731870,4169 4556026,7684
GRAZ	4194423,8429 1162702,6637 4647245,3925	4194423,8211 1162702,6882 4647245,4075	4194423,7880 1162702,7251 4647245,4301
PENC	4052449,4923 1417681,0998 4701407,0886	4052449,4645 1417681,1220 4701407,0985	4052449,4329 1417681,1526 4701407,1178
BOR1	3738358,4777 1148173,6871 5021815,7594	3738358,4550 1148173,7078 5021815,7700	3738358,4220 1148173,7350 5021815,7862

Продовження табл. 3.5

LAMA	3524522,9452	3524522,9193	3524522,8860
	1329693,6063	1329693,6244	1329693,6520
	5129846,3315	5129846,3382	5129846,3548
VLNS	3343600,6425	3343600,6164	3343600,5805
	1580417,7197	1580417,7358	1580417,7616
	5179337,2819	5179337,2942	5179337,3025
KLPD	3359230,2935	3359262,1858	3359228,1007
	1297488,4272	1297458,2606	1297490,5008
	5246689,4601	5246676,3891	5246690,3582
RIGA	3183899,2205	3183899,1971	3183899,1629
	1421478,4724	1421478,4892	1421478,5140
	5322810,7901	5322810,7971	5322810,8151

Основні результати цього підпункту наведено в роботах [10, 13, 52].

3.5. Висновки

Даний розділ присвячено узгодженій обробці (репроцесингу), що була виконана в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України. Автором отримано однорідні координатні ряди та значення зенітної тропосферної рефракції (розв'язок *MAI*).

За допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0», було отримано розв'язок для 29 GPS-станцій, що розташовані на території Східної Європи, 12 з яких – на території України. Період обробки GPS-спостережень склав 163 GPS-тижні (14 вересня 2003 р. – 4 листопада 2006 р.).

Детально наведено алгоритм обробки. Процес отримання розв'язку для окремого GPS-тижня можна розділити на чотири головні етапи: попередня обробка добових сесій спостережень, отримання оцінок координат для окремої доби спостережень, отримання оцінок координат для окремого тижня та отримання фінальних значень зенітних тропосферних рефракцій для всіх GPS-станцій.

Процес обробки було автоматизовано завдяки модулю «Bernese Processing Engineer».

Розглянуто основні відмінності між регулярною обробкою GPS-

спостережень (розв'язок *МАО*), що було виконано в ГАО НАН України та репроцесингом.

Розділ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РЕПРОЦЕСИНГУ

4.1. Загальні зауваження щодо точності репроцесингу

Репроцесинг виконувався в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України на персональному комп'ютері з наступними характеристиками: процесор «Intel (R) Core (TM) 2 Duo CPU 2.33 ГГц», ОЗП 2048 Мб, жорсткий накопичувач 320 Гб під операційною системою «Ubuntu 10.04 LTS». Для розв'язку *MAI* використовувались спостереження 29 GPS-станцій. На рис. 4.1 зображено кількість GPS-станцій для кожного GPS-тижня, спостереження яких використовувались у репроцесингу.

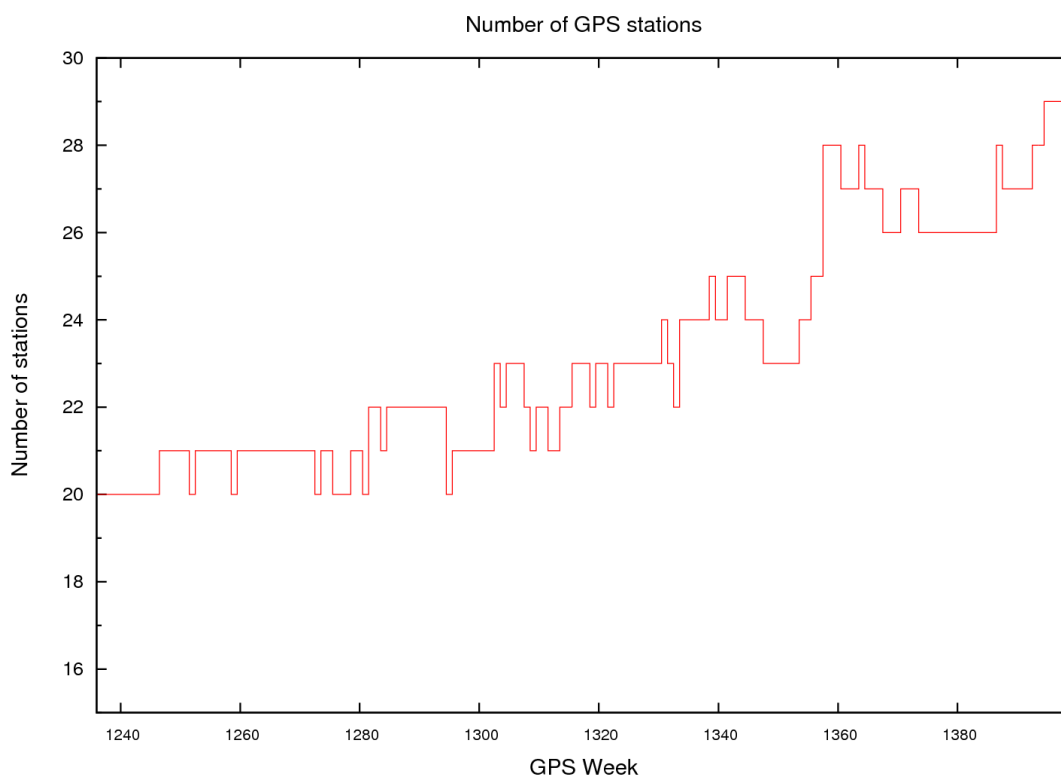


Рис. 4.1. Кількість GPS-станцій, які використовувались для розв'язку *MAI*

На рис. 4.2 наведено кількість спостережень та невідомих параметрів для кожного GPS-тижня. Загальні дані наведено нижче:

- кількість рівнянь для всіх GPS-тижнів – 74361165,
- кількість невідомих параметрів для всіх GPS-тижнів – 1071173,
- кількість степенів вільності для всіх GPS-тижнів – 73289992.

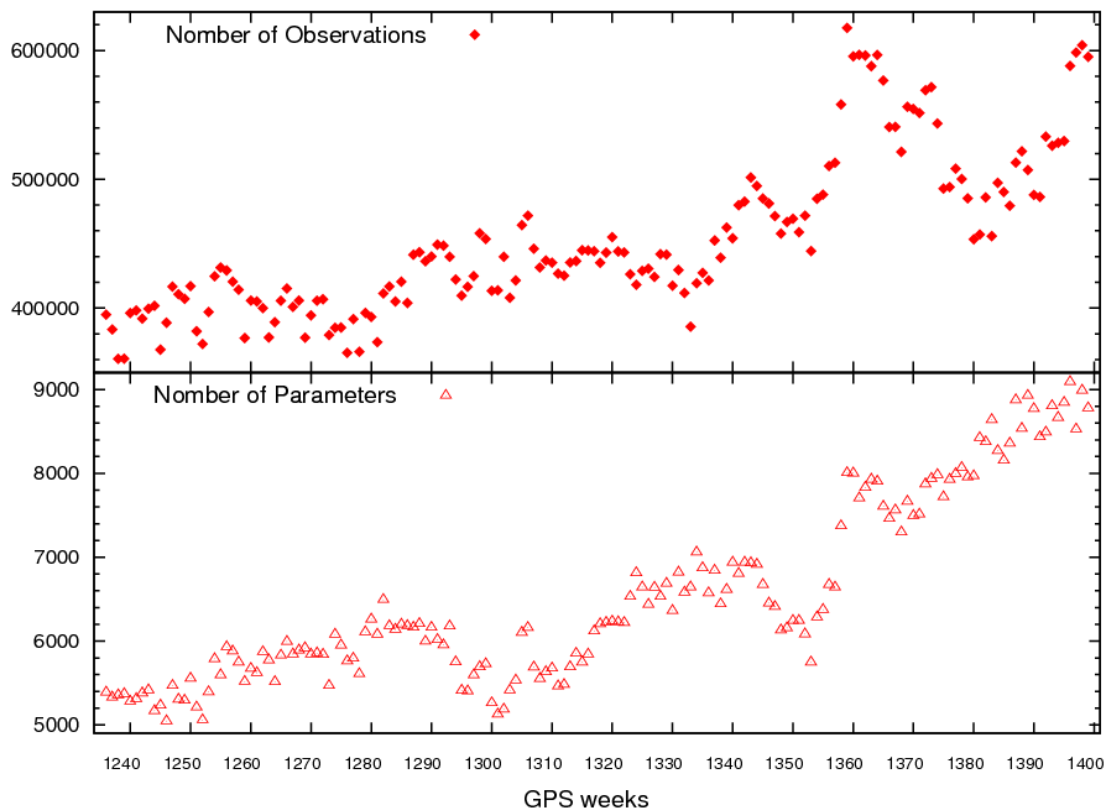


Рис. 4.2. Кількість спостережень та невідомих параметрів для розв'язку *MAI*

Середні значення повторюваності координат наступні:

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

На рис. 4.3 зображено відсоток фіксованих невизначеностей для розв'язку *MAI*.

Щоб оцінити якість отриманого розв'язку *MAI*, було проведено порівняння з комбінованими розв'язками міжнародних служб.

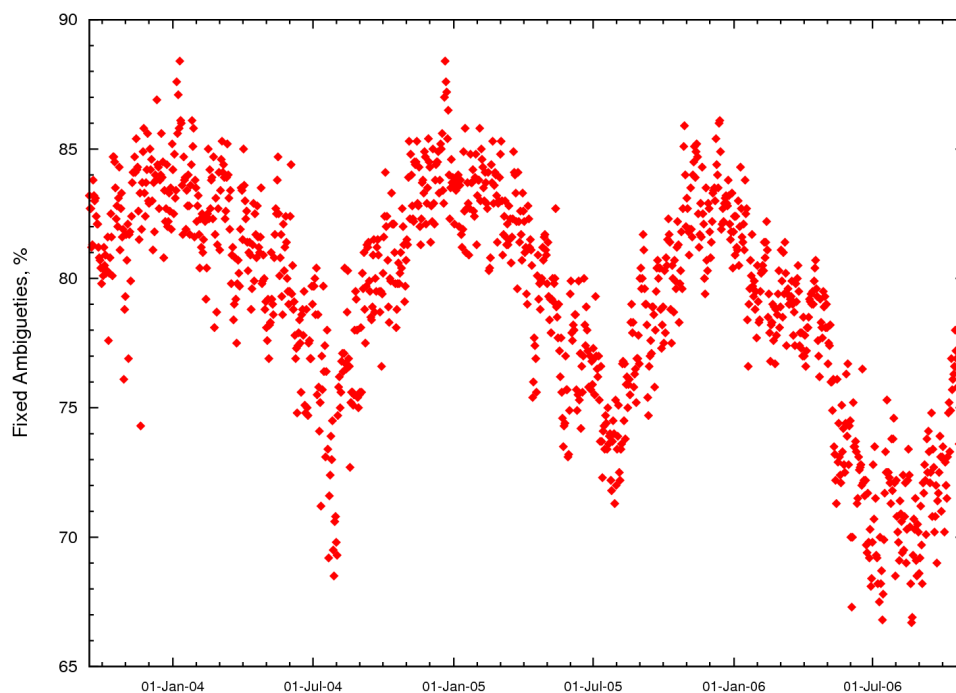


Рис. 4.3. Відсоток фіксованих невизначеностей для розв'язку *MA1*

4.2. Порівняння результатів репроцесингу з комбінованими розв'язками міжнародних служб

4.2.1. Порівняння результатів репроцесингу з комбінованим розв'язком Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі. В 2010 р. Робочою Групою Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі, регіональної мережі згущення на території Європи, було вирішено провести репроцесинг для GPS-станцій, що входять в мережу EPN. Обробка виконувалась у відповідності з новими рекомендаціями EPN та з урахуванням географічного положення (як приклад, використовувалась модель руху Євразійської літосферної плити).

EPN почала кампанію *EPN Repro1*, в межах якої було виконано обробку архівних GPS-спостережень [87–89]. Отриманий розв'язок було позначено як *EU0*. Результати кампанії репроцесингу *EPN Repro1* доступно на ftp-сервері EPN¹².

Наявність комбінованого розв'язку EPN дала можливість виконати оцінку якості отриманих результатів репроцесингу Центру аналізу ГНСС-даних.

Порівняння розв'язків *MA1* та *EU0* виконувалось шляхом визначення

¹² <ftp://igs.bkg.bund.de/EPNrepro1/products/>

параметрів перетворення Гельмерта та різниць zenітної тропосферної рефракції. На рис. 4.4 зображено географічне розташування GPS-станцій, спільних для розв'язків *MA1* та *EU0*.

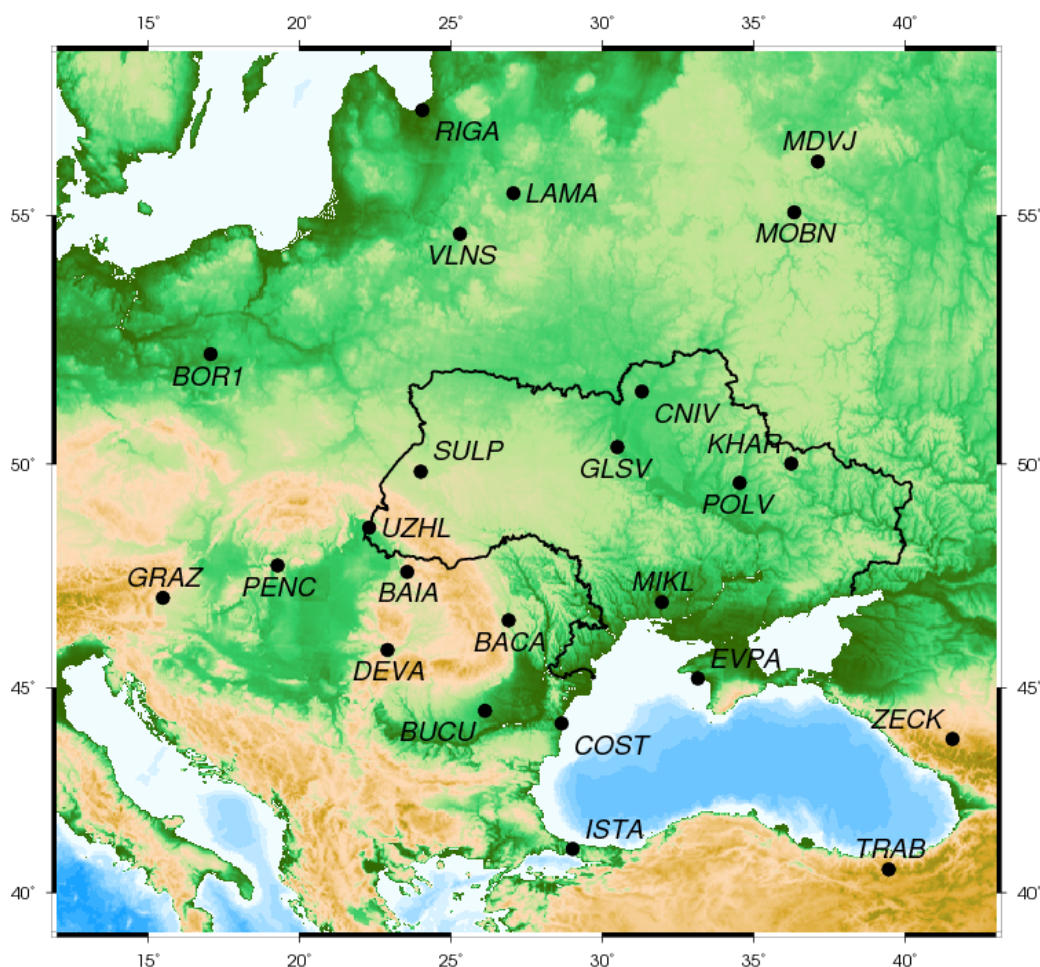


Рис. 4.4. Розташування спільних GPS-станцій, спостереження яких використовувались для отримання розв'язків *MA1* та *EU0*

Як приклад, в табл. 4.1. наведено координатні різниці між розв'язками *MA1* та *EU0* для GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 (система координат IGS05).

Таблиця 4.1

Різниці координат між розв'язками *MAI* та *EU0* для
GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 (система координат: IGS05)

Станція	GPS-тиждень	$X_{MAI} - X_{EU0}$, мм	$Y_{MAI} - Y_{EU0}$, мм	$Z_{MAI} - Z_{EU0}$, мм
GLSV	1236	0,0	-4,1	-1,0
	1300	1,8	-1,8	3,4
	1399	-1,4	-3,0	-2,5
UZHL	1236	2,0	-4,6	-0,5
	1300	1,7	-2,1	3,1
	1399	-0,7	-3,3	-1,4
KHAR	1236	-	-	-
	1300	2,2	-1,1	3,9
	1399	-1,9	-3,2	-3,3
POLV	1236	0,0	-4,1	-1,1
	1300	2,0	-1,8	3,6
	1399	-1,3	-3,0	-2,7
MIKL	1236	-	-	-
	1300	2,0	-2,0	3,4
	1399	-1,7	-3,2	-2,7
SULP	1236	1,0	-3,9	0,3
	1300	2,4	-2,0	3,5
	1399	-1,2	-0,2	-2,3
CNIV	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-1,3	-3,2	-2,5
EVPA	1236	-	-	-
	1300	2,3	-1,9	3,5
	1399	-1,7	-2,9	-2,8
MDVJ	1236	0,5	-4,6	-0,5
	1300	-	-	-
	1399	-0,4	-2,8	-0,2
ZECK	1236	-0,2	-4,7	-0,9
	1300	-	-	-
	1399	-2,6	-3,5	-3,8

Продовження табл. 4.1

TRAB	1236	-1,4	-4,2	-2,3
	1300	1,4	-2,1	2,9
	1399	-2,5	-2,9	-4,6
ISTA	1236	-0,9	-4,5	-2,8
	1300	-0,1	-3,2	1,2
	1399	-0,9	-2,4	-2,1
BUCU	1236	-	-	-
	1300	1,5	-2,1	2,6
	1399	0,5	-1,3	-1,3
COST	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-1,0	-2,5	-2,5
BACA	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-0,7	-2,6	-1,3
BAIA	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	0,1	-3,2	-1,9
DEVA	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-0,8	-3,2	-2,5
GRAZ	1236	-	-	-
	1300	-0,2	-2,8	0,7
	1399	-0,1	-2,8	-1,2
PENC	1236	-2,0	-4,7	-2,0
	1300	-1,3	-3,2	-0,4
	1399	-1,0	-2,7	-1,6
BOR1	1236	1,6	-3,5	0,8
	1300	1,7	-2,3	2,4
	1399	0,7	-2,1	0,7
LAMA	1236	2,0	3,6	2,4
	1300	1,2	-2,7	2,6
	1399	0,0	-2,5	-0,2

Продовження табл. 4.1

VLNS	1236	0,8	-0,8	-0,3
	1300	0,7	-2,5	1,3
	1399	-0,6	-2,7	-1,6
RIGA	1236	1,4	-3,3	0,8
	1300	1,2	2,1	2,5
	1399	0,0	-2,6	-1,3

Максимальні абсолютні значення отриманих різниць координат наступні.

Для GPS-тижня 1236:

для координати X : 2,0 мм (для станції UZHL, PENC, LAMA),

для координати Y : 4,7 мм (для станції ZECK, PENC),

для координати Z : 2,8 мм (для станції ISTA).

Для GPS-тижня 1300:

для координати X : 2,4 мм (для станції SULP),

для координати Y : 3,2 мм (для станції ISTA, PENC),

для координати Z : 3,9 мм (для станції KHAR).

Для GPS-тижня 1399:

для координати X : 2,6 мм (для станції ZECK),

для координати Y : 3,5 мм (для станції ZECK),

для координати Z : 4,6 мм (для станції TRAB).

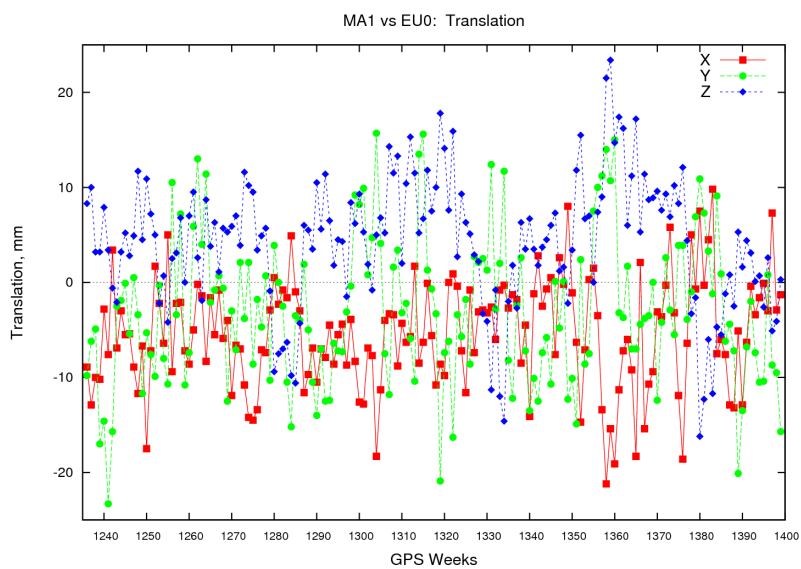
Значення параметрів перетворення Гельмерта між розв'язками *MAI* та *EU0* представлено на рис. 4.5. Отримано такі мінімальні та максимальні значення.

Зсув:

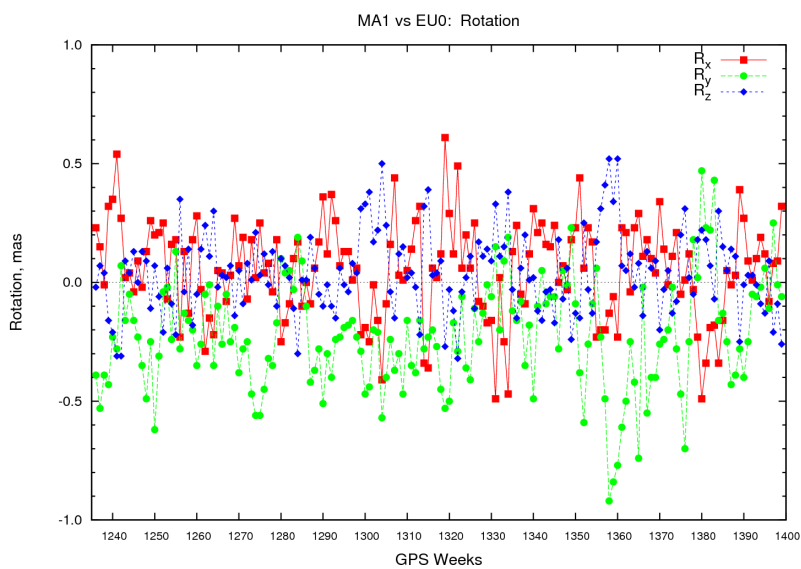
за віссю X : від -21,2 мм до 9,8 мм,

за віссю Y : від -23,3 мм до 15,7 мм,

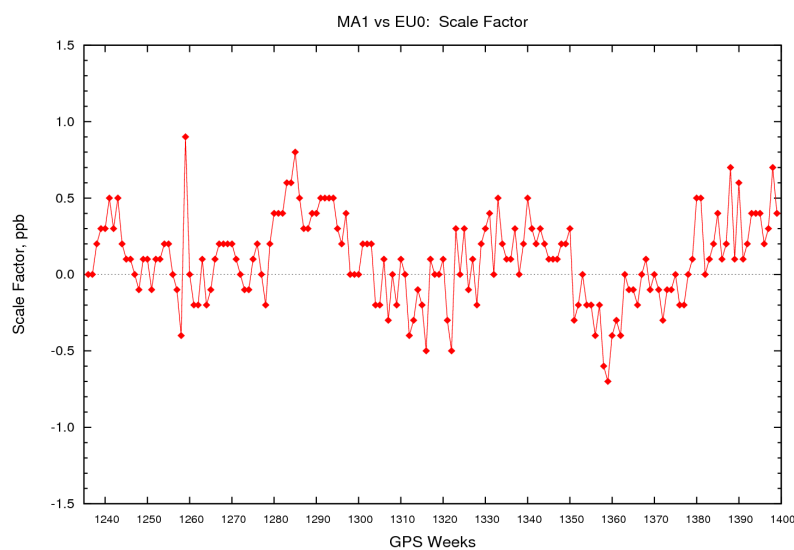
за віссю Z : від -16,2 мм до 23,4 мм.



а)



б)



в)

Рис. 4.5. Параметри перетворення Гельмерта між розв'язками *MA1* та *EU0* (а – зсув, б – обертання, в – масштабний множник)

Обертання:

навколо вісі X : від $-0,49$ мс дуги до $0,61$ мс дуги,

навколо вісі Y : від $-0,92$ мс дуги до $0,47$ мс дуги,

навколо вісі Z : від $-0,32$ мс дуги до $0,52$ мс дуги.

Масштабний множник:

від $-0,7 \cdot 10^{-9}$ до $0,9 \cdot 10^{-9}$

На рис. 4.6 зображено середні значення залишків координат на постійнодіючих станціях після перетворень Гельмерта між розв'язками $MA1$ та $EU0$ для північної, східної та висотної компонент.

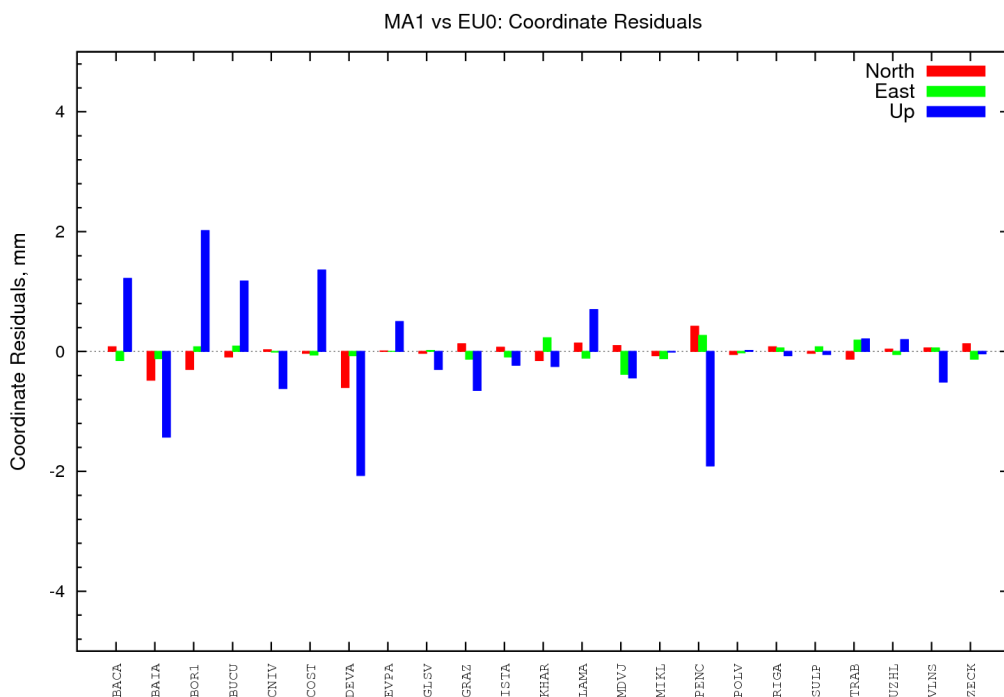


Рис. 4.6. Середні значення залишків координат після перетворення Гельмерта між розв'язками $MA1$ та $EU0$

Найменші та найбільші залишки за модулем склали наступні значення:

- від $0,03$ мм (для станцій CNIV, COST, GLSV, SULP) до $0,60$ мм (для станції DEVA) для північної компоненти,
- від $0,01$ мм (для станції CNIV) до $0,38$ мм (для станції MDVJ) для східної компоненти,
- від $0,01$ мм (для станції MIKL) до $2,07$ мм (для станції DEVA) для

висотної компоненти.

Отримані ненульові значення залишків координат після перетворення Гельмерта пояснюються різними способами реалізації системи координат (геометріями мережі та різним набіром референцних станцій).

На рис. 4.7 наведено середні значення різниць тропосферної рефракції між розв'язками *MA1* та *EU0*.

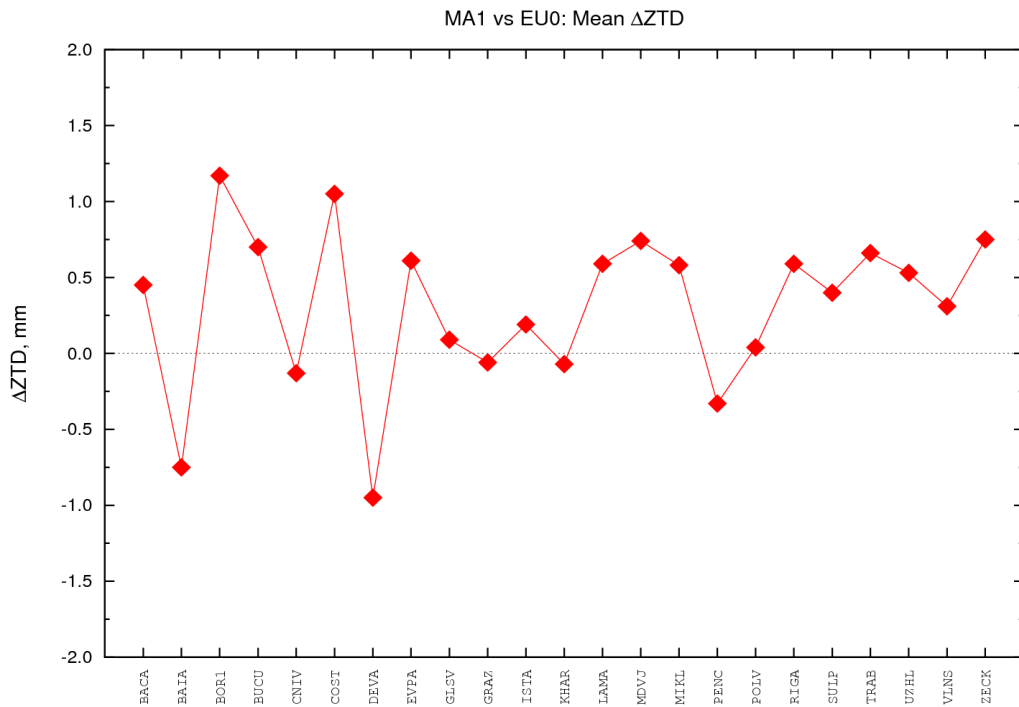
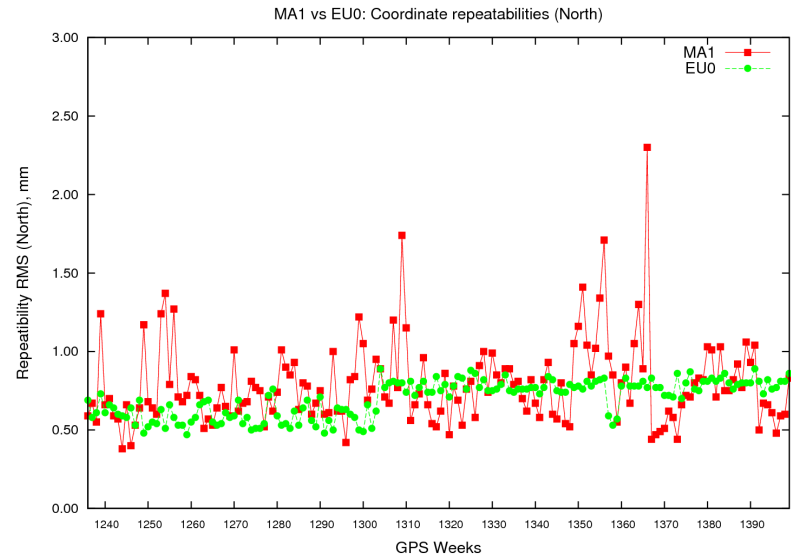


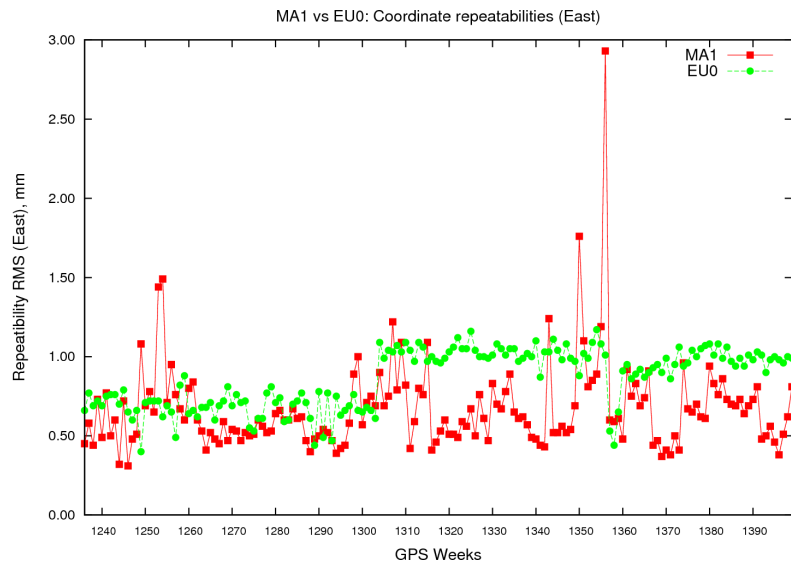
Рис. 4.7. Середні значення різниць тропосферної рефракції між розв'язками *MA1* та *EU0*

Значення різниць тропосферної рефракції знаходяться в межах від $-0,95$ мм (для станції DEVA) до $1,17$ мм (для станції BOR1). Отримані значення різниць зенітної тропосферної рефракції знаходяться в межах похибок.

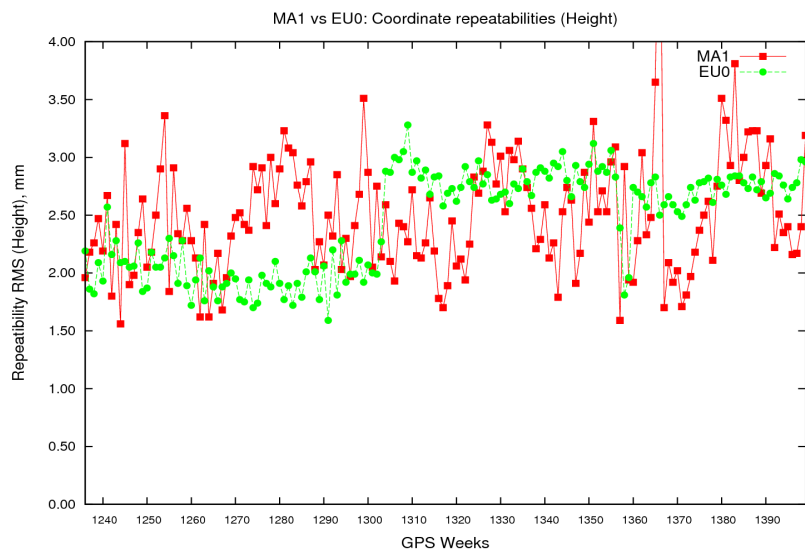
Однією з характеристик якості отриманого розв'язку в результаті репроцесингу є повторюваність координат станцій. На рис. 4.8 зображено середні значення повторюваності координат для GPS-станцій для північної, східної за висотної компонент для розв'язків *MA1* та *EU0*.



а)



б)



в)

Рис. 4.8. Повторюваність координат станцій для розв'язків *MA1* та *EU0* (а – північна, б – східна, в – висотна компоненти)

Як видно з графіків, повторюваність координат для обох розв'язків

знаходиться майже на одному рівні. Спираючись на вищезазначене можна констатувати, що за якістю отриманих в результаті репроцесингу розв'язок *MAI* відповідає комбінованому розв'язку EPN. Основні результати цього підpunkту викладено в роботах [7, 9]

4.2.2. Порівняння результатів репроцесингу з комбінованим розв'язком Міжнародної ГНСС-служби. У 2010 р. Міжнародною ГНСС-службою було розпочато кампанію репроцесингу *IGS Repr01*. Репроцесинг виконувався згідно рекомендацій IGS, що вступили в дію з GPS-тижня 1400 [44]. В результаті виконаної кампанії було отримано покращені координатні ряди та параметри тропосфери [82, 84–85]. Покращення вдалося досягнути завдяки новій моделі океанічних навантажень на постійнодіючі GPS-станції, використанню абсолютних моделей фазових комбінацій антена–купол тощо [83]. Також використовувались покращені ефемериди GPS-супутників та параметри обертання Землі, що були отримані в результаті кампанії репроцесингу, пов'язаного з покращенням орбіт GPS-супутників [42, 81, 86]. SINEX-файли розв'язку *IGS Repr01* розміщено на ftp-сервері IGS¹³ (розв'язок позначено як *IGB*).

Наявність комбінованого розв'язку *IGB* дало можливість виконати ще одну оцінку якості отриманих результатів репроцесингу Центру аналізу ГНСС-даних для станцій, що наявні в розв'язках *MAI* та *IGB*, рис. 4.9.

Як приклад, в табл. 4.2 наведено різниці координат для спільних GPS-станцій *MAI* та *IGB* для GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 (система координат IGS05).

¹³ <ftp://igs-rf.ensg.eu/pub/igb/>

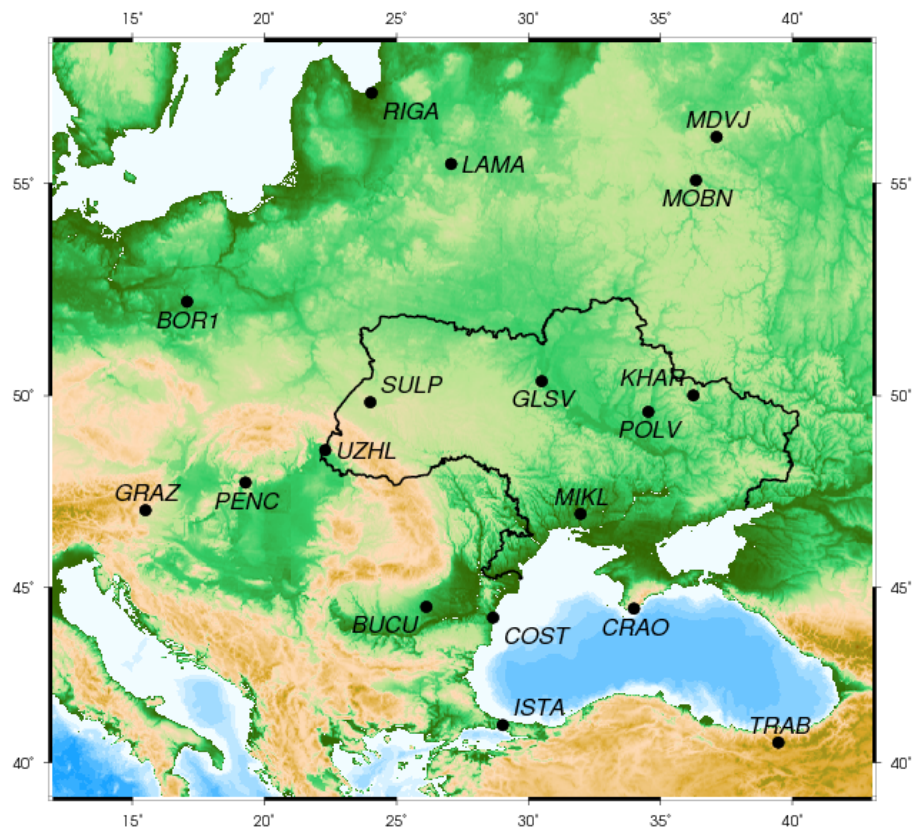


Рис. 4.9. Розташування спільних GPS-станцій, спостереження яких використовувались для отримання розв'язків *MAI* та *IGB*

Таблиця 4.2

Різниці координат між розв'язками *MAI* та *IGB* для
GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 (система координат IGS05)

Станція	GPS-тиждень	$X_{MAI} - X_{EU0}$, мм	$Y_{MAI} - Y_{EU0}$, мм	$Z_{MAI} - Z_{EU0}$, мм
GLSV	1236	1, 2	-3, 6	4, 6
	1300	3, 9	1, 5	1, 0
	1399	0, 3	0, 5	-2, 5
UZHL	1236	-1, 6	-4, 4	6, 4
	1300	5, 1	0, 0	0, 5
	1399	3, 2	-0, 7	-3, 9
KHAR	1236	-	-	-
	1300	3, 6	1, 7	0, 7
	1399	2, 0	1, 7	-8, 2
POLV	1236	-1, 9	-3, 6	6, 0
	1300	4, 3	2, 4	0, 0
	1399	0, 6	0, 8	-5, 4

Продовження табл. 4.2

MIKL	1236	0,6	-2,5	6,1
	1300	6,2	2,0	-0,1
	1399	3,9	1,7	-3,6
SULP	1236	-0,3	-2,9	2,5
	1300	5,8	0,9	-0,9
	1399	3,4	1,6	-1,7
CRAO	1236	-0,1	-1,3	-6,5
	1300	7,9	4,0	0,5
	1399	3,6	3,1	-4,4
MDVJ	1236	0,5	-4,6	-0,5
	1300	4,5	2,1	-4,1
	1399	-0,4	-2,8	-0,2
ZECK	1236	1,1	0,5	3,7
	1300	-	-	-
	1399	3,7	6,0	-3,6
TRAB	1236	-0,8	-0,4	9,1
	1300	3,7	2,8	3,0
	1399	2,0	0,5	-6,1
ISTA	1236	0,7	-2,7	8,3
	1300	5,7	1,3	2,3
	1399	3,4	1,4	-6,5
BUCU	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	4,6	3,2	-3,7
GRAZ	1236	-1,1	-5,3	6,5
	1300	5,1	-0,8	0,5
	1399	5,1	-0,6	-1,8
PENC	1236	-0,7	-5,2	5,4
	1300	3,5	0,0	2,5
	1399	2,9	-0,4	-4,2
BOR1	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	3,7	-0,6	-1,5

Продовження табл. 4.2

LAMA	1236	2,0	-4,7	2,5
	1300	5,3	-0,6	-1,2
	1399	2,3	-0,8	-2,1
RIGA	1236	-1,5	-4,6	2,9
	1300	4,1	0,2	-2,1
	1399	2,1	-1,1	-2,2

Максимальні абсолютні значення отриманих різниць координат наступні.

Для GPS-тижня 1236:

для координати X : 2,0 мм (для станції LAMA),

для координати Y : 5,2 мм (для станції PENC),

для координати Z : 9,1 мм (для станції TRAB).

Для GPS-тижня 1300:

для координати X : 7,9 мм (для станції CRAO),

для координати Y : 4,0 мм (для станції CRAO),

для координати Z : 4,1 мм (для станції MDVJ).

Для GPS-тижня 1399:

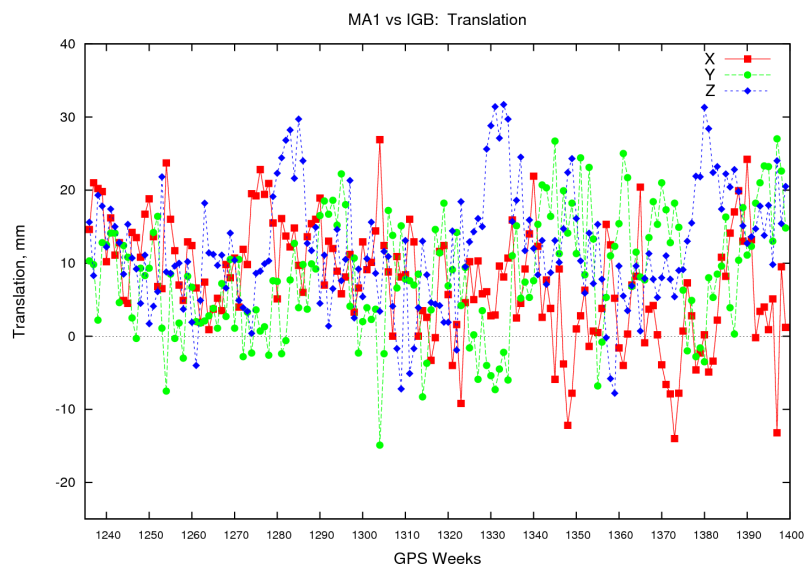
для координати X : 5,1 мм (для станції GRAZ),

для координати Y : 6,0 мм (для станції ZECK),

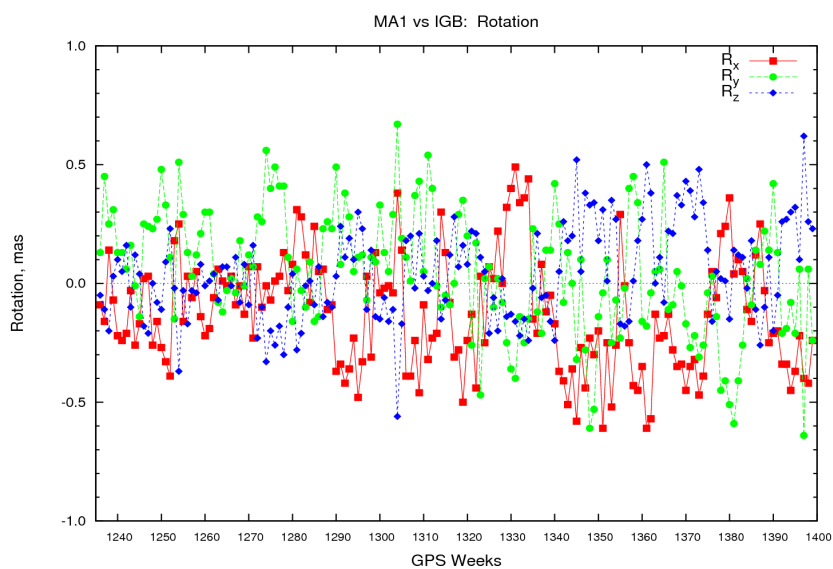
для координати Z : 8,2 мм (для станції KHAR).

Порівняння розв'язків *MAI* та *IGB* виконувалось шляхом визначення параметрів перетворення Гельмерта.

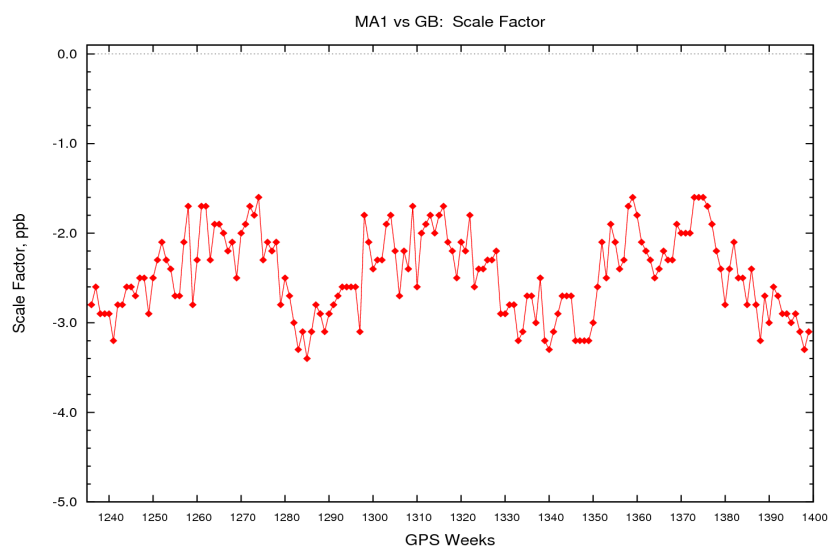
Значення параметрів перетворення Гельмерта між розв'язками *MAI* та *IGB* представлено на рис. 4.10. Відповідні мінімальні та максимальні значення наведено нижче.



a)



б)



в)

Рис. 4.10. Параметри перетворення Гельмерта між розв'язками *MA1* та *IGB* (а – зсув, б – обертання, в – масштабний множник)

Зсув:

за віссю X : від $-14,0$ мм до $24,2$ мм,

за віссю Y : від $-8,3$ мм до $26,7$ мм,

за віссю Z : від $-5,1$ мм до $29,7$ мм.

Обертання:

навколо вісі X : від $-0,61$ мс дуги до $0,49$ мс дуги,

навколо вісі Y : від $-0,61$ мс дуги до $0,47$ мс дуги,

навколо вісі Z : від $-0,33$ мс дуги до $0,50$ мс дуги.

Масштабний множник:

від $-3,3 \cdot 10^{-9}$ до $-1,7 \cdot 10^{-9}$.

На рис. 4.11 зображено середні значення залишків координат на постійнодіючих станціях після перетворень Гельмерта між розв'язками $MA1$ та IGB для північної, східної та висотної компонент.

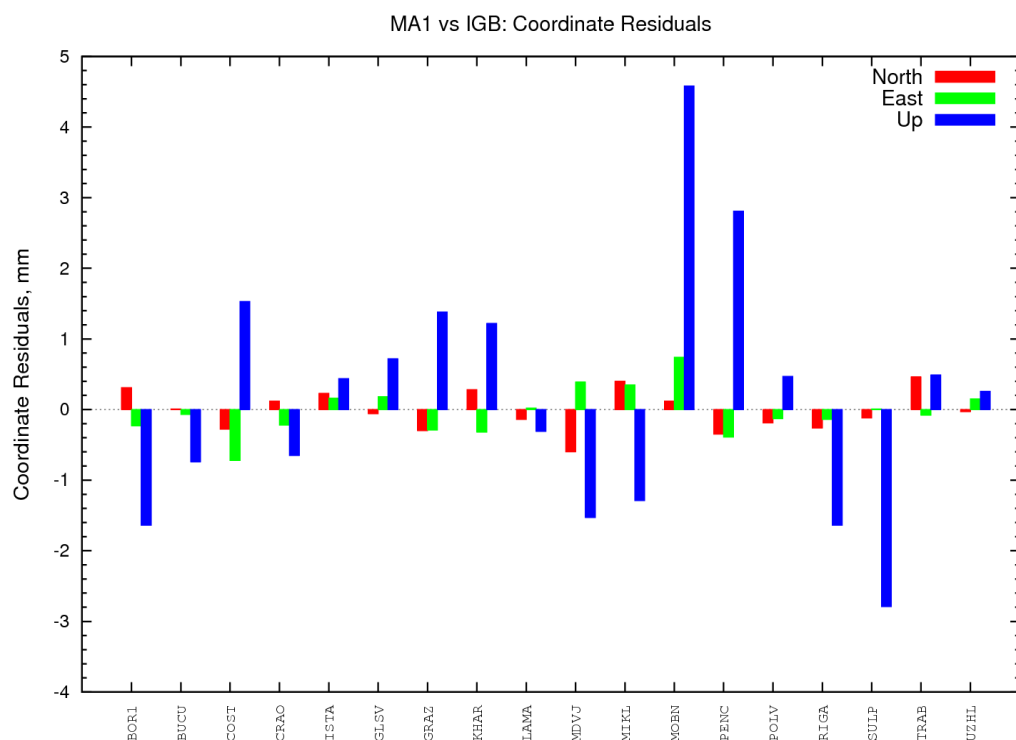


Рис. 4.11. Середні значення залишків координат після перетворень Гельмерта між розв'язками $MA1$ та IGB

Отримано такі найбільші та найменші середні залишки для розв'язків $MA1$ та IGB за модулем.

– від $0,01$ мм (для станції BUCU) до $0,60$ мм (для станції MDVJ) для

- північної компоненти,
- від 0,01 мм (для станції SULP) до 0,72 мм (для станції COST) для східної компоненти,
 - від 0,26 мм (для станції MIKL) до 4,58 мм (для станції MOBN) для висотної компоненти.

Основні причини несуттєвих різниць залишків між розв'язками *MAI* та *IGB* ті самі, що наведено в підпункті 4.2.1 для розв'язків *MAI* та *EU0* – різні геометрії мереж та різні способи реалізації систем координат.

Основні результати цього підпункту викладено в роботі [7]

4.2.3. Розрахунок «зовнішніх» похибок та коефіцієнтів кореляції.

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 базуються на одному і тому ж спостережувальному матеріалі, то між ними повинна існувати велика взаємна кореляція.

Для розрахунку «зовнішніх» похибок та коефіцієнтів кореляції було використано метод, який було розроблено в ГАО НАН України [1, 19]. 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 :

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

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:

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

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

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 $\Delta \hat{x}_i^{k0}$.

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:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{4} (s_{12} + s_{13} - s_{23} + d_{12} + d_{13} - d_{23}),$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{4} (s_{12} + s_{23} - s_{13} + d_{12} + d_{23} - d_{13}),$$

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{4} (s_{23} + s_{13} - s_{12} + d_{23} + d_{13} - d_{12}).$$

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

$$\rho_{12} = \frac{s_{12} - d_{12}}{4\sigma_1\sigma_2},$$

$$\rho_{13} = \frac{s_{13} - d_{13}}{4\sigma_1\sigma_3},$$

$$\rho_{23} = \frac{s_{23} - d_{23}}{4\sigma_2\sigma_3}.$$

Середні значення «зовнішніх» оцінок середньоквадратичних похибок та коефіцієнтів кореляцій розв'язків *MAI*, *EU0* та *IGB* наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

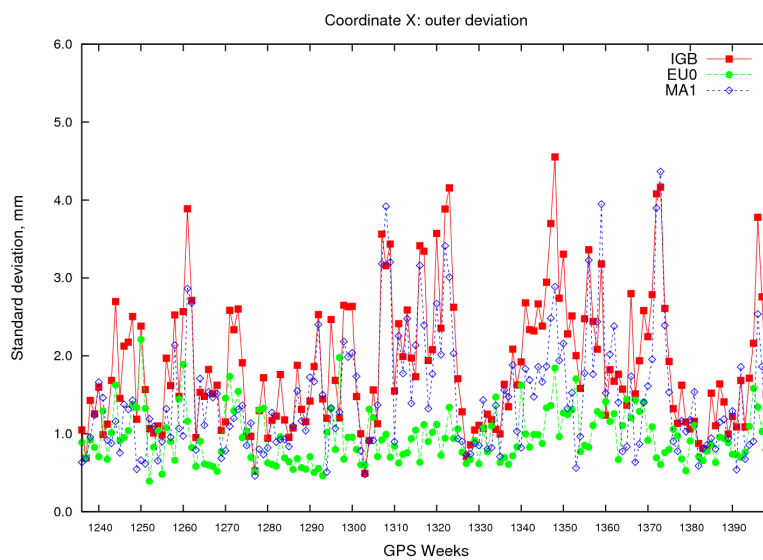
«Зовнішні» оцінки точності розв'язків:
середні значення середньоквадратичних похибок та коефіцієнтів кореляцій

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

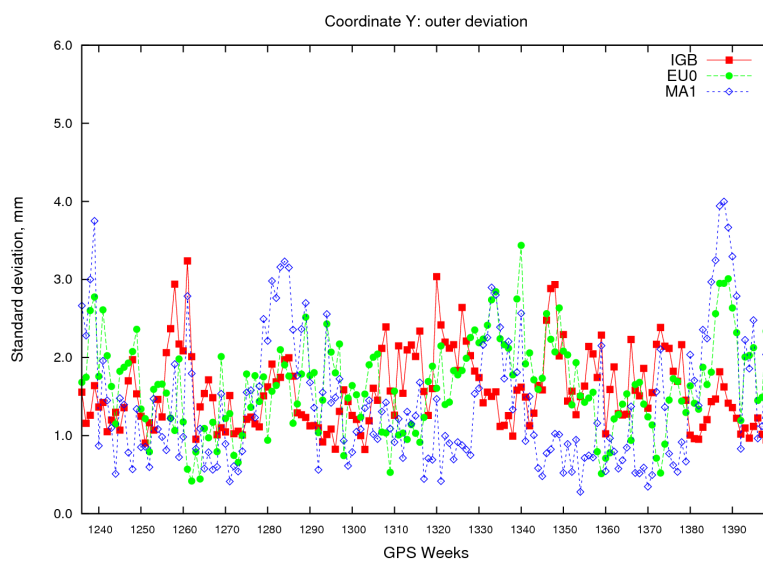
На рис. 4.12 зображено «зовнішні» середньоквадратичні похибки для координат *X*, *Y* та *Z* для розв'язків *MAI*, *EU0* та *IGB* для кожного GPS-тижня.

Виходячи з наведеного в табл. 4.3 та на рис. 4.12, можна вважати, що розв'язок *MAI* відповідає за якістю комбінованим розв'язків *EU0* та *IGB*.

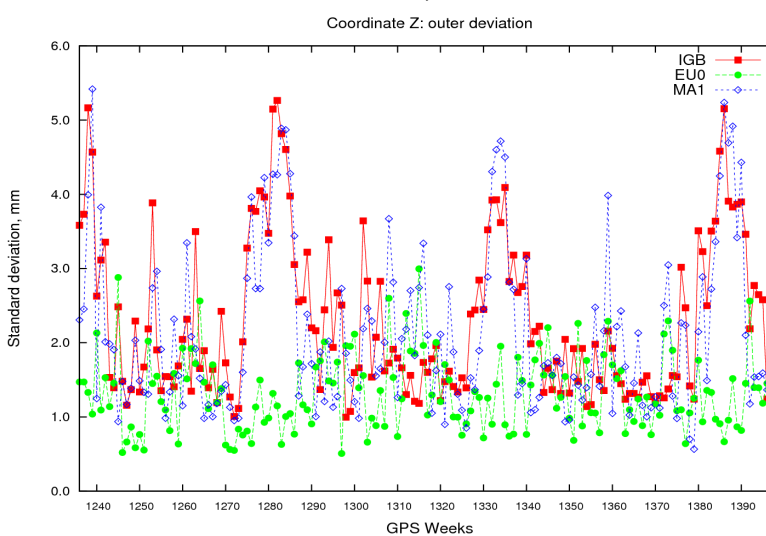
Основні результати цього підпункту викладено в роботі [7]



а)



б)



в)

Рис. 4.12. Значення «зовнішніх» середньоквадратичних похибок розв'язків *MA1*, *EU0* та *IGB* (а – для координати *X*, б – для координати *Y*, в – для координати *Z*)

4.3. Порівняння результатів репроцесингу з регулярною обробкою Центру аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України

4.3.1. Порівняння оцінок координат та значень зенітної тропосферної рефракції GPS-станцій. У Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України було виконано регулярну обробку спостережень супутників для GPS-тижнів 1236–1399 на 29 GPS-станціях. Обробку було здійснено за допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 4.2» [24] відповідно до вимог Центрального бюро EPN, що діяли до GPS-тижня 1400 (до 4 листопада 2006 р.). У результаті виконаної обробки було отримано координати GPS-станцій у системі відліку IGS00b (друга IGS-реалізація системи координат ITRF2000) та значення зенітної тропосферної рефракції для кожної станції мережі [15, 17–18]. Позначимо цей розв’язок як *MAO*. Оскільки для розв’язку *MAO* координати були оцінені в системі відліку IGS00b, а для розв’язку *MA1* – в системі відліку IGS05, то для виконання порівняння отриманих координат було необхідно перетворити координати розв’язку *MAO* з системи координат IGS00b до IGS05. Перетворення було здійснено за допомогою сервісу, що надається на сайті Центрального бюро EPN¹⁴.

Як приклад, в табл. 4.4 наведено різниці координат між розв’язками *MA1* та *MAO* для GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 (система координат IGS05).

¹⁴ http://www.epncb.oma.be/_productsservicees/coord_trans

Таблиця 4.4

Різниці координат між розв'язками *MAI* и *MAO* для
GPS-тижнів 1236, 1300 та 1399 (система координат: IGS05)

Станція	GPS-тиждень	$X_{MAI} - X_{MAO}$, мм	$Y_{MAI} - Y_{MAO}$, мм	$Z_{MAI} - Z_{MAO}$, мм
GLSV	1236	-5, 1	-1, 2	-3, 5
	1300	-8, 3	-1, 6	-5, 3
	1399	-9, 0	-3, 6	-2, 2
UZHL	1236	0, 4	0, 1	1, 2
	1300	-3, 6	0, 1	-0, 4
	1399	-2, 3	-1, 6	5, 6
KHAR	1236	-4, 8	1, 0	-3, 6
	1300	-6, 0	1, 8	1, 0
	1399	-5, 8	-0, 1	2, 9
POLV	1236	-3, 6	1, 2	-1, 6
	1300	-5, 1	1, 5	0, 0
	1399	-4, 4	0, 3	4, 6
MIKL	1236	-	-	-
	1300	-6, 8	-2, 6	-1, 5
	1399	-5, 7	-3, 0	4, 3
SULP	1236	-4, 3	-4, 0	-1, 1
	1300	-6, 4	-3, 3	-1, 5
	1399	-7, 6	-5, 6	1, 0
CNIV	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-5, 7	-1, 5	3, 7
EVPA	1236	-3, 6	1, 2	-2, 7
	1300	-4, 6	1, 4	-1, 8
	1399	-2, 2	1, 7	6, 1
ALCI	1236	-	-	-
	1300	-6, 7	-2, 3	-0, 8
	1399	-3, 9	-1, 6	6, 8
SHAZ	1236	-	-	-
	1300	-5, 4	-2, 4	-0, 4
	1399	-4, 6	-4, 0	3, 4

Продовження табл. 4.4

DNMU	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-11,0	-6,1	-6,4
CRAO	1236	-4,1	-1,1	-5,3
	1300	-2,1	3,0	-1,8
	1399	-2,0	-1,8	4,2
MDVJ	1236	15,5	-19,5	10,8
	1300	0,9	1,3	16,1
	1399	2,3	0,6	21,7
MOBN	1236	4,0	1,5	9,2
	1300	2,4	2,4	11,2
	1399	3,9	2,0	15,1
ZECK	1236	-3,8	-1,0	-7,3
	1300	-	-	-
	1399	6,0	6,9	15,7
TRAB	1236	2,8	9,4	3,9
	1300	4,6	8,2	6,9
	1399	7,5	8,3	15,5
ISTA	1236	8,3	4,3	4,5
	1300	5,9	3,9	5,9
	1399	9,6	4,0	16,5
BUCU	1236	7,4	1,7	6,3
	1300	3,5	1,7	4,6
	1399	6,4	1,9	12,1
COST	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-0,5	-0,5	3,8
BACA	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	0,7	-4,1	3,0
BAIA	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	3,3	-4,4	4,4

Продовження табл. 4.4

DEVA	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	3,8	-3,8	4,9
GRAZ	1236	5,4	-2,0	2,7
	1300	1,1	-1,8	1,2
	1399	2,7	-0,9	8,6
PENC	1236	-1,0	-2,2	3,1
	1300	-5,4	-3,0	-0,3
	1399	-4,9	-4,6	4,4
BOR1	1236	4,0	3,4	3,6
	1300	-0,2	-2,8	0,1
	1399	0,1	-4,4	4,7
LAMA	1236	4,6	-1,6	4,6
	1300	-0,9	-2,5	0,6
	1399	-0,7	-4,5	4,1
KLPD	1236	-	-	-
	1300	-	-	-
	1399	-2,1	-4,3	4,6
VLNS	1236	0,2	-2,3	0,7
	1300	-3,9	-3,0	-1,9
	1399	-3,5	-4,5	1,6
RIGA	1236	0,1	-2,2	1,2
	1300	-4,4	-3,0	-1,7
	1399	-2,8	-4,9	4,3

Максимальні абсолютні значення отриманих різниць координат наступні.

Для GPS-тижня 1236:

для координати X : 15,5 мм (для станції MDVJ),

для координати Y : 19,5 мм (для станції MDVJ),

для координати Z : 10,8 мм (для станції MDVJ).

Для GPS-тижня 1300:

для координати X : 8,3 мм (для станції GLSV),
 для координати Y : 8,2 мм (для станції TRAB),
 для координати Z : 16,1 мм (для станції MDVJ).

Для GPS-тижня 1399:

для координати X : 11,0 мм (для станції DNMU),
 для координати Y : 6,1 мм (для станції DNMU),
 для координати Z : 21,7 мм (для станції MDVJ).

Порівняння розв'язків *MAI* та *MAO* виконувалось шляхом визначення параметрів перетворення Гельмерта та різниці зенітної тропосферної рефракції. Значення параметрів перетворення Гельмерта між розв'язками *MAI* та *MAO* представлено на рис. 4.13. Відповідні мінімальні та максимальні значення наведено нижче.

Зсув:

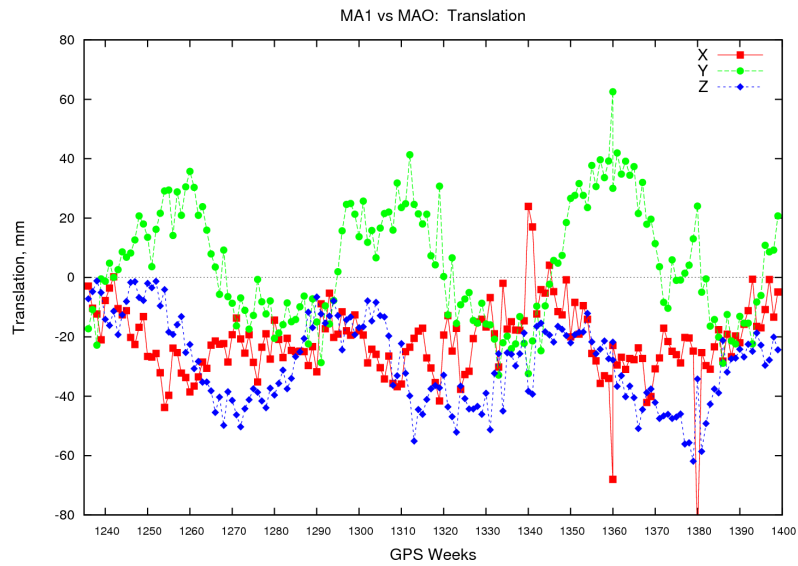
за віссю X : від $-89,8$ мм до $23,9$ мм,
 за віссю Y : від $-32,4$ мм до $62,5$ мм,
 за віссю Z : від $-61,9$ мм до $-1,2$ мм.

Обертання:

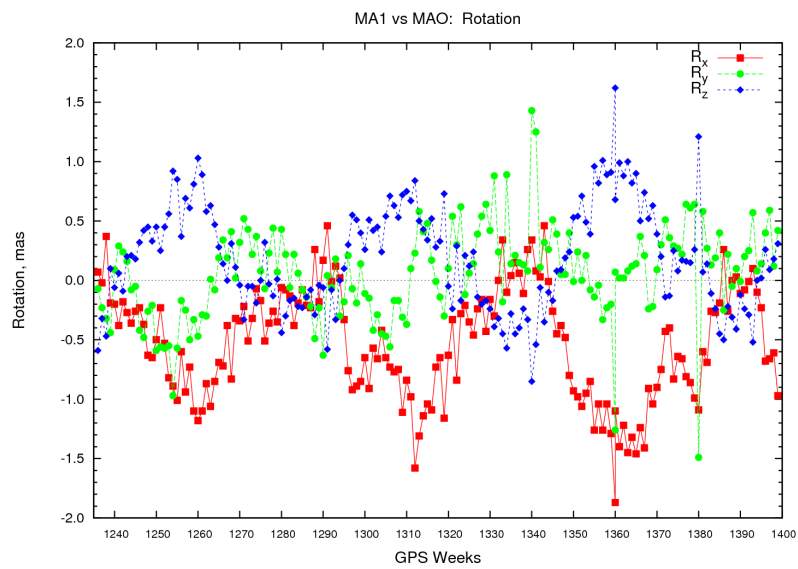
навколо вісі X : від $-1,87$ мс дуги до $0,46$ мс дуги,
 навколо вісі Y : від $-1,49$ мс дуги до $1,43$ мс дуги,
 навколо вісі Z : від $-0,89$ мс дуги до $1,62$ мс дуги.

Масштабний множник:

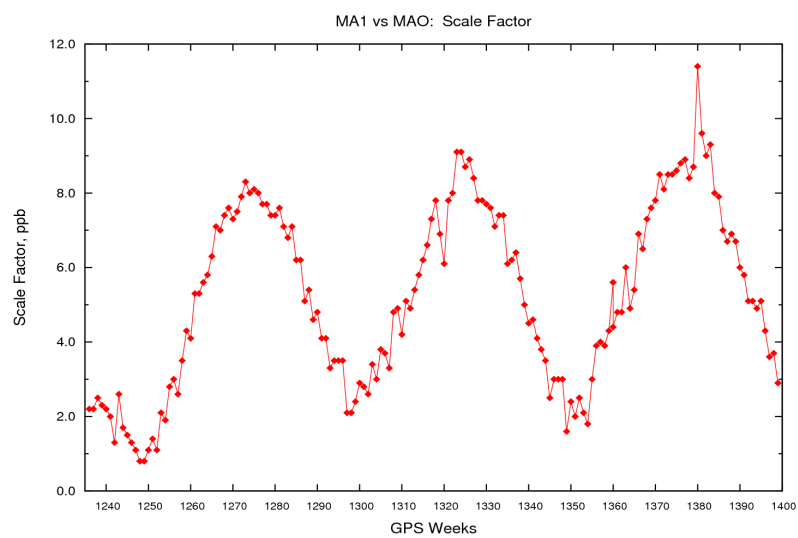
від $0,8 \cdot 10^{-9}$ до $11,4 \cdot 10^{-9}$.



а)



б)



в)

Рис. 4.13. Параметри перетворення Гельмерта між розв'язками *MA1* та *MAO*
(а – зсув, б – обертання, в – масштабний множник)

На рис. 4.14 зображено середні значення залишків координат на постійнодіючих станціях після перетворень Гельмерта між розв'язками *MAI* та *MAO* для північної, східної та висотної компонент.

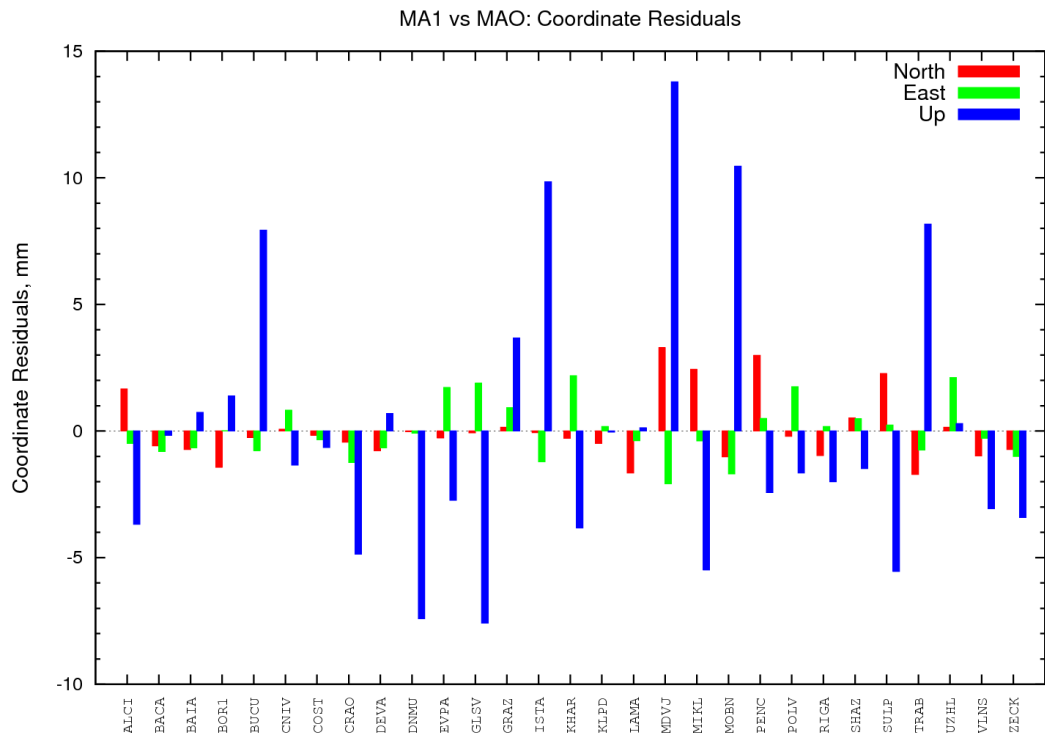


Рис. 4.14. Середні значення залишків координат після перетворень Гельмерта між розв'язками *MAI* та *MAO*

Отримано такі найбільші та найменші за модулем середні різниці для розв'язків *MAI* та *MAO* значення.

- від 0,06 мм (для станції ISTA) до 3,29 мм (для станції MDVJ) для північної компоненти,
- від 0,01 мм (для станції BOR1) до 2,18 мм (для станції KHAR) для східної компоненти,
- від 0,16 мм (для станції KLPD) до 13,79 мм (для станції MDVJ) для висотної компоненти.

На рис. 4. 15 зображено середні залишки різниць тропосферної рефракції між розв'язками *MAI* та *MAO*.

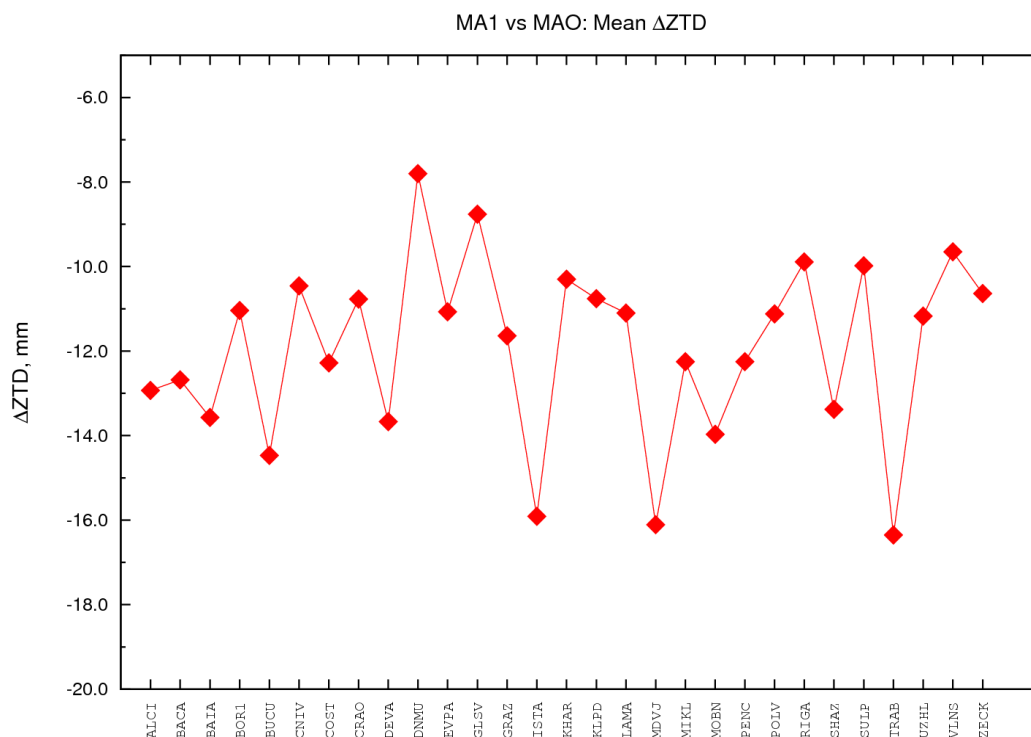
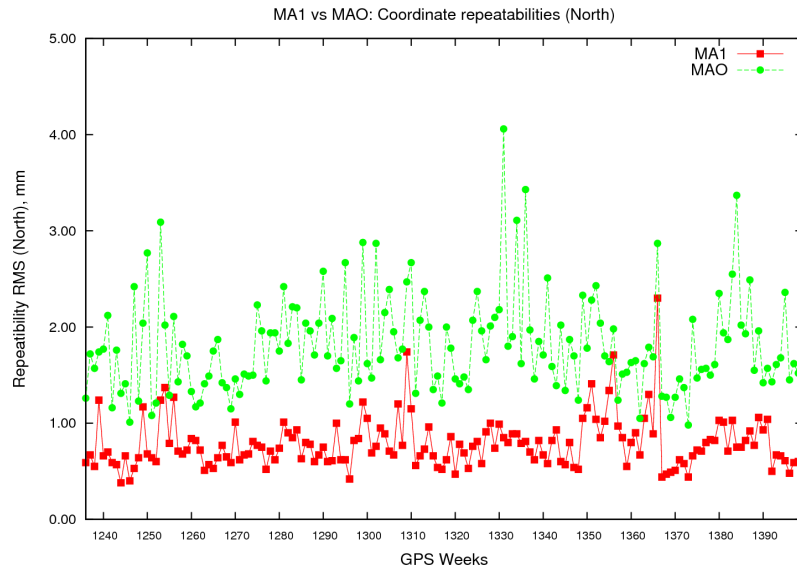


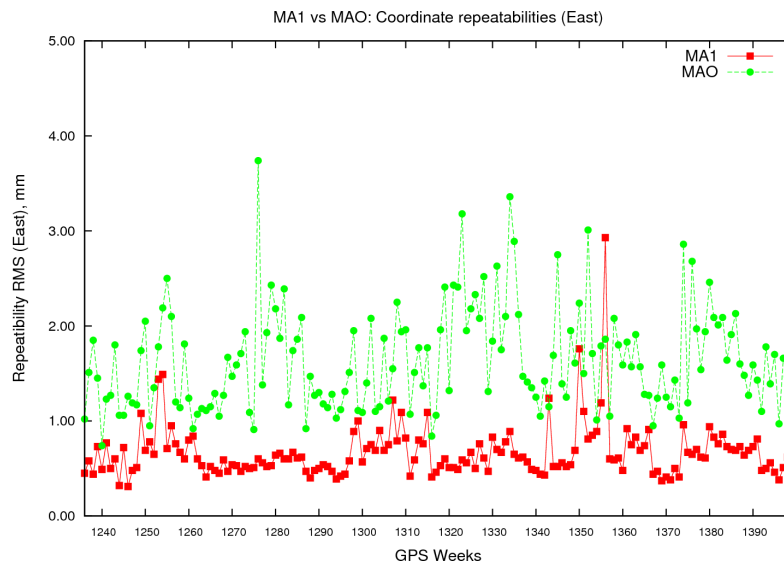
Рис. 4.15. Середні значення різниць тропосферної рефракції між розв'язками *MA1* та *MAO*

Середні значення різниць зенітної тропосферної рефракції знаходяться в межах від $-7,80$ мм (для станції DNMU) до $-16,35$ мм (для станції TRAB). Основний внесок у зміну точності отриманих параметрів зенітної тропосферної рефракції зумовлено використанням апріорної моделі тропосфери, кращої функції нахилу та визначенням тропосферного градієнту, завдяки чому стало можливим використовувати спостереження супутників з кутом місця менше 3° .

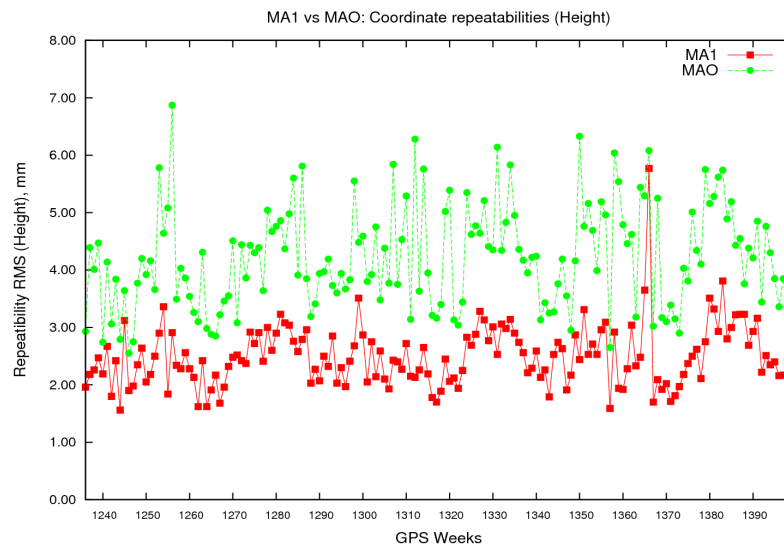
Однією з характеристик оцінки якості розв'язку репроцесингу *MA1* є повторюваність координат. Ця характеристика відповідає за внутрішню оцінку точності розв'язку. Повторюваність координат для розв'язків *MA1* та *MAO* представлено на рис. 4.16.



а)



б)



в)

Рис. 4.16. Повторюваність координат для розв'язків *MA1* та *MAO* (а – північна, б – східна, в – висотна компоненти)

Як можна спостерігати, значення повторюваності координат для розв'язку *MAI* майже в два рази менші для північної та східної компонент та у три 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. Основні результати цього підpunkту викладено в роботах [6–7, 9–10, 13, 52].

4.3.2. Аналіз узгодженості репроцесингу та подальшої регулярної обробки. Для додаткової оцінки якості отриманих результатів репроцесингу часові ряди координат та значення зенітної тропосферної рефракції було перевірено на розриви на момент початку GPS-тижня 1400 та їх подальшої узгодженості. Для цього були взяті оцінки координат станцій та зенітної тропосферної рефракції з регулярної обробки Центру аналізу ГНСС-даних для GPS-тижнів 1400–1631 (5 листопада 2006 р. – 10 квітня 2011 р.). На рис. 4.17 зображено географічне розташування GPS-станцій, спостереження яких використовувались в регулярній обробці.

В регулярну обробку було включено 41 ГНСС-станції, що розташовані на території Східної Європи, 15 з яких – розташовано на території України. Система координат встановлювалась шляхом обмеження «No-net translation» на координати референцних станцій DOR1, GLSV, JOZE, MATE, MDVJ, NICO, METS, POLV, POTS та WTZR.

Постійна обробка в Центрі аналізу ГАО виконувалась згідно рекомендацій Центрального бюро EPN, що почали діяти з GPS-тижня 1400. Використовувалась система координат IGS05, модель океанічних навантажень FES2004, абсолютні моделі варіацій фазових центрів комбінацій антена-купол та система фіксування мережі «No-net translation». Обробка виконувалась за допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0».

У Додатку Б представлено поведінку координатних рядів та зенітної тропосферної рефракції для ГНСС-станцій для всього періоду репроцесингу та обробки (GPS-тижні 1236–1631). Як можна бачити з графіків у Додатку Б для

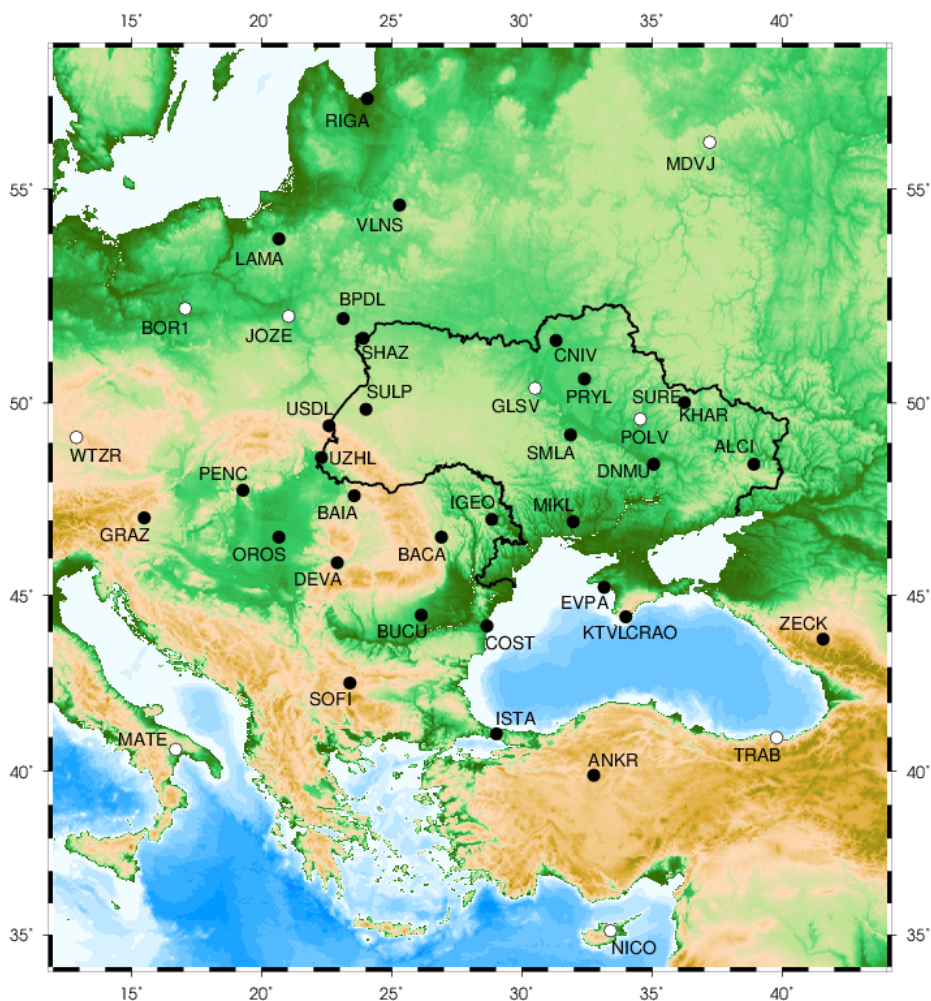


Рис. 4.17. Розташування ГНСС-станцій, спостереження яких входять в регулярну обробку

широти, довготи, висоти та зенітної тропосферної рефракції для станції, що розташована на краю мережі (як приклад, ГНСС-станція RIGA, рис. Б1) та для станції, що розташована в середині мережі (як приклад, ГНСС-станція MIKL, рис. Б2) розривів на вказаній момент (GPS-тиждень 1400) не зафіксовано. Невеличкі зміни в поведінці координатних рядів, скоріше за все, викликані різницями в геометрії мереж постійнодіючих станцій, іншим набором референцних станцій та формуванням різних наборів файлів перших різниць для репроцесингу та регулярної обробки. Основні результати цього підpunkту викладено в роботах [12–13].

4.3. Вплив використаних 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.

В табл. 4.5 наведено середні значення залишків між розв'язками *MA1* та *MA0* (позначено як M1) для висотної компоненти для кожної комбінації антена–купол, що використовувались в обох розв'язках.

Таблиця 4.5

Середні залишки висотної компоненти після перетворень Гельмерта між розв'язками *MA1* та *MA0*

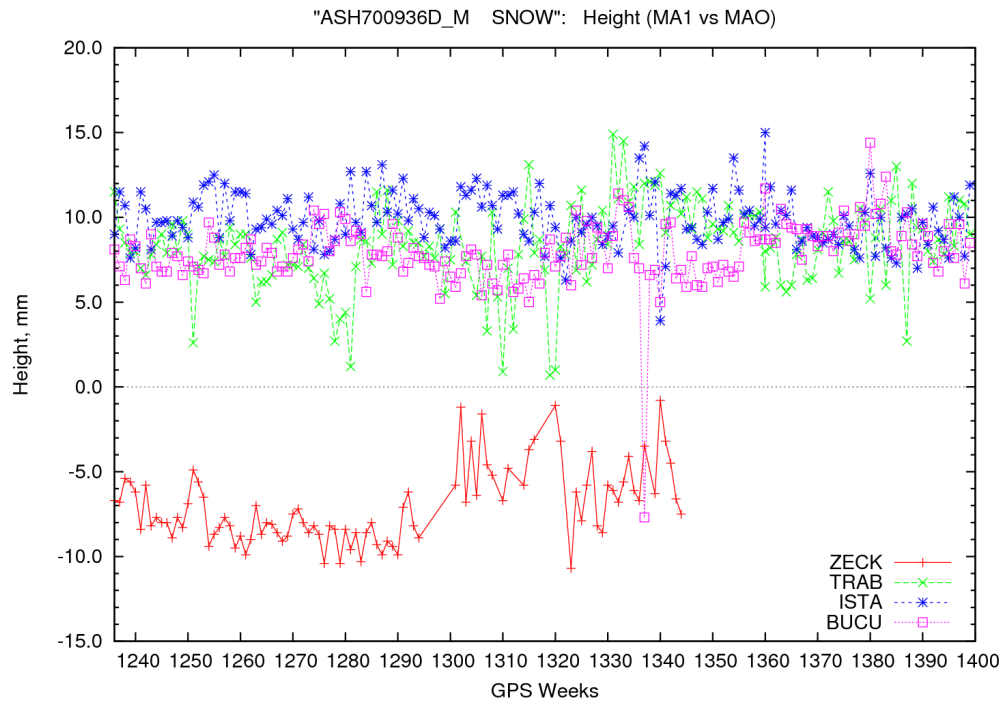
Комбінація антена–купол	Кількість станцій	U (mm) ± dU (mm)
AOAD/M_T	NONE 1 (M1) 14 (B3)	13,98 ± 1,24 -0,89 ± 7,51
AOAD/M_T	SCIS 1 (M1) 0 (B3)	-4,86 ± 1,95 -
ASH700936A_M	NONE 1 (M1) 3 (B3)	-3,07 ± 1,58 1,14 ± 3,57
ASH700936D_M	NONE 1 (M1) 1 (B3)	-2,00 ± 1,70 8,80 ± 5,94
ASH700936D_M	SNOW 4 (M1) 8 (B3)	9,84 ± 2,84 13,54 ± 10,39
ASH700936E	NONE 1 (M1) 1 (B3)	-0,46 ± 0,93 -1,77 ± 1,81
ASH700936F_C	SNOW 1 (M1) 0 (B3)	0,13 ± 1,34 -
ASH701945B_M	NONE 1 (M1) 4 (B3)	-0,65 ± 1,28 -2,59 ± 3,55
ASH701945C_M	SCIS 1 (M1) 0 (B3)	10,46 ± 2,44 -
JPSREGANT__DD_E	NONE 1 (M1) 3 (B3)	13,79 ± 2,36 12,49 ± 7,08

Продовження табл. 4.5

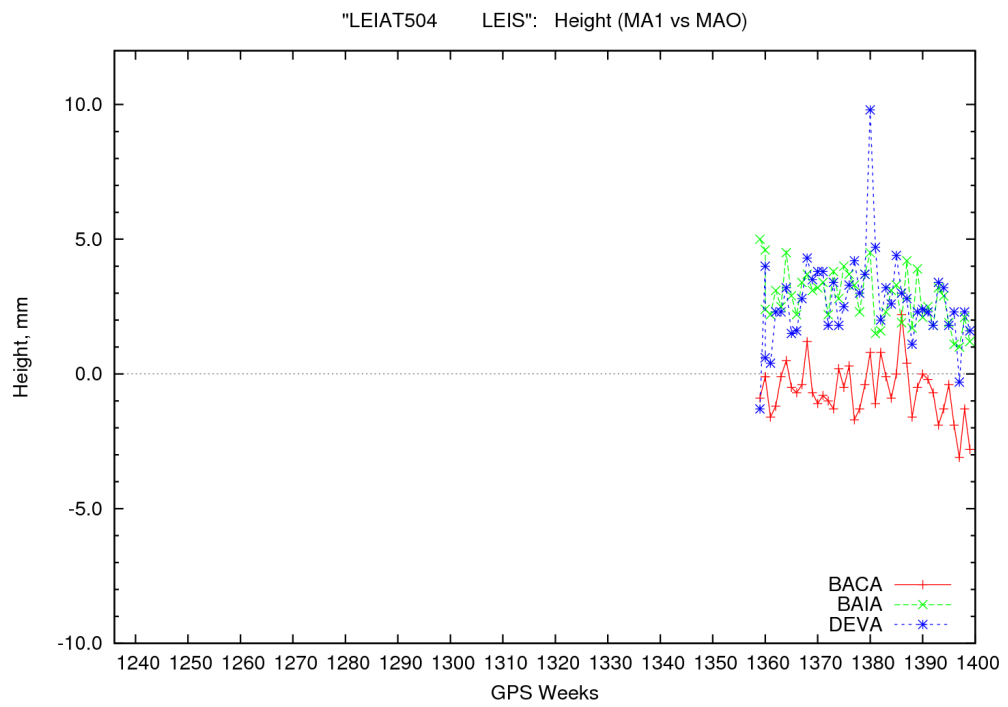
LEIAT504	LEIS	4 (M1) 17 (B3)	$0,42 \pm 1,23$ $-10,86 \pm 3,15$
TRM14532,00	NONE	1 (M1) 2 (B3)	$-7,41 \pm 8,52$ $-10,56 \pm 1,92$
TRM29659,00	NONE	7 (M1) 36 (B3)	$-1,80 \pm 1,52$ $1,12 \pm 5,72$
TRM41249,00	NONE	5 (M1) 6 (B3)	$-3,72 \pm 1,50$ $-4,13 \pm 3,78$

Для порівняння в табл. 4.5 також наведено середні залишки після перетворень Гельмерта між розв'язками, в яких використовувалися абсолютні та відносні моделі калібровок фазових центрів комбінацій антена–купол для регіональної мережі з роботи [55] (позначено як B3). Можна відмітити, що середні значення залишків для більшості комбінацій антена–купол – близькі. Значні відмінності значень спостерігаються у випадку різних кількостей ГНСС-станцій для окремих комбінацій антена–купол (мережа, яка використовувалась в роботі [55], складалась зі 134 ГНСС-станцій).

На рис. 4.18 та 4.19 зображено значення залишків для висотної компоненти для комбінацій антена–купол, що найчастіше використовувались у мережі GPS-станцій.

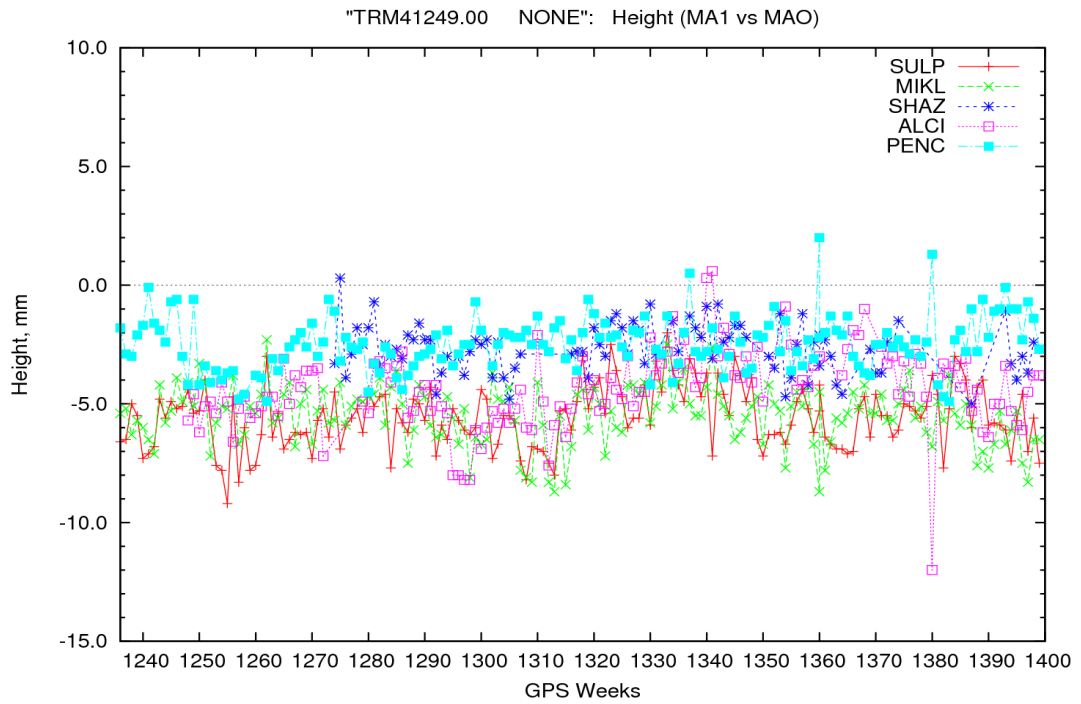


a)

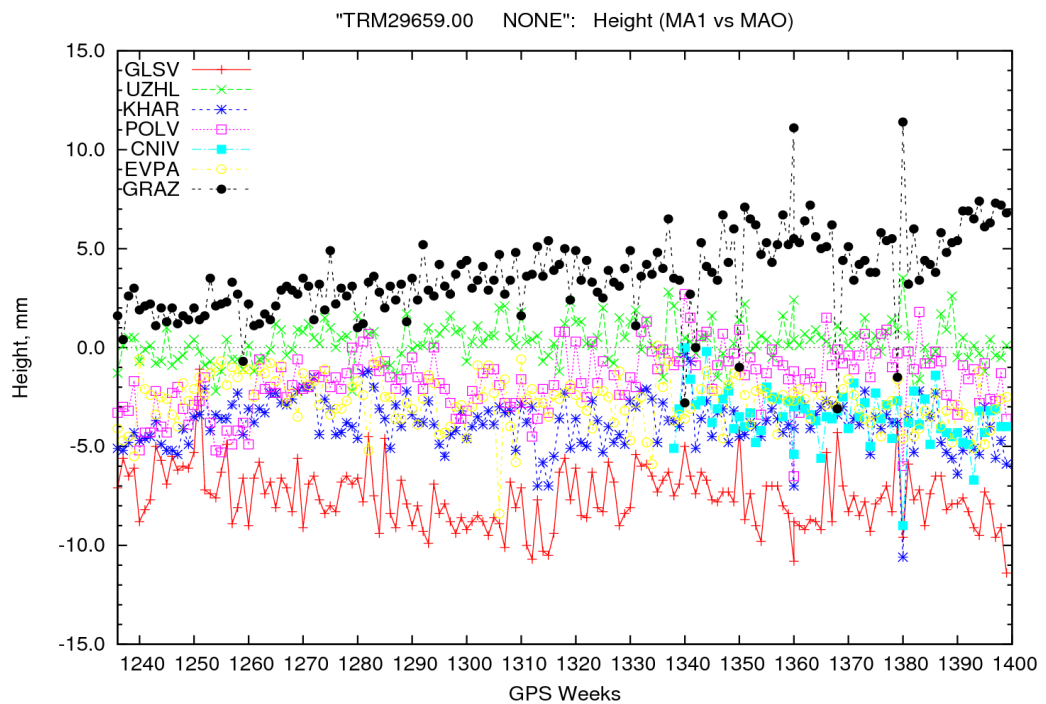


б)

Рис. 4.18. Значення залишків для висотної компоненти після перетворень Гельмерта між розв'язками *MA1* та *MA0* (а – ASH700936D_M SNOW, б – LEIAT504 LEIS)



а)



б)

Рис. 4.19. Значення залишків для висотної компоненти після перетворень Гельмерта між розв'язками *MA1* та *MA0* (а – TRM41249.00 NONE, б – TRM29659.00 NONE)

Отримані результати надають підстави стверджувати що, не дивлячись на різницю моделей, що використовувались, та різних методик для регулярної обробки та репроцесингу, основний внесок у різниці координат привнесено

зміною моделей фазових центрів комбінацій антена–купол, що використовувались для розв'язку *MAI* (абсолютних замість відносних) та використанням покращених орбіт GPS-супутників.

Основні результати цього підпункту наведено в роботах [8, 11]

4.3. Висновки

Даний розділ присвячено результатам аналізу розв'язку репроцесингу *MAI*, що виконано автором у Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України, та його порівнянню з міжнародними комбінованими розв'язками, отриманими в результаті кампаній репроцесингів EPN та IGS, та досліджень подальшої узгодженості координатних рядів і значень зенітної тропосферної рефракції.

Для перевірки якості розв'язку *MAI* були отримані параметри перетворення Гельмерта між розв'язком *MAI* та комбінованими розв'язками Міжнародної ГНСС-служби (*IGB*) та Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі (*EU0*). Отримані результати дозволяють зробити висновок, що розв'язок, що виконано в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України, відповідає за якістю комбінованим розв'язкам репроцесингів IGS та EPN. Основні відмінності викликані різницями в геометрії мереж, різними наборами файлів перших різниць та референцних ГНСС-станцій.

Отримано середні значення різниць тропосферної рефракції між розв'язками *MAI* та *EU0*. Для 29 GPS-станцій середні значення лежать в межах похибок (від $-0,95$ мм до $1,17$ мм).

Наявність трьох розв'язків у системі координат IGS05 дозволила визначити значення «зовнішніх» похибок та кореляції між ними. Середні значення «зовнішніх» похибок для розв'язків склали:

для розв'язку *MAI* – 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 координатні ряди, отримані в результаті репроцесингу, за якістю відповідають

розв'язкам IGS та EPN.

Виконано порівняння повторюваності координат між розв'язком *MAI* та регулярним розв'язком Центру аналізу ГНСС-даних (*MAO*). Для розв'язку *MAI* значення повторюваності координат майже в три рази менші для північної та східної компонент та у два рази менші для висотної компоненти у порівнянні з розв'язком *MAO*.

Виконано перевірку координатних рядів та значень zenітної тропосферної рефракції розв'язку *MAI* та подальшої регулярної обробки 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.

Залишки після перетворення Гельмерта між розв'язками *MAI* та *MAO* надали інформацію про вплив зміни моделей калібровок комбінацій антена–купол. Незважаючи на те, що для цих розв'язків використовувались різні апріорні дані та моделі, основний внесок у зміни координат та zenітної тропосферної рефракції для GPS-станцій викликані використанням абсолютних моделей калібровок комбінацій антена–купол замість відносних та використанням покращених орбіт GPS-супутників.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що розв'язок репроцесингу *MAI* Центру аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України, виконано на відповідному рівні і за якістю відповідає міжнародним стандартам та вимогам.

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 *MAI*). Визначено значення zenітної тропосферної рефракції для 29 GPS-станцій. Використання горизонтального тропосферного градієнта дозволило враховувати спостереження низьких супутників, що призвело до покращення оцінки параметрів zenітної тропосферної рефракції. Середні різниці zenітної тропосферної рефракції між розв'язками *MAI* 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 *MAI* були отримані параметри перетворення Гельмерта між розв'язком *MAI* та комбінованими розв'язками Міжнародної ГНСС-служби (*IGB*) та Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі (*EU0*). Розв'язок *MAI* відповідає за якістю комбінованим розв'язкам репроцесингів IGS та EPN. Основні відмінності викликано різницями в геометрії мереж та способами реалізації системи координат (різний набір референціальних станцій). Середні значення «зовнішніх» похибок для розв'язків склали:
 - для розв'язку *MAI* – $1,5$ 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 координатні ряди, отримані в результаті репроцесингу, за якістю відповідають розв'язкам IGS та EPN.

3. Часові ряди координат та значень зенітної тропосферної рефракції на розриви перевірено 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 *MAI* та регулярним розв'язком Центру аналізу ГНСС-даних (*MAO*). Для розв'язку *MAI* значення повторюваності координат майже в три рази менші для північної та східної компонент та у два 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 *MAI* 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 (замість відносних) та використанням покращених орбіт GPS-супутників.

ПОДЯКА

Автор висловлює щирі подяки своєму науковому керівникові *Ході Олегу Александровичу* за постійну підтримку і неоціненну допомогу в роботі над дисертацією.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Болотін С. Л.* Порівняння об'єднаних каталогів RSC (GAOUA) 05 C 03 та RSC (PUL) 06 C 02 з реалізацією Міжнародної небесної системи відліку ICRF / Болотін С. Л., Литвин С. О. // Кинематика и физика небесных тел. – 2010. Т. 26, №1. – С. 31–42.
2. *Гофманн-Веленгофф Б.* Глобальна система місцеположення (GPS): Теорія і практика. / Гофманн-Веленгофф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. // Київ: Наукова думка. – 1996. – 392 с.
3. *Гофманн-Веленгофф Б.* Навігація. Основи визначення місцеположення та скеровування. / Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. // Львів: Львівський національний університет ім. І. Франка. – 2006. – 449 с.
4. *Дума Д. П.* Загальна астрометрія. Навчальний посібник / Дума Д. П. // Київ: Наукова думка. – 2007. – 591 с.
5. *Ищенко М. В.* Обзор сетей перманентных ГНСС-станций / Ищенко М. В. // Вісник астрономічної школи. – 2009. – Т.6, № 1. – С. 114–117.
6. *Ищенко М. В.* Оцінка зенітної тропосферної рефракції для постійнодіючих GPS-станцій з використанням різних методик та моделей / Ищенко М. В. // XIII міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених». – Чернігів, 2011. – С. 28–29.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
 11. *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.
 12. *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.
 13. *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.
 14. *Конин В. В.* Системы спутниковой радионавигации / Конин В. В., Харченко В, П. // Национальный авиационный университет. – К.: Холтек. – 2010. – 520 с.
 15. *Хода О. А.* Центр анализа GPS-данных ГАО НАН Украины: результаты обработки наблюдений для GPS-недель 1236–1399 / Хода О. А. // Кинематика и физика небесных тел. – 2010. – Т. 26, № 6. – С. 56–67.
 16. *Хода О. А.* Наблюдения спутников Глобальной системы определения местоположения (GPS) для геодинамических и ионосферных исследований в Украине / Диссертационная работа, Киев 2000. – 117 с.
 17. *Хода О. А.* Определение зенитной тропосферной рефракции на украинских перманентных GPS-станциях по данным наблюдений для

- GPS-неделя 1236–1399 / Хода О. А. // Кинематика и физика небесных тел. – 2011. – Т. 27, № 2. – С. 3–7.
18. *Хода О. А.* Центр анализа GPS-данных ГАО НАН Украины: результаты обработки наблюдений для GPS-недель 1236–1399 / Хода О. А. // Кинематика и физика небесных тел. – 2011. – Т. 27, № 1. – С. 25–39.
19. *Чолий В. Я.* Сравнение различных реализаций земной системы координат, построенных по данным лазерной локации искусственных спутников Земли / Чолий В. Я. // Кинематика и физика небесных тел. – 1987. – Т. 3, №4. – С. 75–79.
20. *Altamimi Z.* ITRF2005: a new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of stations and Earth Orientation Parameters / Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C. // Journal of Geophysical research. – 2007. – Vol. 112. – 19 p.
21. *Argus D.* No-net rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model Nuvel-1 / Argus D., Gordon R. // Geophysical Research Letters. – 1991. – Vol. 18. – P. 2038–2042.
22. *Ashby N.* Relativistic effects in the Global Positioning System / N. Ashby // Proceedings of the International Association of Geodesy (IAG) Symposia of the XIX General Assembly of IUGG, Vancouver, Canada. – 1987. – Vol. 1. – P. 41–50.
23. *Ashby N.* Relativity in the Global Positioning System / Ashby N. // Living Reviews in Relativity. – 2003. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-1>
24. Bernese GPS Software version 4.2 / Hugentobler U., Shaer S., Fridez P. // Berne: Astronomical Institute, University of Berne. – 2001. – 515 p.
25. Bernese GPS Software version 5.0 / Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. // Berne: Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland. 2007. – 612 p.
26. *Beutler G.* Development of the IGS / Beutler G. // IGS Annual Report. – 1995. – P. 3–9.
27. *Beutler G.* Extended orbit modeling techniques at the CODE Processing Center

- of the International GPS Service (IGS): Theory and initial results / Beutler G., Brokmann E., Guther W., Hugentobler U., Mervart L., Verdum A. // *Manuscripta Geodaetica*. – 1994. – Vol. 19. – P. 367–386.
28. *Beutler G.* The 1992 IGS TEST Campaign, Epoch'92 and the IGS PILOT Service: an overview / G. Beutler // *Proc. 1993 IGS Workshop*, Bern Switzerland. – 1993. – P. 3–9.
29. *Blewitt G.* Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km / G. Blewitt // *Journal of Geophysical research*. – 1989. – Vol. 94, № 10. – P. 10187–10203.
30. *Blewitt G.* Constructing the IGS polyhedron by Distributed Processing, in IGS workshop on Densification of the IERS Terrestrial Reference Frame through regional GPS Network / Blewitt G., Block and Y., Kouba J. // *IGS Central Bureau, jet Propulsion Laboratory, Pasadena (California, USA)*. – 1994. – P. 21–41.
31. *Böhm J.* Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data / Böhm J., Niell A., Tregonibg P., Schuh H. // *Geophysical Research Letter*. – 2006. – Vol. – 33. – 4 p.
32. *Boucher C.* The ITRF2000. / Boucher C., Altamimi Z., Scillard P., Feissel-Vernier M. // *IERS Technical Note 31*. – 2004. – 270 p.
33. *Brockmann E.* Combination of solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS) / Brockmann E. // *Geodätisch geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*. – 1997. Vol. – 55.
34. *Bruyninx C.* The EUREF Permanent Network: a multi-disciplinary network serving surveyors as well as scientists / Bruyninx C. // *GeoInformatics*. – 2004. – Vol. 7. – P. 32–35.
35. *DeMets C.* Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions / DeMets C., Gordon R., Argus D., Stein S. // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – P. 2191–2194.
36. *Dick W.* IERS Annual Report 2000 / Dick W., Richter B. // *IERS Annual Report*. – 2001.
37. *Dow J.* The International GNSS Service in a changing landscape of Global

- Navigation Satellite Systems / Dow J., Neilan R., Rizos C. // *Journal of Geodesy*. – 2009. – Vol. 83, № (3–4) – P. 191–198.
38. *Dow J.* The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade / Dow J., Neilan R., Gendt G. // *Advanced In Space Research*. – 2005. – Vol. 36, № 3. – P. 320–326.
39. *Essen L.* The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24 000 Mc/s / Essen L., Froome K. // *Proceedings of Physical Society*. – 1951. – P. 862–875.
40. *Estey L.* TEQC – Summary / Estey L. // *Proc. IGS Network System Workshop. Annapolis (Maryland, USA)*. – 1998. – P. 343–345.
41. *Ferland R.* From relative to absolute antenna phase center calibrations: the effect on the SINEX products / Eds. Springer T., Gendt G., Dow J. // *The International GNSS Service (IGS): perspectives and visions for 2012 and beyond, Proceedings of the IGS Workshop 2006, European Space Agency (Darmstadt, Germany)*. – 2008.
42. *Gendt G.* IGS reprocessing – summary of orbit/clock combination and first quality assessment / Gendt G., Griffiths J., Nischan T., Ray J. // *Presented at the IGS Workshop 2010, Newcastle upon Tyne, United Kingdom*. – 2010.
43. *Gibson R.* A derivation of relativistic effects in satellite tracking / Gibson R. // *Technical Report, Naval Surface Weapon Center, Dahlgren (Virginia, USA)*. – 1987. – P. 83–55.
44. *Guidelines for EPN Analysis Centers*. – 2006. [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.php
45. *Gurtner W.* RINEX: The receiver Independent Exchange Format Version 2 / Gurtner W. // *Astronomical Institute University of Berne, Switzerland*. – 2006. [Электронный ресурс] Режим доступа: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex210.txt>
46. *Habrich H.* Combining the EUREF Local Analysis Centers' Solutions. Rep. on the Symposium of the IAG sub-commission for Europe (EUREF) held in Dubrovic / Habrich H. // [Электронный ресурс:]. – 2003. Режим доступа:

<http://www.euref.eu/symposia.book2003/1-03-Habrigh.pdf>

47. *Habrigh H.* EPN analysis – Products and report / Habrich H. // Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) in Brussels, Belgium. – 2008.
48. *Hatanaka Y.* Compact RINEX format and tools (beta-test version) / Hatanaka Y. // Proc. IGS 1996 Analysis Center Workshop. – Silver Spring (Mariland, USA). – 1996. – P. 121–129.
49. *Hilla S.* Extending the standard product 3 (SP3) orbit format / P. Tetreault // Proceedings of the IGS Network, Data, and Analysis Centre Workshop, Towards Real Time. – 2002.
50. *Hofmann-Wellenhof B.* GNSS – Global Navigation Satellite System / Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E. // SpringerWienNewYork. – 2008. – 343 p.
51. *Hopfield H.* Two-quadratic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data / Hopfield H. S. // Journal of Geophysical Research. – 1967. – Vol. 74. – P. 4487–4499.
52. *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, Kiev, Ukraine. – 2012. – 56 p.
53. *Jefferson D.* Examining the C1-P1 pseudorange bias / Jefferson D., Heflin D., Muellerschoen R. // GPS Solutions. – 2001. – Vol. 4, № 4. – P. 25–30.
54. *Kaplan E.* Understanding GPS: principle and applications / Kaplan E. // 2th edn. Artech House, Boston, London. – 2006. – 703 p.
55. *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.
56. *Kouba J.* Relativistic time transformations in GPS / Kouba J. // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 5, № 4. – P. 1–9.
57. *Lyard F.* Modeling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 / Lyard F., Lefvre F., Letellier T., Francis O. // Ocean Dynamics. – 2006. –

- Vol. 56. – P. 394–415.
58. *McCarthy D.* IERS Conventions / McCarthy D., Petit G. // IERS Technical Note 32. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. – 2004.
 59. *Meindl M.* Tropospheric gradient estimation at CODE: results from global solutions in applications of GPS remote sensing to meteorology and related fields / Meindl M., Schaer S., Hugentobler U., Beutler G. // Journal of the Meteorological Society of Japan. – 2004. – Vol. 82, № 1. – P. 331 – 338.
 60. *Mervart L.* Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System / Mervart L. // Geodätisch geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 53, Schweizerische Geodätische Kommission, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zürich. – 1995. – 155 p.
 61. *Mervart L.* The impact of ambiguity resolution on GPS orbit determination and on global geodynamics studies / Mervart L. Beutler G., Rothacher M., Schaer S. // Presented at the XXI. General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Boulder, Colorado. –1995.
 62. *Nelian R.* The organization of the IGS / Nelian R. // IGS 1994 Annual Report. – 1995. – P. 11–23.
 63. New IGS ERP Format (version 2) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/erp.txt>
 64. *Niell A.* Comparison of atmosphere wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS and VLBI / Niell A., Coster A., Solheim F., Toor P., Langley R., Upham C. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2001. – Vol. 18. – P. 830–850.
 65. *Niell A.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths / Niell A. // Journal of Geophysical Research. – 1996. – Vol. 101. – P. 3227–3246.
 66. *Ray J.* Status of IGS reprocessing activities / Ray J., Ferland R., Gendt G. // IGS Mail No. 5875 [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2008/msg00195.html>

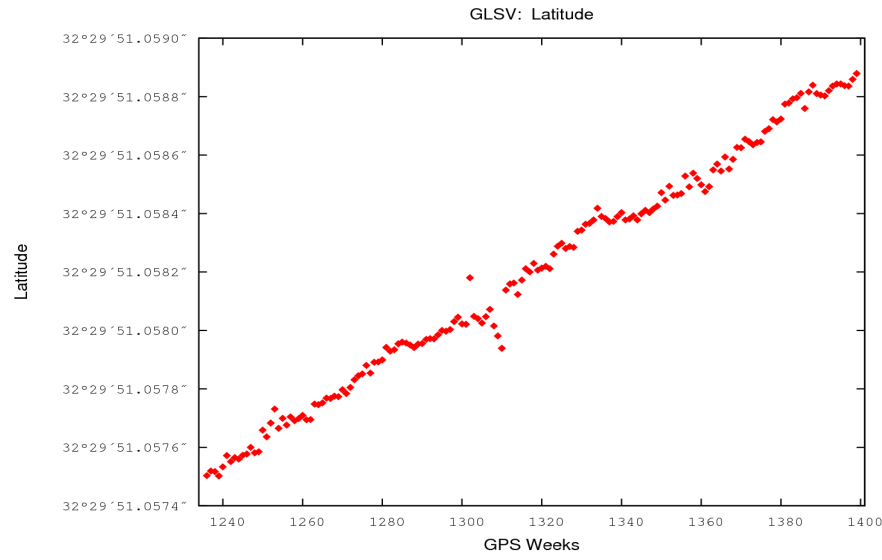
67. *Ray R.* A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99.2/GOT00.2. / Ray R. D. // NASA Technical Memorandum 209478. – 1999.
68. Relative IGS phase center corrections for satellite and receiver antennas / [Электроний ресурс] // Режим доступа: ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/igs_01.atx
69. *Remondi B.* Extending the national geodetic survey standard GPS orbit formats / Remondi B. // Technical Report NOS 133 NGS 46, NOAA, USA. – 1998.
70. *Remondi B.* NGS Second generation ASCII and binary orbit formats and associated interpolated studies / Remondi B. // Presented at the XX General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Vienna, Austria. – 1991.
71. *Rothacher M.* Azimuth- and elevation-dependent phase center corrections for Geodetic GPS antennas estimated from GPS calibration campaigns / Rothacher M., Gurtner W., Schaer S., Weber R., Hase H. // IAG Symposium. – 1996. – Vol. 115. – P. 335–339.
72. *Rothacher M.* New versions of SINEX (2.01) and ANTEX (1.3) / Rothacher M., Schmid R. // IERS message № 71 [Электроний ресурс] Режим доступа: http://www.iers.org/products/2/11428/orig/message_071.txt
73. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites / Saastamoinen J. // The use of artificial satellites for Geodesy of Geophysics Monogram Series, AGU. – 1972. – Vol. 15 – P. 244–251.
74. *Saastamoinen J.* Contribution to the theory of atmospheric refraction / Saastamoinen J. // Bulletin Geodesies. – 1973. – Vol. 107. – P. 13–43.
75. *Schaer S.* CODE's Global Ionosphere Maps (GIMs). / Schaer S. // – 1998. [Электроний ресурс] // Режим доступа: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>
76. *Schaer S.* Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system / Schaer S. // Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Schweizerische Geodatische Kommission, Institut für Geodasie und Photogrammetrie. – 1999. – Vol. 59.

77. *Schaer S.* Stochastische Ionosphärenmodellierung beim Rapid Static Positioning GPS / Schaer S. // Diplomarbeit, Astronomisches Institut, Universität Bern, Switzerland. – 1994.
78. *Schmig R.* Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas / Schmig R., Steigenberg P., Gendt G., Ge M., Rothacher M. // Journal of Geodesy. – 2007. – Vol. 81, № 12. – 2007. – P. 781–798.
79. *Spilker J.* GPS signal structure and performance characteristics / Spilker J. // The Institute of Navigation: Global Positioning System. – 1999. – Vol. 1. – P. 29–54.
80. *Standish E.* The Observational basis for JPL's DE200, the planetary ephemerides of the astronomical almanac / Standish E. // Astronomy and Astrophysics. – 1990. – Vol. 233, № 1. – P. 252–271.
81. Status of IGS orbit products / IGS Analysis Centre Coordinator // IGS Mail No. 6053 [Электронный ресурс] // Режим доступа:
<http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2010/msg00001.html>
82. *Steigenberg P.* CODE contribution to the first IGS Reprocessing campaign / Steigenberg P., Hugentobler U. // Technical Report 1/2011. – 2011.
83. *Steigenberg P.* Reprocessing issues, standardization, new models / Steigenberg P., Romero I., Fang P. // IGS Workshop, Darmstadt, Germany. – 2006. [Электронный ресурс] // Режим доступа:
<http://nng.esoc.esa.de/ws2006/REPR1.pdf>
84. *Steigenberg P.* Reprocessing of global GPS network: PhD dissertation / Steigenberg P. // Deutsche Geodätische Commission, Reihe – 2009. – 630 p. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://dgk.badw.de/docs/c-640.pdf>
85. *Steigenberg P.* Reprocessing of global GPS network / Steigenberg P., Rothacher M., Dietrich R., Fritsche M., Rulke A., Vey S. // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111. – 13 p.
86. *Steigenberg P.* Quality of reprocessed GPS satellite orbits / Steigenberg P., Rothacher M., Fritsche M., Rulke A., Dietrich R. // Journal of Geodesy. – Vol. 83, №3–4. – 2009. – P. 241–248.

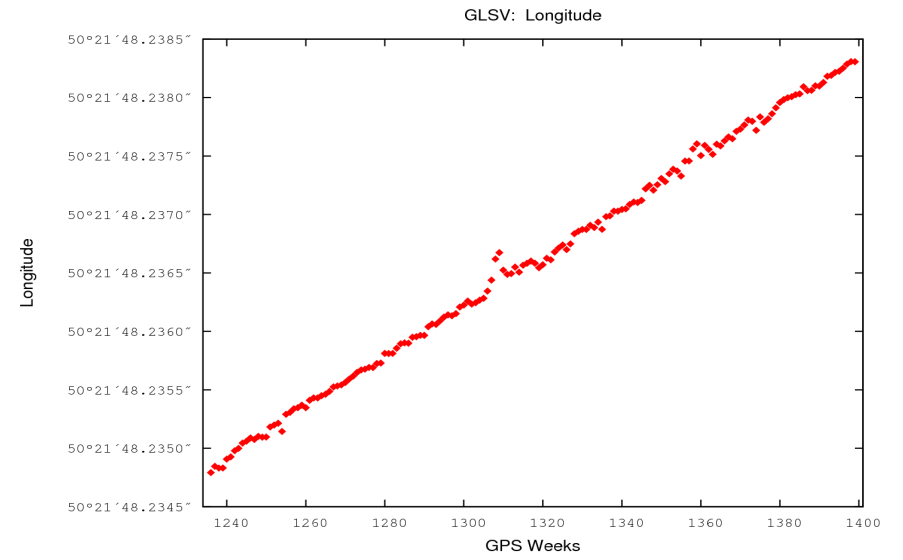
87. *Vöelksen C.* An update on the EPN Reprocessing Project: current achievements and status / Vöelksen C. // Project EUREF Symposium. – 2011. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.euref.eu/symposia/2011Chisinau/01-06-Voelksen.pdf>
88. *Vöelksen C.* EPN Reprocessing: report on the current status of the EPN / Vöelksen C. // Project EUREF Symposium. – 2010. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.euref.eu/symposia/2010Galve/01-05-Voelksen.pgf>
89. *Vöelksen C.* Reprocessing of a regional GPS network in Europe / Vöelksen C. // International of Geodesy Symposia, Springer. – 2008. – Vol. 133. – P. 57–74.
90. *Wilson B.* The broadcast interfrequency biases / Wilson B., Yinger H., Feess W. // GPS World. – 1999. – Vol. 10, №9. – P. 56–66.
91. *Wübbena G.* Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time / Wübbena G., Schmitz M., Menge F. // Proc. ION GPS, Salt Lake City, USA. – 2000. – P. 2512–2522.
92. *Xu G.* GPS – theory, algorithms and applications / Xu G. // SpringerWienNewYork. – 2007. – 353 p.
93. *Zho S.* Relativistic effects in GPS / Zho S., Groten E., Groten E., Strauss R. // GPS-techniques applied to geodesy and surveying. Springer, Berlin, Heidelberg, New, York, London, Paris, Tokyo, Lecture Notes in Earth Sciences. – 1988. – Vol. 19.

ДОДАТОК А

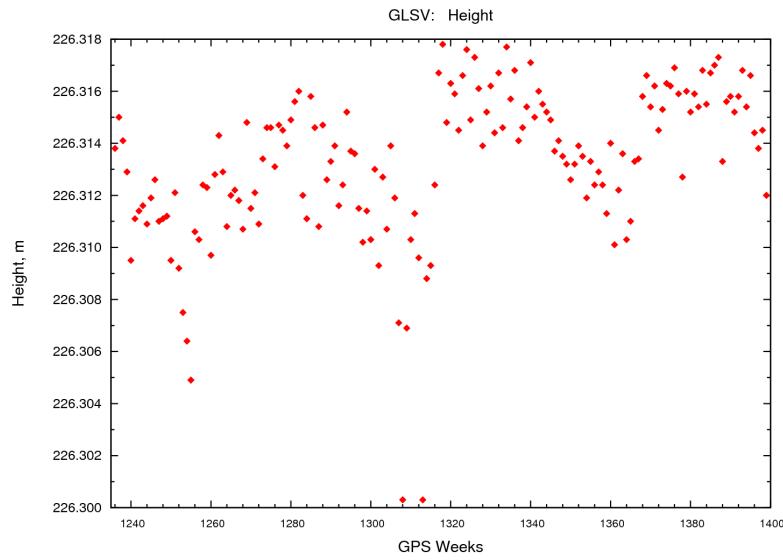
Зміни значень широти, довготи, висоти та зенітної тропосферної рефракції
для GPS-станцій (GPS-тижні 1236–1399)



a)



б)



в)

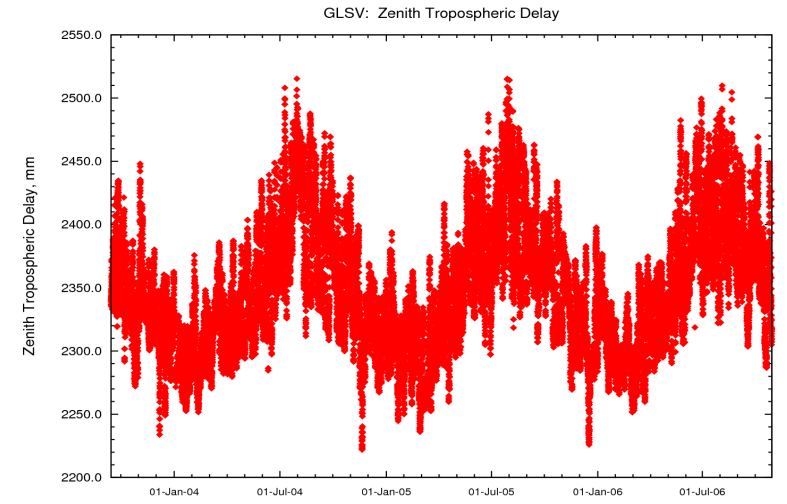
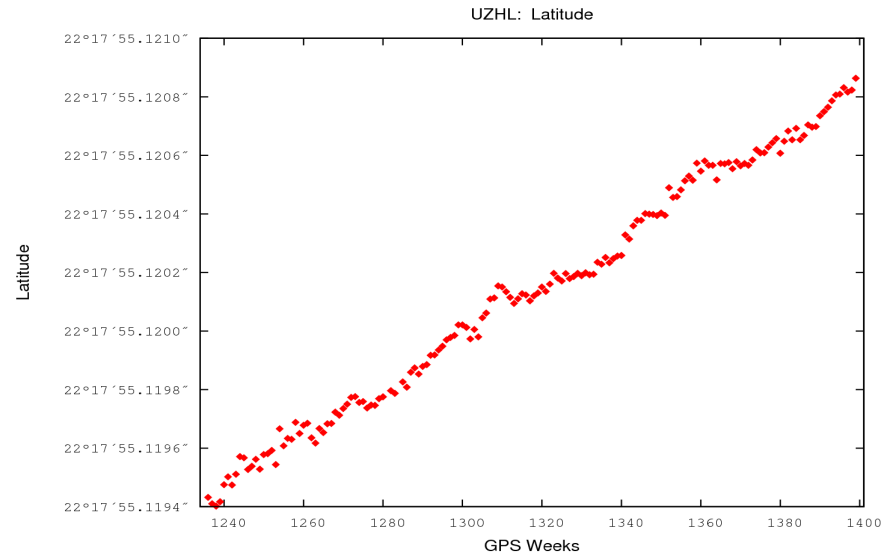
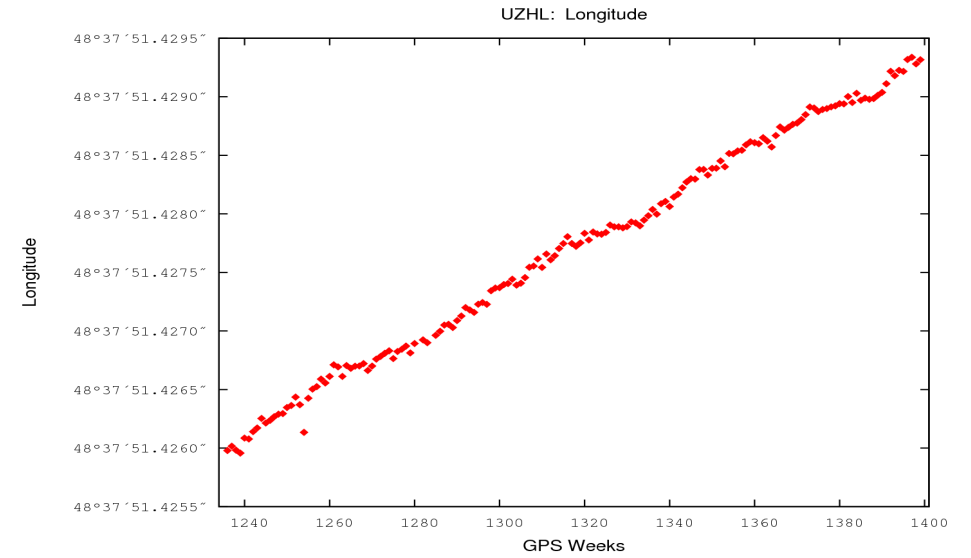


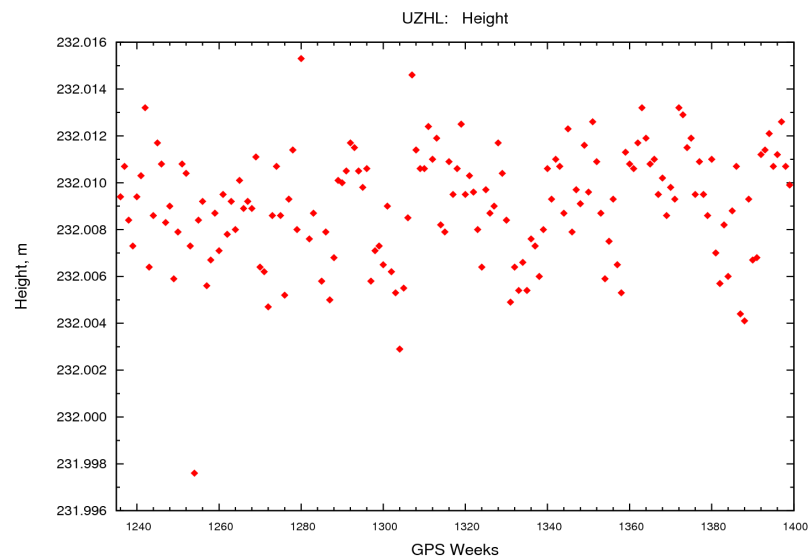
Рис. А. 1. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції GLSV



а)



б)



в)

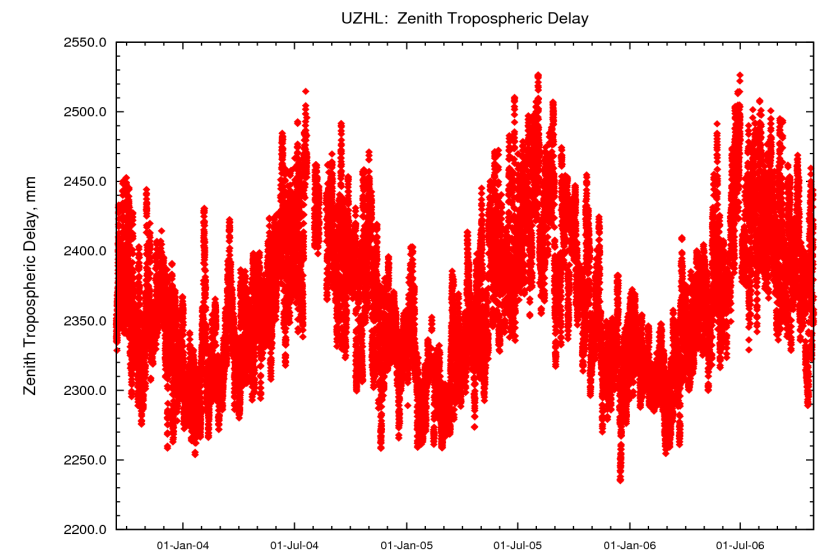
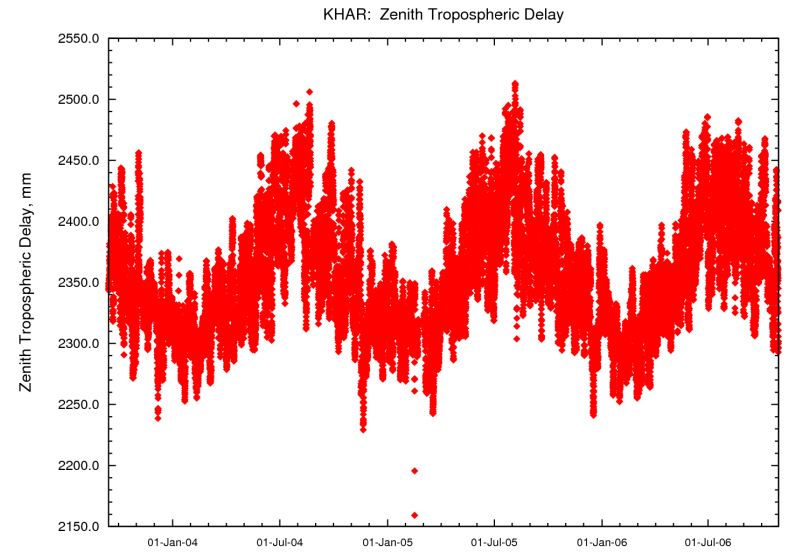
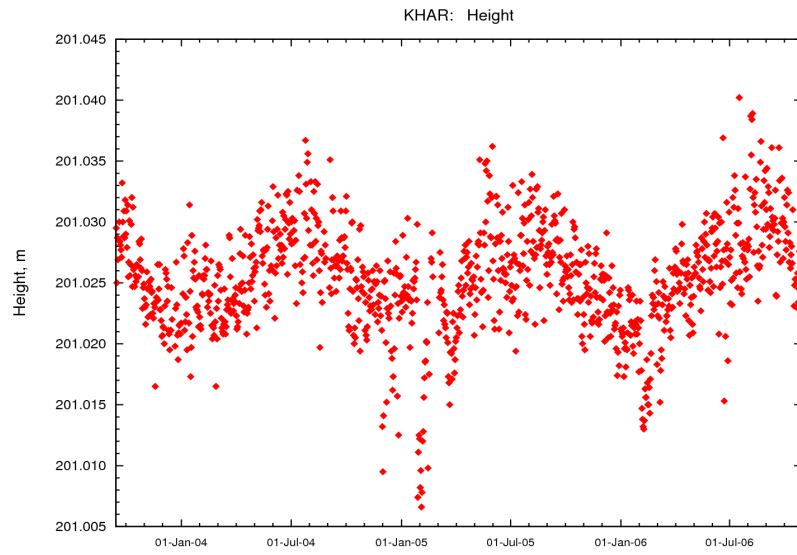
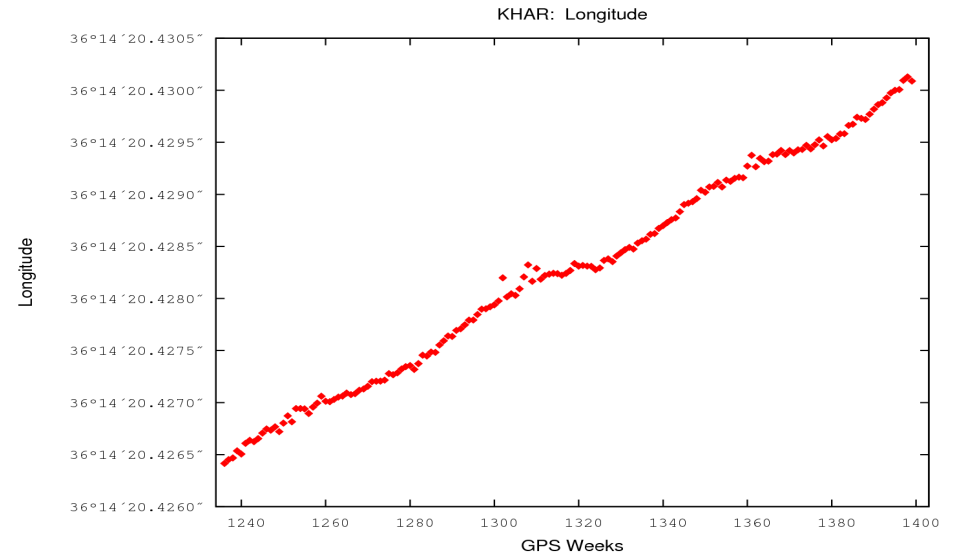
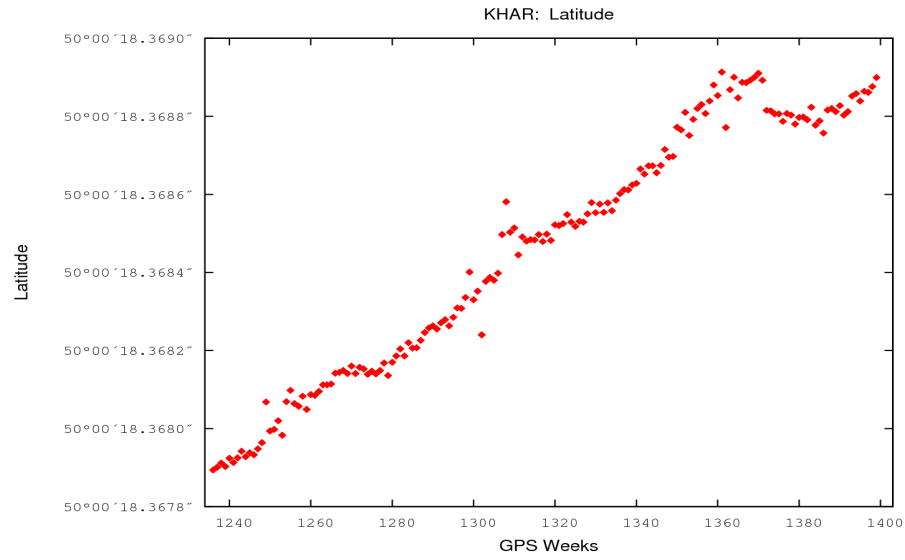
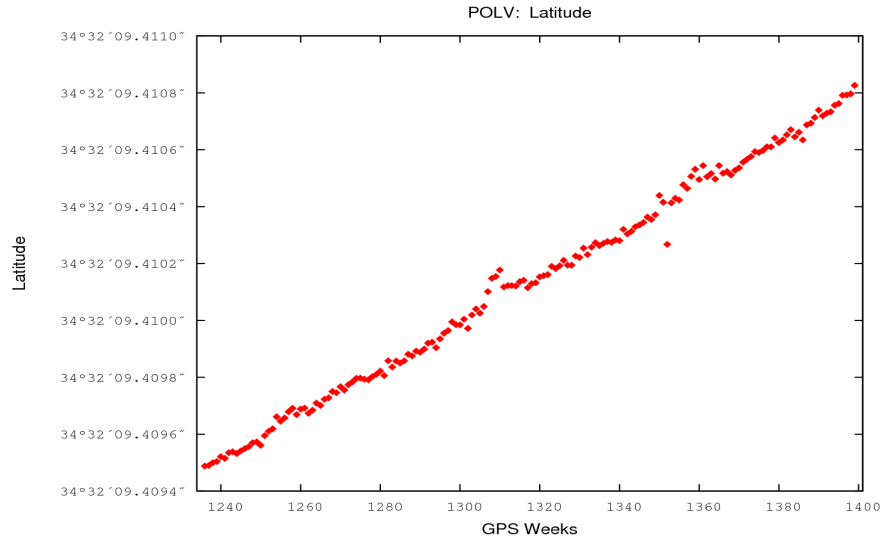


Рис. А. 2. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції UZHL

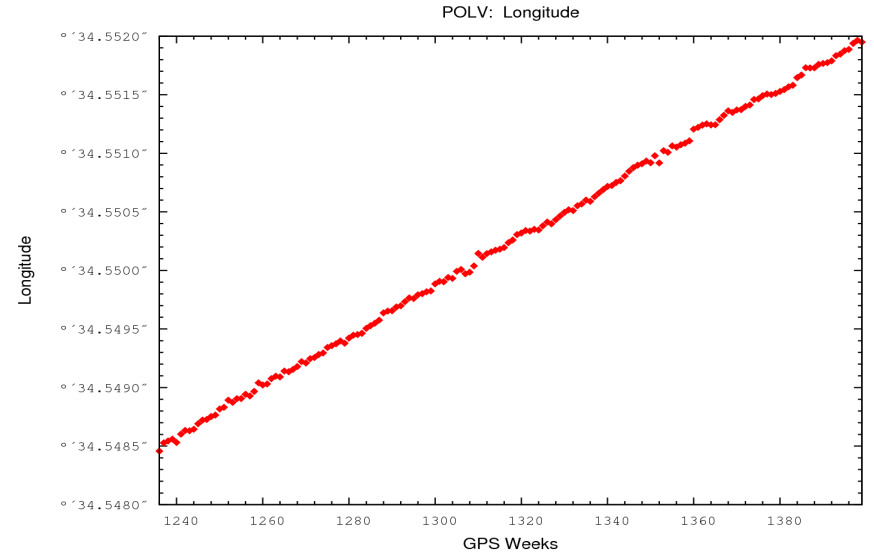


в)

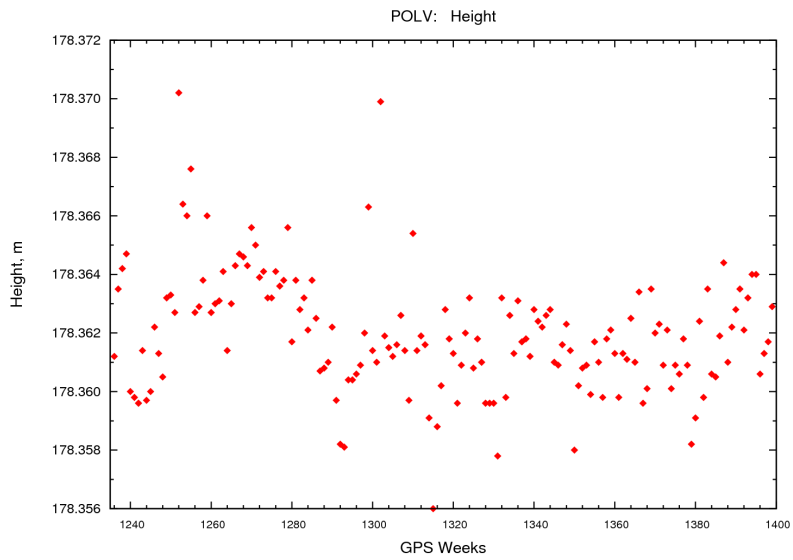
Рис. А. 3. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції KHAR



а)



б)



в)

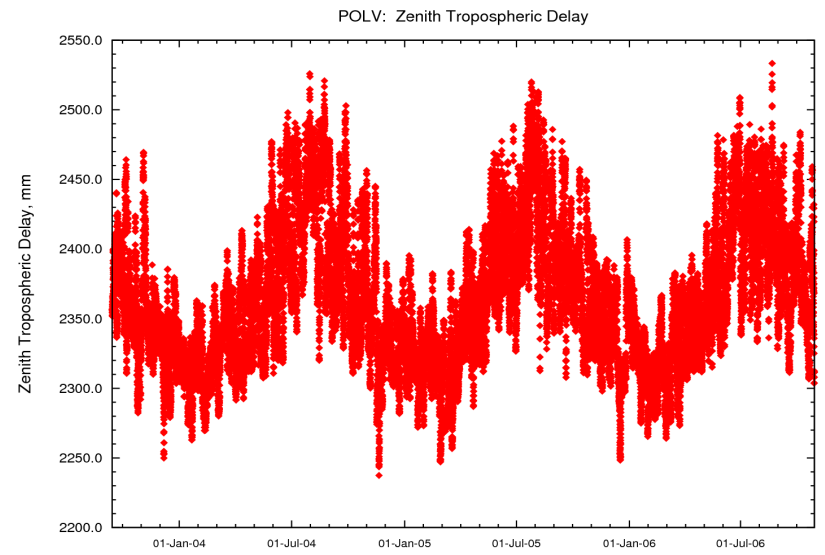
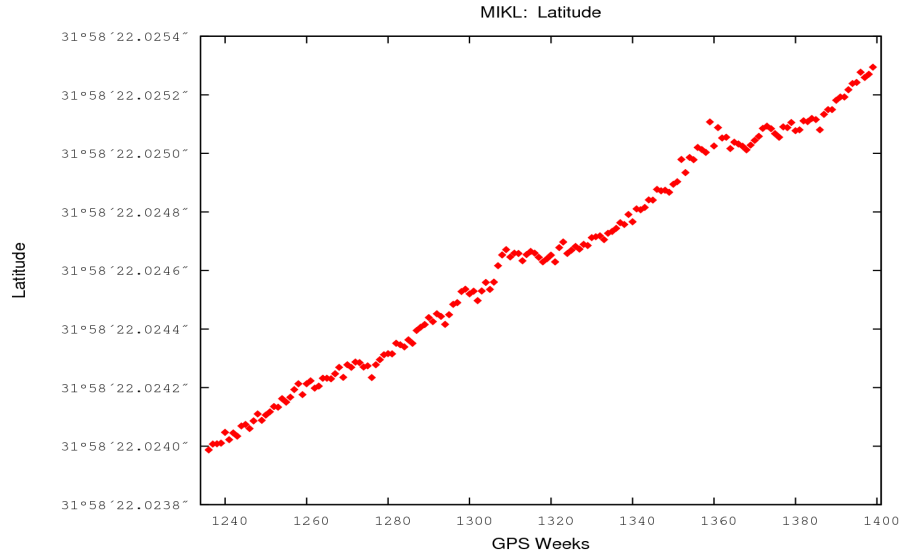
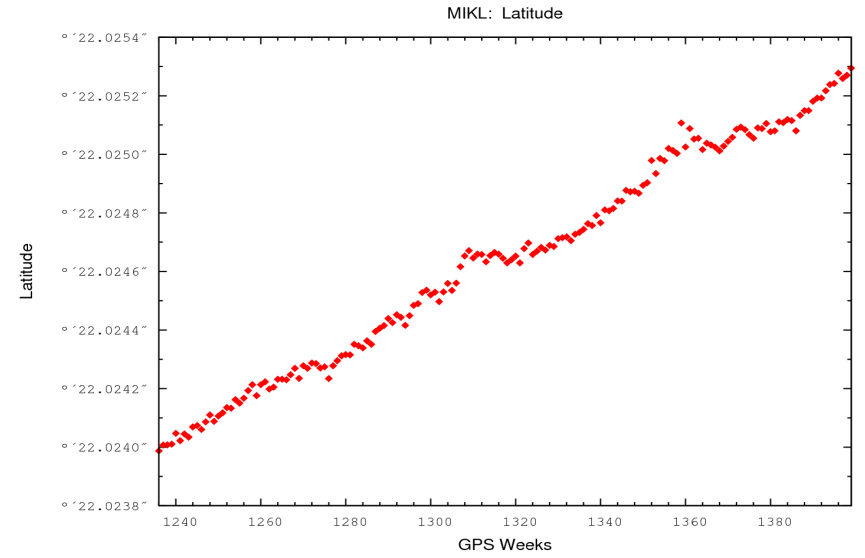


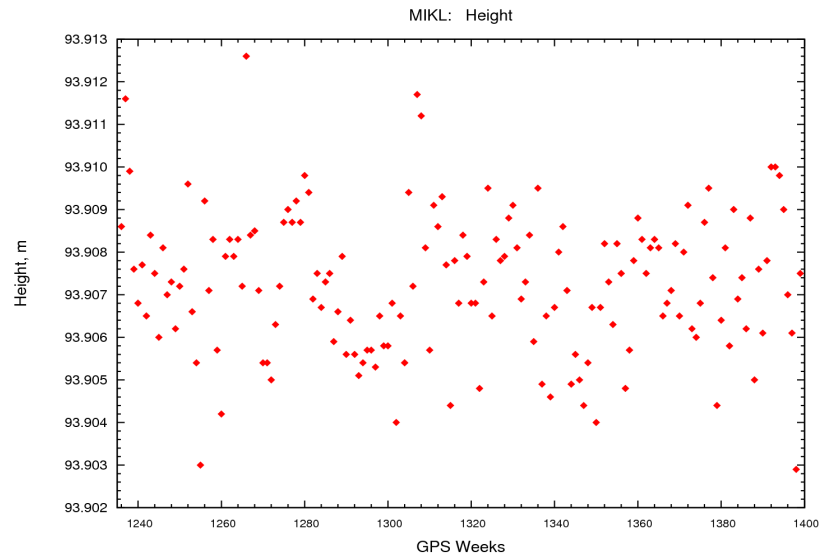
Рис. А. 4. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції POLV



a)



б)



в)

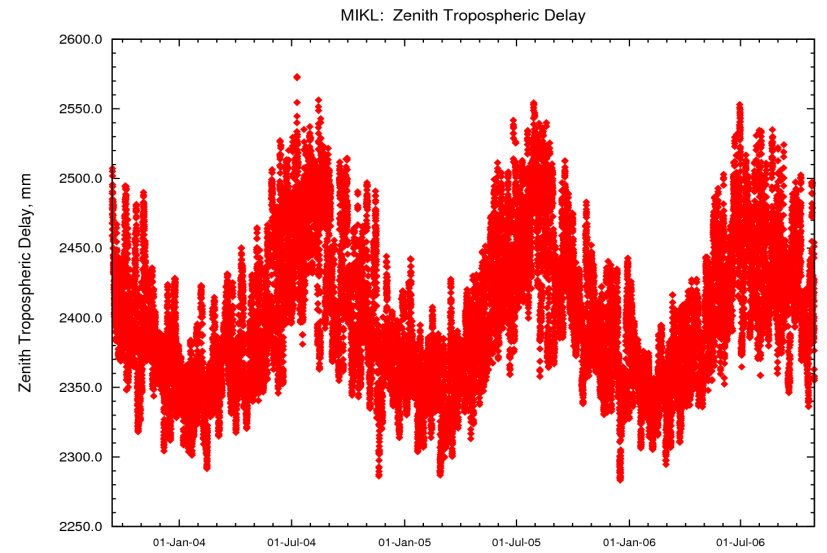


Рис. А. 5. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції МІКЛ

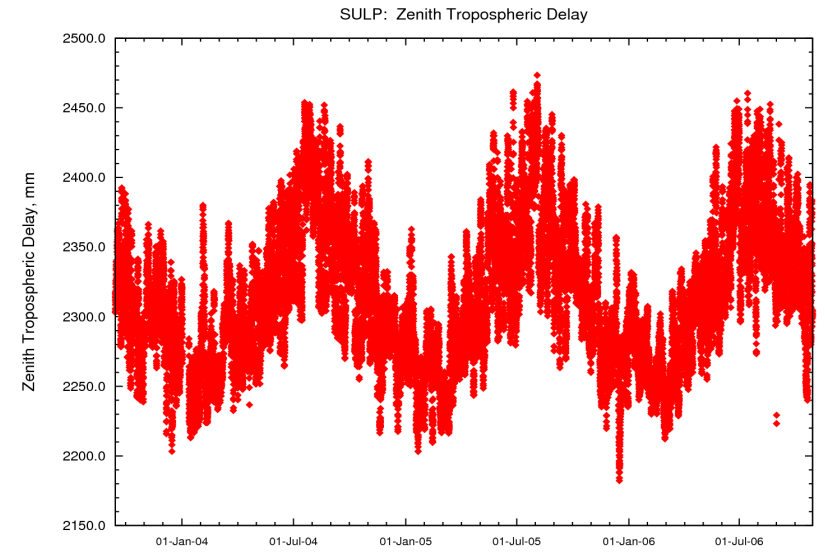
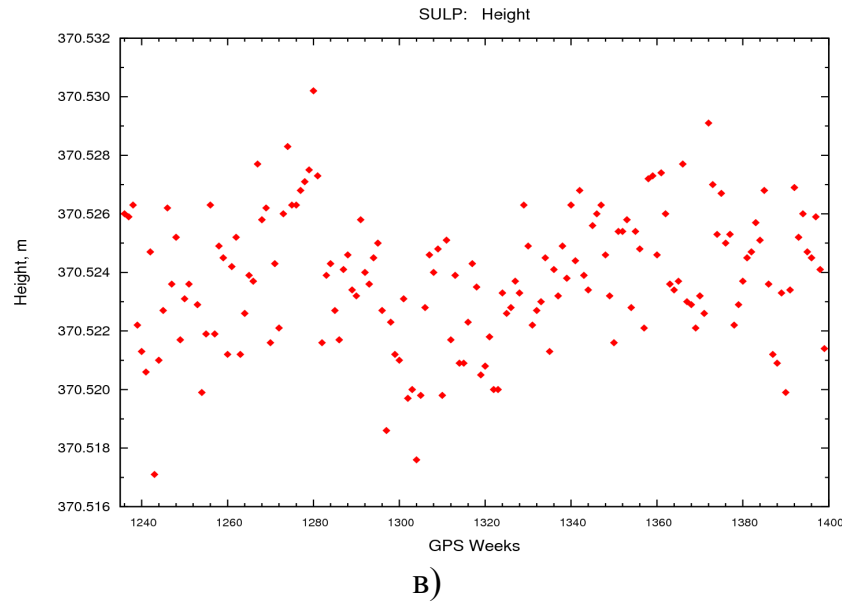
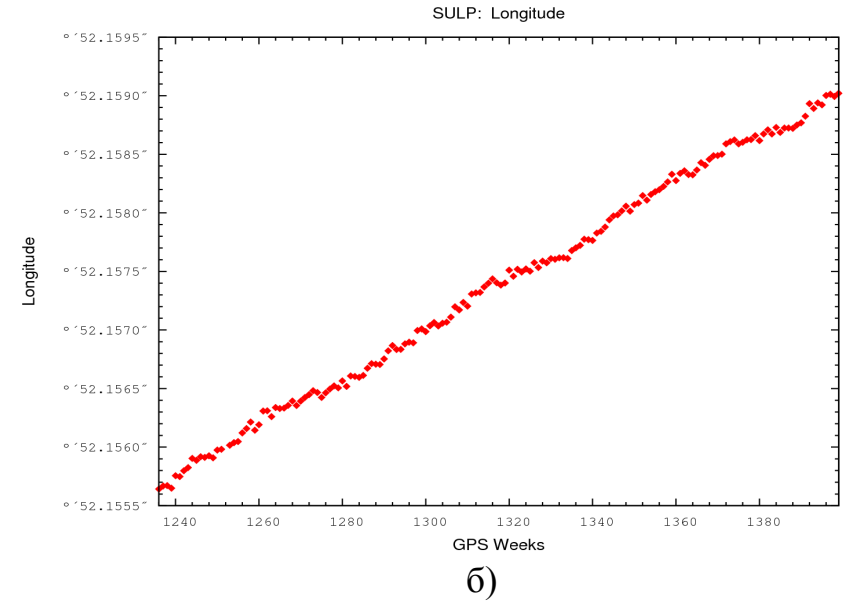
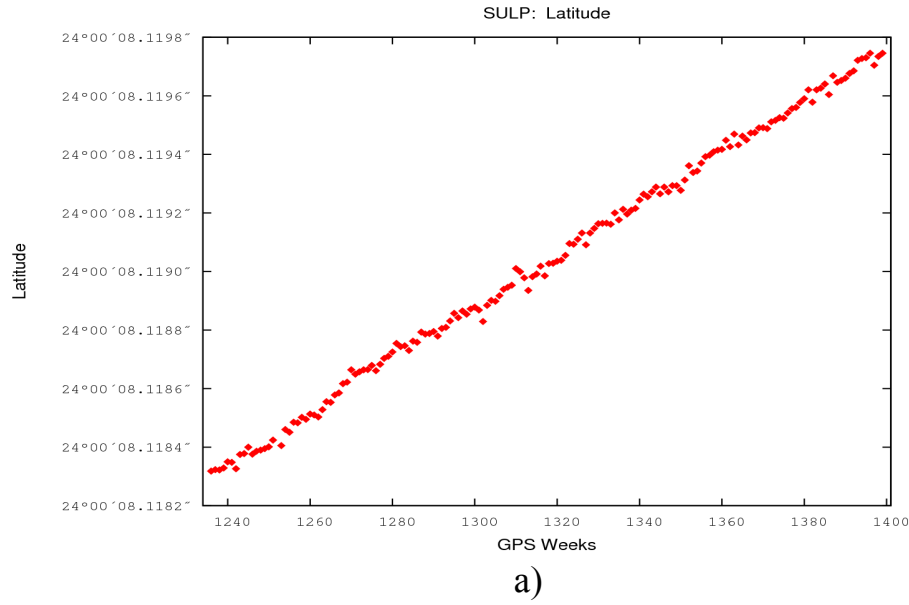
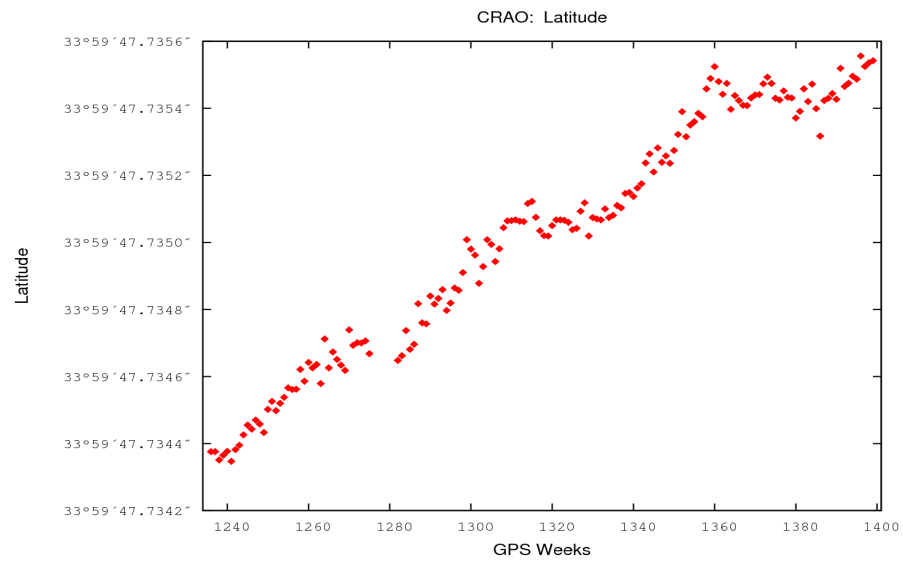
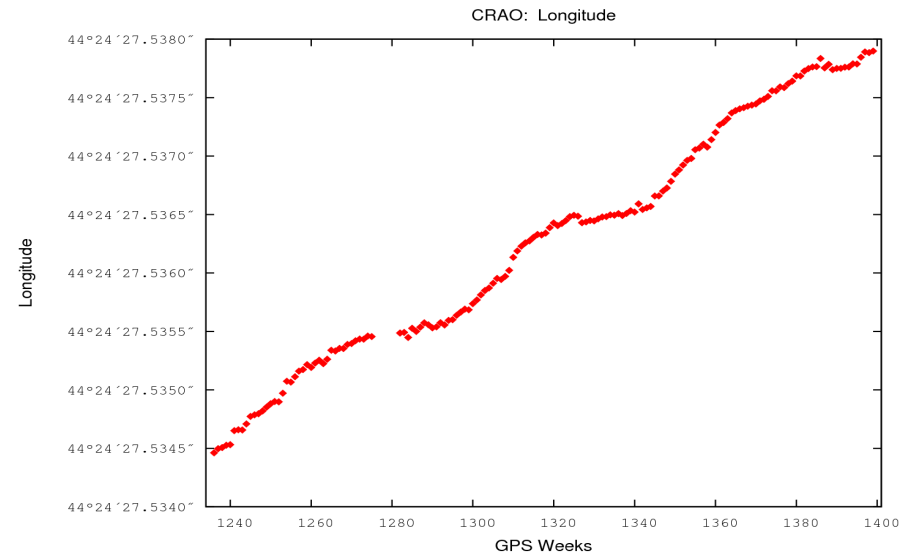


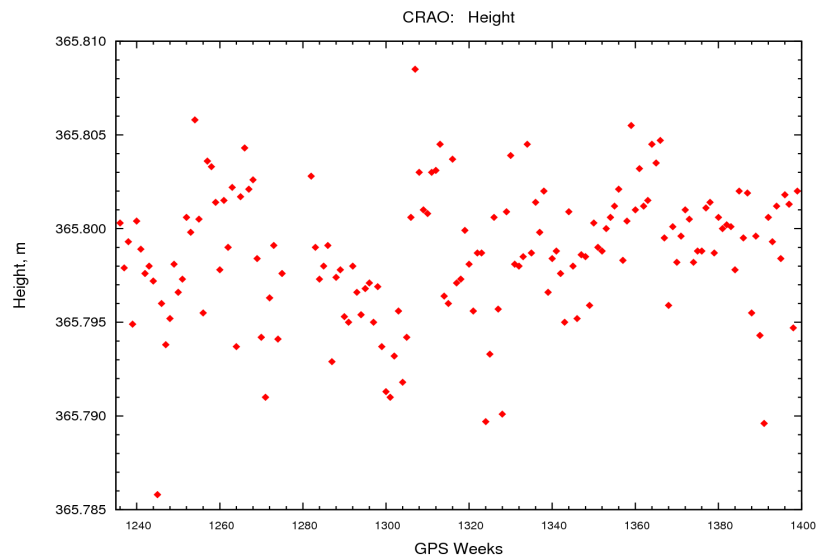
Рис. А. 6. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції SULP



а)



б)



в)

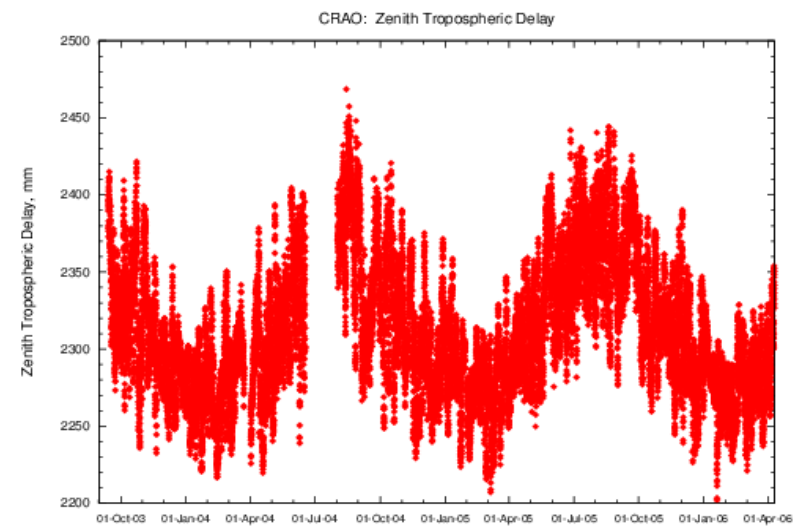
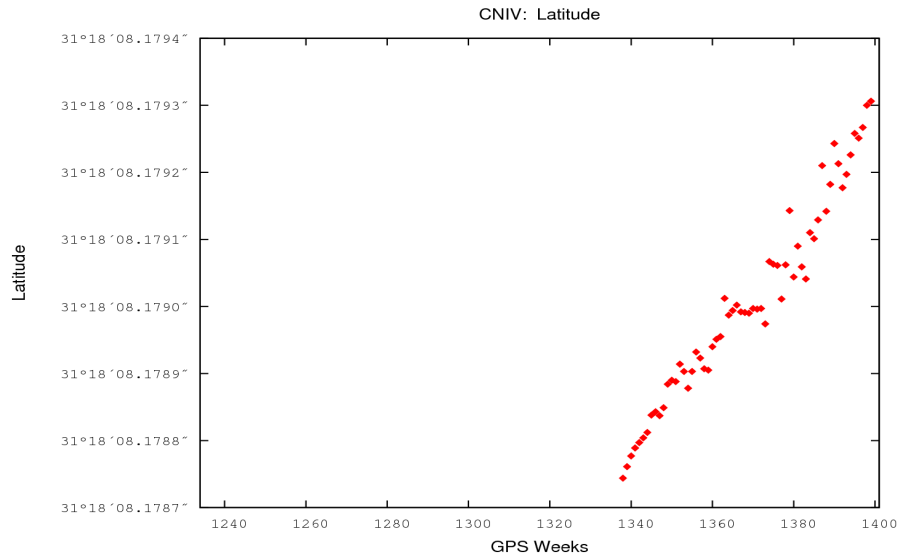
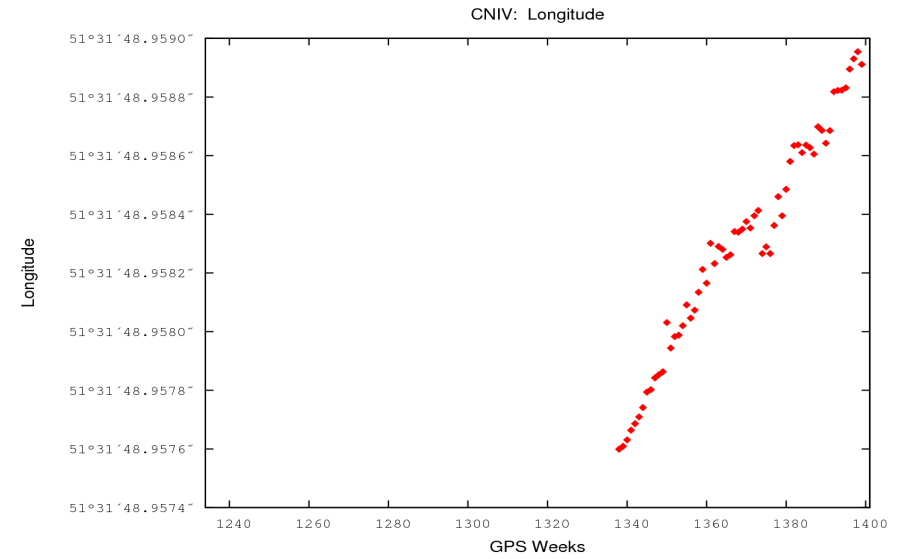


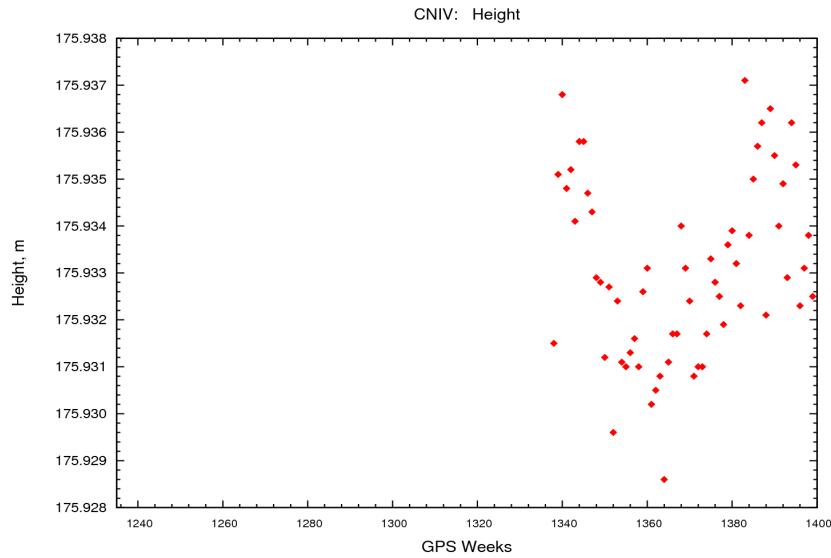
Рис. А. 7. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції CRAO



a)



б)



в)

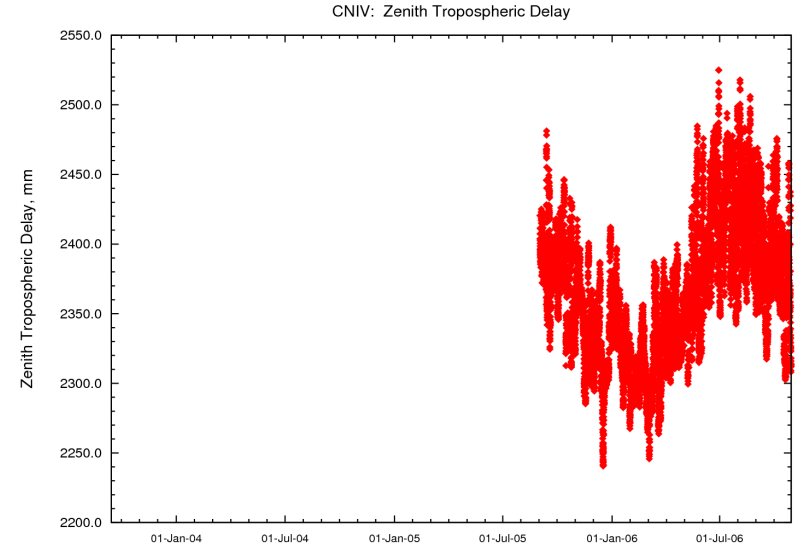
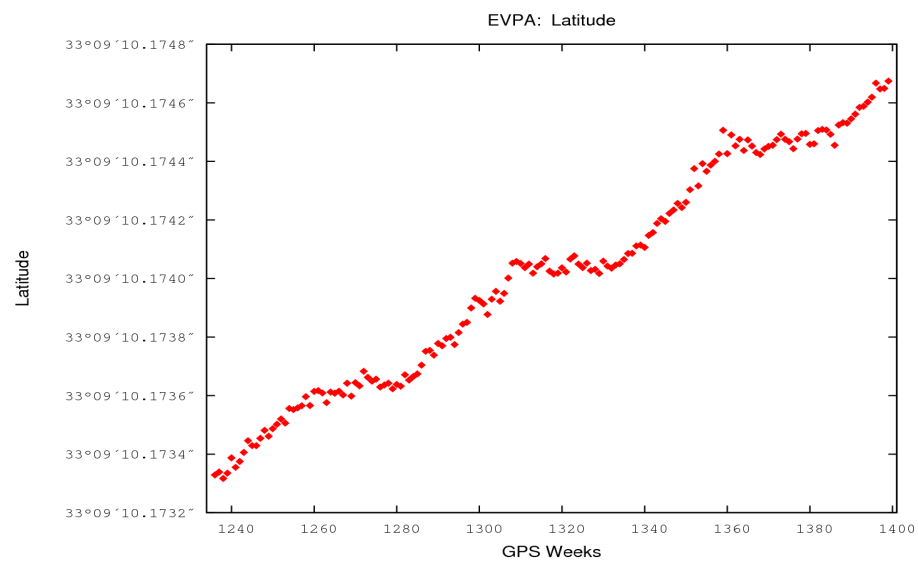
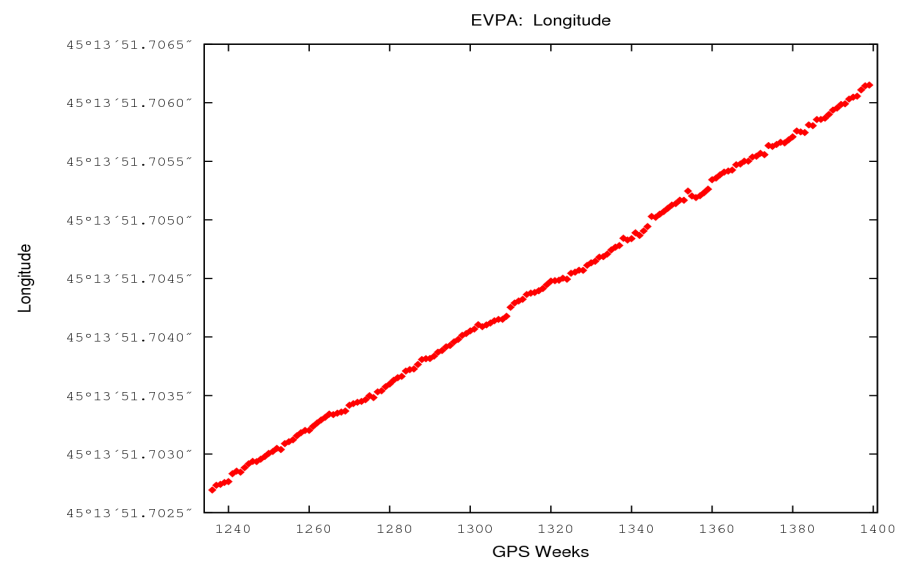


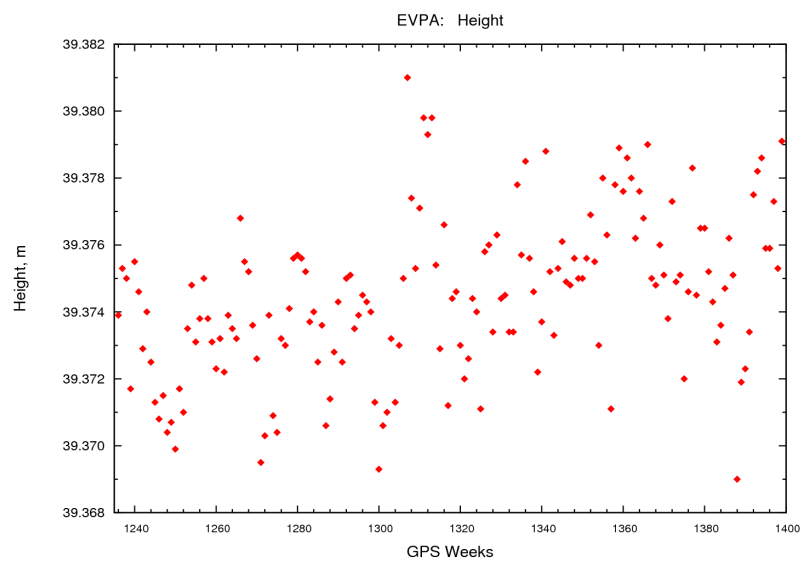
Рис. А. 8. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції CNIV



а)



б)



в)

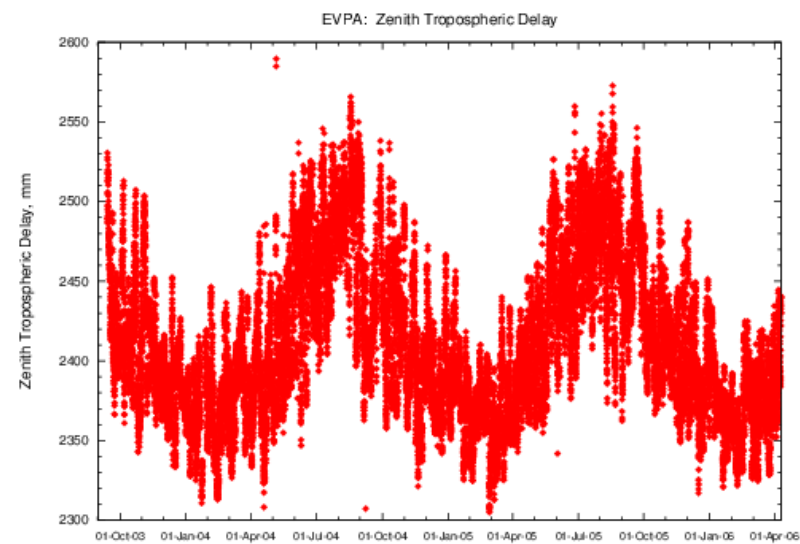
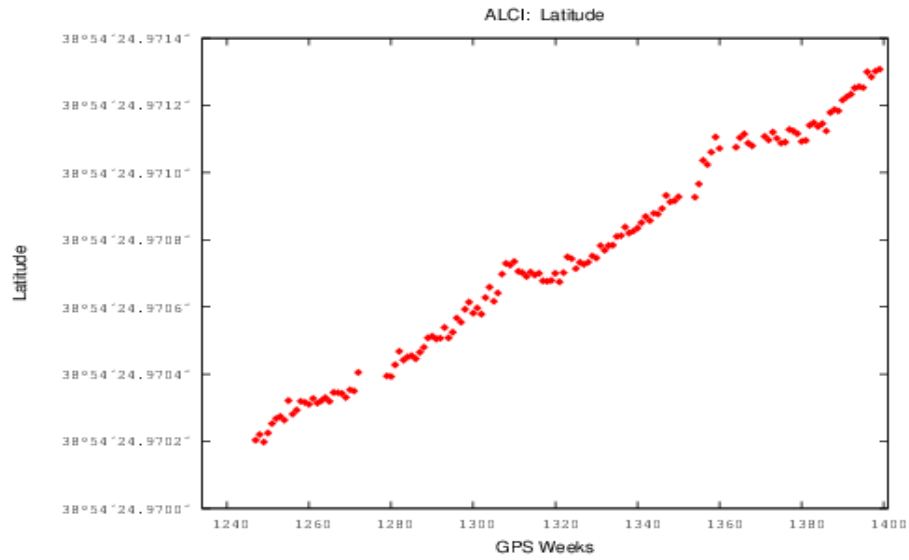
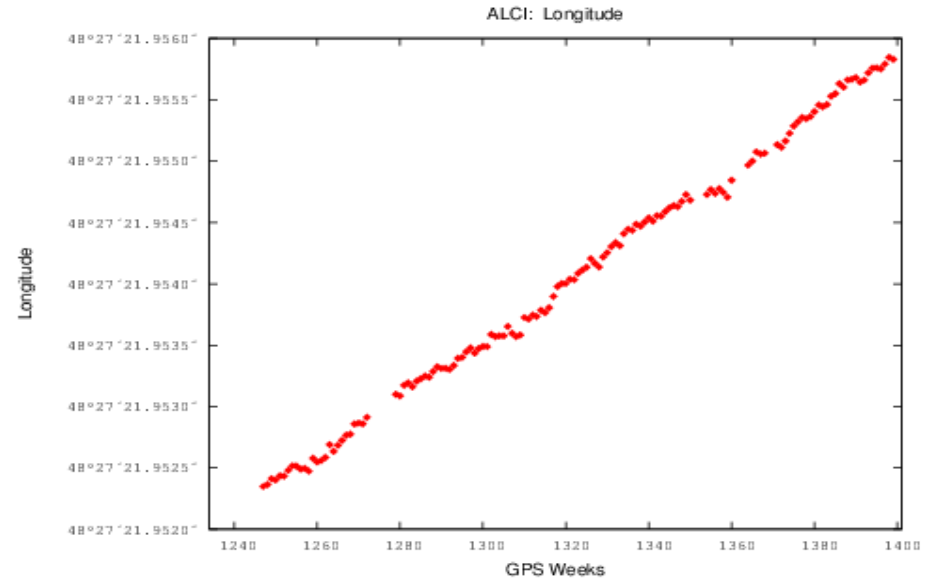


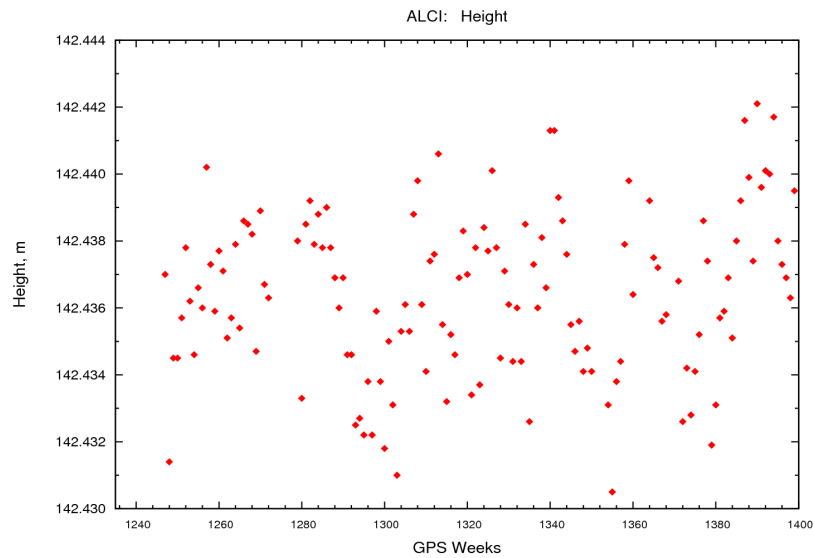
Рис. А. 9. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції EVPA



a)



б)



в)

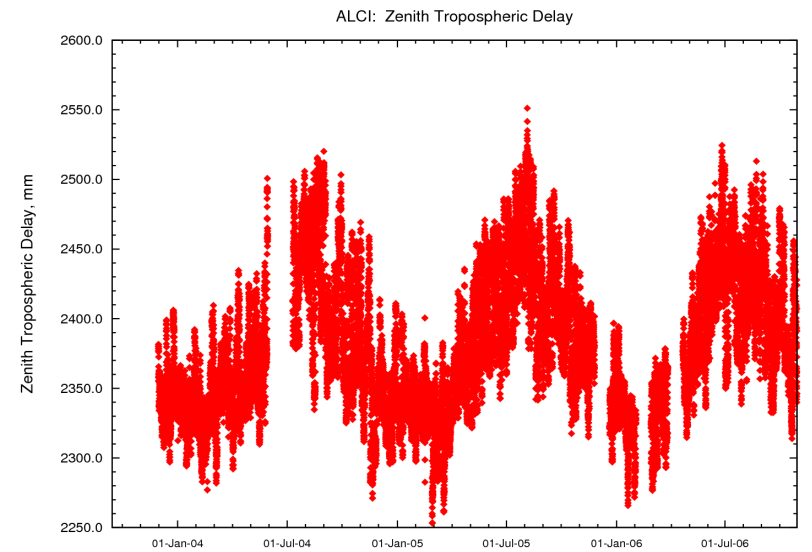
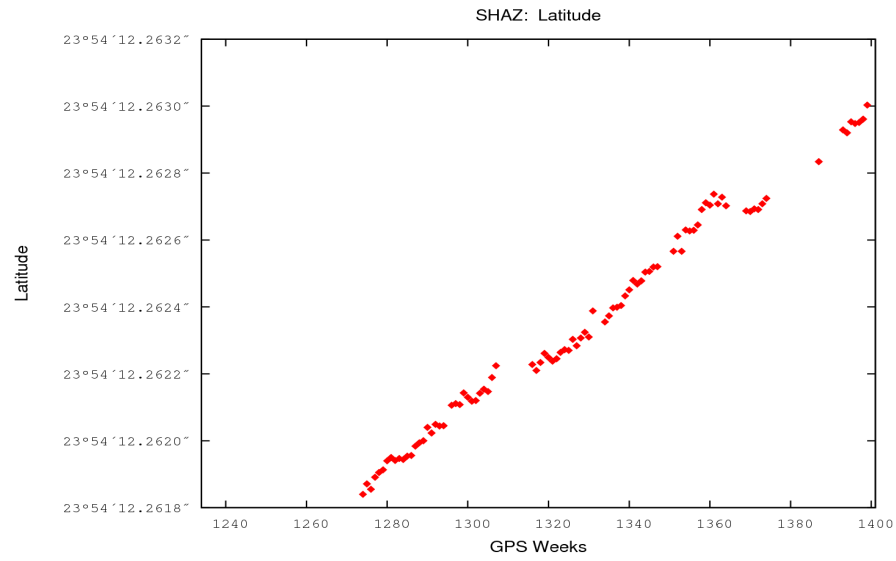
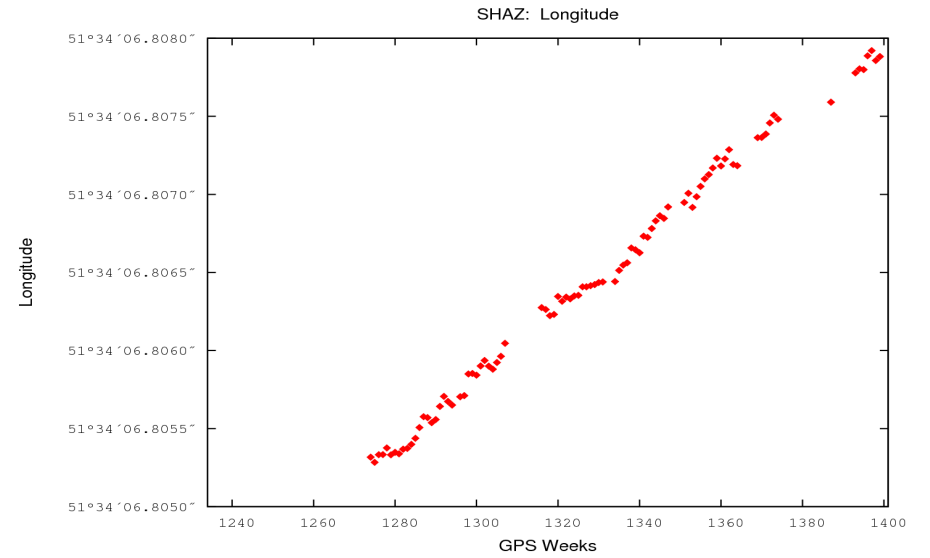


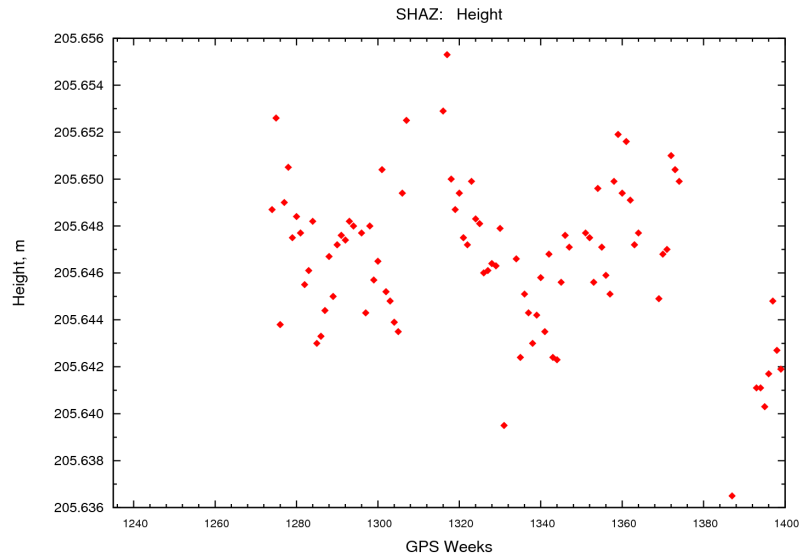
Рис. А. 10. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції ALCI



а)



б)



в)

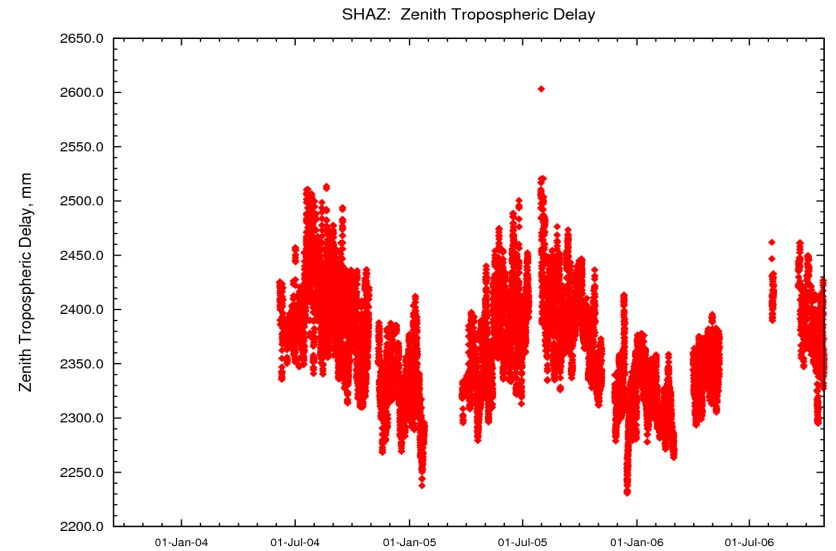
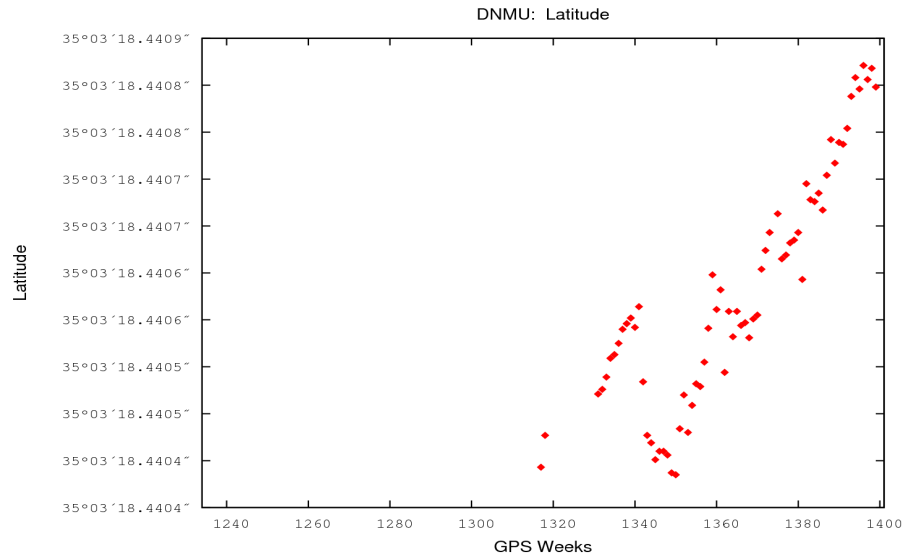
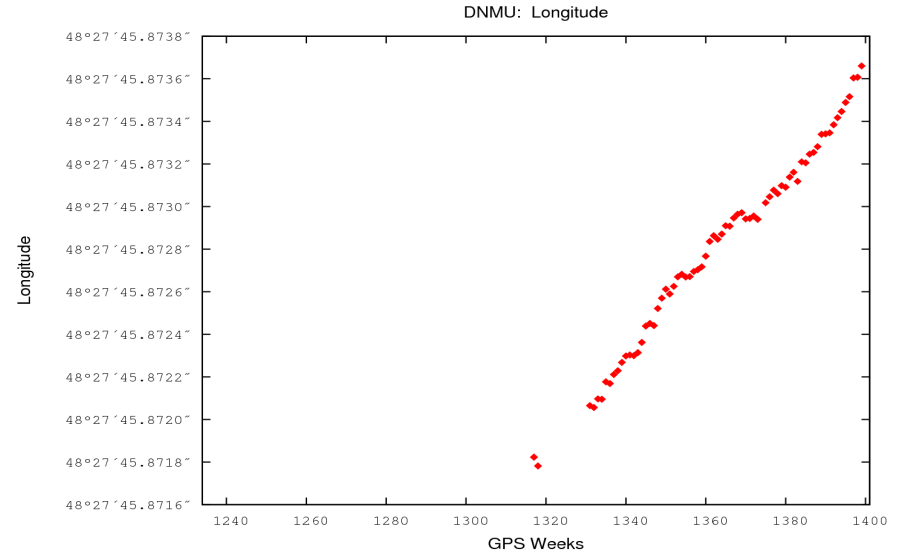


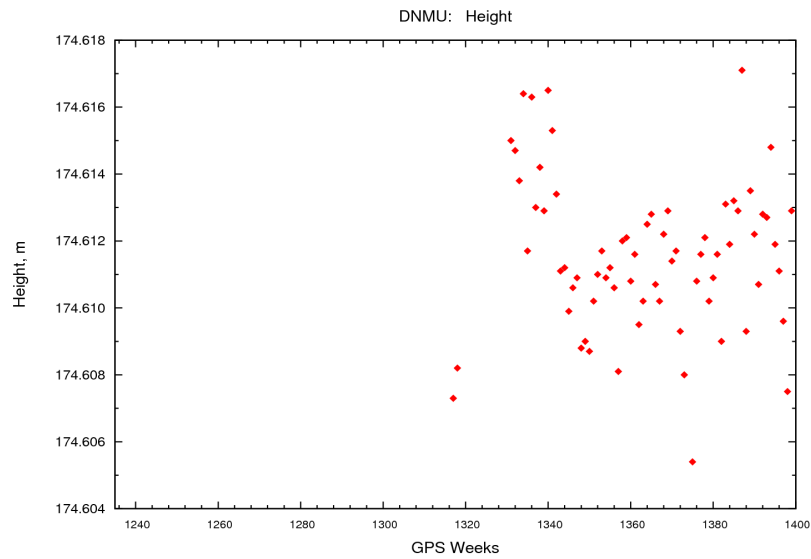
Рис. А. 11. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції SHAZ



а)



б)



в)

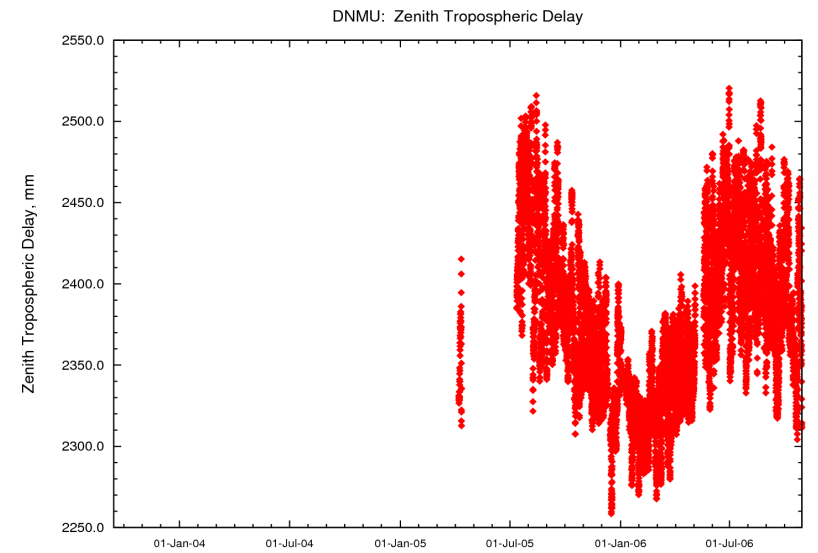


Рис. А. 12. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції DNMU

ДОДАТОК Б

**Зміни значень широти, довготи, висоти та зенітної тропосферної рефракції для
GPS-станцій (GPS-тижні 1236–1631)**

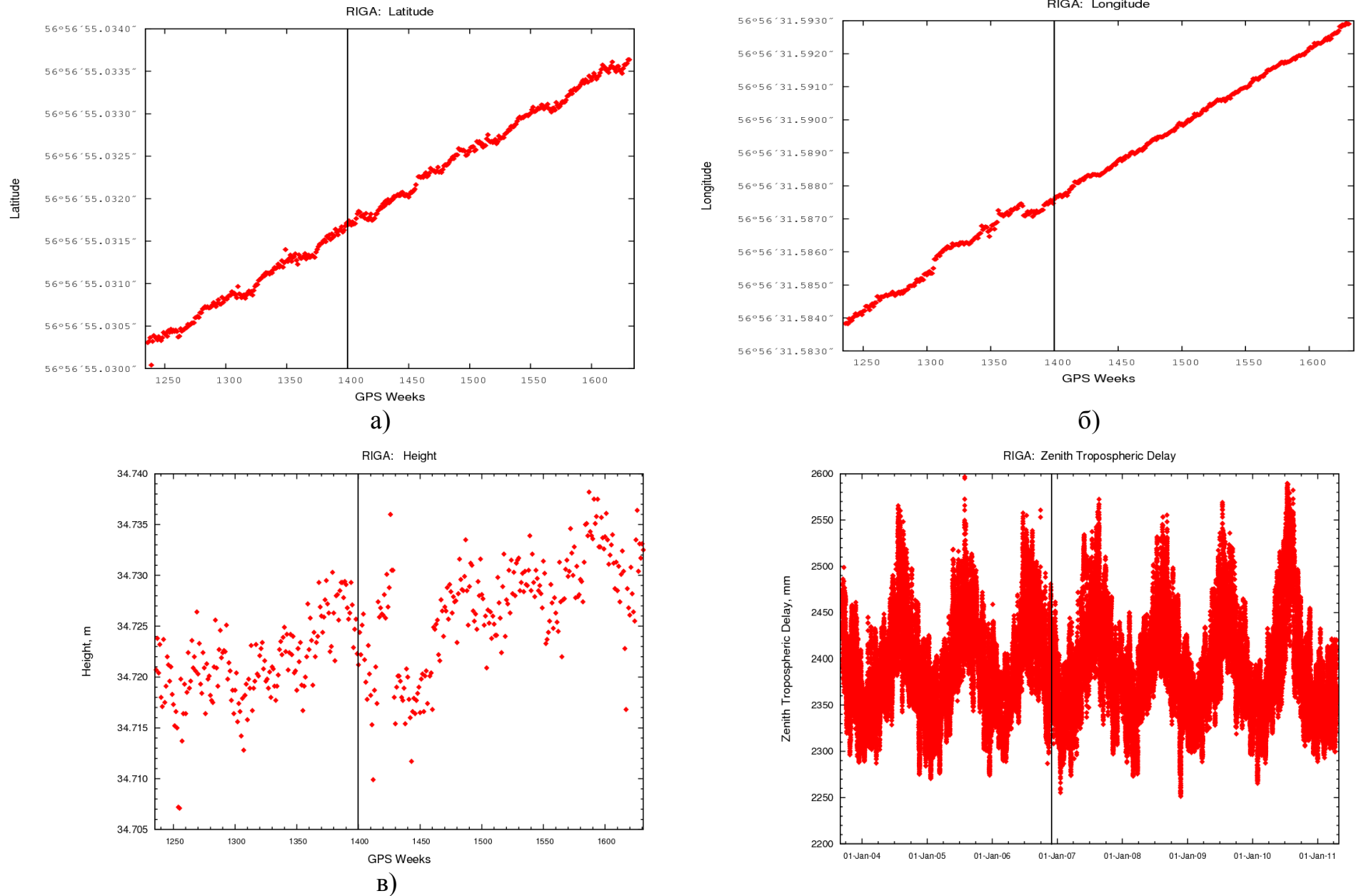
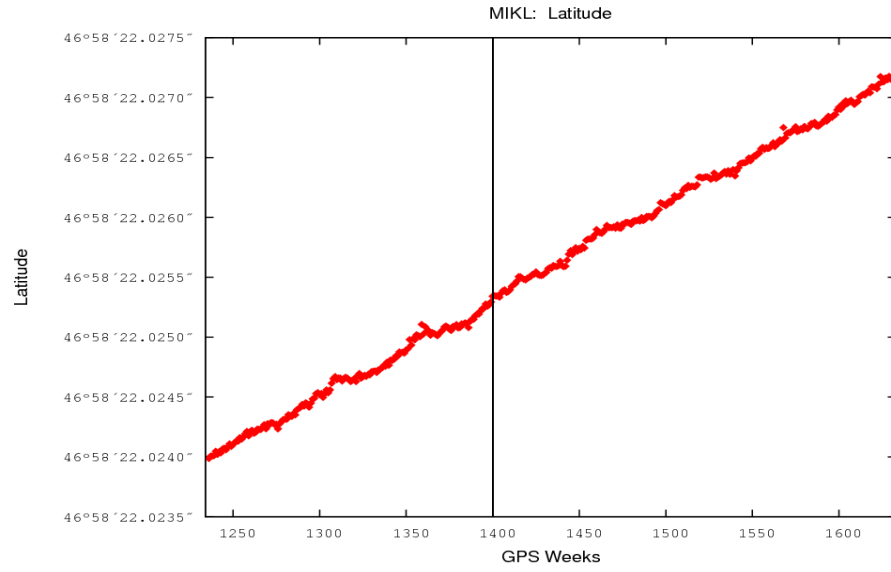
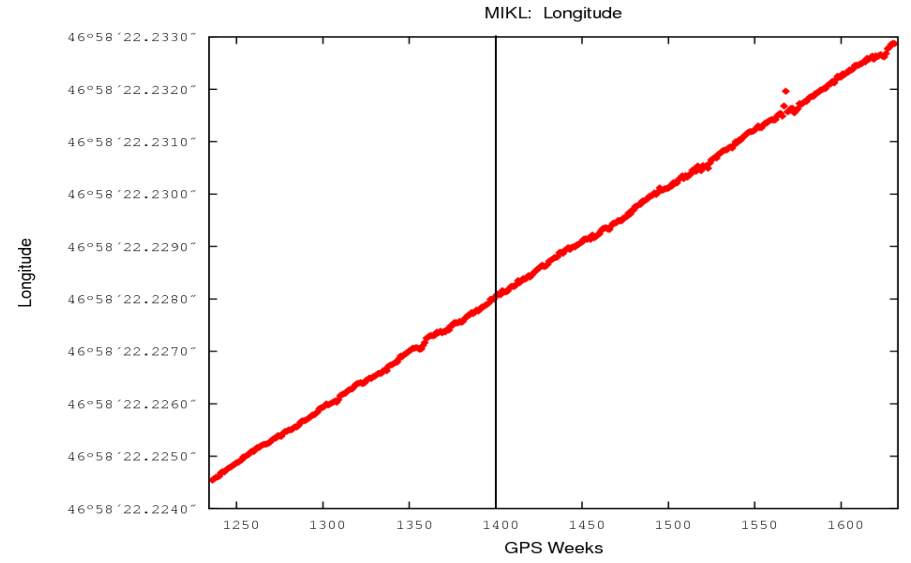


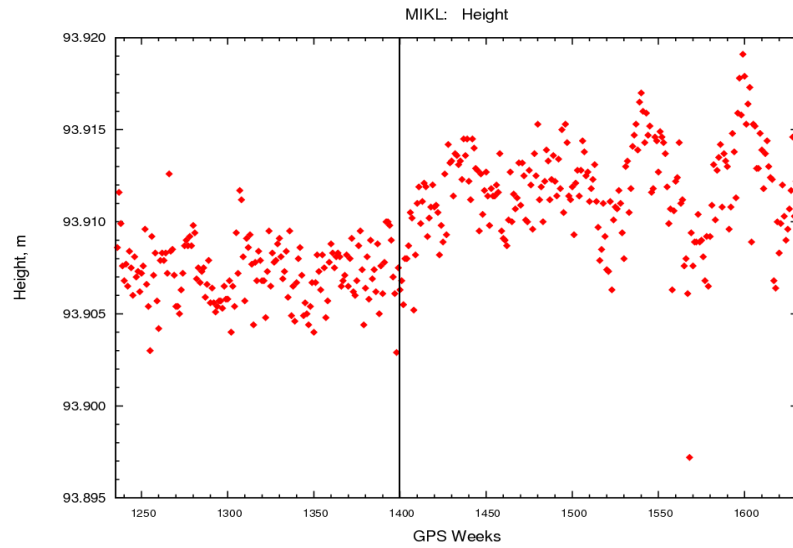
Рис. Б. 1. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції RIGA



а)



б)



в)

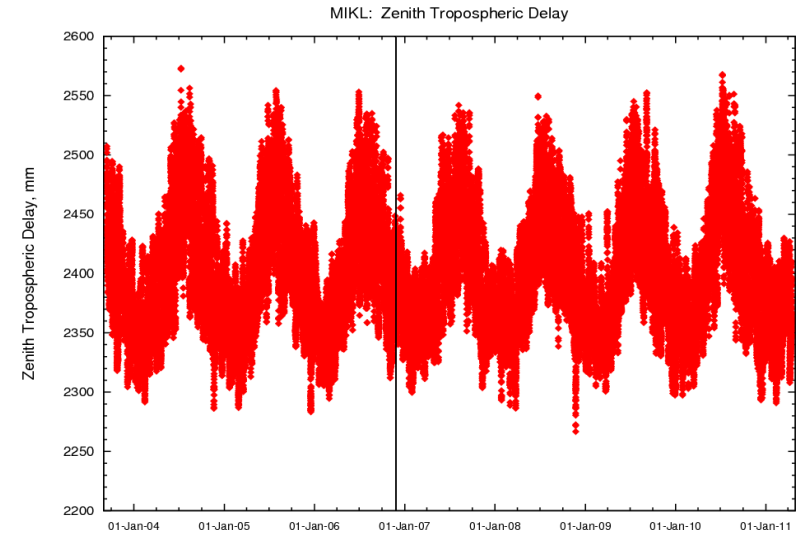


Рис. Б. 2. Координати (а – широта, б – довгота, в – висота) та зенітна тропосферна рефракція на станції МІКЛ