

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ**

ХОДА Олег Олександрович

УДК 528.2:629.78+550.388.2

**СПОСТЕРЕЖЕННЯ СУПУТНИКІВ ГЛОБАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ
МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ (GPS) ДЛЯ ГЕОДИНАМІЧНИХ ТА ІОНОСФЕРНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ В УКРАЇНІ**

Спеціальність 01.03.01 — астрометрія і небесна механіка

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико–математичних наук**

Київ — 2000

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України.

Науковий керівник

доктор фізико–математичних наук,
академік НАН України
Яцків Ярослав Степанович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
директор.

Офіційні опоненти:

доктор фізико–математичних наук, доцент кафедри теорії математичної обробки геодезичних вимірів ДУ "ЛП" Зауляк Петро Михайлович, Державний Університет "Львівська політехніка", декан геодезичного факультету.

кандидат фізико–математичних наук, старший науковий співробітник Тарадій Володимир Кирилович, Міжнародний центр астрономічних та медико–екологічних досліджень НАН України, директор;

Провідна установа

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м. Київ.

Захист відбудеться "_____" _____ 2000 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України (ГАО НАН України, Голосіїв, Київ–127, МСП, 03680). Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО НАН України, Голосіїв, Київ–127, МСП, 03680).

Автореферат розісланий "_____" _____ 2000 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

кандидат фізико–математичних наук

Н.Г. Гусєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За останні півтора десятка років став доступним для використання значний потенціал Глобальної системи визначення місцеположення (GPS), призначеної для навігації та визначення координат різних об'єктів, для наукових та прикладних досліджень. Головними факторами бурхливого розвитку GPS є її всепогодність, оперативність, висока точність, малі габарити приймальної апаратури, простота експлуатації і відносно невелика вартість. До цього слід додати, що конфігурація орбіт GPS-супутників дозволяє практично з будь-якої точки земної поверхні приймати сигнали щонайменше від чотирьох супутників. Висока точність забезпечується принципом вимірювань, який базується на визначенні псевдовідстаней "GPS-супутник — GPS-приймач" по різниці фаз сигналу, прийнятого від супутника, та сигналу, що генерується приймачем.

Вищенаведене визначає актуальність і перспективність використання GPS для рішення широкого спектру наукових задач, пов'язаних з вивченням Землі:

- побудова та підтримка земної системи відліку, яка задається координатами та швидкостями пунктів спостережень,
- вивчення нерівномірності обертання та руху полюсів Землі,
- дослідження деформацій земної поверхні,
- дослідження земної атмосфери та іоносфери.

Якщо на глобальному рівні такі методи космічної геодезії, як радіоінтерферометрія з наддовгими базами (РНДБ), лазерна локація штучних супутників Землі (ЛЛС) та лазерная локація Місяця, можуть конкурувати з GPS, то використання GPS на регіональному рівні та на локальних геодинамічних полігонах є поза конкуренцією через її простоту експлуатації, дешевизну та мобільність груп спостерігачів.

Важливою проблемою обробки GPS-спостережень є врахування впливу іоносферної рефракції на спостереження, отримані за допомогою одночастотних GPS-приймачів. З цією метою необхідно мати моделі іоносфери. Не обійтися без цих моделей й при отриманні рішення при обробці двохчастотних спостережень, виконаних на невеликих базах (до 20 км), тому що використання безіоносферної лінійної комбінації неможливе через високий рівень шуму. При обробці двохчастотних спостережень, виконаних на великих базах, моделі іоносфери використовуються при фіксації фазових невизначеностей.

Крім того отримані з обробки GPS-спостережень моделі іоносфери можуть використовуватись для перевірки моделей іоносфери, отриманих прямими методами вимірювань за допомогою іонозондів, некогерентних розсіювачих радарів тощо.

Всі ці фактори вказують на необхідність створення комп'ютерних програм, що дозволяють оцінювати параметри іоносфери з обробки спостережень GPS–супутників.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що представлені в дисертації, виконувались по плану науково–дослідних тем відділу космічної геодинаміки

- "Експериментальні радіотехнічні та світлолокаційні спостереження небесних тіл та їх обробка", шифр 1.4.6.115, № держреєстрації 01930007615, 1992–1995 рр. (участь в плануванні, організації та проведенні кримської частини кампанії спостережень GPS–супутників РЕКА–94, обробка даних спостережень),
- "Створення та розвиток системи визначення параметрів обертання Землі та шкали всесвітнього часу", шифр 1.4.6/3–Кт "Орієнтація", № держреєстрації 0196U011267, з 1995 р. (створення мережі перманентних GPS–станцій на території України, участь в плануванні, організації та проведенні кампанії спостережень GPS–супутників MAO–LN'97 і обробці даних спостережень),
- "Вивчення змін орієнтації Землі у космічному просторі та інших геодинамічних явищ за даними ЛЛС, РНДБ та GPS–спостережень", шифр 1.4.6/5–169В, № держреєстрації 0196U011266, 1996–1999 рр. (участь в обробці даних спостережень GPS–кампанії GEODUC'95),
- "Розробка теорії та практична побудова земної системи відліку для території України за даними космічних спостережень", шифр 1.4.6.129 "Метрика", 1992–1993 рр. (участь в плануванні, організації та проведенні кампанії спостережень GPS–супутників GEODUC'93),
- "Дослідження змін еквіпотенційної та фізичної поверхні Чорного моря за даними наземних та космічних досліджень", шифр 1.4.6.137 "Поверхня", 1993 р. (участь в плануванні, організації та проведенні кримської частини кампанії спостережень GPS–супутників РЕКА–93),
- "Єдина супутникова система координатно–часового забезпечення об'єктів України", шифр 1.4.6.123 "Метрика–КЧЗ", 1993–1995 рр. (участь в плануванні, організації та проведенні кампанії спостережень GPS–супутників GEODUC'95),

у рамках

- міжнародних проектів WEGENER, SELF, "Геодинаміка Українських Карпат" (GEODUC, 1993–1995 рр.),
- Державної програми "Створення і розвиток Державної служби єдиного часу та еталонних частот, 1995–1999 рр.",
- науково–дослідної роботи "Дослідження глобальних та регіональних явищ та їх зв'язку з особливостями обертання Землі" (1997 р.) проекту "Супутникова геодезія у вирішенні геодинамічних проблем" (п. 22 Українсько–Польської виконавчої програми по співробітництву

в сфері науки і технологій "Протокол першої Українсько–Польської Комісії з співробітництва в галузі науки і технологій", 17–19 березня 1997 р., Договір № 2М/1866–97 від 19 листопада 1997 р.).

Мета і задачі дослідження. Мета і задачі представленої роботи наступні:

- розробка методики прив'язки координатної системи України до Міжнародної земної системи відліку (ITRF) шляхом створення перманентних GPS–станцій на території України,
- розробка програми проведення кампаній GPS–спостережень на геодинамічних полігонах з метою вивчення локальних деформацій земної кори,
- аналіз спостережень GPS–супутників з метою визначення високоточних координат GPS–пунктів на геодинамічних полігонах,
- розробка алгоритмів і програм оцінки параметрів іоносфери з обробки спостережень GPS–супутників,
- розробка алгоритмів і програм, що дозволяють автоматизувати роботу перманентної GPS–станції, та застосування їх на практиці.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше в Україні створена мережа перманентних GPS–станцій, що реалізує на території країни Міжнародну земну систему відліку.
2. З обробки GPS–спостережень отримані високоточні координати пунктів, розташованих
 - на Кримському геодинамічному полігоні (з точністю 1,0–1,5 мм),
 - у Карпатах (проект GEODUC, з точністю 3,0–9,0 мм),
 - на локальному полігоні Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України (ГАО НАН України, з точністю 0,1–1,1 мм).
3. Розроблена і реалізована програма, що дозволяє оцінити в рамках моделі тонкого шару параметри іоносфери з обробки спостережень GPS–супутників.
4. Розроблена і реалізована програма, що дозволяє автоматизувати роботу перманентної GPS–станції.

Практичне значення одержаних результатів. Координати пунктів мережі проекту GEODUC та Кримського геодинамічного полігону можуть бути використані у дослідженнях тектонічних рухів та деформацій цих регіонів. Локальний полігон ГАО НАН України використовується Українським центром стандартизації, метрології та сертифікації для атестації GPS–апаратури.

Дані спостережень на українських перманентних GPS-станціях використовуються Міжнародною геодинамічною GPS-службою (IGS) для обчислення точних ефемерид GPS-супутників, а Українським державним аерогеодезичним підприємством — при обробці кампаній GPS-спостережень прикладного характеру.

Розроблене автором програмне забезпечення Кліо може бути використано для оцінки параметрів іоносфери з метою виключення іоносферної рефракції при обробці одночастотних GPS-спостережень.

Особистий внесок здобувача. Чотири роботи виконано самостійно, п'ять — у співавторстві. У роботах [4, 7, 8] зі списку публікацій автору належать участь у плануванні, організації та проведенні GPS-кампаній РЕКА-94, GEODUC'95 і MAO-LN'97 відповідно, участь в обробці спостережень і аналізі отриманих результатів, у роботі [6] — участь в організації та проведенні GPS-кампаній РЕКА'93 і GEODUC'93, у роботі [9] — установка та супроводження перманентних GPS-станцій, що входять в українську перманентну мережу пунктів космічної геодезії, участь у плануванні, організації та проведенні GPS-кампаній в рамках міжнародного проекту GEODUC, в обробці спостережень та аналізі отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати, що включені до дисертації, були представлені на Шостій Генеральній асамблеї проекту WEGENER (1994 р., м. Санкт-Петербург, Росія), на Четвертому Міжнародному семінарі "GPS у Центральній Європі" (1997 р., м. Пенч, Угорщина), Міжнародній нараді по геодезичним вимірам за допомогою колокацій космічних засобів на Землі (1999 р., м. Токіо, Японія), на Нараді по застосуванню DGPS і ГЛОНАСС на території держав Центрально-Європейської ініціативи (1999 р., м. Трієст, Італія), на Науково-технічному симпозиумі "Геомоніторинг-99" (1999 р., м. Моршин) та на семінарах відділу космічної геодинаміки ГАО НАН України.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у дев'яти роботах: чотирьох статтях у наукових журналах [1–4 зі списку публікацій] і п'яти статтях у матеріалах наукових конференцій і семінарів [5–9 зі списку публікацій].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел, що містить 86 найменувань на дев'яти сторінках. Загальний обсяг дисертації складає 126 сторінок, у тому числі 20 ілюстрацій (на шести сторінках) та 43 таблиці (на 18 сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету роботи, відмічено її наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** описана Глобальна система визначення місцеположення, історія її розвитку та структура. Наводиться структура сигналів, які передають GPS-супутники, записані основні рівняння для величин, що спостерігаються.

Глобальна система визначення місцеположення — всепогодна навігаційна система космічного базування, розроблена Міністерством оборони США для неперервного забезпечення збройних сил, розташованих у будь-якому місці на поверхні Землі або поблизу неї, високоточними даними про їх положення, швидкість та час у єдиній системі відліку. GPS складається з трьох сегментів: космічного, контрольного та сегмента користувачів.

GPS-супутники передають спеціальні сигнали на двох частотах L_1 ($f_1 = 1575,42$ МГц) та L_2 ($f_2 = 1227,60$ МГц). Ці частоти-носії модулюються двома кодами та навігаційним повідомленням для передачі інформації про покази годинників GPS-супутників, параметри орбіти тощо.

Всі величини, що спостерігаються при використанні GPS, являють собою дані типу відстаней між фазовими центрами антени GPS-супутника й антени GPS-приймача (далі відстань "супутник-приймач"). Особливість цих величин полягає в тому, що вони є псевдовідстанями і виражаються у вигляді суми справжньої відстані та малої додаткової величини, зумовленої похибками апаратного характеру.

Кодова псевдовідстань R_{Rj}^S обчислюється шляхом множення швидкості розповсюдження сигналу на виміряний проміжок часу, необхідний для подолання відстані від супутника до приймача:

$$R_{Rj}^S = \rho_R^S + \Delta \rho_j^{ion} + \Delta \rho^{tropo} - \Delta \rho^{rel} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R - v_{Rj}^S, \quad (j=1, 2)$$

де ρ_R^S — геометрична відстань "супутник-приймач",

$\Delta \rho_j^{ion}$ — іоносферна рефракція,

$\Delta \rho^{tropo}$ — тропосферна рефракція,

$\Delta \rho^{rel}$ — релятивістська поправка,

c — швидкість світла,

Δt^S та Δt_R — похибки синхронізації годинників супутника та приймача відповідно,

v_{Rj}^S — шум вимірів плюс немодельовані ефекти.

Порівняння фази сигналу, переданого з GPS-супутника, з фазою сигналу, що генерується GPS-приймачем, дає можливість отримати різницю фаз. В перший момент часу вимірюється лише дробна частина фази, а число цілих циклів N_j в цей момент є невідомим. Якщо спостереження даного GPS-супутника здійснювались без втрати стеження, то це число, що називається фазовою невизначеністю, залишається постійним. Рівняння для фазової псевдовідстані Φ_j записується у вигляді:

$$\Phi_j = \rho_{Rj}^S + \Delta \rho_j^{ion} + \Delta \rho^{tropo} - \Delta \rho^{rel} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + \lambda_j N_j - v_{Rj}^S,$$

де λ_j — довжина хвилі, що відповідає частоті f_j ($j=1, 2$).

Важливою подією в історії розвитку GPS є початок роботи 1 січня 1994 р. Міжнародної геодинамічної GPS-служби. Центри аналізу даних IGS за даними спостережень на перманентних GPS-станціях отримують високоточні ефемериди GPS-супутників, параметри обертання Землі, координати та швидкості GPS-станцій мережі IGS, поправки до годинників GPS-супутників, іоносферну та тропосферну інформацію. Всі продукти IGS є відкритими і доступні будь-кому через Інтернет.

У **другому розділі** описана мережа українських перманентних GPS-станцій, створена з метою прив'язки координатної системи України до Міжнародної земної системи відліку. На цей час мережа включає три перманентні GPS-станції: GLSV (Голосіїв, м. Київ), UZHL (м. Ужгород) та EVPA (м. Євпаторія). Станції Голосіїв та Ужгород входять до складу мереж IGS та EUREF. Відповідно до вимог IGS [6] спостереження на всіх станціях організовані таким чином:

- початок сесій о 00:00 UTC кожної доби;
- кінець сесій о 23:59 UTC кожної доби;
- інтервал реєстрації сигналів від GPS-супутників: 30 секунд, починаючи з секунди "0";
- мінімальний кут місця для супутників, що спостерігаються: $+5^\circ$.

Робота GPS-станцій повністю автоматизована за допомогою розроблених автором алгоритмів та програм. Керування здійснюється програмою-менеджером GGPS, що являє собою набір сценаріїв інтерпретатора команд Bourne Again Shell операційної системи Linux, які формують команди керування GPS-приймачем або файлами даних спостережень. При цьому використовуються так звані R-утіліти фірми Trimble Navigation Ltd, програма перетворення різних бінарних форматів даних у формат RINEX [7] та перевірки якості отриманих даних teqc [5], програма перетворення даних з формату RINEX у формат Compact RINEX [8].

Цей розділ також присвячений використанню GPS-технології на геодинамічних полігонах в Україні.

Кримський геодинамічний полігон розташований на південному узбережжі Кримського півострову в районі селищ Сімеїз і Кацівелі. На полігоні знаходяться дві станції ЛЛС 1873 Simeiz та 1893 Katsively, радіотелескоп РТ-22, оснащений системою реєстрації радіосигналів MARK III, абсолютний та відносні гравіметричні пункти, водомірний пост, ґрунтовий маркер SIME, до якого здійснювалась прив'язка референцної точки мобільної станції ЛЛС 7561 Simeiz, інші додаткові маркери.

Кримський геодинамічний полігон є комплексним полігоном, на якому досліджуються особливості геодинаміки цього сейсмоактивного району Криму. Наявність на полігоні різних інструментів супутникової геодезії дозволяє порівняти результати різних методів спостережень.

На території Кримського геодинамічного полігону були проведені спостереження GPS-супутників у рамках міжнародних кампаній РЕКА-93 і РЕКА-94. Одночасно з кампанією РЕКА-94 була організована GPS-кампанія з метою визначення локальних прив'язок на цьому полігоні.

Обробка спостережень GPS-кампанії РЕКА-94, що проводилися в Криму, виконана автором за допомогою комплексу Bernese v.3.5 [3]. В результаті були отримані координати пунктів полігону з внутрішньою точністю рішення 1,0–1,5 мм. Координати маркера мобільної станції ЛЛС і РТ-22, обчислені з GPS-рішення з врахуванням ексцентриситетів, отриманих з високоточних геодезичних вимірів, співпадають з координатами з рішень ITRF92 та ITRF93 в межах помилок обчислень. Розбіжності аналогічних координат для двох станцій ЛЛС можуть бути пояснені помилками калібровки цих станцій.

У рамках міжнародного українсько-польсько-угорського проекту "Геодинаміка Українських Карпат" [2] були проведені дві кампанії спостережень GPS-супутників GEODUC'93 та GEODUC'95. В результаті обробки даних GPS-кампанії GEODUC'95, виконаної в ГАО НАН України, були визначені повторні координати пунктів даного проекту. Помилки визначення координат склали 3 мм (9 мм), помилки визначення довжин баз — 1–3 мм (5–10 мм) для приймачів типу "Trimble" ("Ashtech").

Враховуючи, що деякі різниці довжин баз між рішеннями GPS-кампаній GEODUC'95 і GEODUC'93 більше середніх квадратичних відхилень побазових рішень, а також землетруси та зсуви ґрунту, що відбулися у Закарпатті восени та взимку 1998 р., слід зробити висновок про необхідність проведення подальших спостережних кампаній у цьому регіоні.

На локальному полігоні ГАО НАН України знаходяться станція ЛЛС, астрономічний пункт, перманентна GPS-станція, GPS-пункт KIEA, на якому проводились спостереження під час низки міжнародних кампаній, у т.ч. EUREF-UKR'95, додаткові маркери. З обробки даних GPS-

кампанії, проведеної на цьому полігоні в серпні 1997 р., були отримані координати вказаних пунктів з точністю 0,1–1,1 мм. Різниці координат, отримані з GPS-рішення й обробки високоточних геодезичних вимірів, для пунктів з доброю видимістю GPS-супутників знаходяться в межах помилок обчислень.

Третій розділ присвячений визначенню параметрів іоносфери із GPS-спостережень. Вплив іоносфери є одним з основних джерел помилок при проведенні спостережень GPS-супутників. В період підвищеної сонячної активності іоносферна рефракція може досягати порядку 50 м. На практиці використовуються лінійні комбінації фазових спостережень, які в деякому наближенні виключають вплив іоносфери. При цьому використовується той факт, що GPS-супутники передають сигнали на двох частотах.

Використовуючи спостереження GPS-супутників на пунктах з добре відомими координатами, можна побудувати модель іоносфери над територією, що покривається цими пунктами.

Розроблене програмне забезпечення Klio призначене для оцінки параметрів іоносфери за даними GPS-спостережень. Умовно програму Klio можна розбити на чотири блоки:

- блок перетворення вхідних даних у внутрішній формат;
- блок перевірки якості даних та визначення моментів стрибків фаз;
- блок визначення параметрів іоносфери;
- блок допоміжних програм.

Вхідними даними служать файли спостережень GPS-супутників у форматі RINEX [7], точні ефемериди GPS-супутників у форматі SP3 [10], об'єднані ряди параметрів обертання Землі (C04-файли) [1, с. I-37 — с. I-39]. Вказані вхідні файли є текстовими, що робить незручним їх швидку обробку. Для запису цих файлів у бінарному форматі служить блок перетворення вхідних даних.

Фазова невизначеність залишається постійною до того моменту, доки не буде перерви в спостереженнях даного супутника. Перерва в спостереженнях спричиняє стрибок фази на цілу кількість циклів. Кожний стрибок фази призводить до збільшення кількості невідомих параметрів при обробці GPS-спостережень. Тому для коректної обробки даних необхідно знати моменти всіх стрибків фази. Для визначення цих моментів, а також для маркування поганих спостережень, призначений блок перевірки якості даних.

Параметри іоносфери оцінюються в рамках моделі тонкого шару. Ця модель базується на припущенні, що всі вільні електрони знаходяться на сферичному безмежно тонкому шарі на деякій висоті над земною поверхнею. Модель тонкого шару не є точною моделлю іоносфери. По-перше, розглядається залежність параметрів іоносфери лише від одного фактору —

положення Сонця (місцевого сонячного часу). По-друге, ця модель може бути названою моделлю "замороженої" іоносфери, тобто іоносфера зображується як сферичний шар з опуклістю, що рухається над поверхнею Землі синхронно з рухом Сонця по небесній сфері. По-третє, зміни з часом усередині іоносфери в моделі тонкого шару не розглядаються.

Параметри іоносфери оцінюються за допомогою фазової комбінації L_4 [11, с. 33]:

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2 = (\Delta \rho_1^{ion} - \Delta \rho_2^{ion}) + N_4 - v_{R4}^S,$$

де $N_4 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2,$

$$v_{R4}^S = v_{R1}^S - v_{R2}^S.$$

Іоносферну рефракцію на частоті f_j ($j=1, 2$) можна записати у вигляді [9]:

$$\Delta \rho_j^{ion} = -\frac{C^{ion}}{f_j^2} \cdot TVEC \cdot M(z),$$

де $C^{ion} \approx 40,3 \text{ м}^3/\text{с}^2,$

$TVEC$ — загальний вміст електронів у зеніті,

$M(z)$ — коефіцієнт нахилання,

z — зенітна відстань GPS-супутника.

$TVEC$ моделюється у вигляді розвинення у ряд Тейлора по географічній широті b та годинному куту Сонця s :

$$TVEC(b, s) = \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} E_{ik} \cdot (b - b_0)^i \cdot (s - s_0)^k,$$

де $E_{ik} = \frac{1}{i!k!} \left. \frac{\partial^{i+k} TVEC}{\partial^i b \partial^k s} \right|_{b_0, s_0}, \quad i = 0 \dots i_{\max}, \quad k = 0 \dots k_{\max},$

(b_0, s_0) — точка розвинення,

s_0 — годинний кут Сонця, що відповідає середині інтервалу спостережень,

b_0 — середнє значення широт всіх GPS-пунктів, що використовуються для обчислення моделі.

Отримане рівняння

$$-C^{ion} \cdot M(z) = \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} E_{ik} \cdot (b - b_0)^i \cdot (s - s_0)^k \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + N_4 - \Phi_4 = v_{R4}^S$$

лінійне по відношенню до невідомих параметрів E_{ik} та константи N_4 . Ці невідомі величини оцінюються рекурсивно за допомогою квадратно–кореневого інформаційного фільтру [4].

Для перевірки працездатності програмного забезпечення Klio були оброблені спостереження GPS–супутників, що відбувалися в рамках GPS–кампанії GEODUC'95. Ті ж спостереження були оброблені комплексом Bernese v.3.5 [3] з тими ж вхідними параметрами. Це дозволило порівняти отримані результати й оцінити якість роботи програми Klio.

Моделі тонкого шару будувалися в основному на чотирьохгодинних інтервалах часу спостережень з використанням даних з одного, двох, трьох та чотирьох GPS–пунктів з різними умовами видимості GPS–супутників.

Значення коефіцієнтів розвинення в ряд Тейлора, обчислені обома програмами, близькі, і відмінності між моделями, побудованими з використанням цих коефіцієнтів, не перевищують значення 0,25 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ електронів/м}^2$). Слід зауважити, що середня точність визначення загального вмісту електронів (TEC) для GPS–пунктів у середніх широтах при використанні моделі тонкого шару складає 3–4 TECU [12, с. 146].

На рис. 1 показано зміни загального вмісту електронів над пунктом LVIV під час проведення кампанії GEODUC'95, отримані по моделям, розрахованим за допомогою програми Klio, а на рис. 2 — різниці між TEC для цього пункту, отриманими обома програмами.

У **висновках** наведено основні результати дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведені результати використання спостережень GPS–супутників для геодинамічних та іоносферних досліджень в Україні.

З метою прив'язки координатної системи України до Міжнародної земної системи відліку на території країни встановлені три перманентні GPS–станції: GLSV (Голосіїв, м. Київ), UZHL (м. Ужгород) та EVPA (м. Євпаторія). Станції Голосіїв і Ужгород включені до міжнародних мереж IGS та EUREF. Режим роботи всіх трьох станцій відповідає вимогам цих організацій. Робота станцій повністю автоматизована за допомогою розроблених автором алгоритмів і програм.

З метою вивчення локальних деформацій земної кори було проведено ряд кампаній спостережень GPS–супутників на геодинамічних полігонах на території України. Із обробки GPS–спостережень були отримані високоточні координати пунктів цих полігонів.

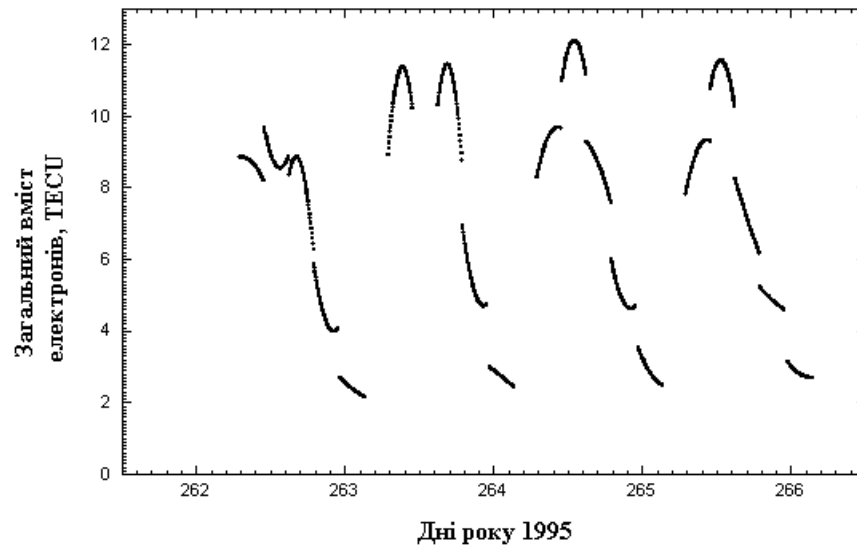


Рис. 1. TEC над пунктом LVIV, отриманий за допомогою програми Кліо

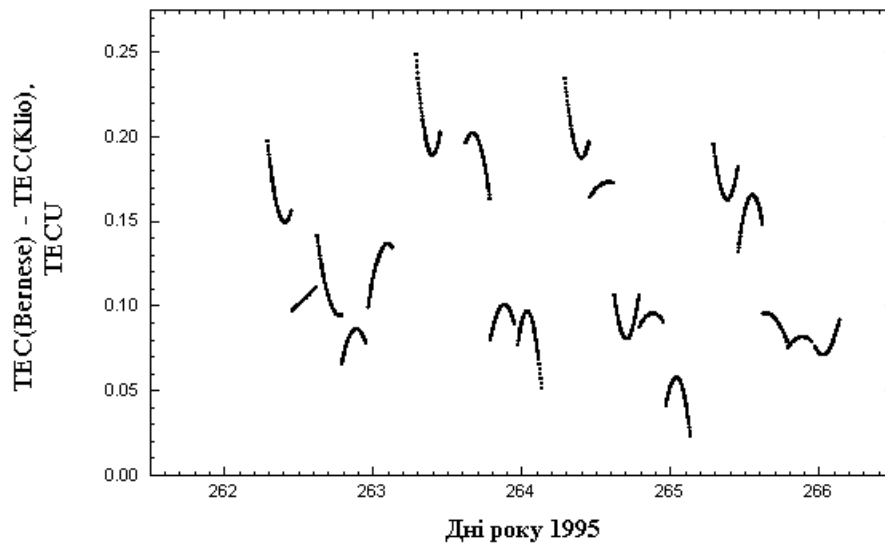


Рис. 2. Різниці TEC над пунктом LVIV

Були організовані та проведені кримські частини міжнародних кампаній GPS–спостережень РЕКА–93 та РЕКА–94. Одночасно з кампанією РЕКА–94 була зпланована, організована й проведена GPS–кампанія на Кримському геодинамічному полігоні (Сімеїз–Кацівелі). Після обробки даних спостережень GPS–супутників під час цієї кампанії були отримані координати пунктів полігону з внутрішньою точністю рішення 1,0–1,5 мм. Координати маркера мобільної станції ЛЛС і РТ–22, обчислені з GPS–рішення з врахуванням ексцентриситетів, отриманих з високоточних геодезичних вимірів, співпадають з координатами з рішень ITRF92 та ITRF93 у межах помилок обчислень. Розбіжності аналогічних координат для двох станцій ЛЛС можуть бути пояснені помилками калібровки цих станцій.

Були зплановані, організовані та проведені дві кампанії спостережень GPS–супутників GEODUC'93 і GEODUC'95 у рамках міжнародного українсько–польсько–угорського проекту "Геодинаміка Українських Карпат". Після обробки даних GPS–кампанії GEODUC'95 були отримані повторні координати пунктів цього проекту. Помилки визначення координат склали 3 мм (9 мм), помилки визначення довжин баз — 1–3 мм (5–10 мм) для приймачів типу "Trimble" ("Ashtech").

Була зпланована, організована та проведена GPS–кампанія на локальному полігоні ГАО НАН України. Після обробки даних цієї кампанії були отримані координати майбутньої (на той час) перманентної GPS–станції, астрономічного пункту та інших маркерів з точністю 0,1–1,1 мм. Різниця координат, отриманих з GPS–рішення й обробки високоточних геодезичних вимірів, для пунктів з гарною видимістю GPS–супутників знаходяться в межах помилок обчислень.

Розроблені та реалізовані алгоритми і програми оцінки в рамках моделі тонкого шару параметрів іоносфери з обробки спостережень GPS–супутників. Обчислені значення TEC для декількох пунктів кампанії GEODUC'95 з різними умовами видимості GPS–супутників узгоджуються зі значеннями, отриманими за допомогою комплексу Bernese v.3.5, в межах 0,25 TECU. При цьому середня точність визначення TEC для GPS–пунктів у середніх широтах при використанні моделі тонкого шару складає 3–4 TECU.

Розроблені методики та досвід, набутий при виконанні дисертаційної роботи, дозволяють запровадити широке використання GPS–технології для геодинамічних досліджень та геодезичних робіт.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IERS Annual Report / International Earth Rotation Service. — Paris: Observatoire de Paris, 1998.
2. Baran L.W., Busisc I., Cacon S. et al. Status of subregional GPS geodynamics project GEODUC // Proc. 1st Turkish International Symposium on Deformations (Istanbul-94). — Istanbul (Turkey). — 1994. — P. 943–951.
3. Bernese GPS Software Version 3.4. Documentation / Rothacher M., Beutler G., Gurtner W. et al. — Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 1993.
4. Bierman G.J. Factorization Methods for Diskrete Sequential Estimation // Orlando, San Diego, New York, Austin, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press, 1977. — 241 p.
5. Estey L. TEQC Summary // Proc. IGS Network Systems Workshop. — Annapolis (Maryland, USA).— 1998. — P. 343–345.
6. Guidelines for IGS Stations and Operational Centers, Version 1.2 (reformatted for IGS Report, August 31, 1998) (prepared by IGS Infrastructure Committee and Central Bureau) // IGS 1997 Technical Reports. —1998. — P. 278–285.
7. Gurtner W. RINEX: The Receiver–Independent Exchange Format // GPS World. — 1994. — Vol.5, No.7. — P. 48–52.
8. Hatanaka Y. Compact RINEX format and tools (beta–test version) // Proc. IGS 1996 Analysis Center Workshop. — Silver Spring (Maryland, USA). — 1996. — P. 121–129.
9. Millman G.H. Ionospheric electron content effects on Earth–space radio propagation — a review // Proc. International Beacon Satellite Symposium. —1979. — P. 323–339.
10. Remondi B.W. Extended the National Geodetic Survey Standard GPS Orbit Formats // NOAA Technical Report NOS 133 NGS46. — 1989. — P. 1–85.
11. Rothacher M. Orbits of satellite systems in space geodesy // Geodätisch–geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. — 1992. — Band 46. — 243 p.
12. Wild U. Ionosphere and geodetic satellite systems: permanent GPS tracking data for modelling and monitoring // Geodätisch–geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. — 1994. — Band 48. — 155 p.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хода О. Визначення координат нової перманентної GPS–станції UZHL (Ужгород) // Кинеметика и физика небесных тел. — 1999. — Т. 15, № 5. — С. 476–479.

2. Хо́да О. Перманентна GPS-станція Голосіїв (GLSV): спостереження у 1998 році // Космічна наука і технологія. — 1999. — Т. 5, № 4. — С. 75–78.
3. Хо́да О. Программное обеспечение "Klio" для определения параметров ионосферы // Космічна наука і технологія. — 1999. — Т. 5, № 5/6. — С. 25–32.
4. Bolotin S., Gaiovitch I., Khoda O., Samoilenko A., Yatskiv Ya. GPS observational campaign in the geodynamics test area "Simeiz–Katsiveli": data processing and results // Додаток до журналу "Космічна наука і технологія". — 1995. — Т. 1, № 2. — 16 с.
5. Хо́да О. Українська мережа перманентних GPS-станцій // Матеріали Міжнародного науково-технічного симпозіуму "Геомоніторинг-99". — Моршин. — 1999. — С. 19–22.
6. Cheremshynskiy D., Gaiovitch I., Khoda O., Medvedskiy M., Nesterov M., Potchynaiko R., Romanishin P., Samoilenko A., Stepanov A., Yatskiv Ya., Zablotskiy F. Status report on the WEGENER related activity in Ukraine // Abstracts, presentations and reports from the Sixth General Assembly of WEGENER. — St.Petersburg (Russia) — 1994. — P. 19–20.
7. Gaiovitch I., Khoda O., Osmak A., Samoilenko A. Collocation of different geodetic techniques at the Main Astronomical Observatory in Kiev // Proc. International Workshop on Geodetic Measurements by the Collocation of Space Techniques on Earth (GEMSTONE). — Tokyo (Japan). — 1999. — P. 225–229.
8. Gaiovitch I., Khoda O., Samoilenko A., Yatskiv Ya. GEODUC'95 GPS campaign data processing. Comparisons to zero data epoch ('93) // Proc. 4th International Seminar "GPS in Central Europe" — Penc (Hungary). — 1997. — Reports on Geodesy. — 1997. — No. 4 (27). — P. 351–362.
9. Yatskiv Ya., Khoda O. Current state and prospects of activity of Ukrainian institutions in the field of the creation of the coordinate-and-time and navigation services to users in Ukraine (National report submitted to the CEI WGST Section C) // Proc. Workshop on DGPS and GLONASS Techniques and Application on Safety in CEI Area. — Trieste (Italy). — 1999. — Reports on Geodesy. — 1999. — No. 3 (44). — P. 121–127.

АНОТАЦІЯ

Хо́да О.О. Спостереження супутників Глобальної системи визначення місцеположення (GPS) для геодинамічних та іоносферних досліджень в Україні. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 — астрометрія і небесна механіка. — Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2000.

Дисертацію присвячено використанню GPS-технології на геодинамічних полігонах, а також побудові моделей іоносфери за даними спостережень GPS-супутників. З обробки GPS-

спостережень отримані високоточні координати пунктів, розташованих на Кримському геодинамічному полігоні, у Карпатах (проект GEODUC), на локальному полігоні ГАО НАН України. Створена мережа перманентних GPS-станцій на території України. Показано, що розроблене програмне забезпечення Klio дає можливість оцінити параметри іоносфери в рамках моделі тонкого шару. Обчислені значення загального вмісту електронів узгоджуються зі значеннями, отриманими за допомогою комплексу Bernese v.3.5, в межах 0,25 TECU.

Ключові слова: Глобальна система визначення місцеположення (GPS), перманентна GPS-станція, геодинамічний полігон, іоносферна рефракція, модель тонкого шару.

ABSTRACT

Khoda O.O. Observations of GPS satellites for geodynamics and ionospheric investigations in Ukraine. — Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 01.03.01 — astrometry and celestial mechanics. — Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2000.

The dissertation is devoted to using GPS at geodynamics test areas and estimating ionospheric parameters by using GPS data. High accuracy coordinates of the points located at the Crimean geodynamics test area, in the Carpathians (the GEODUC project), and at the local test area of the MAO NAS of Ukraine are determined by GPS data processing. The network of the permanent GPS stations is established in Ukraine. It is shown that the Klio software developed can be used for ionospheric parameters estimation by using single layer model. The calculated TEC values are in a good agreement (within the limits of 0.25 TECU) with the values determined with the Bernese GPS Software v.3.5.

Key words: Global Positioning System, permanent GPS station, geodynamics test area, ionospheric refraction, single layer model.

АННОТАЦИЯ

Хода О.А. Наблюдения спутников Глобальной системы определения местоположения (GPS) для геодинамических и ионосферных исследований в Украине. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 — астрометрия и небесная механика. — Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2000.

Диссертация посвящена использованию GPS-технологии на геодинамических полигонах, а также построению моделей ионосферы по данным наблюдений GPS-спутников.

Из обработки GPS–наблюдений получены высокоточные координаты пунктов, расположенных на Крымском геодинимическом полигоне, в Карпатах (проект GEODUC), на локальном полигоне ГАО НАН Украины. Точность определения координат составила:

- 1,0–1,5 мм для пунктов Крымского геодинимического полигона,
- 3,0 мм и 9,0 мм (для приемников типа "Trimble" и "Ashtech" соответственно) для пунктов проекта GEODUC,
- 0,1–1,1 мм для пунктов на локальном полигоне ГАО НАН Украины.

Создана сеть перманентных GPS–станций на территории Украины. В настоящее время сеть состоит из трех станций: Голосеево (Киев), Ужгород и Евпатория. Станции Голосеево и Ужгород входят в состав сети Международной геодинимической GPS–службы (IGS), станция Евпатория будет включена в эту сеть после установки Internet–связи. Наблюдения на всех трех украинских станциях организованы согласно требованиям IGS. Работа GPS–станций полностью автоматизирована. Управление осуществляется программой–менеджером GGPS. GGPS представляет собой набор сценариев интерпретатора команд Bourne Again Shell операционной системы Linux, которые формируют команды управления GPS–приемником или файлами данных наблюдений. При этом используются так называемые R–утилиты фирмы Trimble Navigation Ltd, программа преобразования разных бинарных форматов данных в формат RINEX и проверки качества полученных данных teqc, программа преобразования данных из формата RINEX в формат Compact RINEX.

Созданное программное обеспечение Klio дает возможность оценить параметры ионосферы из обработки наблюдений GPS–спутников. Параметры ионосферы оцениваются в рамках модели тонкого слоя. Для проверки работоспособности программы Klio были обработаны наблюдения GPS–спутников, полученные во время GPS–кампании GEODUC'95. Те же наблюдения были обработаны комплексом Bernese v.3.5 с теми же входными параметрами. Модели тонкого слоя строились в основном на четырехчасовых интервалах времени наблюдений с использованием данных с одного, двух, трех и четырех GPS–пунктов с различными условиями видимости GPS–спутников. Вычисленные с помощью Klio значения общего содержания электронов (TEC) согласуются со значениями, полученными с помощью комплекса Bernese v.3.5, в пределах 0,25 TECU. При этом, средняя точность определения TEC для GPS–пунктов в средних широтах при использовании модели тонкого слоя составляет 3–4 TECU.

Ключевые слова: Глобальная система определения местоположения (GPS), перманентная GPS–станция, геодинимический полигон, ионосферная рефракция, модель тонкого слоя.