

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Жаборовський Віталій Петрович

УДК 521.9+528.2

**НОВА РЕАЛІЗАЦІЯ КООРДИНАТ ПОЛЮСА ЗЕМЛІ ЗА
ДАНИМИ ЛАЗЕРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ШТУЧНИХ
СУПУТНИКІВ**

01.03.01 — Астрометрія і небесна механіка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Чолій Василь Ярославович,

Головна астрономічна обсерваторія НАН України,

в.о. завідувача лабораторії “Український центр

визначення параметрів обертання Землі”.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор

Зазуляк Петро Михайлович,

Інститут геодезії Національного університету

“Львівська політехніка” МОН України,

професор кафедри картографії та геопросторового моделювання;

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Клецонок Валерій Володимирович,

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету

імені Тараса Шевченка,

завідувач сектору астрометрії та малих тіл Сонячної системи.

Захист відбудеться 17 квітня 2015 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою:

03680 МПС, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03680 МПС, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий «10» березня 2015 року.

Учений секретар

Спеціалізованої вченої ради

к.ф.-м.н.

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За останні 40 років розвиток таких методів спостережень, як лазерна локація штучних супутників Землі (SLR), комплексна доплерівська орбітографія (система DORIS), радіотехнічні спостереження супутників глобальних систем навігації (GPS, ГЛОНАСС та GALILEO) та радіоінтерферометрія з наддовгими базами (VLBI) разом з розвитком обчислювальних потужностей та вдосконаленням алгоритмів збереження, пошуку та аналізу даних дозволили значно покращити точність і якість розв'язання задач астрономії, геодезії та геодинаміки. До цих задач відносяться: вивчення нерівномірності обертання Землі та особливостей руху її полюсів, реалізація та підтримка квазіінерційної небесної (ICRF) і земної (ITRF) систем відліку, дослідження деформацій земної поверхні та довгоперіодичних кліматичних змін, перевірка ефектів, передбачених теорією відносності, та деякі інші. Сучасна точність визначення координат полюсів Землі становить 0.2 мілісекунди дуги, всесвітнього часу — 0.001 мілісекунди часу, сталих прецесії $\delta\psi(dX)$ — 0.30 та $\delta\varepsilon(dY)$ — 0.12 мілісекунди дуги відповідно [15].

Для розв'язання задач космічної геодинаміки були спеціально запущені супутники Lageos-1 (1976 р.) та Lageos-2 (1992 р.). Вони мають просту кулясту форму та виведені на орбіти, на яких, з одного боку, вони зазнають мінімальних збурюючих прискорень, а з іншого, висота цих орбіт дозволяє без значних зусиль проводити їх локацію. Спостереження супутників Lageos з великим успіхом широко використовуються для визначення параметрів обертання Землі [16].

Проте, локація супутників Lageos не дозволяє вивчати інші параметри Землі, зокрема тонку структуру її гравітаційного поля. Для цієї задачі створено та запущено ще декілька супутників, придатних для лазерної локації. Серед них Ajisai, Stella, Starlette та ін. Спостерігати ці супутники значно простіше через меншу висоту їх орбіт. Але з іншого боку, мала висота орбіти приводить до значного атмосферного гальмування супутників, що ускладнює моделювання їх руху і визначення з їх спостережень параметрів обертання Землі.

У Головній астрономічній обсерваторії НАН України традиційно ведуться роботи з використання даних лазерної локації ШСЗ для визначення координат полюса Землі. Тут недавно було розроблено програмний комплекс “Київ-Геодинаміка++” (зараз він носить назву KG++), який здатен опрацьовувати лазерні спостереження штучних супутників Землі [7, 17]. За його допомогою вперше в Україні проведено, повністю відповідно до нових вимог Міжнародної служби обертання Землі (IERS) [15], обчислення рядів координат полюса за даними лазерної локації супутників Lageos-1 та Lageos-2.

Також було проведено аналіз та порівняння моделей атмосферної густини та зроблено спроби отримати з урахуванням цих моделей ряди параметрів

обертання Землі зі спостережень низькоорбітальних супутників (Ajisai, Stella та Starlette). Спроба виявилася невдалою, оскільки не вдалося мінімізувати через наявність некомпенсованих прискорень відхилення цих рядів від ефемеридних. Аналіз цих рядів планується продовжити..

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені в даній роботі, виконувалися за планом науководослідних тем відділу космічної геодинаміки Головної астрономічної обсерваторії (ГАО) НАН України:

- держбюджетна тема: “Удосконалення методів та засобів високоточних астрономо-геодезичних вимірювань, їх обробки та аналіз з метою визначення параметрів обертання Землі та систем відліку” (2007 – 2009 рр., номер державної реєстрації 0106U011372, шифр 236-В).
- конкурсна тема “Регіональна система геодинамічного моніторингу з використанням методів космічної геодезії” (2012 – 2013 рр., номер державної реєстрації 0110U004087, шифр 312-КТ).
- держбюджетна тема: “Визначення параметрів обертання Землі за даними сучасних астрокосмічних спостережень їх обробка та аналіз” (2010 – 2014 рр., номер державної реєстрації 0109U008107, шифр 1.4.6/3 – 236-В).

В цих темах автор приймав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження полягали в:

- ознайомленні з практичними принципами лазерної локації ШСЗ, зокрема в вивченні будови реальної станції лазерної локації та отриманні навичок і вмінь у проведенні лазерно-локаційних спостережень;
- отриманні рядів спостережень за програмою IERS;
- вивченні методик моделювання руху ШСЗ за допомогою сучасної обчислювальної техніки;
- ознайомленні та аналізі рекомендацій і вимог IERS щодо використання конкретних процедур при моделюванні руху ШСЗ взагалі та обробки даних лазерної локації зокрема;
- модернізації наявного програмного забезпечення для обробки даних лазерної локації у відповідності до вимог IERS;
- тестовій обробці спостережень супутника Lageos з метою отримання параметрів обертання Землі на тестовому інтервалі часу (дузі);

- повній обробці спостережень супутників серії Lageos за 2001 рік для отримання параметрів обертання Землі, зокрема координат її полюса за вказаний період, та в перевірці результатів;
- моделюванні сили атмосферного гальмування ШСЗ;
- отриманні параметрів обертання Землі зі спостережень низькоорбітальних супутників та порівнянні отриманих результатів з аналогічними, отриманими зі спостережень супутників серії Lageos.

Об'єктом досліджень є глобальна геодинаміка. Предметом досліджень є вплив вибору астрономічних та геодинамічних моделей на точність отримання параметрів обертання Землі із лазерних спостережень штучних супутників, що знаходяться на орбітах різної висоти. Методи досліджень: лазерно-локаційні спостереження, аналітичні розрахунки, статистичний аналіз, чисельне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше в Україні визначені координати полюса Землі з даних лазерної локації ШСЗ серії Lageos відповідно до нових вимог IERS.
2. Представлено рекомендації щодо особливостей використання спостережень низькоорбітальних геодезичних супутників для визначення параметрів обертання Землі (ПОЗ).
3. Запропоновано новий алгоритм пошуку коренів для методу безпосереднього порівняння моделей атмосфери на основі перетворення Гельмерта, що дозволило провести аналіз точності моделей NRL-MSISE-00, DTM-2012 та JB2008.
4. Сформульовано рекомендації щодо використання моделей густини атмосфери в задачах визначення сили атмосферного гальмування ШСЗ, що дозволяє покращити точність моделювання їх руху.
5. Проведено оцінку точності отриманих рядів координат полюса Землі, що дозволило провести апробацію запропонованого методу порівнянь.

Практичне значення отриманих результатів. Визначення за даними лазерної локації ШСЗ, згідно до рекомендацій IERS, координат полюса Землі є кроком до впровадження в ГАО НАН України центру аналізу SLR-даних для визначення параметрів орієнтації Землі, що дозволить брати активну участь у створенні та забезпеченні міжнародних систем відліку.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень. Визначені ряди координат полюса були порівняні з аналогічними результатами,

отриманими іншими міжнародними центрами. Порівняння проводилося за допомогою описаного в роботі методу, що базується на перетворенні Гельмерга.

Особистий внесок здобувача. Дві роботи [1, 12] виконано одноосібно, дванадцять — у співавторстві. У роботі [2] автор брав участь у постановці задачі та тестуванні програмного забезпечення; у роботі [3] автор брав участь в постановці задачі, накопиченні спостережень та виконав усі обчислення; у роботі [4] автор опрацював спостережний матеріал та проводив обрахунки; у роботі [5] автор брав участь у постановці задачі, провів усі розрахунки за допомогою пакету *KG++* та розрахував величини стандартних відхилень отриманих рядів; у роботі [6] автор створював програмне забезпечення; у роботах [7, 8, 10, 11, 13], автор відповідав за тестування програмного забезпечення, у роботі [9] автор приймав участь в накопиченні матеріалу, оформленні постури та виконував доповідь, у роботі [14] автор обробляв результати.

У всіх роботах автор брав участь у аналізі результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати, включені в дисертацію, були представлені на:

- Міжнародній конференції “17th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics” (2010 р., Київ),
- Всероссийской астрономической конференции (ВАК-2010) “От эпохи Галилея до наших дней” (2010 р., Нижній Архиз, Російська Федерація),
- European Geosciences Union General Assembly 2010 (2010 р., Відень, Австрія),
- Journées 2011 Systèmes de référence spatio-temporels (2011 р., Відень, Австрія),
- Міжнародній конференції “19th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics” (2012 р., Київ),
- “Eighteenth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation” (2013 р., Фуджюшіда, Японія),
- Міжнародній конференції “21th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics” (2014 р., Київ),
- Сьомій міжнародній науковій конференції пам’яті Б.Т.Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики” (2014 р., Львів),
- щорічних нарадах Українського центру визначення параметрів обертання Землі (м. Дунаївці, 2011 р., м. Алчевськ, 2012 р., м. Миколаїв, 2013 р.),

- семінарах відділу космічної геодинаміки Головної астрономічної обсерваторії НАН України.

Публікаці. Основні результати дисертації опубліковано в чотирнадцяти роботах: вісім — у наукових фахових журналах [1–8] та шість — у матеріалах міжнародних конференцій [9–14].

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, списку умовних скорочень, чотирьох розділів, висновків. Загальний обсяг дисертації: 115 сторінок, включаючи 26 рисунків, 7 таблиць. Список використаних джерел містить 117 бібліографічних найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

Перший розділ “Метод лазерної локації ШСЗ” присвячено огляду методики лазерної локації штучних супутників Землі. Розглянуто принципи, описано історію розвитку та сучасний стан методики. Проводиться порівняння з іншими методиками космічної геодезії. Описано результати роботи автора на станції лазерної локації 1824 “Голосіїв-Київ”.

Лазерна локація ШСЗ є потужним інструментом для вивчення Землі. Перші сеанси за її допомогою були проведені в листопаді 1964 року, і кожен вимір мав точність декілька метрів. З того часу методика досягла міліметрової точності і широко використовується для різноманітних задач: від моніторингу гравітаційного поля Землі та вивчення її обертання до точної калібровки орбіт супутників різного призначення. Міжнародна мережа станцій лазерної локації охоплює більше 30 постійнодіючих станцій, три з яких знаходяться в Україні (дві в Криму). Кращою за точністю та кількістю з українських станцій є станція № 1824 “Голосіїв-Київ”, яка належить Національній академії наук України та розташована в Головній астрономічній обсерваторії (Київ). Автор самостійно провів більше 1000 спостережень проходжень супутників (сеансів) на цій станції та приймав активну участь у розробці нових та модернізації наявних модулів станції. Зокрема, була запропонована методика, яка дозволила без відриву від основної програми спостережень накопичити матеріал, на основі якого була побудована модель похибок телескопа [3], що дало змогу збільшити кількість отриманих спостережень.

В другому розділі “SLR в космічній геодинаміці” показано, як з лазерних спостережень ШСЗ можна отримати координати полюса Землі, та описано програмний продукт KG++, який був розроблений та використовувався при виконанні роботи.

Рівняння для опису обертання Землі в неінерційній системі координат, яка обертається з кутовою швидкістю $\vec{\omega}$ відносно інерційної:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + [\vec{\omega} \times \vec{H}] = \vec{L},$$

можна лінеаризувати, поклавши:

$$\vec{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \cdot \Omega.$$

Тут Ω — середня швидкість обертання Землі, m_i — параметри обертання Землі, m_1 та m_2 називають координатами полюса Землі і, як правило, позначають x_p та y_p , а m_3 називається нерівномірністю обертання Землі.

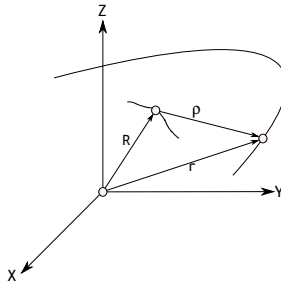


Рис. 1: Зв'язок між основними векторами спостережень.

Для знаходження ПОЗ використовується такий метод. Якщо \vec{R} — геоцентричний вектор положення станції, $\vec{\rho}$ — топоцентричний вектор положення супутника, то його геоцентричне положення $\vec{r} = \vec{\rho} + \vec{R}$ (рис. 1). З іншого боку, геоцентричне положення супутника можна обрахувати, інтегруючи в інерційній системі рівняння його руху. Таким чином, якщо \hat{M} — матриця переходу між інерційною та неінерційною системами відліку, то:

$$\vec{\rho}(t) = \hat{M}(t)\vec{r}(t) - \vec{R}(t) = \vec{\Phi}(\vec{X}, t). \quad (1)$$

Отже, положення супутника $\vec{\rho}(t)$ можна описати векторною функцією певних параметрів. Отримавши зі спостережень відстань до супутника ρ_o (лише модуль вектора) та маючи приблизні значення параметрів \vec{X}_0 , рівня-

ння (1) можна лінеаризувати:

$$\rho_o - \rho_c = \left(\frac{\partial \vec{\Phi}(\vec{X})}{\partial \vec{X}} \right) \Big|_{\vec{X}_0} \vec{x},$$

тут $\vec{x} = \vec{X} - \vec{X}_0$ — поправки до параметрів. Отож, маючи спостереження супутника ρ_o , моделюючи на основі попередніх значень параметрів \vec{X}_0 його положення ρ_c та знаходячи похідні від функції $\vec{\Phi}$ за уточнюваними параметрами, можна скласти систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно \vec{x} . Таку процедуру можна повторювати, поступово уточнюючи значення \vec{X} . Цей метод називають методом диференціальних поправок. Для його реалізації потрібно мати змогу обраховувати похідні від відстані за уточнюваними параметрами.

Функція $\vec{\Phi}$ містить параметри обертання Землі в матриці \hat{M} , яка в загальному випадку може бути представлена як $\hat{M} = \hat{Q} \cdot \hat{R} \cdot \hat{W}$, тут \hat{Q} — матриця прецесії-нутації, \hat{R} — матриця обертання Землі, а матрицю руху полюса \hat{W} можна записати так:

$$\hat{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ x_p & -y_p & 1 \end{bmatrix}.$$

Процедура знаходження параметрів обертання Землі складається з декількох етапів. Спочатку уточнюються кеплерові елементи орбіти супутника. В якості початкових значень можна взяти дані, які розповсюджуються командуванням повітряно-космічної оборони Північної Америки (NORAD), або інші. (Детальніше це питання розглядається в четвертому розділі.) Після уточнення орбіти, проводиться процедура уточнення координат полюса Землі. В якості початкових умов використовуються значення зі стандартного ряду, що надається IERS.

Обробка спостережень виконувалася за допомогою програмного пакету KG++. Починаючи з 1987 року, в Головній астрономічній обсерваторії НАН України проводилися роботи зі створення програмного забезпечення для обробки результатів лазерної локації в межах програми МЕРІТ. Тоді було створено та протестовано підсистему для інтегрування рівнянь руху на основі методу Адамса зі змінним кроком та порядком. На базі цього інтегратора функціонувала перша версія програми, яка називалася “КиївГеодинаміка”. Вона була написана на мові програмування Fortran.

Але з того часу точність локації значно збільшилася та значно змінилися вимоги IERS щодо точності моделювання положення супутників. Програма застаріла і перестала відповідати вимогам IERS. Тому було вирішено її мо-

дернізувати. Фактично, від старої програми залишилася лише ідея та назва. Було створено потужну й гнучку систему, яка легко налаштовується під різні моделі та відповідає усім стандартам IERS. Нова програма називається “КиївГеодинаміка++” (KG++) і написана на мові програмування C++.

Обробка спостережень низькоорбітальних супутників потребує врахування сили атмосферного гальмування. Основною проблемою при цьому є знаходження густини атмосфери. **Третій розділ “Сила атмосферного гальмування”** присвячено аналізу наявних моделей густини атмосфери, які можна використати для розв’язання цієї задачі, та порівнянню їх точності.

В роботі розглядаються такі моделі:

- *Модель Jacchia–Bowman 2008 (JB2008)*. Емпірична модель густини термосфери містить покращений, в порівнянні з попередніми своїми версіями, алгоритм корекції за сонячну активність та новий метод для корекції за геомагнітні шторми на основі використання геомагнітного індексу Dst. Це дозволило покращити точність моделювання густини до 16% під час найпотужніших геомагнітних штормів. Модель забезпечує стандартне відхилення на рівні 9% – 11% для висот 400 км [19].
- *Drag Temperature Model (DTM-2012)*. Модель повністю основана на спостереженнях супутників. Є останнім великим оновленням моделі DTM94 та базується на розширеній інформації про гальмування супутників під час мінімуму та максимуму сонячної активності. Постійно оновлюється. Модель напівемпірична, дозволяє знайти температуру, густину та склад термосфери в діапазоні висот 120 – 1500 км як функції часу, місця та космічної погоди [20].

Станом на початок 2014 року DTM рекомендується IERS для внесення в наступний стандарт в якості моделі величини гальмівного прискорення супутників при визначенні параметрів обертання Землі.

- *Модель NRL-MSISE-00*. Модель утворена на базі моделі MSISE-90, яка є, як показує остання літера E в її назві “extended”, розширенням моделі MSIS-86 з висот 90 км до поверхні Землі. Містить інформацію про загальну густину атмосфери, отриману з вимірювань прискорення на супутниках та з уточнення їх орбіт, температуру, отриману з некогерентного радарного розсіяння, та густину молекулярного кисню O₂, отриману за даними місії SMM [21].

Вхідними даними для моделі є номер дня в році, всесвітній час (UT), географічна широта та довгота, місцевий сонячний час, магнітний індекс a_p та індекс сонячної активності $F_{10.7}$.

Головною відмінністю цієї моделі від попередніх з сімейства MSIS є використання загальних даних про гальмування супутників, додання в

загальну густину внеску O^+ , особливо на висотах, більших 500 км, та включення даних з SMM.

Для порівняння моделей та визначення, яка з них має найменшу внутрішню похибку, мірою якої є дисперсія, застосовується такий метод. На основі моделі густини створюється каталог точок у певному просторі. В роботі використовується два типи каталогів: у першому для фіксованої висоти для кожної точки вказується широта, довгота та значення густини (каталог ізоплощин), у другому фіксується густина та для кожної точки вказується широта, довгота та висота (каталог еквіденсит). Постулювалося, що між каталогами існують систематичні та випадкові похибки. Систематичні похибки описувалися за допомогою перетворення Гельмерта, визначалися та усувалися. Для оцінки внутрішньої точності моделі потрібно було обрахувати величину її внутрішніх похибок, яка визначалася як дисперсія σ_i та знаходилася для кожної моделі з такої систем рівнянь:

$$\begin{cases} \sigma_{12}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\rho_{12}\sigma_1\sigma_2 \\ \sigma_{13}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 2\rho_{13}\sigma_1\sigma_3 \\ \sigma_{23}^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\rho_{23}\sigma_2\sigma_3 \end{cases} . \quad (2)$$

Тут ρ_{ij} — описує взаємні кореляції каталогів, а σ_{ij} є взаємною дисперсією відповідних каталогів і визначається так:

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (\vec{r}_{(i)k} - \vec{r}_{*(j)k})^2}{N - M},$$

тут M відповідає кількості параметрів перетворення Гельмерта, яке описує статистичні похибки каталогів, в роботі використовувалося 15 параметрів — по три повороти, масштаби та зсуви початків і шість параметрів деформацій.

Система (2) розв'язувалася методом Ньютона для векторної функції векторного аргументу. Початкові умови, для прискорення процесу, підбиралася перебором з певним критерієм оптимізації, який детально описано в дисертації.

Загалом описана процедура була виконана для чотирьох різних дат, що відповідають літу та зимі при високій та низькій сонячній активності на діапазоні висот 400 – 1100 км включно з кроком 100 км. Знайдені дисперсії моделей для каталогів еквіденсит для різних висот та моментів часу наведено на рис. 2. Різні типи ліній позначають різні моделі за різних умов сонячної активності. Суцільна лінія відповідає моделі JD-2008 при низькій сонячній активності.

Аналіз отриманих у результаті порівнянь атмосфер даних показує високі кореляції моделей між собою, особливо NRL-MSISE-00 та DTM-2012, модель

JB2008, в деяких випадках, дещо менше корелює з іншими моделями.

Дисперсії моделей, отримані з еквіденсит, практично однакові та очікувано зростають з висотою та сонячною активністю. З цієї картини випадає поведінка моделі JB2008 при низькій сонячній активності на висотах більше 600 км. Це свідчить про невелику потужність випадкових похибок моделі JB2008 для цього діапазону та є аргументом для використання даної моделі для зазначеного діапазону висот.

Дисперсії, отримані з ізоплощин, не показують висотної залежності, лише невелику залежність від космічної погоди та, взагалі, схожі на шум. Як було показано в роботі [18] такий результат можна пояснити великими, відносно значень каталогу, випадковими похибками. Використання каталогів, побудованих на основі еквіденсит, через заміну густин (типове значення каталогу порядку 10^{-18} , величина похибки — того самого порядку) на висоти (типове значення каталогу — $7 \cdot 10^3$, значення похибок порядку — 10^{-6}) дозволяє уникнути цього ефекту.

Розраховані з каталогів еквіденсит дисперсії виражаються в кілометрах і самі по собі малоінформативні. Більш цікавою та корисною є інформація про дисперсії в просторі густин атмосфери. Якщо на висоті h_0 дисперсія висоти — σ_h , то дисперсія густини на тій самій висоті:

$$\sigma_\rho = \left. \frac{\partial \rho}{\partial h} \right|_{h_0} \sigma_h.$$

На рис. 3 наведено значення випадкових похибок моделей густини атмосфери в залежності від висоти у відсотках густини на заданій висоті.

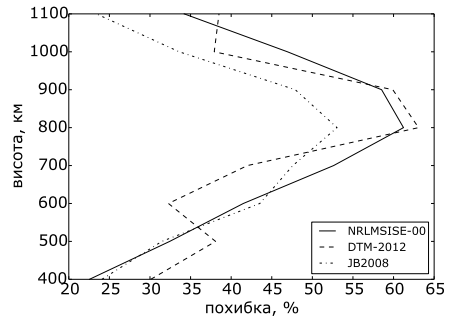
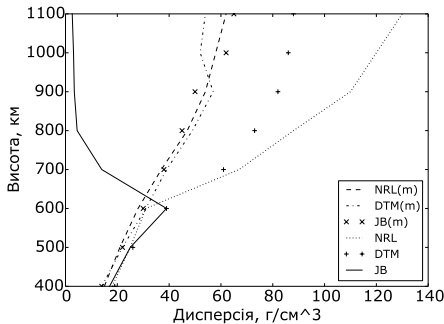


Рис. 2: Дисперсії моделей атмосфери. Суцільна лінія відповідає моделі JB.

Рис. 3: Похибки моделей у відсотках від густини на заданій висоті.

Отримані результати показують практичну ідентичність усіх трьох розглянутих моделей атмосферної густини. JB2008 має більш примітивні алгоритми розрахунків та менше корелює з іншими моделями. Її можна застосовувати для перевірки отриманих результатів. Моделі NRL-MSISE-00 та DTM-2012 дозволяють отримати практично ідентичні результати. Єдиним недоліком останньої є відсутність відкритих вихідних файлів моделі. NRL-MSISE-00 потребує проведення найбільшої кількості операцій для отримання результату, але зараз цей факт не є суттєвим через високі потужності обчислювальної техніки.

Четвертий розділ “Визначення координат полюса Землі” містить результати обробки лазерних спостережень супутників Lageos-1 та Lageos-2 за 2001 рік та їх порівняння з аналогічними даними, отриманими в інших міжнародних центрах.

При обробці для конкретизації $\vec{\Phi}(\vec{X}, t)$ з (1) потрібно використовувати певні процедури, які називаються моделями. Міжнародна служба обертання Землі регулярно видає свої циркуляри, в яких фіксує рекомендації щодо моделей та їхнього застосування. Проте, не всі моделі там описано, тому кожна обробка даних лазерної локації супроводжується описом застосованих моделей.

При обробці даних лазерної локації супутників Lageos-1 та Lageos-2 за 2001 рік були використані такі моделі.

Моделі сил. Для розрахунку збурюючого прискорення при інтегруванні рівнянь руху використовуються моделі сил. Усі застосовані моделі сил наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Моделі сил при обробці Lageos-1/2

Гравітаційне притягання Землі	EGM-96 [22], порядок моделі 20×20 .
Гравітаційне притягання Сонця, Місяця та планет	ефемериди LeDe421 [23].
Сила прямого сонячного тиску	коефіцієнт альbedo 2.2, циліндрична тіньова функція [24].
Сила непрямого сонячного тиску	враховано відбите Землею світло Сонця та власне теплове випромінювання Землі [25].
Релятивістські ефекти	прецесія Лензе-Тіррінга [26], геодезична прецесія та нутація [27, 28], релятивістський рух перигею [15].
Емпіричне прискорення	коефіцієнт $-3.4 \cdot 10^{-12} H/m^2$, уточнювався.

Моделі перетворень. Для знаходження матриці перетворення між інерційною та неінерційною системами відліку, застосовуються моделі перетворень, які перераховані в таблиці 2. Додатково до вказаних у таблиці використовувалися моделі поправок у координати полюса, модель зсуву початків

(frame bias), модель вільної нутації ядра (free core nutation), припливні поправки до ПОЗ, модель для знаходження кута обертання Землі, узгоджена з моделлю прецесії-нутації, та деякі інші у повній відповідності до стандарту IERS [15].

Таблиця 2

Моделі перетворень при обробці Lageos-1/2

Прецесія та нутація	IAU2000A [29].
Координати полюса	IERS C04 [15]

Моделі редукцій. До них відносяться усі поправки, які потрібно вносити до спостережень. Вони перераховані в таблиці 3.

Також до моделей редукцій були віднесені координати станцій та відповідні припливні поправки. При обробці спостережень Lageos-1/2 використовувалися координати станцій у системі ITRF-2005 [32]. Координати станцій виправлялися за ексцентричності станцій згідно даних IERS¹. Рухи станцій — згідно ITRF2005 [32].

Таблиця 3

Моделі редукцій при обробці Lageos-1/2

Рефракція	модель Маріні та Мюррея [30].
Релятивістська поправка у відстань	згідно стандарту IERS [15]
Корекція за центр мас супутника	згідно праці Отсубо [31].

Моделі припливів. Окремо слід згадати припливні явища. Вони мають подвійний ефект. По-перше, змінюють положення опорних точок на поверхні Землі, що виливається у необхідність введення додаткових поправок у координати станцій. По-друге, змінюючи форму Землі, змінюють її гравітаційне поле. Для врахування цього ефекту в коефіцієнти геопотенціалу вводяться відповідні поправки.

При обробці спостережень Lageos-1/2 були враховані твердотільний, океанічний та полюсний припливи згідно вимог IERS [15].

Константи. В стандарті IERS [15] наведено чисельні значення необхідних при моделюванні констант, таких як швидкість світла в вакуумі, геометричні параметри Землі, значення гравітаційної сталої, величина астрономічної одиниці та деякі інші. При обробці спостережень використовувалися вказані величини, якщо якась із застосовуваних моделей не містила власних. Так, наприклад, модель гравітаційного поля EGM-96 додатково містить значення гравітаційної сталої для Землі (добуток маси на гравітаційну сталу)

¹http://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/site_procedures/eccentricity.html

та значення великої півосі земного еліпсоїда, а модель ефемерид — уточнене значення астрономічної одиниці.

Як уже зазначалося, при уточненні параметрів \vec{X} важливо знати їх початкові значення \vec{X}_0 . Для координат полюса з цим проблем не виникало, в якості \vec{X}_0 використовувалися значення зі стандартного ряду C04. Але при уточненні орбіти виникали проблеми з вибором початкових значень кеплерових елементів. Елементи, які надаються NORAD, не завжди оптимальні для таких задач через те, що орбіта збурена та її елементи змінюються. Найкращі результати були досягнені при використанні точних (~ 1 см) положень супутника на задану епоху. Автор висловлює велику подяку професору Toshimichi Otsubo з університету Hitotsubashi за надані точні положення супутників на епоху 2001-01-01T00:00:00. Використовуючи ці положення, були знайдені елементи орбіти на вказану епоху та на їх основі пораховані точні положення супутника на початок першої дуги року 2001. Таким чином вдалося значно скоротити кількість розрахунків та оптимізувати процес обробки спостережень.

Були опрацьовані спостереження супутників Lageos-1 та Lageos-2 за 2001 рік: усього близько 75000 окремих спостережень. Обробка проводилася на семидобових дугах, усього 52 дуги. Початковими умовами для інтегрування рівнянь руху на кожній дузі були кінцеві положення супутника на попередній. Обробка кожної дуги відбувалася в два етапи. Спочатку уточнювалися лише елементи орбіти супутника. Ця процедура займала 4–5 ітерацій та тривала доки стандартне відхилення між спостережними та модельованими відстанями не припиняло зменшуватися. Після цього додатково раз на добу уточнювалися коефіцієнт емпіричного прискорення та параметри обертання Землі. Уточнення відбувалося доки стандартне відхилення не сягало значення, меншого за 10 см. Така точність є достатньою для знаходження координат полюса. Для кожної дуги було виконано сумарно 12–15 ітерацій. На кожній ітерації проводився аналіз отриманих різниць між модельованими та спостережними відстанями ($O - C$) та їх розподіл. Усі спостереження, $O - C$ яких не потрапляло в інтервал 3σ , відсіювалися. Для деяких дуг після п'ятнадцятої ітерації було відсіяно до 20 відсотків спостережень.

Аналіз залишкових $O - C$ для останніх ітерацій показав наявність некомпенсованих прискорень з амплітудою порядку 4 см. Такі прискорення пояснюються неідеальністю використаних моделей. Вони потребують подальшого аналізу.

Результати знаходження координат полюса Землі за лазерними спостереженням супутників Lageos-1 та Lageos-2 наведено на рис. 4.

Для перевірки отриманих спостережень було проведено аналіз власних похибок отриманих рядів за допомогою методу, описаного в третьому розділі. Міжнародна служба обертання Землі надає доступ до аналогічних рядів,

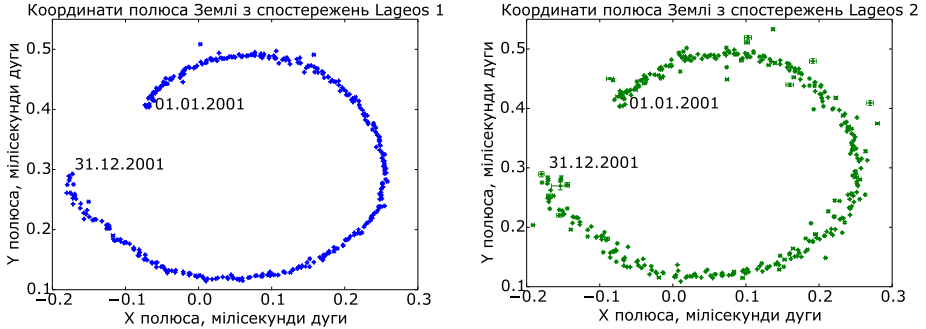


Рис. 4: X- та Y-координати полюса Землі за 2001 рік, отримані з лазерних спостережень супутників Lageos-1 (ліворуч) та Lageos-2 (праворуч).

отриманих у різних центрах аналізу з різних спостережень (лазерних, радіоінтерферометричних, позиційних, доплерівських та їх комбінацій). Ці дані знаходяться у вільному доступі в мережі Інтернет².

Для аналізу ми використовували ряди, отримані в Center for Space Research, США (csr), Delft University of Technology, Нідерланди (dut), Institute for Applied Astronomy, Російська Федерація (iaa), та стандартний розв'язок ILRS (ilrs) (рис. 5). На рис. 6 два результати, отримані при виконанні роботи, та результат ILRS показано на одному графіку.

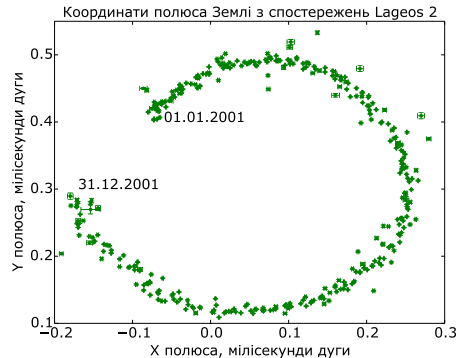
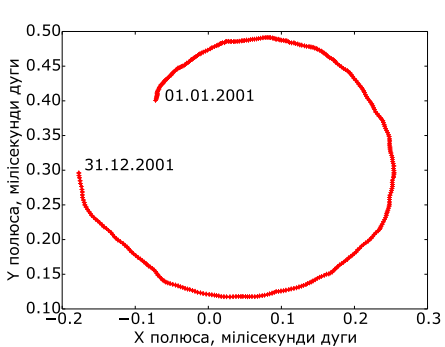


Рис. 5: X- та Y-координати полюса Землі за 2001 рік за даними ILRS.

Рис. 6: X- та Y-координати полюса Землі за 2001 рік, усі результати.

²<ftp://hpiers.obspm.fr/iers/series/operational>

При порівнянні різних рядів використовувалася така схема. Аналізувалися два ряди з бази IERS та один, отриманий у роботі. Систематичні похибки описувалися таким рівнянням:

$$\vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \vec{r}_1 + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}.$$

Отримані при порівнянні величини стандартних відхилень наведено в таблиці 4, в якій у кожній комірці міститься значення стандартного відхилення, отримане з порівняння власного супутникового ряду (рядочок) з відповідною парою стандартних рядів (стовпчик). Середні стандартні відхилення координат полюса для результатів, отриманих з обробки спостережень Lageos-1, становлять $3.10 \cdot 10^{-4}$ кутових мілісекунд, а отриманих з обробки спостережень Lageos-2 — $1.19 \cdot 10^{-3}$ кутових мілісекунд.

Таблиця 4

Стандартні відхилення для рядів координат полюса Землі, кутові мілісекунди

	dut – csr	csr – iaa	iaa – ilrs	ilrs – dut	середнє
Lag1	$2.98 \cdot 10^{-4}$	$3.57 \cdot 10^{-4}$	$2.44 \cdot 10^{-4}$	$3.42 \cdot 10^{-4}$	$3.10 \cdot 10^{-4}$
Lag2	$1.27 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$	$1.21 \cdot 10^{-3}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$1.19 \cdot 10^{-3}$

Отримані значення вказують на те, що ряди координат полюса, отримані зі спостережень супутника Lageos-1, майже на порядок точніші даних, отриманих зі спостережень супутника Lageos-2, та суттєво не відрізняються від аналогічних рядів, отриманих в інших міжнародних центрах. Такий результат свідчить про коректну роботу програмного пакета KG++ на рівні точності близько 2 см та його придатність до використання як інструменту аналізу даних лазерної локації ШСЗ з точністю, що задовольняє вимогам IERS.

ВИСНОВКИ

1. Обробка програмним пакетом KG++, згідно останніх вимог IERS, даних лазерної локації супутників Lageos-1 та Lageos-2 дозволила отримати ряди координат полюса для кожної доби 2001 року з точністю, порівнянною з точністю результатів міжнародних центрів обробки лазерних спостережень ШСЗ.
2. Програмний пакет KG++ продемонстрував високу ефективність роботи при обробці даних лазерної локації ШСЗ серії Lageos. Комбінація методу диференційних поправок разом з інтегратором, що використовує процедуру Адамса зі змінним кроком та порядком, та оптимізованими алгоритмами для розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь дозволила створити сучасне програмне забезпечення, яке здатне працю-

вати в розподіленому режимі та може використовуватися для розв'язку задач геодинаміки.

3. Аналіз моделей атмосферної густини, які придатні для обчислення гальмування супутників, дозволив сформулювати рекомендації щодо їх використання при моделюванні руху ШСЗ. За допомогою методики, що базується на перетворенні Гельмерта, були розраховані значення випадкових похибок, які використовувалися як критерії величини внутрішніх похибок цих моделей.
4. Було показано, що опрацювання лазерних спостережень низькоорбітальних супутників з набором моделей, який відповідає рекомендаціям IERS для обробки спостережень Lageos-1/2, з одночасним врахуванням атмосферного гальмування та врахуванням вищих порядків геопотенціалу не дозволяє промоделювати усі збудуючі прискорення і отримати координати полюса Землі з точністю, порівняною з точністю опрацювання спостережень Lageos-1/2.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zhaborovsky V. P. Quantitative Analysis of the Atmospheric Density Models Applicable for Determination of Artificial Satellite Deceleration / V. P. Zhaborovsky // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2014. — Vol. 30, No. 6. — P. 308–312.
2. Чолій В.Я. Методика обробки даних лазерної локації штучних супутників Землі / В.Я. Чолій, В.П. Жаборовський // Космічна наука і технологія. — 2011. — Т. 17, № 2. — С. 51–55.
3. Telescope inaccuracy model based upon satellite laser ranging data / V. P. Zhaborovsky, V. O. Pap, M. M. Medvedsky, V. Y. Choliy // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2013. — Vol. 3, Iss. 1. — P. 63–65.
4. Determination of the reference frames deflections from optical observations of GNSS satellites / V. Ya. Choliy, V. P. Zhaborovsky, V. Taradiy, L. Rykhlova // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2011. — Vol. 1. — P. 99–101.
5. Zhaborovsky V. P. Earth's pole coordinates determined from Lageos-1/2 laser ranging / V. P. Zhaborovsky, V. Ya. Choliy // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2014. — Vol. 4, Iss. 2. — P. 54–57.
6. Автоматизована система керування куполом / Медведський М. М., Жаборовський В. П., Пап В. О., Глуценко Ю. М. // Бюлетень УЦПОЗ. — 2013. — № 8. — С. 58–61.
7. Choliy V. Ya. KyivGeodynamics++: software for processing satellite laser ranging data / V. Ya. Choliy, V. P. Zhaborovsky // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2011. — Vol. 1. — P. 96–98.

8. Чолій В. Я. Підсистема визначення поправок програмного пакету Київ-Геодинаміка++ / Чолій В. Я., Жаборовський В. П. // Бюлетень УЦПОЗ. — 2011. — № 6. — С. 7–16.
9. Zhaborovskyy, V. P. Ukraine SLR stations: the current state and future / V. P. Zhaborovskyy, M. M. Medvedskyy // Eighteenth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. — (Fujiyoshida, Japan, November 11 – 15, 2013). Book of abstracts. — P. 156.
10. Choliy, V. Ya. Juliette/KG++: software for processing Satellite Laser Ranging observations / V. Ya. Choliy, V. P. Zhaborovskyy // Journees Proc. — (Vienna, Austria, September 19 – 21, 2011). Book of abstracts. — P. 158–159.
11. Choliy, V. Ya. New version of SLR software Kiev-Geodynamics: KGpp. First results / V. Ya. Choliy, Ya. S. Yatskiv, V. P. Zhaborovskyy // European Geosciences Union General Assembly 2010 (Vienna, Austria, May 02 – 07, 2010) Book of abstracts. — EGU2010-6777. — P. 6777.
12. Жаборовський, В. П. Порівняння моделей атмосферної густини, придатних для розрахунку гальмування ШСЗ / Жаборовський В. П.// VII міжнародна наукова конференція “Вибрані питання астрономії та астрофізики” (Львів, 07 – 10 жовтня 2014 р.) Тези. — С. 47.
13. Чолій В. Программный комплекс КиевГеодинамика++ для обработки лазерных наблюдений спутников / Чолій В., Жаборовський В.// Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) “От эпохи Галилея до наших дней”. — (Нижний Архыз, Российская Федерация, 13 – 18 сентября 2010 г.) Тезисы. — С. 55.
14. Чолій В. Результаты оптических наблюдений навигационных спутников в обсерватории Терскол 2007 – 2010 гг. / Чолій В., Тарадий В., Рыхлова Л., Жаборовський В., Андреев М.// Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) “От эпохи Галилея до наших дней”. — (Нижний Архыз, Российская Федерация, 13 – 18 сентября 2010 г.) Тезисы. — С. 55.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

15. IERS Technical Note No. 36 (IERS Conventions 2010). — 2010.
16. Smith, D. E. Long term evolution of the LAGEOS orbit / D. E. Smith, P. J. Dunn // *Geophysical Research Letters*. — 1980. — Vol. 7. — P. 437–440.
17. Тарадий, В. К. Вычисление траекторий искусственных спутников Земли. Построение алгоритмов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений / В. К. Тарадий, М. Л. Цесис. — К. : ИТФ НАНУ, 1984. — 46 с. — (Препр./ АН УССР. Ин-т теор. физики).
18. Choliy, V. Ya. On the extension of Helmert transform / V. Ya. Choliy // *Advances in Astronomy and Space Physics*. — 2014. — Vol. 4, No. 1., — P. 15-19.
19. The Thermospheric Density Model JB2008 using New EUV Solar and Geomagnetic Indices / B. R. Bowman, W. K. Tobiska, F. Marcos, C. Huang //

- 37th COSPAR Scientific Assembly. — Vol. 37 of COSPAR Meeting. — Montreal: COSPAR Scientific Assembly, 2008. — P. 367.
20. Evaluation of the DTM-2009 thermosphere model for benchmarking purposes / S. L. Bruinsma, N. Sánchez-Ortiz, E. Olmedo, N. Guijarro // *Journal of Space Weather and Space Climate*. — 2012. — Vol. 2, No. 27. — P. A4.
 21. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / J. M. Picone, A. E. Hedin, D. P. Drob, A. C. Aikin // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. — 2002. — Vol. 107. — P. 1468.
 22. The Development of the Joint NASA GSFC and National Imagery and Mapping Agency / F. G. Lemoine, S.C. Kenyon, J. K. Factor [et al.]. — 1998. — P. 575.
 23. Folkner U. The planetary and Lunar Ephemeris DE421 / Folkner U., Williams J., Boggs D. — 2008. — Vol. 343R.08.003. — P. 31.
 24. Montenbruck, O. Satellite Orbits — Models, Methods, and Applications / O. Montenbruck, E. Gill. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
 25. Kabelac, J. Radiation influences of higher orders acting on the orbit of an earth's satellite / J. Kabelac // *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*. — 1988. — Vol. 39. — P. 379–387.
 26. Chashchina, O. Elementary Derivation of the Lense-Thirring Precession / O. Chashchina, L. Iorio, Z. Silagadze // *Acta Physica Polonica B*. — 2009. — Vol. 40. — P. 2363. — 0808.0397.
 27. de Sitter, W. On Einsteins theory of gravitaion and its astronomical consequences. / W. de Sitter // *MNRAS*. — 1916. — Vol. 76. — P. 699 – 728.
 28. de Sitter, W. On Einsteins theory of gravitaion and its astronomical consequences. Paper II. / W de Sitter // *MNRAS*. — 1916. — Vol. 77. — P. 155 – 184.
 29. Expressions for the Coordinates of the CIP and the CEO Using IAU 2000 Precession-Nutation / N. Capitaine, J. Chapront, S. Lambert, P. Wallace // *Astron. and Astrophys.* — 2003. — Vol. 400. — P. 1145 – 1154.
 30. Marini J. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees / Marini J., Murray C. — GSFC, Greenbelt, NASA-TM-X-70555. — 1973. — P. 60.
 31. Otsubo T. System-dependent centre-of-mass correction for spherical geodetic satellites / Otsubo T., Appleby G.M. // *Journal of Geophysical Research*. — 2003. — Vol. 108, No. B4. — P. 2201.
 32. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters / Z. Altamimi, X. Collilieux, J. Legrand [et al.] // *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. — 2007. — Vol. 112. — P. 9401.

АНОТАЦІЯ

Жаборовський В.П. Нова реалізація координат полюса Землі за даними лазерних спостережень штучних супутників. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 — Астрометрія і небесна механіка. — Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2015.

В дисертації йдеться про розрахунок координат полюса Землі з аналізу лазерних спостережень штучних супутників, які знаходяться на навколосемних орбітах різної висоти. Опрацювання спостережного матеріалу відбувалося за допомогою програмного пакету “КиївГеодинаміка++”, розробленого згідно останніх вимог Міжнародної служби обертання Землі (IERS).

За допомогою програмного пакета KG++ отримано, з кроком в одну добу, координати полюса Землі за 2001 рік. Результати порівнювалися з аналогічними, отриманими іншими центрами обробки даних лазерної локації. Показано, що KG++ дозволяє опрацьовувати дані лазерної локації штучних супутників Землі з точністю, не гіршою, ніж у інших центрів аналізу та цілком придатен для використання при розв’язанні задач, що їх IERS ставить.

Проведено аналіз моделей атмосферної густини, що придатні для використання при розрахунку гальмування супутників. Оцінено величини їх випадкових похибок та сформовано рекомендації щодо їх використання при аналізі даних лазерної локації низькоорбітальних супутників.

На основі стандартних рекомендацій IERS та моделі атмосферної густини NRL-MSISE-00 виконано спробу отримати координати полюса Землі зі спостережень супутників Ajisai, Stella та Starlette. На жаль, не усі збудуючі прискорення вдалося компенсувати, і координати полюса з цих спостережень отримані не були.

Ключові слова: лазерна локації штучних супутників Землі, координати полюса Землі, геодинаміка.

АННОТАЦИЯ

Жаборовский В.П. Новая реализация координат полюса Земли по данным лазерных наблюдений искусственных спутников. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 — Астрометрия и небесная механика. — Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2014.

Представленная диссертация посвящена расчету координат полюса Земли из анализа лазерных наблюдений искусственных геодезических спутников, находящихся на околоземных орбитах различной высоты. Уникальность результатов состоит в том, что обработка наблюдательного материала производилась с помощью собственного программного пакета “КиевГеодинамика++”, разработанного в ГАО НАНУ согласно последним требованиям Международной службы вращения Земли (IERS). Таким образом, с помощью программного пакета KG++ обрабатывались данные лазерной локации искусственных спутников Земли Lageos-1, Lageos-2, Ajisai, Stella и Starlette за 2001 год. Исследования такого типа координируются IERS, основной задачей которой является получение параметров вращения Земли, в частности координат её полюса. Наиболее подходящими для решения задачи определения и уточнения координат полюса Земли являются наблюдения спутников серии Lageos. Хотя количество наблюдений спутников, находящихся на более низких орбитах, значительно больше, атмосферное торможение для них более существенно. Учет атмосферных возмущений движения низкоорбитальных спутников является одной из проблем, рассматриваемых в диссертации. Исследования различных моделей атмосферной плотности позволили определить величину собственных ошибок каждой из них. Лучшие результаты были получены при использовании модели NRL-MSISE-00. Однако, следует отметить, что учет таких возмущений вместе со стандартным набором моделей IERS не позволил получить координаты полюса Земли из наблюдений низкоорбитальных спутников с точностью, сопоставимой с точностью результатов, полученных из наблюдений спутников Lageos.

Сравнение моделей атмосферной плотности производилось с помощью методики, которая позволяет оценить и исключить систематические ошибки на основе превращения Гельмерта. Для каждой модели был создан каталог значений плотности, и после исключения систематических ошибок рассчитывались взаимные дисперсии каталогов, которые принимались за количественные характеристики случайных ошибок. Собственные ошибки для каждого каталога можно рассчитать, имея значения взаимных дисперсий для трех и более каталогов и зная их корреляции.

С помощью программного пакета KG++ были получены координаты полюса Земли за 2001 год с суточным шагом. Эти результаты сравнивались с аналогичными, полученными другими международными центрами обработки данных лазерной локации. Было показано, что KG++ позволяет обрабатывать данные лазерной локации искусственных спутников Земли с точностью, не худшей, чем у других центров анализа, и вполне пригоден для использования при решении задач, которые ставятся IERS.

Ключевые слова: лазерная локация искусственных спутников Земли, координаты полюса Земли, геодинамика.

ANNOTATION

Zhaborovskyy V.P. The new realisation of Earth's pole coordinates based upon satellite laser ranging data. — Manuscript.

Thesis for candidate's degree by speciality 01.03.01 — Astrometry and celestial mechanics. — Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

The thesis is devoted to measuring of the Earth's pole coordinates with laser ranging observations of artificial satellites. The software package “Kyiv-Geodynamics++” is used in this work. This program developed according to the latest requirements of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS).

The pole coordinate series for 2001 with one day step were obtained using the software package KG++. These results were compared with similar, obtained by other international satellite laser ranging (SLR) data processing centers. It was shown that KG++ allows to process the satellite laser ranging data with the accuracy not worse than in other analysis centers and is quite suitable for use of IERS problems solving.

Also, an analysis of models of atmospheric density, suitable for use in calculating the drag of satellites was made. The magnitudes of random errors were evaluated and recommendations for their using into analyzing the data SLR low Earth orbits satellites were presented.

Based on the recommendations of the IERS standard and atmospheric density model NRL-MSISE-00 the attempt to derive the coordinates of the pole of Earth from Ajisai, Stella and Starlette observations was made. Unfortunately, not all perturbing accelerations we were able to compensate and pole coordinates from these observations were not derived.

Key words: satellite laser ranging, Earth's pole coordinates, geodynamics.