

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

ЧОЛІЙ Василь Ярославович

УДК 521.31, 521.93

**МОДЕЛІ ГЛОБАЛЬНОЇ ГЕОДИНАМІКИ ТА ЇХ ТЕСТУВАННЯ
ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка МОН України, Головній астрономічній обсерваторії НАН України, Міжнародному центрі астрономічних та медико-екологічних досліджень НАН України

Науковий консультант:

академік НАН України, доктор фізико-математичних наук

Яцків Ярослав Степанович,

Головна астрономічна обсерваторія, директор

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор,

Зазуляк Петро Михайлович,

Інститут геодезії національного університету «Львівська політехніка» МОН України,

професор кафедри картографії та геопросторового моделювання;

доктор фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник,

Шульга Олександр Васильович,

НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія» МОН України,

директор;

доктор технічних наук, професор,

Конін Валерій Вікторович,

Національний авіаційний університет МОН України,

професор кафедри аеронавігаційних систем.

Захист відбудеться 16 вересня 2021 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: 03143, м.Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ГАО НАН України за адресою: 03143, м.Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розісланий 13 серпня 2021 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01

кандидат фізико-математичних наук

І.Е.Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні десятиріччя відбулося значне підвищення точності засобів вимірювання і удосконалення методів, що використовуються для дослідження Землі як планети. Сучасні технології супутникових спостережень і методи супутникової геодинаміки в цьому ряду займають унікальне положення завдяки таким характеристикам, як висока точність, оперативність отримання даних спостережень, а також завдяки можливості їх використання для вивчення кінематичних і динамічних параметрів Землі на основі єдиних підходів. Сучасна точність супутникових вимірювань методами SLR (Satellite Laser Ranging), GPS (Global Positioning System) і DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) знаходиться на тому рівні, який дозволяє визначати не тільки значення параметрів моделей, але і їх зміну з часом.

Однак методи спостереження супутників не дублюють один одного, а розширюючи область в якій можливе вивчення Землі, в той же час мають як свої недоліки, так і переваги. Так, наприклад, система DORIS займає передові позиції в області вивчення іоносфери. Впливу іоносфери на лазерні спостереження супутників немає, тож іоносфера не може вивчатися цим способом.

Спостережні дані дозволяють аналізувати геодинамічні процеси, що відбуваються на рівні взаємодії кори, мантії, океану й атмосфери, і підійти до розв'язання проблем, пов'язаних з глобальною еволюцією Землі і з особливостями її внутрішньої будови.

Спостереження геодинамічних супутників відіграють велику роль і для розв'язання прикладних питань координатно-часового забезпечення. Тут виникає необхідність як в аналізі можливостей кожної системи, наприклад GPS і GLONASS, так і у розвитку існуючих та у додаванні нових моделей геодинамічних явищ. Наприклад, використання спостережень низькоорбітальних супутників, на жаль, неможливе без адекватних моделей атмосфери, що в свою чергу змушує займатися моделями термосферних вітрів, метеорологією та сонячною активністю. Така робота вимагає зусиль великої кількості учених, що зумовлює існування центрів опрацювання і аналізу, зазвичай під загальним керівництвом з боку IERS (International Earth Rotation Service, Міжнародна служба обертання Землі). Найголовнішими величинами, що мають суттєве прикладне значення є параметри обертання Землі (ПОЗ): координати полюса, поправка до всесвітнього часу та тривалість доби.

Кількість супутників усіх систем, що знаходяться на орбітах і спостерігаються з геодинамічною метою, зростає і в найближчому майбутньому перевищить сотню. Їх опрацювання має бути поставлене так, щоб можна було об'єднувати результати різних методів з метою побудови єдиної геодинамічної моделі Землі, включаючи її внутрішню будову, атмосферу, іоносферу, океани. На жаль, це неможливо без створення нових комп'ютерних програм, що будуть здатні одночасно опрацьовувати значно більші об'єми спостережень. Роботи в цьому напрямі призводять до створення моделей – їх кількість лише зростає, але незалежна об'єктивна оцінка їх

якості часто відсутня. Однак, оскільки Земля є єдиною глобальною системою, аналіз та використання усіх моделей має ґрунтуватись на єдиному підході.

Актуальність робіт у цій області не викликає сумнівів, оскільки ми знаходимося на порозі того часу, коли космічна геодинаміка готова перейти від вивчення окремих земних систем до вивчення Землі як цілого.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка під час виконання комплексної наукової програми “Астрономія та фізика космосу”, №01БФ051-14 “Дослідження динамічних процесів у геліосфері, магнітосфері та атмосфері Землі за результатами наземних та супутникових вимірювань” (№ держреєстрації 0101U002469), Головній астрономічній обсерваторії НАН України за темами №279 “Удосконалення методів та засобів високоточних астрономо-геодезичних вимірювань, їх обробка та аналіз з метою визначення ПОЗ та систем відліку” (№ держреєстрації 0110U004087), №271в “Визначення ПОЗ за даними сучасних астрономічних спостережень” (№ держреєстрації 0109U008107), №312кт “Регіональна система геодинамічного моніторингу з використанням методів космічної геодезії” (№ держреєстрації 0112U004458), №351в “Визначення та аналіз змін ПОЗ регіональних та локальних рухів і деформацій на геодинамічних полігонах України” (№ держреєстрації 0115U002686), (відповідальний виконавець, керівник лабораторії “Український центр визначення параметрів обертання Землі”), та у Міжнародному центрі астрономічних та медико-екологічних досліджень НАН України, “Комплексні дослідження малих тіл Сонячної системи в навколосемному просторі: розробка і впровадження методів та засобів досліджень астрокосмічних об'єктів природного та штучного походження”, №0104U010789, а також в рамках програм “Астрономія в Призельбрусьє”, 2007 – 2014 рр. “Динамические процессы в Солнечной системе: малые тела естественного и техногенного происхождения, астероидно-кометная безопасность (шифр ВЕСТА)” №01200708131, грантів РФФИ №08-02-00458, №09-02-00176, “Изучение вращения Земли по результатам обработки наблюдений навигационных ИСЗ” (відповідальний виконавець).

Мета дослідження: є вирішення проблем геодинаміки шляхом розробки нової чисельної теорії руху супутників, розвитку математичного апарату і програмного забезпечення для покращення точності геодинамічних моделей, розробки методик визначення геодинамічних параметрів та постановки власних спостережень.

Завдання дослідження:

Розробити єдиний підхід, за якого об'єктом дослідження є модель геодинамічного явища чи процесу, окремо, без від зв'язків та залежностей з іншими моделями.

Проаналізувати теоретичні основи усіх існуючих геодинамічних моделей як стандартизованих IERS, так і тих, що публікуються незалежними від IERS групами.

Розвинути математичний апарат та створити програмне забезпечення для аналізу та використання усіх моделей з єдиних позицій: універсалізація доступу та використання усіх моделей в єдиному ключі.

Розробити чисельні теорії руху штучних супутників Землі як високо-, так і низькоорбітальних, що відповідають за точністю спостереженням, оцінити їх якість.

Створити програмне забезпечення, що дозволить працювати з усіма системами геодинамічних супутникових спостережень (лазерними, доплерівськими, навігаційними) та радіоінтерферометричними.

Розробити статистичний підхід до тестування моделей, що дозволить тестувати суттєву або навіть всю частину функціональності моделі.

Розробити власне програмне забезпечення для отримання параметрів обертання Землі зі спостережень високих (Etalon), середньоорбітальних (Lageos) та низькоорбітальних супутників (Lares, Ajisai, Stella, Starlette).

Створити центр обробки лазерних спостережень у КНУ.

Створити програмне забезпечення для прогнозу параметрів обертання Землі та випадкових полів загального вмісту електронів (Total Electron Content, TEC) для експрес-аналізу та швидкої обробки спостережень.

Об'єкт дослідження: геодинамічні моделі з урахуванням загального вмісту електронів, параметрів штучних супутників Землі, земної атмосфери та іоносфери, параметрів земних, океанічних та атмосферних припливів тощо.

Предмет дослідження: характеристики точності моделей геодинамічних параметрів та методів супутникових спостережень у залежності від методик їх побудови та особливостей використання, внутрішньо сумісні ряди параметрів орієнтації Землі.

Метод дослідження: незалежний статистичний аналіз моделей, порівняння їх між собою, аналіз статистичних властивостей спостережного матеріалу, сингулярний спектральний аналіз, статистичне моделювання рядів та полів, метод авторегресії-ковзного середнього (АРКС), методики паралельних обчислень, розширене перетворення Гельмерта (ПГ).

При вирішенні задач геодинаміки використовувалися методи високоточних геодезичних вимірювань, а саме метод лазерних локацій ШСЗ, метод радіотехнічних вимірювань навігаційних супутників і метод доплерівської орбітографії. Для аналізу були використані спостереження, накопичені світовою мережею геодинамічних станцій, які пройшли контроль якості.

Обробку даних було виконано методами небесної механіки, а саме методом орбітального аналізу, що включає розроблені в дисертації чисельні теорії руху ШСЗ, основані на сучасних алгоритмах чисельного інтегрування рівнянь руху і на схемі диференційної корекції одно- і двогруповим методом оцінювання невідомих поправок.

Визначення взаємної орієнтації систем координат було виконано на основі позиційних спостережень панорамними приймачами випромінювання (ПЗЗ-матрицями) в обсерваторії на піку Терскол. При аналізі цих спостережень використані методи небесної механіки, фотографічної астрометрії і математичне моделювання.

Побудова програми для опрацювання геодинамічних спостережень супутників виконана з використанням основних технологій і базових паттернів проектування на мові C++ для розподіленого обчислювального середовища.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше побудовано методику на основі якої забезпечено регулярне отримання ПОЗ з достатньою точністю на основі опрацювання спостережень низькоорбітальних супутників. Створено центр опрацювання таких спостережень у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка. Для цього використано розроблену автором нову чисельну теорію руху супутників на орбітах різної висоти.

Розроблено нові методики визначення геодинамічних параметрів за спостереженнями супутників різних систем, оцінювання ПОЗ за спостереженнями низькоорбітальних супутників різних систем, які включають також синхронні визначення поправки до прийнятої моделі атмосфери (балістичного коефіцієнта), альbedo та емпіричного прискорення супутника.

Вперше розроблено та запроваджено методику статистичного тестування геодинамічних моделей з великою кількістю вхідних параметрів, таких як моделі атмосфери та іоносфери.

Створено новий програмний комплекс Juliette для розв'язання геодинамічних задач у розподіленому обчислювальному середовищі, що може успішно конкурувати з кращими міжнародними зразками.

Вперше розроблено методики оцінки точності геодинамічних моделей з використанням розширеного ПГ та сингулярного спектрального аналізу (ССА).

Розроблено нові методики спостережень навігаційних супутників з використанням твердотільних приймачів випромінювання, для визначення кутів взаємної орієнтації навігаційних систем координат GPS і GLONASS, та вперше введено поняття другої тіньової функції.

Вперше розроблено методику прогнозування карт загального вмісту електронів (ТЕС) на основі ССА та моделювання методом АРПК.

Вперше проведено спостереження магнітоспряжених затемнень у радіодіапазоні і отримано спостережні докази на користь існування пилової лінії в іоносфері.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені чисельні алгоритми використовувались при вивченні впливу збурюючих факторів різного походження на орбіти супутників, а також для визначення більш точних значень параметрів моделей збурень, що дозволило поставити і успішно вирішити задачу про визначення ПОЗ зі спостережень низькоорбітальних супутників.

Шляхом порівняння результатів нового програмного забезпечення з існуючими можна сподіватись на відшукання похибок та неточностей моделей чи програмного забезпечення.

Розроблені динамічні моделі використовуються Центром аналізу лазерних спостережень ШСЗ. Після відповідних тестів та перевірок з боку IERS ці значення ПОЗ будуть братись до уваги IERS для побудови комбінованих розв'язків.

Методика прогнозування глобальних іоносферних карт використовується в роботі Центру аналізу при побудові більш точних моделей іоносфери для потреб теорій руху супутників.

Оцінки параметрів атмосфери забезпечують можливість уточнення впливу атмосферних збурень на рух низькоорбітальних ШСЗ.

Запроваджена система розподілених обчислень забезпечила можливість ефективного розв'язання задач астрометрії, небесної механіки та глобальної геодинаміки.

Оцінки ПОЗ послужать для підвищення точності комбінованих рядів ПОЗ в IERS.

Статистичне тестування геодинамічних моделей дозволить виявляти приховані помилки.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій. Достовірність отриманих результатів і висновків забезпечується точним слідуванням статистичним процедурам використаних методів – сингулярного та авторегресійного спектрального аналізу, методу АРКС, класичного методу найменших квадратів.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів і висновків забезпечуються також використанням сучасних методик програмування, паттернів проектування і методів тестування програмного забезпечення, у тому числі – використанням модельних прикладів, стандартних тестів, статистичного підходу до тестування, проходженням тестів з боку IERS з метою оцінювання якості програмного забезпечення, порівнянням отриманих результатів з висновками інших центрів аналізу, аналізом розбіжностей.

Достовірність результатів також підтверджена публікацією результатів роботи у фахових реферованих журналах та апробацією на міжнародних наукових конференціях.

Особистий внесок здобувача. Роботи [3], [5], [6], [8], [9] виконані автором одноосібно. В роботах [2], [4], [11], [12] автору належить постановка задачі та контроль за її виконанням, обговорення результатів, практична участь у розв'язанні завдань. У роботах [7], [13], [14] автору належить постановка задачі. В роботі [10] автор брав участь в опрацюванні результатів. В роботах [15] – [23] автору належить опрацювання спостережень іоносферних шумів, ефемерид магнітоспряжених затемнень та участь в інтерпретації результатів. У роботі [21] розвинута запропонована автором ідея магніто-спряжених затемнень. Робота [1] є узагальнюючою роботою великого міждисциплінарного колективу, де автору належить частина, присвячена моделюванню атмосфери пакетом Geos-Chem.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на таких міжнародних та українських конференціях:

Міжнародна наукова конференція International Symposium From Solar Corona to Interplanetary Space, 2000, Київ, Україна.

1-й, 4-й Українських конференціях з перспективних наукових досліджень, 2001, 2004, Київ, Україна.

EGU General Assembly, 2002, Ніцца, Франція.

Міжнародні наукові конференції 9th, 15th, 17th, 18th, 19th, 20th, 23th, 24th, 25th YSC on Astronomy and Space Physics, 2002, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2016, 2017, 2018 Київ, Україна

COSPAR Assembly, 2003, Маастріхт, Нідерланди.

Міжнародні наукові конференції Weeks of Doctoral Students, 2003, 2010, 2011, Прага, Чехія.

Міжнародна наукова конференція Magnetospheric response to Solar Activity, 2003, Прага, Чехія.

COSPAR Assembly, 2004, Ніцца, Франція.

EGU General Assembly, 2007, 2008, 2009, 2010, 2014, Відень, Австрія.

6-й Орловській конференції “Вивчення Землі як планети методами геофізики, геодезії і астрономії”, 2009, Київ, Україна.

“Астрономия и всемирное наследие“ 2010, Казань, Росія.

“Всероссийская астрометрическая конференция“, ВАК-2011, Нижній Архиз, Росія.

“Всероссийская астрометрическая конференция“, ВАК-2012, Пулково, Санкт-Петербург, Росія.

Journee’2011, Відень, Австрія, 2013, Париж, Франція.

Результати дисертаційної роботи також були представлені на нарадах центрів аналізу ILRS, 2009 – 2016 рр., наукових семінарах кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ГАО НАН України і Міжнародного центру астрономічних і медико-екологічних досліджень НАН України.

Публікації за темою дисертації. Викладені в дисертації результати опубліковані у 80 наукових публікаціях, а саме: в 23 статтях у реферованих фахових журналах [1-23], у 52 тезах та статтях, опублікованих у матеріалах міжнародних конференцій [24-76]. Частково матеріал дисертації опубліковано в підручнику [77] для студентів. Принципи та деталі роботи програмного забезпечення викладено в технічній документації [78-80].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків, списку літератури і двох додатків. Робота викладена на 382 сторінках, містить 39 таблиць, 118 рисунків та 436 найменувань у списку літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та основні завдання, описано методи, які необхідні для розв’язання завдань, а також вказано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відмічено особистий внесок автора і рівень апробації результатів.

Перший розділ дисертації “**Аналіз сучасного стану методів космічної геодинаміки**” присвячений аналізу сучасного стану методів космічної геодезії і супутникової геодинаміки. В ньому виконано порівняльний аналіз чотирьох основних методів спостережень: лазерної локації ШСЗ і Місяця, доплерівської орбітографії супутників системи DORIS, радіотехнічних спостережень навігаційних ШСЗ.

Особливу увагу автор приділив аналізу динамічних моделей, які необхідні для високоточного прогнозу руху супутників. Всі моделі розділені на дві групи, які розглядаються в дисертації окремо, а саме: моделі, стандартизовані IERS, і моделі, для яких стандартні варіанти ще не прийняті.

Лазерні спостереження геодинамічних ШСЗ і фазові вимірювання GPS супутників вносять найбільш суттєвий вклад у розв’язання задач глобальної геодинаміки. Що стосується спостережень супутників системи DORIS, то вони забезпечують також і можливість вивчення і моделювання іоносфери, яка істотно впливає на точність моделювання руху цих супутників. Одна з задач, що при цьому виникає, полягає у виключенні впливу іоносфери зі спостережень шляхом утворення різниць спостережної та обчисленої величини та у моделюванні іоносферних ефектів другого і більш високих порядків. Особливості методів спостережень супутників зумовлюють використання різних методів опрацювання спостережень. Незважаючи на відмінності, алгоритми і моделі руху супутників демонструють також і спільні риси, які потрібно вивчати незалежно від методів спостережень.

Аналіз теорії і практики моделювання, таким чином, дещо відсторонюється від процесу спостереження і утворює окрему, дуже важливу задачу.

Досягнутий рівень точності спостережень супутників (1 см) потребує при їх обробці адекватних точностей використаних моделей збурень руху ШСЗ і чисельних методів прогнозування. Оскільки сучасні чисельні методи забезпечують необхідну точність інтегрування руху супутників, то основні джерела похибок, що визначають точність опрацювання спостережень, зумовлюються якістю тих динамічних і кінематичних моделей, які були використані. Отже, розробка і подальша параметризація цих моделей і уточнення їх параметрів із спостережень складають важливий напрям досліджень.

Алгоритми переходу із однієї системи відліку до іншої достатньо стандартизовані, і тут головна задача зводиться до визначення параметрів обертання Землі зі спостережень. Алгоритми моделювання ефектів, що впливають на положення пунктів спостережень, також стандартизовані і досить точні. У значно меншій мірі це стосується до моделювання ефектів, що збурюють орбіти супутників. Тому головну увагу в дисертації приділено динамічним моделям.

Однак автор вважає, що область геодинамічних і геофізичних явищ, точність моделювання яких повинна зростати, слід розширити, наприклад щоб отримати можливість ставити нові задачі. Питання про можливе використання в геодинаміці низькоорбітальних супутників, таких як Stella, Starlette, Ajisai, обмежується точністю моделювання густини нейтральної атмосфери на відповідних висотах. Сила атмосферного опору – це найбільш складна і погано модельована сила. В

дисертації розглянуто послідовність моделей нейтральної атмосфери MSIS, від MSIS-86 до NRL-MSISE-00 [70].

Моделі сили атмосферного гальмування розглядаються у своєму розвитку. Вони демонструють суттєве підвищення точності, однак розкид модельних значень густини нейтрального компонента, все ще виражається одиницями відсотків. Звичайно, вплив нейтральної атмосфери на точність супутникових спостережень давно аналізується в літературі, однак, насамперед як джерело похибок рефракції [60]. Розділення нейтральної атмосфери на вологі та сухі компоненти [61], збірка моделей функції нахилу [62], [63], [64] – ці і інші роботи свідчать про успіхи рефракційної теми. На відміну від сказаного, силі атмосферного гальмування приділено значно менше уваги [65], [66], очевидно, з тієї причини, що для визначення геодинамічних параметрів використовуються в основному високоорбітальні супутники, для яких ця сила практично несуттєва.

В дисертації побудована і впроваджена технологія моделювання цієї сили в процесі опрацювання спостережень низькоорбітальних супутників Stella, Starlette, Ajisai, Lares. Питання побудови адекватної спостереженням моделі іоносфери та альbedo супутника [67] також розглянуті в першому розділі разом з деякими малими ефектами, що мають значення для точного обчислення сили світлового тиску, а саме: власне випромінювання Землі, ефект Ярковського та ефект Пойнтинга–Робертсона.

Перетин границі тіні Землі не може розглядатися тільки з геометричних позицій, оскільки в цьому випадку сила тиску світла задається розривною функцією, що створює труднощі при інтегруванні рівнянь руху ШСЗ. Такі явища в атмосфері, як дисперсія, розсіяння світла, рефракція і навіть зміна концентрації газів (в тому числі озону) з висотою відіграють роль при обчисленнях. Незважаючи на складність обчислень (їх на порядок більше, ніж у моделі Кабеляч [68]), модель Вокроухліцького [71] слід приймати як найбільш адекватну.

Точність моделювання руху супутників можна підняти також за рахунок емпіричного прискорення. Це зібрані під однією назвою усі немодельовані чи погано модельовані сили, які ніяк не враховуються в рівняннях руху. Така модель залишає деяке відчуття штучності, тому ми відносимося до неї з деякою обережністю.

Другий розділ дисертації “Алгоритми опрацювання спостережень супутників” присвячений деталям розробки комплексу алгоритмів і програм для опрацювання спостережень лазерних супутників. Що стосується світових зразків, то їх небагато. Найбільш важливою їх особливістю є те, що кожен з таких програмних пакетів розвивався десятки років і, як правило, побудований на тих архітектурних принципах програмування, що відповідали часу початку їх розробки. Всі вони написані на Фортрані, що накладає додаткові обмеження на їх можливості.

Програмний комплекс Juliette написаний автором самостійно. Метою автора було створення такого продукту, який би не базувався ні на яких відомих парадиг-

мах, і таким чином, був цілком незалежним. Після впровадження частини цього програмного забезпечення в ГАО НАН України і Українському центрі визначення параметрів обертання Землі, за ним закріпилася назва КиївГеодинаміка++, а в скороченому вигляді – Juliette. Створений автором програмний комплекс має ряд особливостей.

По-перше, він написаний цілком і повністю з нуля на C++. Це дозволило врахувати більшість особливостей і недоліків існуючих пакетів програм. Наша задача полягала не в осучасненні старого продукту, а в написанні нового і побудові його архітектури так, щоб вона з самого початку допускала зміни, в найзагальнішому розумінні цього слова. Це надзвичайно важливо, адже навіть стандартизовані геодинамічні і астрономічні моделі з часом поліпшуються.

По-друге, комплекс алгоритмів і програм складається з великої кількості окремих модулів, які взаємодіють один з одним на основі попередньо спроектованого і фіксованого протоколу обміну даними і протоколу викликів. Цей підхід, відомий як plugin-технологія, забезпечив можливість заміни моделей без особливих затрат часу і зусиль.

Архітектурна схема системи програм представлена на рис. 1.

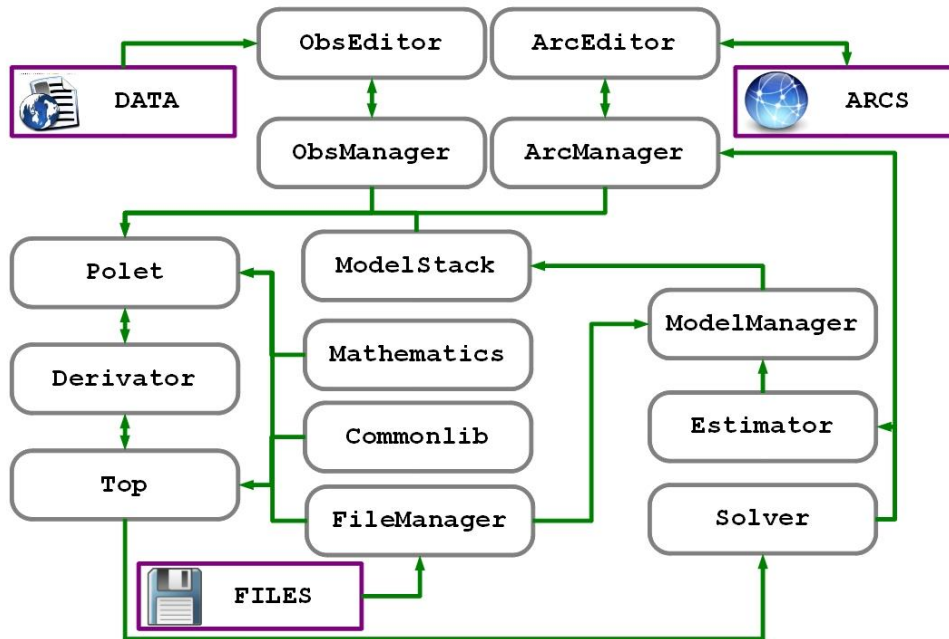


Рис. 1. Блок-схема програмного комплексу.

Стандартний набір модулів забезпечує автоматичне знаходження поправок до набору параметрів (уточнювані параметри) методом найменших квадратів. Основними модулями системи є Polet і Top, які здійснюють моделювання руху супутників і знаходять поправки до уточнюваних параметрів відповідно. Велике значення для роботи системи мають модулі Derivator і Estimator, в яких зібрані процедури для знаходження похідних від спостережних величин за уточнюваними

параметрами і засоби для роботи з розв'язком. Для первинної обробки спостережень у системі є ObsManager і ObsEditor, а для обслуговування масивів отриманих даних (дуг) - ArcManager і ArcEditor. Модуль Solver – це підсистема розв'язання систем лінійних рівнянь. Таких модулів у системі три: оснований на LAPACK, побудований на основі CUBLAS і безіменний, написаний автором самостійно. Він оснований на QR-розбитті матриці, ортогональних перетвореннях і стабілізуючих процедурах для отримання розв'язку найменшої довжини. FileManager забезпечує обслуговування файлів системи.

Важливою частиною програмного комплексу є модуль інтегратора, який є частиною модуля Polet. Оригінальна версія була написана ще у 1980-і, вона ввійшла до першої версії КиївГеодинаміки. Інтегратор реалізує метод Адамса з автоматичним вибором кроку і порядку з метою задоволення вимог точності інтегрування. Алгоритм був опублікований і названий VASOMI (VARIABLE Step and Order Method of Integration) [73]. Перекладений автором дисертації на C++ і дуже уважно протестований, він став основою системи розподілених обчислень програмного комплексу Juliette.

Найскладнішим і найважливішим модулем системи є бібліотека моделей Modellib. В ній містяться процедури для геодинамічних обчислень для всіх геодинамічних процесів та явищ, як стандартизованих IERS, так і створених неалежними групами. Таких бібліотек у програмному комплексі декілька: кожна відповідає певній редакції Стандартів. Програма може працювати, використовуючи будь-який зі Стандартів IERS за основу.

Окрема модель, що використовується при опрацюванні спостережень, реалізується в вигляді класу і додається в роботу динамічно, без необхідності перезбирання програми в цілому. Робота з різними типами спостережень зводиться фактично до розташування необхідних моделей в одному місці. Однак, оскільки більша частина моделей для різних типів спостережень співпадає, система містить стандартні моделі в вигляді динамічних бібліотек. Ці бібліотеки сконструйовані так, що коли користувачеві потрібна якась особлива версія певної моделі, він може внести її в систему, розташувавши свою динамічну бібліотеку у відповідному місці. В цьому випадку внесена бібліотека має перевагу і закриває собою стандартну функціональність, чи її частину.

Ще однією особливістю програмного комплексу є можливість уточнення будь-якого параметра будь-якої з доданих у систему моделей. Це можна зробити за допомогою спеціальних класів, що називаються диференціаторами. Ці класи будуються кожен на основі своєї моделі і відповідають за знаходження похідних за параметрами лише цієї, своєї, моделі. Диференціатори не потребують спеціального догляду, досить зібрати їх у відповідному місці, і система буде здатна знаходити необхідні похідні за параметрами, що будуть уточнюватися.

Похідні можна знаходити або аналітично, для чого диференціатор опитує свою модель, а вона виконує відповідні обчислення, або чисельно, коли диференціа-

тор забезпечує правильне заповнення правих частин диференційних рівнянь для похідних, що інтегруються сумісно з рівняннями руху.

Отримання поправок до уточнених параметрів виконується методом найменших квадратів. Система лінійних рівнянь, яка при цьому виникає, може мати великий розмір; нами успішно протестовано одночасне визначення мільйона параметрів.

За отримання поправок і внесення їх в модель відповідають програмні класи, які називаються розв'язувачами. За аналогією з диференціаторами, кожен розв'язувач відповідає за роботу з однією моделлю. Він забезпечує вибірку "своїх" поправок з загального розв'язку і правильне внесення їх в модель і в масив результатів таким чином, що перехід до наступної ітерації і/або іншого масиву не потребує ніяких додаткових дій користувача.

В сучасному вигляді програмний комплекс дещо нагадує конструктор, в якому опрацювання спостережень різних типів починають із збирання воедино необхідного програмного забезпечення, моделей, диференціаторів і розв'язувачів.

В другому розділі дисертації також викладено результати автора стосовно стандартизації файлів даних та результатів.

Програма взаємодіє з користувачем через файли, переважно текстові. До таких переусім відносяться масиви даних, формат яких встановлюється протоколом обміну і не залежить від типу спостережень. Крім того, це файли із спостереженнями або у внутрішньому форматі, або у форматі RINEX. Програмний комплекс уміє читати RINEX-файли форматів 2 і 3, RINEX-DORIS, а також всі основні формати, в яких представляються лазерні спостереження (Merit, CRD, NPT та ін.). Результати опрацювання представляються в текстовому форматі, або в форматі SINEX. Загальний вигляд потоків інформації представлено на рис.2.

Орієнтація на нові технології програмування дозволила автору дисертації сформулювати пропозиції щодо впровадження деяких стандартних підходів до форматів даних, моделей і спостережень. Не викликає сумніву той факт, що формати файлів, що використовуються в геодинаміці, незважаючи на те, що вони ґрунтуються на RINEX(SINEX)-подібних правилах, відрізняються один від одного.

В дисертації зроблено та обґрунтовано висновок про те, що стандартизація усіх вхідних і вихідних форматів, включаючи також формати представлення параметрів моделей і кінцевих результатів, відповідатиме сучасним інформаційним технологіям і сприятиме використанню вже існуючого програмного забезпечення з інших областей для опрацювання результатів і їх представлення, в тому числі і через Інтернет. Для цього автор запропонував використовувати формат XML, важливою особливістю якого є те, що для завантаження чи вивантаження даних у форматі XML можна використати існуюче програмне забезпечення, як правило, відкрите і добре тестоване, а при зміні внутрішньої структури файла зміни коду не потрібні. Розроблена автором система опрацювання геодинамічних спостережень вже містить модулі, здатні працювати з XML-файлами.

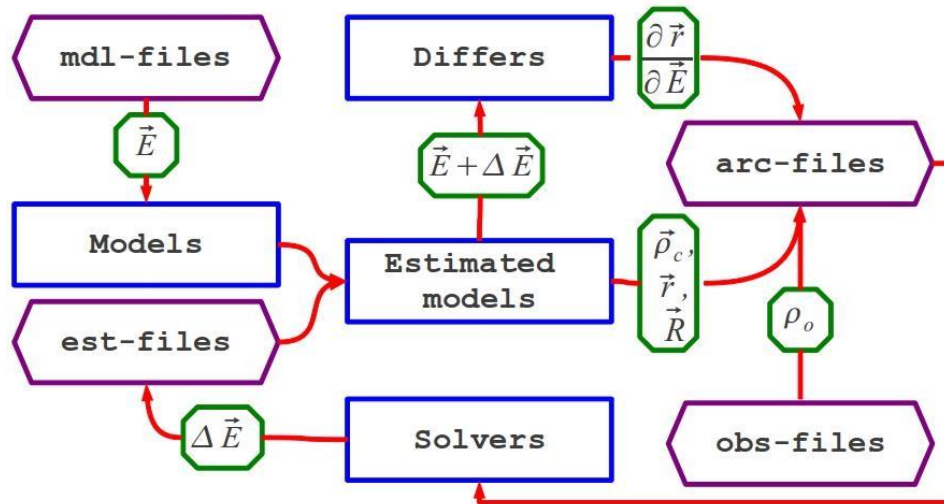


Рис. 2. Схема руху даних.

В третьому розділі “Чисельне інтегрування рівнянь руху” увагу зосереджено на алгоритмах інтегрування звичайних диференціальних рівнянь, в тому числі паралельних. Проаналізовано характеристики дещо забутого методу Multistep-out-of-grid (MOG), що об’єднує як властивості методів Рунге-Кутти, так і властивості методів Адамса. Отримано доказ того, що при деяких значеннях параметрів методу MOG він показує кращі параметри точності, ніж аналогічні за своїм порядком методи Адамса, але працює повільніше. Оскільки швидкість роботи програмного комплексу в цілому важлива, то єдиним виходом з ситуації є його паралелізація.

Найбільш відомими засобами є MPI і PVM, за допомогою яких одна і та ж програма з різними початковими умовами запускається на різних машинах, а отримані часткові розв’язки об’єднують і опрацьовують сумісно. Більша частина паралелізації була виконана автором на початку 2000-х років, коли можливості паралельних обчислень ще тільки розвивалися. Зараз ми зосередилися на CUDA (Computer Unified Device Architecture), апаратному рішенню компанії NVIDIA.

В розробленому автором програмному комплексі інтегрування руху супутника виконується або на окремому комп’ютері, або на окремому процесорному ядрі. Збирання системи умовних рівнянь побудовано на багатогруповому методі розділення змінних, чи в більш простих термінах – на блочному характері матриці нормальних рівнянь, а розв’язок системи умовних рівнянь виконується розподіленим розв’язувачем.

Автор дисертації використав методіку, розроблену співробітниками університету Антверпена [74], які змогли побудувати комп’ютер терафлопсової продуктивності і розмістити його в звичайному настільному ПК. Автору вдалося побудувати аналогічний комп’ютер і пристосувати його для геодинамічних задач з використанням програмного комплексу.

Параметри цього настільного кластера приведені в табл. 1. Автор обмежився тільки реалізацією алгоритму VASOMI як паралельного методу Адамса зі змінним кроком і порядком для CUDA.

Таблиця 1

Параметри настільного кластера

Параметр	Значення
Процесор	AMD Phenom 9850, 4 ядра
Пам'ять	8 Гб
Кількість відеокарт	4
Тип відеокарт	GeForce GTX-260
Число ядер	768
Пам'ять відеокарт	4 Гб
Дисковий простір	8 Тб
Пікова потужність	1500 Вт

Результати виконаних автором робіт з перетворення коду VASOMI показали, що навіть просте розпаралелювання тільки алгоритму VASOMI приводить до прискорення інтегрування в декілька разів. Ми вважаємо, що цим підходом питання про швидкість роботи програмного комплексу практично знімається: згідно з тестами автора, при інтегруванні рівнянь руху 100 навігаційних супутників на 15-добовому інтервалі необхідний час інтегрування (умовна задача двох тіл) вимірюється секундами і основним обмежуючим фактором стає швидкість передачі інформації, а не швидкість обчислень.

Переважає більшість розробок, що використовують CUDA, орієнтується на сумісне інтегрування величезної (10^6) кількості дуже простих диференціальних рівнянь. Найбільш відомий приклад – задача дуже великої кількості тіл, наприклад, моделювання руху зірок у зоряній системі, їх зіткнення, колапс та ін. Інтегратори, що при цьому використовуються, архітектурно прості (інтегратори Ерміта низьких порядків) і в них відсутні засоби для контролю кроку і порядку, тобто точності. Праві частини таких рівнянь теж нескладні, хоча їх обчислення і достатньо трудомістке.

Обробка супутникової інформації суттєво відрізняється від цієї задачі. Формули для вибору кроку та порядку інтегрування складні а праві частини диференціальних рівнянь руху – дуже складні. Саме тому автором були розпаралелені також алгоритми для основних геодинамічних моделей, необхідних для обчислення сил. Розв'язанню цієї задачі присвячено третій параграф. Автором також розроблено паралельну версію лінійного методу найменших квадратів з обмеженнями для визначення диференціальних поправок.

В четвертому розділі дисертації “Аналіз точності окремих геодинамічних моделей” детально аналізуються моделі густини нейтральної атмосфери, планетні та місячні ефемериди та моделі геопотенціалу.

Головним методом, використаним для аналізу моделей, є перетворення Гельмерта. Класичне перетворення Гельмерта аналізується з метою його розширення для більш повного врахування систематичної частини похибок моделі. Введені і проаналізовані аналогії між задачами зоряної астрономії (моделі Ковальського–Ері, Оорта–Ліндблада, Огородникова–Мілна) та різними варіантами перетворення Гельмерта, що дозволяє враховувати зсуви, повороти і окремі клас деформацій як частини систематичної похибки.

Розвиток аналогії між геодинамічними та зоряно-астрономічними задачами привів автора до постановки задачі про знаходження “тектонічних плит” на небі для точнішого врахування локальних систематичних похибок.

Оцінювання дисперсії випадкових похибок ґрунтується на системі рівнянь, що включають величини кореляцій між наборами даних (каталогами), що порівнюються. Автором розглянуто три способи знаходження кореляцій: за стандартними статистичними формулами, за алгоритмом з роботи [72], та за авторським алгоритмом, що ґрунтується на багатовимірній оптимізації у полі кореляцій.

Моделі густини нейтральної атмосфери важливі для точного врахування сили гальмування, що діє на низькі супутники. Проаналізовані усі доступні моделі атмосферної густини. Однак, лише три моделі виявилися достатньо відкритими, щоб з ними можна було проводити додаткові чисельні експерименти. Це моделі NRL-MSISE, DTM-2012, JB2008.

Використавши розширене перетворення Гельмерта на послідовності поверхонь рівної густини, проведено аналіз випадкових похибок моделей атмосфери в залежності від висоти, космічної погоди та пори року. Це дозволило сформулювати висновок на користь використання моделі NRL-MSISE в пакеті Juliette.

Окрім цього, В.Жаборовському [77] під керівництвом автора вдалося знайти оцінки точності значень густини в залежності від висоти на рівні 30 – 35 %, що дещо гірше, ніж оцінки, отримані авторами моделей.

На жаль, усі три моделі атмосферної густини показують найгіршу точність в тому діапазоні висот (700 – 800 км), які найбільш цікаві для опрацювання SLR-спостережень низькоорбітальних супутників.

Аналогічний підхід було використано для порівняння трьох чисельних фундаментальних планетних ефемерид LEDE421, INPOP08, EPM2008, аналітичної планетної ефемериди VSOP87 та місячної ефемериди ELP-82. Для знаходження дисперсії випадкових похибок аналізуються положення планет, задані в системах різних ефемерид та отримані за допомогою їхнього ж програмного забезпечення на інтервалах часу, рівних одному періоду обертання планети довкола Сонця.

Загальний результат порівняння полягає в тому, що поведінка ефемериди EPM суттєво відрізняється від поведінки інших названих ефемерид. Потужність випадкових похибок ефемериди EPM суттєво змінюється з часом. Положення початку цієї

ефемериди незрозуміло зсунуте на величину близько 100 км та має обертання з лінійною швидкістю близько 1 км/рік у площині, перпендикулярній напрямку на точку весняного рівнодення, на відміну від LEDE та INPOP, центри яких узгоджуються в межах сотень метрів.

Проаналізовано місячні ефемериди, з яких ELP-82 (аналітична) має вдвічі гіршу точність, ніж усі три перелічені вище чисельні.

Друга частина розділу присвячена методу сингулярного спектрального аналізу (ССА), за допомогою якого знаходиться оцінка точності, робиться прогноз та закриваються пропуски в рядах на прикладі рядів координат полюса та зенітної затримки сигналів GNSS в атмосфері. Показано, що на відміну від перетворення Гельмерта, коли для оцінки точності доводиться брати щонайменше три ряди і аналізувати їх сумісно, ССА дозволяє оперувати лише з одним рядом даних. Показано, що спектр власних чисел довільного ряду можна розбити на три частини, відповідно корисний компонент, випадковий (високочастотні шуми в даних) та хаотичний (похибки заокруглення). Значення точності отримуються як загальна дисперсія усієї випадкової частини. Показано, як можна розділити ряд на такі три частини. Узгодження з іншими оцінками точності задовільне.

Метод SSA використано для прогнозування параметрів обертання Землі, що необхідно для того, щоб знати ПОЗ під час первинного опрацювання спостережень.

Досвід автора в сфері інформаційних технологій дозволив поставити та успішно розв'язати задачу про суцільне тестування моделей, що потребують великої кількості вхідних параметрів. Наприклад, моделі нейтральної атмосфери чи іоносфери потребують дати, часу, координат, висоти, космічної погоди, магнітного поля та інше, крім того модель іоносфери (International Reference Ionosphere, IRI) може вимагати до п'ятдесяти параметрів. Провести всестороннє тестування у цьому випадку дуже важко. Самі автори IRI подаються лише 10 тестів [78], якими покривається дуже невелика частина функціональності. Нами запропоновано схему статистичного тестування і проведено понад мільйон тестових запусків моделі IRI. Дуже неочікуваним виявилось те, що при деяких значеннях вхідних параметрів, допустимих відповідно до документації, офіційна модель IRI не працює.

П'ятий розділ дисертації **“Використання програмного комплексу”** присвячений викладенню основних результатів, отриманих з розробленим програмним комплексом.

Нова теорія руху низькоорбітальних лазерних супутників була успішно протестована на масиві спостережень супутників Lares, Ajisai, Starlett, Stella на даних 2014 – 2015 рр. повному чандлеровому періоді. Ми обмежилися координатами полюса та тривалістю доби. Для порівняння тими ж методами і програмами було опрацьовано спостереження супутників Lageos-1, Lageos-2, Etalon-1, Etalon-2. Проведене порівняння дозволяє стверджувати, що модель руху низькоорбітальних супутників цілком придатна для отримання ПОЗ з достатньою точністю.

Точність моделювання орбіти в новому пакеті програм задовільна для отримання координат полюса. Якщо притримуватися того, що кожне спостереження цінне, і відкидати лише статистично доведені викиди та помилки, то орбіти супутників Lageos гарантовано моделюються з точністю, вищою ніж 10 см. Точність моделювання орбіти супутника Lares теж така. Оскільки ці супутники рухаються на різних висотах (7000 км для Lageos і 700 км для Lares), такий результат можна вважати добрим.

Координати полюса та тривалість доби оцінювалися один раз на добу. Спроба отримати параметри орієнтації Землі на субдобових інтервалах виявилась неуспішною через недостатню кількість спостережень. Для супутників Etalon спостережень настільки мало, що похибки навіть для координат полюса дуже великі. Наш висновок полягає в тому, що супутники Etalon для цієї задачі непридатні через малу кількість спостережень і їх дуже нерівномірний розподіл по часу.

Отримані ряди ПОЗ порівнювалися між собою та з офіційним рядом IERS. Цей ряд є фінальним розв'язком після об'єднання результатів багатьох центрів і різноманітних методик.

Таблиця 2

Оцінки точності ПОЗ (секунди дуги та часу)

	Lag1	Lag2	Lars	Ajis	Star	IERS
X	0.003774	0.005398	0.005533	0.013392	0.013097	0.00296
Y	0.003907	0.005953	0.005635	0.011075	0.013045	0.00235
Lod	0.000587	0.000701	0.000769	0.001911	0.001515	0.00011

Як видно з табл.2 супутник Stella погано підходить для визначенні ПОЗ, очевидно через те, що він низький, сонячносинхронний і завжди освітлений.

Нами отримано також ряд ПОЗ шляхом об'єднання спостережень на рівні умовних рівнянь. При цьому одна проти одної працюють дві тенденції: покращення точності через збільшення кількості спостережень та можливе її погіршення через гіршу точність спостережень низькоорбітальних низькоорбітальних супутників. Однак, формальна точність отриманого таким способом об'єднаного ряду вища, що дозволяє сподіватися на те, що включення спостережень низькоорбітальних супутників до процедур IERS, можливо, покращить точність фінальних результатів (див. табл.3).

Таблиця 3

Оцінки точності ПОЗ при об'єднанні умовних рівнянь (секунди дуги та часу)

	Lag1	Lag1+Lag2+Lars	Lag1+Lag2+Lars+Star
X	0.003774	0.002701	0.002843
Y	0.003907	0.002668	0.002983
Lod	0.000587	0.000347	0.000587

Результати такого аналізу досить об'ємні і для їх представлення створено постійно оновлюваний веб ресурс: <http://space.univ.kiev.ua/Choliy/SLR/>. Обробка спостережень продовжується, і нові результати представляються на цьому ресурсі.

Апаратура для спостереження за супутниками теж вносить свої похибки. Такі похибки теж аналізувалися з метою визначення їх впливу на точність результатів. Основою для цієї роботи була запропонований в [69] підхід для моделювання часових зсувів годинників на станціях та систематичних зсувів у відстанях, пов'язаних з калібруваннями вимірювальних приладів. Внесення цієї моделі до програмного комплексу дозволяє ще підвищити точність моделювання. Так, для супутників Lageos впевнено отримується один сантиметр, а для супутника Starlette – одиниці сантиметрів.

У шостому розділі **“Точність динамічних систем відліку GPS і GLONASS”** розглядаються питання незалежного аналізу точності динамічних систем відліку, заданих сузір'ями навігаційних супутників.

Існуючі в цей час декілька систем навігаційних супутників, таких як GPS та GLONASS, їх подальший розвиток і поява нових, вимагають їх постійного моніторингу з метою визначення їх зовнішньої точності.

Власники навігаційних систем працюють у напрямку підвищення точності цих систем відліку. Однак тільки порівняння цих систем між собою дозволяє визначити їх взаємні систематичні відхилення. Знання цих величин піде на користь точності як окремих систем, так і об'єднаних навігаційній системі відліку.

Методика порівняння систем відліку – задача достатньо класична для астрометрії, яка протягом сторіч проводила порівняння реалізацій каталожних систем координат. Суть її полягає в тому, що відраховуються і порівнюються координати спільних об'єктів (навігаційних супутників в даному випадку) в різних системах відліку, а систематичні нев'язки інтерпретуються як неспівпадіння систем відліку.

На жаль, отримання координат (ефемерид, елементів орбіти) супутників сузір'я GPS у динамічній системі відліку GLONASS чи навпаки неможливе через особливості їх реалізації. Однак це можна зробити, користуючись третьою системою відліку, наприклад оптичною, відраховуючи положення супутників різних систем у цій третій системі. При правильно побудованій методиці, такі оптичні спостереження можуть послужити для оцінки точності динамічних систем відліку, навіть якщо точність відліку в цій третій системі гірша, ніж у перших двох.

Методика оптичних спостережень навігаційних ШСЗ є розвитком методики спостережень геостаціонарних ШСЗ, що успішно розвивається в обсерваторії на піку Терскол. Автором дисертації методика, запропонована в роботах Думи і співробітників [76], була розвинута з метою її використання до навігаційних супутників. В процесі розробки цієї теми, автор проаналізував такі підходи, основані на спостереженнях супутників на фоні зірок:

- стандартні астрометричні спостереження, опрацювання знімків та отримання координат;

- спостереження ШСЗ є моменти перетину ними ліній небесної сфери, в першу чергу небесного екватора;
- спостереження в моменти перетину видимих шляхів супутників різних систем;
- покриття супутниками астрометричних зір.

Ще одна задача, отримання знімків навігаційних супутників поряд з радіоджерелами в оптичному діапазоні на жаль, відкладена через занадто велику різницю блиску супутника та радіоджерела в оптичному діапазоні що потребує зміни методики.

Приклади знімків, отриманих у процесі виконання спостережень приведені на рис. 3. Зліва направо представлені знімки в моменти перетину екватора, покриття зорі, перетину видимих шляхів. Основну кількість спостережень матеріалу отримав співробітник обсерваторії на піку Терскол М.В. Андрєєв.

У всіх підходах виконується астрометрування знімків і обчислюються координати точок на знімках. При цьому тільки перший підхід, досить класичний по суті, вимагає точного знання цих координат, всі інші варіанти спостережень мають диференційний характер і для їх використання потрібно знати різниці координат супутників, а не їх абсолютні значення, що дозволяє досягти вищої точності визначення поправок.

Методика допускає модифікацію для спостережень, при яких точність відліку часу незадовільна. При цьому слід цікавитись фактом явища, а не моментами його настання. Особливо виразно це можна показати при спостереженнях перетинів видимих шляхів супутників. Оскільки орбіти GPS і GLONASS мають різний нахил 55 і 63 градуси, то в місці перетину видимих шляхів кут малий (8°). В зв'язку з цим, малі неточності в елементах орбіти і орієнтації системи відліку приводять до суттєвих зсувів місця спостереження явища на небесній сфері. Ці різниці (спостережене положення мінус обчислене) можуть складати мінути дуги, незважаючи на використання точних SP3-орбіт GPS і RINEX-орбіт для GLONASS і алгоритмів, що описані в документах самими навігаційними системами. При цьому, однак, момент часу виявляється непотрібним: порівнюються лише координати точок, де явище відбувалось.

Отримані нами оцінки точності систем відліку складають 0.46 м для GPS і близько 0.91 м для GLONASS. Що стосується кутів взаємної орієнтації, то їх значення досягають секунд дуги і особливо по осі Z перевищують рівні похибок. Якщо ж допустити неспівпадіння центрів цих систем відліку, то їх положення відрізняються величину порядку 1.730 м, що є значною величиною. Цей результат погано узгоджується з загальноприйнятою точкою зору про високу точність навігаційних систем відліку, хоча і може служити аргументом на користь їх невеликих систематичних розходжень.

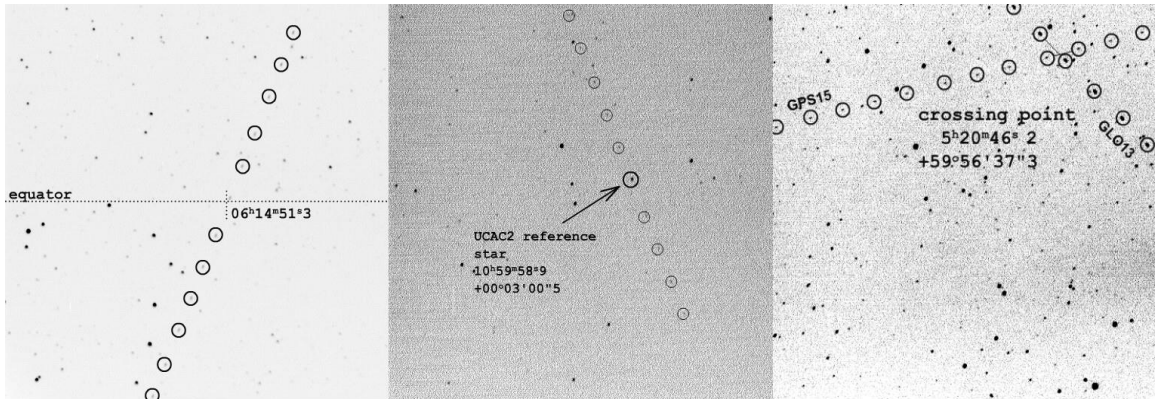


Рис.3. Приклади спостережного матеріалу.

У цьому розділі дисертації “Аналіз точності та прогноз іоносферних параметрів” розглянуто питання покращення моделі іоносфери яка використовується в геодинамічних програмах. Модель іонізованого шару атмосфери відіграє важливу роль при моделюванні руху навігаційних супутників та радіоінтерферометрії. До найбільш відомих моделей іоносфери належить IRI – модель усередненої іоносфери Міжнародного союзу радіотехнічних наук (URSI).

Незважаючи на її широке розповсюдження, вона дає уявлення тільки про середні значення концентрації електронів і основних іонних компонентів атмосфери. Технологія глобальних навігаційних систем відкрила можливості для аналізу стану іоносфери і створення карт загального вмісту електронів у вертикальному стовпі іоносфери над вказаним місцем (точкою спостереження), виражених в одиницях TECU ($\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^2$). Такі карти, що називаються картами TEC (Total Electron Content) будують з аналізу фазових спостережень навігаційних супутників, виконаних одночасно на двох частотах. Ці карти значно точніші ніж ті значення, що дає IRI, однак, в них відображено лише існуючий стан іоносфери, і для отримання її еволюції з часом необхідно працювати з пакетом таких карт. Крім того, ці карти, що створюються деякими центрами аналізу, стають доступними з досить великою затримкою, тобто вони придатні в основному для пост-опрацювання спостережень. Для первинного чи швидкого опрацювання спостережень доводиться користуватися IRI.

Питанням стохастичного моделювання послідовності карт TEC і їх прогнозу присвячена частина розділу. В дисертації розглянуто загальну модель АРКС. Ця модель, що ґрунтується на понятті чорної скриньки, широко використовується для прогнозування часових рядів [75]. Раніше автор використовував цей підхід для моделювання і прогнозу часових рядів координат полюса і всесвітнього часу.

В моделі АРКС спостережна величина (наприклад значення TEC для точки на земній поверхні) інтерпретуються як вихід деякої лінійної динамічної системи, вхід якої в загальному випадку невідомий. Якщо ввести умову, що вхід можна представити як лінійне перетворення нормально розподілених випадкових величин, цей вхідний процес можна відновити, як і передавальну функцію чорної скриньки.

Цю передавальну функцію можна далі використати для побудови прогнозуючих процедур, які дозволять знайти вихід чорного ящика на крок (чи кілька кроків) вперед по часу. Загальна модель має вигляд:

$$z_t - \sum_{i=1}^p \varphi_i \cdot z_{t-i} = \varepsilon_t - \sum_{i=1}^q \psi_i \varepsilon_{t-i},$$

де z_t – вихід, ε_t – вхід чорної скриньки, ψ_i , φ_i – параметри моделі. Загальне число невідомих параметрів дорівнює $p+q+1$.

Можливість розв'язання цього рівняння вивчалась у великій кількості робіт. Важливою умовою є стаціонарність чи процесу самого по собі, чи його похідних. Нестационарні ряди зазвичай використовують проінтегровану модель АРКС.

Карти ТЕС, як відомо, не містять некомпенсованих трендів, тобто вони досить стаціонарні. Однак тренди в картах присутні, але лише у вигляді сезонних залежностей, викликаних або добовою, або близькомісячними періодичностями. Імовірно, річні чи інші сезонні хвилі в картах теж є. Компенсація трендів такого роду здійснюється взяттям сезонних різниць, тобто, сьогоднішня карта мінус вчорашня чи навіть сьогоднішня мінус карта місячної давності. Саме тому говорять про загальну сезонну АРКС-модель.

Обчислення параметрів авторегресії потребує розв'язання системи лінійних рівнянь, знаходження параметрів ковзного середнього – розв'язання системи нелінійних рівнянь. Після отримання попередніх оцінок їх слід уточнити, наприклад ітераційним методом.

Карти ТЕС – це матриці розміром щонайменше 73 точок по довготі і 73 точок по широті, рівномірно розподілених по земній кулі з роздільною здатністю 2 години по часу, 5 градусів по довготі і 2.5 градуси по широті. Для мети нашої роботи в кожній точці карти ТЕС будується сезонна просторово-часова АРКС-модель в яку входять:

а) значення ТЕС у цій же точці в попередні моменти часу, в т.ч. розділені добами чи місяцями;

б) значення ТЕС у сусідніх точках в декілька попередніх моментів.

Скільки слід взяти параметрів визначає процедура ідентифікації. Точні значення параметрів знаходять після ідентифікації. Далі їх можна використати для прогнозування за відомими алгоритмами.

Без використання CUDA розв'язання такої задачі виходить за можливості сучасних комп'ютерів. Отримані автором результати і їх порівняння з справжніми картами ТЕС у ті ж моменти займають частину розділу.

Інший підхід до оцінки точності та прогнозування карт ТЕС ґрунтується на двовимірному ССА (2dССА). Масові обчислення, що мають місце в цьому випадку дозволяють успішно прогнозувати карти ТЕС десь аж на добу вперед. Для оцінювання точності використано той же підхід, що і для координат полюса в розділі 4.

З кінця 1990-х років автор брав участь у роботах зі спостереження радіошумів іоносфери, в тому числі і під час повних сонячних затемнень. Ці роботи стимулювали подальший інтерес автора до питань моделювання процесів взаємодії земної тіні з іоносферою і особливостей рівнянь руху супутника в моменти перетину супутником термінатора. Було сформульовано поняття другої тіньової функції, коли між супутником та станцією спостереження проходить термінатор. Виявилось, що для станцій за полярним колом у періоди літнього сонцестояння досить чітко можна виділити ефект від термінатора, який проводить тривалий час на висотах іоносфери.

Спостереження шумів іоносфери проводились з використанням мобільного радіоінтерферометричного комплексу, розробленого та побудованого С.І. Мусатенком та колегами. Автор дисертації брав участь у підготовці частини програмного забезпечення для управління приладом під час спостережень, опрацювання, брав участь в експериментах і інтерпретації результатів.

Одним з найцікавіших явищ, що спостерігалися колективом, були так-звані магнітоспряжені затемнення. Очевидно, це слід віднести на деяке везіння, але магнітоспряжена область для Києва лежить у південній частині Індійського океану трохи південніше острова Мадагаскар. Саме в цій зоні в період з 1995 до 2006 років відбулося три повних затемнення Сонця, які спостерігалися нами в Києві. Аналізуючи спостереження цих і деякої кількості інших затемнень, ми змогли достатньо впевнено стверджувати, що збурення в іоносфері, викликані її попаданням в область тіні (тінь виглядає як точкове збурення) можна спостерігати в магнітоспряжених точках.

В зв'язку з вищесказаним нами була поставлена задача про визначення впливу тонких ефектів в проходженні променів від навігаційного супутника до приймача за умови, що промінь перетинає термінатор на висотах іоносфери. Оскільки в цій області спостерігається скачок (розрив) параметрів іоносфери, слід очікувати, що він якось проявиться в спостережних значеннях ТЕС. Нами отримані деякі докази існування такого ефекту, але його врахування у геодинамічних спостереженнях, безумовно, справа майбутнього.

У додатку А **«Моделі космічної геодинаміки»** викладено переопрацьований автором на основі єдиного підходу теоретичний та довідковий матеріал щодо всіх моделей, що використовуються в роботі програмного комплексу. Цей розділ призначений для швидкого вступу в теорію геодинамічних моделей.

У додатку Б **«Список опублікованих праць за темою дисертації»** наведено перелік статей автора у фахових виданнях та тез конференцій, а також відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

В дисертації розглянуто і вирішено проблеми геодинаміки, детальне розуміння яких важливе для точного моделювання руху супутників, параметрів обертання і орбіти Землі та віддалених небесних об'єктів. Кожне таке явище, перетворення чи властивість, а також будь-який з методів спостереження є своєрідними кубиками в конструкторі, з якого автор розробив програмний код для опрацювання спостережень відповідного типу. Таким був підхід при створенні програмного пакету Juliette, який не має відповідного аналога в світовій практиці.

Основними результатами, отриманими автором в дисертації є:

Вперше розроблено підхід, за якого об'єктом дослідження є геодинамічна модель, відокремлена від зв'язків та залежностей з іншими моделями, а також метод спостереження.

Проаналізовано теоретичні основи усіх (більше ста) геодинамічних моделей, як стандартизованих IERS, так і тих, що публікуються незалежними від IERS групами, знайдено і виправлено помилки в деяких моделях.

Розвинуто математичний апарат та створено програмне забезпечення для аналізу та використання моделей з уніфікованим протоколом доступу.

Розроблено чисельні теорії руху високо- і низькоорбітальних штучних супутників Землі з урахуванням стандартних моделей збурень, у тому числі моделей атмосфери, іоносфери і тіньової функції.

Вперше створено програмне забезпечення, що дозволяє працювати з усіма системами геодинамічних спостережень (SLR, LLR, DORIS, GNSS, VLBI).

Вперше розроблено, протестовано і введено в експлуатацію унікальний програмний комплекс Juliette, для розв'язання задач космічної геодезії, геодинаміки і астрометрії в розподіленому обчислювальному середовищі.

Запропоновано статистичний підхід до перевірки моделей, що дозволяє тестувати всю функціональність моделі.

Проведено аналіз процедур інтегрування звичайних диференціальних рівнянь, в т.ч. інтегратора MOG, та створено паралельну версію програми інтегрування звичайних диференціальних рівнянь.

Проаналізовано точність геодинамічних моделей у систематичному та випадковому відношенні.

Вперше незалежно і з використанням власного програмного забезпечення отримано параметри обертання Землі зі спостережень високих (Etalon), середньо-орбітальних (Lageos) та низькоорбітальних супутників (Lares, Ajisai, Stella, Starlette), для отримання оцінки точності виконано їх порівняння між собою та з офіційними даними IERS.

Почав роботу центр обробки лазерних спостережень середньовисоких та низькоорбітальних супутників в КНУ.

Розроблено методику, проведено спостереження та отримано кути взаємного повороту динамічних систем координат навігаційних супутників.

Вперше створено програмне забезпечення для прогнозу параметрів обертання Землі та випадкових полів для експрес-аналізу та попередньої обробки спостережень.

Сформульовано поняття другої тіньової функції, отримано докази на користь її існування та введено поняття і проведено спостереження магнітоспряжених сонячних затемнень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових реферованих виданнях

1. Shelestov A., Kolotii A., Borisova T., Turos O., Milinevsky G., Gomilko I., Bulanay T., Fedorov O., Shumilo I., Pidgorodetska I., Kolos L., Borysov A., Pozdnyakova N., Chunikhin A., Dudarenko M., Petrosian A., Danylevsky V., Miatselskaya N., Choliy V. (2019). Essential variables for air quality estimation. *Int.J. of Digital Earth*, vol.13, Issue 2, p.278–298.
2. Vasiuta M.S., Choliy V.Ya. (2016). On the usage of the Singular Spectrum Analysis for precision estimation and editing of total atmospheric delay time series. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.6, Issue 2, p.94–98.
3. Choliy V.Ya. (2016). Formal estimation of the random component in global maps of total electron content. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.6, Issue 1, p.56–60.
4. Olifer L.O., Choliy V.Ya. (2016). On the analysis of Multistep-out-of-grid method for celestial mechanics tasks. *Artificial Satellites*, vol. 51, Issue 3, p.99–105.
5. Чолій В.Я. (2015). До питання про точність моделей гравітаційного поля Землі. *Космічна наука і технологія*, т.21, № 1, с.70–76.
6. Чолій В.Я. (2015). Оцінка точності та прогноз параметрів обертання Землі методом сингулярного спектрального аналізу. *Кінем. і фіз. небесн.тіл*, т.31, № 4, с.72–80.
7. Choliy V.Ya., Zhaborovsky V.P. (2014). Earth's pole coordinates determined from Lageos-1/2 laser ranging. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.4, Issue.2, p.54–57.
8. Choliy V.Ya. (2014). On the precision estimation of fundamental planetary ephemerides. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, vol. 30, Issue 6, p.304–307.
9. Choliy V.Ya. (2014). On the extension of Helmert transform. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.4, Issue 1, p.15–19.
10. Zhaborovsky V.P., Pap V.O., Medvedsky M.M., Choliy V.Ya. (2013). Telescope inaccuracy model based upon satellite laser ranging data. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.3, Issue 1, p.63–65.
11. Tkachuk V.V., Choliy V.Ya. (2013). On comparison of fundamental planetary ephemeris. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.3, Issue 2, p.141–144.

12. Choliy V.Ya., Prokhorenkov A. (2012). Parametric modeling of global TEC fields. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.2, Issue 2, p.96–98.
13. Choliy V., Zhaborovsky V. (2011). KyivGeodynamics++: software for processing satellite laser ranging data. *Advances in Astronomy and Space Physics*, vol.1, p.96–98.
14. Чолій В.Я., Жаборовський В.П. (2011). Методика обробки даних лазерної локації ШСЗ. *Космічна наука і технологія*, т.17, № 2, с.51–55.
15. Мусатенко С., Мусатенко Ю., Курочка Є., Ласточкин А., Чолій В., Сліпченко О. (2007). Радіошуми заповненої іоносферної плазми під час метеорних потоків. *Вісник КНУ, Астрономія*, т.44, с.52–55.
16. Мусатенко С.И., Мусатенко Ю.С., Курочка Е.В., Ласточкин А.В., Чолий В.Я., Максименко О.И., Слипченко А.С. (2006). Пылевая плазма в среднеширотной ионосфере во время метеорных потоков. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.46, № 2, с.182–192.
17. Мусатенко С.И., Максименко О.И., Мусатенко Ю.С., Чолий В.Я., Сухой А.А., Курочка Е.В., Слипченко А.С., Москалюк В.И., Делюков А.А. (2006). Возмущения в атмосфере и ионосфере, вызванные солнечным затмением 11.08.1999 г. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.46, № 1, с.78–87.
18. Мусатенко С.И., Чолій В.Я., Курочка Е.В., Сліпченко А.С. (2005). Сонячні затемнення 04.12.2002 р. та 31.05.2003 р. у мікросплесках радіошумів іоносфери. *Вісник КНУ, Астрономія*, т.41-42, с.91–94.
19. Мусатенко С.И., Курочка Е.В., Чолий В.Я., Решетник В.Н. (2004). Высыпания потоков дрейфующих частиц в среднеширотную ионосферу. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.44, № 4, с.480–486.
20. Мусатенко С.И., Чолий В.Я. (2002). О возможности ионосферных наблюдений магнитосопряжённых эффектов солнечного затмения 04.12.2002 г. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 6, с.852–853.
21. Мусатенко С.И., Курочка Е.В., Чолий В.Я., Медведский М.М., Слипченко А.А., Ласточкин А.В., Решетник В.Н., Буромский Н.И. (2002). Магнитосопряжённые эффекты солнечного затмения 21.06.2001г. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 5, с.684–691.
22. Мусатенко С.И., Коломієць Г.І., Курочка Є.В., Медведський М.М., Мусатенко Л.А., Чолій В.Я., Мусатенко Ю.С., Сухий О.А., Сліпченко О.С., Скоритченко Б.М., Тряшин С.С., Власенко А.В., Ільїна В.В., Кириленко П.В., Мусатенко К.С. (2001). Комплексні спостереження іоносферних проявів сонячного затемнення 11.08.1999р. *Вісник КНУ, Астрономія*, т.37, с.43–49.
23. Мусатенко С.И., Мусатенко Ю.С., Курочка Е.В., Медведский М.М., Сухой А.А., Слипченко А.С., Чолий В.Я. (2001). Фликкер-шум среднеширотной ионосферы в метровом диапазоне 11-12.08.1999 г. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.41, № 6, с.812–819.

Статті у матеріалах конференцій та інших виданнях

24. Olifer L., Choliy V. (2017). DDscat.C++ 7.3.1 new features and possibilities. 22th Young Scientists Conference, book of abstracts, Kyiv, Apr.24-29.
25. Чолій В.Я. (2013). Теоретичне обґрунтування розширеного перетворення Гельмерта. Бюлетень УЦВПОЗ, т.8, с.87-90.
26. Чолій В.Я. (2012). Опрацювання лазерних спостережень Місяця за допомогою програмного пакета Київ-Геодинаміка++. Бюлетень УЦВПОЗ, т.7, с.13-15.
27. Чолій В.Я. (2012). Визначення параметрів видимого руху супутника та їх прогноз з використанням фільтра Калмана. Бюлетень УЦВПОЗ, т.7, с.6-12.
28. Жаборовський В.П., Пап В.О., Медведський М.М., Чолій В.Я. (2012). Побудова моделі похибок телескопа. Бюлетень УЦВПОЗ, т.7, с.27-29.
29. Чолій В.Я. (2011). Метод параметрів видимого руху для швидкого визначення елементів орбіти з оптичних спостережень супутників. Бюлетень УЦВПОЗ, т.6, с.25-32.
30. Чолій В.Я., Жаборовський В.П. (2011). Підсистема визначення поправок програмного пакету Київ-Геодинаміка++. Бюлетень УЦВПОЗ, т.6, с.7-15.
31. Чолій В.Я., Жаборовський В.П. (2010). Моделювання руху супутників для геодинаміки. Стан справ і перспективи. Бюлетень УЦВПОЗ, т.5, с.12-26.
32. Choliy V., Zhaborovsky V. (2012). KG++: software for processing Satellite Laser Ranging observations. Journee'2011 Proceedings, p.158-159.
33. Choliy V. (2012). On the usage of XML file format in geodynamic calculations. Journee'2011 Proceedings, p.160-161.
34. Musatenko S.I., Kurochka E.V., Choliy V.Ya., Medvedsky M.M., Slipchenko A.S., Lastochkin A.V., Reshetnyk V.M., Buromsky N.I. (2003). Magnetoconjugated effects of solar eclipse 21.06.2001. WDS'02 Proceedings of Contributed papers, p.338-344.
35. Choliy V., Pervak S., Taradiy V. (2008). Spectral analysis of the ionospheric irregularities from GPS observations. WDS'08 Proceedings of Contributed papers, pt.2, p.189-191.
36. Choliy V., Babyk Iu., Taradiy V. (2008). Determination of the station coordinates using GPS satellite single frequency doppler signal. WDS'08 Proceedings of Contributed papers, pt.2, p.192-195.
37. Zhaborovsky V., Choliy V., Taradiy V., Rykhlova L., Andreev M. (2008). Optical observations of navigation satellites for determination of reference frames deflections. WDS'09 Proceedings of Contributed papers, pt.2, p.78-82.
38. Musatenko S.I., Choliy V., Kurochka E., Slipchenko A. (2002). Conjugate effects of solar eclipse 21.06.2001 in ionosphere radionoisies. 9th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.63.
39. Musatenko S.I., Choliy V., Kurochka E., Slipchenko A. (2002). Magnetoconjugated effects of solar eclipse 21.06.2001. Geophysical Research Abstracts, v.4, EGU2002-A-02654.

40. Musatenko S.I., Choliy V. (2002). On cooperative observations of conjugated ionospheric disturbances during solar eclipse 04.12.2002. *Geophysical Research Abstracts*, v.4, EGU2002-A-02658.
41. Choliy V., Taradiy V., Rykhlova L. (2007). Preliminary results of 29.03.2006 solar eclipse observations at Terskol observatory with the pair of GPS/GLONASS receivers. *Geophysical Research Abstracts*, v.9, EGU General Assembly 2007.
42. Choliy V. (2007). New GNSS processor (Juliette) for geodynamic and atmospheric tasks. *Geophysical Research Abstracts*, v.9, EGU General Assembly 2007.
43. Choliy V. (2008). Second shadow function: interference on terminator in ionosphere. *Geophysical Research Abstracts*, v.10, EGU2008-A-06582.
44. Choliy V. (2009). Space-time ARIMA modelling of global TEC maps. *Geophysical Research Abstracts*, v.11, EGU2009-5623.
45. Choliy V., Pervak S. (2009). Wave-like events during terminator passage in the ionosphere from results of GPS observations. *Geophysical Research Abstracts*, v.11, EGU2009-5639.
46. Choliy V., Taradiy V., Rykhlova L. (2009). Mutual orientation of inertial and GPS-based and Glonass-based reference frames. *Geophysical Research Abstracts*, v.11, EGU2009-5662.
47. Choliy V. (2009). Distributed CUDA-based Gps processor. First results. *Geophysical Research Abstracts*, v.11, EGU2009-5688.
48. Choliy V., Zhaborovsky V., Taradiy V., Rykhlova L. (2010). Optical observations of navigation satellites for determination of dynamical reference frames deflections. *Geophysical Research Abstracts*, v.12, EGU2010-6771.
49. Choliy V., Taradiy V. (2010). Fast integration of satellite movement with CUDA software. *Geophysical Research Abstracts*, v.12, EGU2010-6775.
50. Choliy V., Zhaborovsky V. (2010). New version of SLR software Kiev-Geodynamics: KG++. First results. *Geophysical Research Abstracts*, v.12, EGU2010-6777.
51. Choliy V., Taradiy V., Rykhlova L., Andreev M. (2010). On the determination of the deflection angles of GPS and GLONASS reference frames. *Proceedings of the 6th Orlov Conference, Kyiv*, p.84-90.
52. Choliy V., Taradiy V. (2010). VASOMI integration routine: parallel computations experience. *Proceedings of the 6th Orlov Conference, Kyiv*, p.218-221.
53. Mayer D., Boehm J., Boehm S., Choliy V., Hellershcmied A., Hoffmeister A., Karbon M., Krasna H., McCallum J., Mazdak M., Nilsson J., Plank I., Shabala S., Soja B., Sun J., Teke K. (2014). Status quo and future plans for the Vienna VLBI Software (VieVS). *Geophysical Research Abstracts*, v.14, EGU2014-6367.
54. Чолий В., Тарадий В., Рыхлова Л., Андреев М., Жаборовский В.П. (2009). Взаимная ориентация оптической системы отсчёта и систем отсчёта, построенных по наблюдениям навигационных спутников. *Астрономия и всемирное наследие, Труды международной конференции, Казань*, с.69-70.

55. Чолий В., Тарадий В. (2009). Программа численного интегрирования систем дифференциальных уравнений VASOMI. Версия для работы на параллельных компьютерах. *Астрономия и всемирное наследие, Труды международной конференции, Казань*, с.88-89.
56. Чолий В.Я. (2009) Программный комплекс Juliette для обработки наблюдений навигационных спутников. *Астрономия и всемирное наследие, Труды международной конференции, Казань*, с.87.
57. Мусатенко С.И., Курочка Е.В., Чолий В.Я., Слипченко А.В., Ласточкин В.М., Решетник В.М., Буромский Н.И. (2001) Эффекты солнечного затмения 21.06.2001 в радиошумах магнитосопряженной ионосферы. Первая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, Киев, Сборник тезисов, с.108-109.
58. Мусатенко С.И., Чолий В.Я. (2001) Проблема точности розрахунків сонячного термінатора для космічних експериментів. Первая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, Киев, Сборник тезисов, с.122.
59. Мусатенко С.И., Мусатенко Ю.С., Курочка Е.В., Чолий В.Я., Слипченко А.В., Ласточкин В.М. (2004) Радіошуми іоносферної плазми та магнітосферний альфвенівський резонатор. Четвертая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, Крым, Сборник тезисов, с.95.
60. Мусатенко С.И., Мусатенко Ю.С., Курочка Е.В., Чолий В.Я., Слипченко А.В., Ласточкин В.М. (2004) Спостереженні параметри пилової плазмової лінії під час швидкісних метеорних потоків. Четвертая украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, Крым, Сборник тезисов, с.96.
61. Musatenko S.I., Musatenko Yu.S., Sukhyj A.A., Slipchenko O.S., Kurochka E.V., Medvedsky M.M., Choliy V.Y. (2000) Effects caused by Solar eclipse on August 11, 1999 in USW radionoise of midlatitude ionosphere. From Solar corona through interplanetary space. *Proceedings of International Symposium*, p.343-344.
62. Babyk Yu., Choliy V. (2008). Determination of the Station Coordinates Using GPS Satellite Single Frequency Doppler Signal. 15th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.58.
63. Zhaborovsky V., Choliy V. (2010) Determination of Reference Frame deflection from Optical Observations of GNSS satellite. 17th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.58.
64. Zhaborovsky V., Choliy V. (2010) KG++: software package for processing SLR data. 17th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.58.
65. Zhaborovsky V., Choliy V. (2011) Earth atmospheric parameters estimation from LEO SLR data. 18th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.74.
66. Koval A., Choliy V. (2011) Model issue of atmospheric tomography based upon GNSS satellites. 18th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.75.
67. Prokhorenkov A., Choliy V. (2011) Parametric modelling of global TEC fields. 18th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.75.

68. Pap V., Zhaborovsky V., Medvedsky M., Choliy V. (2012) Telescope insaccurace model based upon SLR data. 19th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.56.
69. Tkachuk V., Choliy V. (2012) Comparison of the basic ephemerides in situ. 19th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p56.
70. Prokhorenkov A., Choliy V. (2012) Space-time ARIMA modelling of global TEC fields. 19th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.63.
71. Tkachuk V., Choliy V. (2013) Processing of VLBI data of MAO NAS Ukraine analysis center with new SteelBreeze software. 20th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.54.
72. Olifer L, Choliy V. (2016) On the analysis of MOG method for celestial mechanics tasks. 23th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.35.
73. Olifer L, Choliy V. (2017) DDscat.C++ 7.3.1 new features and possibilities. First experience. 24th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.42.
74. Olifer L, Choliy V. (2017) On the determination of snowflakes properties from simulation of scattered light. 24th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.41.
75. Vasiuta V., Choliy V. (2017) On the usage of SSA for precision determination and editing of total atmospheric delay time series. 24th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.24.
76. Belyaeva E., Choliy V. (2018) On building of the targets of any possible shapes in DDscat.C++. 25th Young Scientists Conference, Book of abstracts, p.40.

Підручник

77. Чолій В.Я. Вступ до небесної механіки. Друкарник.- К.: 2018.- 224 с, ISBN 978-617-7503-15-5.

Документація програмного забезпечення

78. Чолій В.Я., Жаборовський В.П. (2019). Juliette/KG++: теоретичні основи. 131 с., <http://space.univ.kiev.ua/Choliy/Juliette/Theory.pdf>
79. Чолій В.Я., Жаборовський В.П. (2019). Juliette/KG++: посібник користувача. 67 с., <http://space.univ.kiev.ua/Choliy/Juliette/UserGuide.pdf>
80. Чолій В.Я., Жаборовський В.П. (2019). Juliette/KG++: посібник програміста. 26 с., <http://space.univ.kiev.ua/Choliy/Juliette/Programmer Guide.pdf>

Цитована література

81. Beutler G., Bauersima W., Gurtner M. (1988). Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations. Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements, Monograph 12, 15-43, University of New South Wales, Kensington, Australia.
82. Niell A. (1996). Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths, J.Geophys.Res., v.101(B2), p.3227-3246.

83. Saastamoinen I. (1973). Contribution to the theory of atmospheric refraction, *Bull. Geod.*, v.107, p.13-34.
84. Goad C., Goodman L (1974). A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model. Proceedings of the Fall Annual Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, California.
85. Rothacher M., Beutler G., Gurtner W. (1986). The Swiss 1985 GPS Campaign. Proceedings of the Fourth International Symposium on Satellite Positioning, vol. 2, p.979-991, Austin, Texas.
86. Jeon H., Cho S., Kwak Y. (2010). Mass density of the upper atmosphere derived from Starlette's precise orbit determination with SLR. *Astrophys. SpaSci.*, doi:10.1007/s10509-010-0528-2.
87. Lejba P., Schillak S., Wunk E. (2007). Determination of orbits and SLR stations coordinates on the basis of laser observations of the satellites Starlette and Stella. *Adv. Spa.Sci.*, vol.40, p.143-149.
88. Fliiegel H., Gallini T., Swift E. (1992). GPS radiation force model for geodetic applications. *J. Geophys. Res.*, vol.97(B1), p.559-568.
89. Kabelac J. (1988). Shadow Function - Contribution to the Theory of the Motion of Artificial Satellites. *BAIC*, vol.39, n.6, p.213-220.
90. Otsubo T., Mueller H., Pavlis E. (2019). Rapid response quality control service for the SLR network. *J. Geodesy*, vol.93, p.2335-2344.
91. Picone J., Hedin A., Drob D. (2003). NRL-MSISE-00 Empirical Model of the Atmosphere. *J. Geophys Res*, vol.107, p.1468–1485.
92. Vokrouhlicky P., Farinella P., Mignard F. (1993). Solar Radiation Pressure Perturbations for Earth Satellites. I. A Complete Theory Including Penumbra Transitions. *Astron. and Astrophys*, vol.208, p.295-312.
93. Болотін С.Л., Литвин С.О. (2010). Порівняння об'єднаних каталогів RSC(GAOUA)05 С 03 та RSC(PUL)06 С 02 з реалізацією Міжнародної небесної системи відліку ICRF. *Кинемат.физ.небесн.тел.* vol.26,n.1, с.31-42.
94. Тарадий В.К., Цесис М.Л. (1984). Вычисление траекторий ИСЗ. Построение алгоритмов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. Препринт ИТФ АН УССР, 84-96Р, 46 стр.
95. FastraPC group, (2002), <http://fastra.uni.be>
96. Бокс Дж., Дженкинс Г. (1974). Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 408 стр.
97. Дума Д. (1974). Определение нуль-пунктов и периодических погрешностей звёздных каталогов. К.: Наукова думка, 164 стр.
98. Жаборовський В. (2014). Кількісний аналіз додатних для розрахунку гальмування ШСЗ моделей атмосферної густини. *Кинемат.физ.небесн.тел.* т. 30, n.5, с.65-72.
99. <http://iriweb.org>

АНОТАЦІЯ

Чолій В.Я. Моделі глобальної геодинаміки та їх тестування за даними супутникових спостережень.- Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 05.07.12 - Дистанційні аерокосмічні дослідження (10 - природничі науки; 104 - фізика та астрономія).- Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2021.

Метою дисертаційної роботи є вирішення проблем геодинаміки шляхом розробки нової чисельної теорії руху супутників, розвитку математичного апарату і програмного забезпечення для покращення точності геодинамічних моделей, розробки методик визначення геодинамічних параметрів та постановки власних спостережень.

Запропоновано підхід, за якого об'єктом дослідження є геодинамічна модель, відокремлена від зв'язків та залежностей з іншими моделями, а також від методу спостереження. Для реалізації такого підходу розвинуто математичний апарат та створено програмне забезпечення для аналізу та використання усіх моделей з єдиних позицій. В окремих моделях знайдено та виправлено помилки. Запропоновано статистичний підхід до тестування моделей.

Розроблено чисельні теорії руху штучних супутників Землі сантиметрової точності, як високо- так і низькоорбітальних, адекватних спостереженням за точністю, оцінено їх якість. Створено програмне забезпечення, що дозволяє працювати з усіма системами геодинамічних спостережень (SLR, LLR, DORIS, GNSS, VLBI).

Розроблено, протестовано і введено в експлуатацію програмний комплекс Juliette, для розв'язання задач космічної геодезії, геодинаміки і астрометрії в розподіленому обчислювальному середовищі та запущено в роботу центр обробки лазерних спостережень низькоорбітальних супутників, де регулярно представляються ПОЗ з опрацювання спостережень низькоорбітальних супутників.

Ключові слова: геодинаміка, астрометрія, небесна механіка, вивчення Землі з космосу, статистичні методи опрацювання спостережень,

ANNOTATION

Choliy V.Ya. Global geodynamics models and their testing from reprocessing of satellite observations.- Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for a Doctor of Sciences degree in Physics and Mathematics, speciality 05.07.12 - Remote sensing (10 - Natural Sciences; 104 - Physics and Astronomy). - National Taras Shevchenko University of Kyiv, Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The precision of the measurement hardware and software used for collecting and processing the data about the Earth as a whole made a great progress in the last decades. Modern technologies of the satellite observations and satellite geodynamics methods are unique because of their high precision, short delay between observation and delivery and due to the possibility to build the steering systems based on the same unified approach. Modern level of the precision of the satellite measurements with the SLR (Satellite Laser Ranging), GPS (Global Positioning System) and DORIS (Doppler Orbitography Integrated on Satellite) is at the level where we can determine parameter values and their changes with time.

The collected data allows us to make the analysis of geodynamic processes and mutual influence of the Earth core, mantle, surface, oceans, atmosphere and ionosphere. It allows to work with global Earth evolution and details of its internals. Observations of geodynamics satellites plays a serious role in applied aspects of time and coordinate services. We should permanently monitor the changes in every systems, like SLR, GPS etc., their precision and possible degradations, investigate existing and develop new models of geodynamic processes, data and transformations.

For example, to use the observations of Low Earth Orbiters (LEO) we need an atmosphere model, which compel us to investigate meteorology and winds. A lot of scientific groups are involved in these processes and it leads to data processing and data analysis centers to appear. Most of them work under general supervising from International Earth Rotation Service (IERS).

Total amount of the satellites in orbits and under observations grows and now is more than one hundred. We must be able to process their observations by unifying all of them (from different methods of observations) to build the single geodynamics Earth model including the internals, oceans, atmosphere, etc. It may be done only if new software will be build capable to solve really huge size challenges. A lot of new models of geodynamics processes are build now. But in many cases there is no independent determination of their precision. But we have the only Earth and it looks like we must use the single approach when using the models.

The models of all geodynamics processes were subdivided into two categories: standard ones (according to IERS Standards) and free ones (from independent scientific groups). They were analysed for the quality estimation and the best of them were recommended for Juliette code. All necessary theoretical background was given.

The purpose of this study is a solution of space geodynamics tasks by the new numerical theory of satellite motion, development of the mathematics methods and software to make the better precision geodynamics models, creating the newer approaches and setting up own observation and processing programs.

Main approach consists in interpreting the geodynamic model as the object of analysis, itself, without links and dependencies with other models or observation method. Mathematical methods were developed and software was built to allow interpretation of all spectrum of models from the same positions. In some models there were errors found and corrected. Statistical testing procedure was introduced.

Centimeter level numerical theories of motion of middle and low Earth' orbiters were built with the precision sufficient to explain the observations. Their precision was determined. The software was written based upon these theories which allows to proceed all satellite system observations (SLR, LLR, DORIS, GNSS, VLBI).

Built, tested and started an exploitation of the Juliette software for solving the geodynamics tasks in distributed environment. Data processing center have been started with the special attention to low Earth orbiters.

The most interesting result is that we are able to process LEO observations for the determination of EOPs. The simultaneous but separate processing of observations from Lageos and some LEO (Ajisai, Lares, Starlettem Stella) have taken place to deduce EOP series. Then these were intercompared and the estimation errors were deduced. The overall precision of Lares' results are comparable with that of Lageos. It allows us to make the final statement that the usage of LEO data in official EOP determination can give us better precision.

Serious efforts were taken place in the atmosphere modelling. The best of existing atmosphere model: NRLMSISE still cannot give satisfactory precision on the LEO heights. That is why the ballistic coefficient, albedo and parameters of empirical acceleration must be estimated in the runs. EOP results along with some additional data is presented on author's web site.

Keywords: geodynamics, astrometry, celestial mechanics, remote sensing, statistical methods of data processing