

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена створенню каталогу положень та елементів орбіт космічних об'єктів (КО) на геосинхронних орбітах з використанням комбінованого методу ПЗЗ-спостережень. Комбінований метод ПЗЗ-спостережень був розроблений в 2000 році групою співробітників НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ МАО) [20]. Комбінований метод ПЗЗ-спостережень полягає в часовому відокремленні процесів отримання зображень об'єкту та опорних зір [18].

Актуальність теми. Активне використання космічного простору привело до появи нового класу космічних об'єктів – космічного сміття (КС), тобто всіх антропогенних об'єктів, які не функціонують та знаходяться на навколосеземних орбітах. В зв'язку зі збільшенням кількості КС та його некерваністю, воно становить загрозу для працюючих космічних апаратів.

Найбільш гострою проблема засмічення є для низьких та геосинхронних орбіт. Оскільки зона геосинхронних орбіт (ГСО), завдяки своїм природним властивостям, вигідна для розташування телекомунікаційних КО, необхідність контролю розповсюдження КС в цій зоні з кожним роком стає все більш актуальною. На січень 2010 р. на ГСО за даними [21] зареєстровано 1238 КО, з них 68% об'єктів становить космічне сміття. Численні дослідження вказують на те, що в міру збільшення кількості й маси КС основним джерелом нового КС стануть зіткнення. Такий розвиток подій може призвести до неможливості використання навколосеземного космічного простору. Додаткову загрозу зіткнень створюють КО, які було виведено на орбіти захоронення, ці об'єкти можуть перетинати зону працюючих КО під дією місячно-сонячних збурень [30]. Також у 2014–2023 роках відбудеться повернення в зону екватора КО, які були виведені на ГСО у 60-х роках минулого століття [31]. Враховуючи все вищезгадане – дослідження навколосеземного космічного простору є актуальною сучасною задачею.

Основними напрямками досліджень навколосеземного космічного простору (НКП) на сьогоднішній день є:

- спостереження КО в НКП і їх каталогізація,
- моделювання росту популяції КС,
- розрахунок небезпечних зближень КО,
- уточнення теорії орбітального руху КО.

Основою для дослідження НКП та закономірностей еволюції орбіт КО є формування каталогу елементів орбіт. Каталог елементів орбіт КО формується та оновлюється за результатами регулярних спостережень КО. Моделювання росту кількості КС вказує на значне збільшення в зоні ГСО КО малого розміру, які є складними для спостережень. Спостереження КО на

ГСО зазвичай проводяться в оптичному діапазоні. Такий стан справ обумовлюється тим, що КО на ГСО недоступні для спостережень на більшості радіотелескопів. При спостереженнях оптичними телескопами час експонування зображень КО обмежений наявністю його руху відносно опорних зір, що знижує проникну силу телескопа. Тому для спостережень геосинхронних КО, особливо малого розміру, актуальною задачею є розробка нових методів оптичних спостережень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи пов'язані з науково-дослідними роботами, що проводилися в Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» Міністерства освіти і науки України:

- „Дослідження астрометричних та фізичних характеристик об'єктів ближнього космосу” („Геокосмос”), номер державної реєстрації 0101U000217, 2001–2004 рр.;
- „Вивчення впливу чинників природного і техногенного характеру на динаміку орбіти штучних супутників Землі” („ДИОР”), номер державної реєстрації 0208U002676, 2005– 2007 рр.;
- „Дослідження навколосезонного космічного простору наземними оптичними та радіотехнічними засобами” („ОРАДОК”), номер державної реєстрації 0108U000595, 2008– 2010 рр.;

а також з дослідно-конструкторськими роботами за контрактами:

- „Спільні радіо оптичні спостереження об'єктів космічного сміття в області геосинхронних орбіт. Проведення оглядових робіт видимої області геосинхронних орбіт”, № 1–МАО від 10.03.2003 р.;
- „Координатні спостереження обраних об'єктів космічного сміття в області геосинхронних орбіт та астероїда 2000PH5”, № 28/03/1 від 20.04.2004 р.;
- „Участь в підготовці та проведенні державних випробувань СКАКО”, № 04–05/МАО від 01.09.2005 р.;
- „Участь у дослідній експлуатації СКАКО” №07–07/МАО від 15.05.2007 р.;
- Визначення орбіт космічних об'єктів, виведених РН „Днепр-Восток” № 02–05/МАО від 01.07.2005 р.;
- Визначення орбіт космічних об'єктів, виведених РН „ДНЕПР-Генезис” № 01–06/МАО від 10.03.2006 р.;
- Визначення орбіт космічних об'єктів, виведених РН „Днепр” с КА „EgyptSat-1” № 04–06/МАО від 15.11.2006 р.;

- Визначення орбіт космічних об'єктів, виведених РН „Днепр-Генезис-2” № 04–06/МАО від 15.11.2006 р.;
- Визначення орбіт космічних об'єктів, виведених РН „Днепр” с КА „ТетраSAR-X” № 01–07/МАО від 03.01.2007 р.;
- Оперативне визначення параметрів орбіт засобами АО (шифр “Днепр-Theos”) № 07–07/МАО від 15.05.2007 р.;
- Визначення параметрів орбіт засобами АО (шифр “Днепр-РэпидАй”) № 02–08/МАО від 20.10.2008 р.

Автор брала участь у виконанні всіх вищезгаданих робіт.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є отримання каталогу положень та елементів орбіт КО на ГСО зі спостережень комбінованим методом ПЗЗ-спостережень на телескопі – Швидкісний автоматичний комплекс (ШАК) НДІ МАО.

Поставлена мета розв'язувалась виконанням таких завдань:

- впровадження в практику астрометричних спостережень КО на ГСО комбінованого методу ПЗЗ-спостережень (КМС), який забезпечує відокремлення процесів отримання зображень опорних зір та КО із застосуванням оптимальних режимів роботи ПЗЗ-камери;
- уточнення методики застосування комбінованого методу ПЗЗ-спостережень з використанням поворотної платформи – механічного пристрою, що обертає ПЗЗ-камеру навколо осі об'єктива та розміщує стовпці ПЗЗ-матриці паралельно напрямку руху об'єкта спостереження для використання режиму синхронного переносу заряду;
- розробка та впровадження модифікованої моделі редукції спостережень КО, отриманих комбінованим методом ПЗЗ-спостережень;
- проведення спостережень КО на ГСО з використанням КМС на телескопі ШАК НДІ МАО, обробка результатів спостережень, формування каталогу положень КО в текстовому вигляді;
- обчислення векторів стану і елементів орбіт КО на ГСО та формування каталогів в текстовому вигляді, обчислення ефемерид КО та їх порівняння з даними каталогу положень;
- аналіз та узагальнення отриманих результатів.

Достовірність та обґрунтованість. Обґрунтованість застосування комбінованого методу ПЗЗ-спостережень підтверджується підвищенням проникної сили телескопа ШАК при спостереженні об'єктів, що рухаються відносно зір, таких як КО та астероїдів, що зближуються із Землею (АЗЗ). Достовірність результатів, отриманих із застосуванням модифікованої моделі редукції, підтверджується порівнянням координат навігаційних КО, отриманих зі спостережень, з ефемеридою Міжнародної служби

лазерної локації, а також порівнянням координат АЗЗ, отриманих зі спостережень, з ефемеридою Лабораторії реактивного руху США (Horizons). Достовірність каталогу векторів стану та елементів орбіт підтверджується порівнянням ефемерид, розрахованих з векторів стану, з даними каталогу положень з різницею епох між вектором стану та положеннями порівняння від однієї доби до 200 діб.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше впроваджено для постійних спостережень КО на ГСО комбінований метод ПЗЗ-спостережень, який забезпечує відокремлення процесів отримання зображень опорних зір та КО із застосуванням оптимальних режимів роботи ПЗЗ-камери.

2. Розроблено та впроваджено в практику астрономічних досліджень модифікований метод редукції спостережень. Метод полягає в астрометричній редукції прямокутних координат КО, зображення яких відокремлені в часі від зображення опорних зір та отримані в іншому режимі роботи ПЗЗ-камери.

3. Отримано 31883 положення 67 геосинхронних КО в екваторіальній системі координат, які оформлені у вигляді каталогу положень на епоху J2000. Середньоквадратична похибка спостережень КО $10\text{--}16^m$ відносно кеплерової орбіти склала $\pm 0.33''$ – $\pm 0.66''$ за прямим піднесенням та $\pm 0.26''$ – $\pm 0.91''$ за схиленням, що відповідає кращому світовому рівню точності для такого роду спостережень.

4. З використанням каталогу положень проведено розрахунок векторів стану та елементів орбіт 67 геосинхронних КО та отримано каталог у текстовому вигляді. З використанням векторів стану розраховано ефемериди на інтервал прогнозування від однієї доби до 200 діб та проведено порівняння ефемериди (С) з даними спостережень (О). Отримані при порівнянні (О–С) не перевищують $\pm 0.15^\circ$ за прямим піднесенням та $\pm 0.05^\circ$ за схиленням.

5. Впроваджено КМС для спостережень астероїдів, що зближуються із Землею на відстань менше 0.05 а.о. За результатами спостережень отримано 334 положення п'яти АЗЗ. Середньоквадратичне відхилення (СКВ) спостережень АЗЗ відносно ефемериди Лабораторії реактивного руху США склало $\pm 0.34''$ за прямим піднесенням та $\pm 0.24''$ за схиленням, що відповідає світовому рівню точності для такого роду спостережень.

Практичне значення отриманих результатів. Каталог 31883 положень 67 геосинхронних КО, отриманий зі спостережень на телескопі ШАК, використовується спільно з НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету (НДІ АО ОНУ) для уточнення моделі руху КО.

Із застосуванням комбінованого методу спостережень отримано 334 положення п'яти АЗЗ, з яких 59 було надіслано до Центру малих планет. Отримані положення можуть використовуватися для поліпшення орбіт згаданих АЗЗ.

Отриманий каталог векторів стану та елементів орбіт геосинхронних космічних об'єктів, використовуються в НДІ МАО для обчислення ефемерид КО.

Розроблена автором модифікована модель редуцції (ММР) та програмне забезпечення використовується в НДІ МАО для обчислення топоцентричних екваторіальних координат КО на навколосемних орбітах та АЗЗ, отриманих зі спостережень КМС. ММР також використовувалась для обробки даних спостережень КО, які проводились в рамках цільової програми СКАКО, що є складовою Національної космічної програми України.

Особистий внесок здобувача. В статті [1] автором проведено аналіз точності спостережень, також автор брала участь у обговоренні результатів та в написанні другої глави статті. В роботах [2, 12, 14–16] автор брала участь у розробці та впровадженні комбінованого методу спостережень КО на телескопі ШАК, обговоренні результатів та написанні статті [2]. В роботах [3, 17, 18] автором проведено дослідження точності редуцції спостережень, автор приймала участь в обговоренні результатів, також в роботі [3] автором самостійно написана друга та третя глава. Авторське свідцтво [4] отримано автором самостійно. В роботах [5, 10, 11] автор приймала участь у спостереженнях та виконала оцінку точності спостережень. Автором проведено спостереження АЗЗ, складено список та проведено спостереження геосинхронних КО малого розміру, проведено порівняння отриманих зі спостережень КО елементів орбіт з каталогом Space-Track, написано перший та шостий розділи роботи [7]. В роботі [8] автором було складено списки об'єктів, проведена обробка спостережень та аналіз точності спостережень. Автором проведено складання списків об'єктів та підготовка ефемерид для спостережень АЗЗ, а також автор брала участь у впровадженні спостережень АЗЗ комбінованим методом з використанням поворотної платформи в роботах [9, 19], в роботі [9] автором написано текст третього та п'ятого розділів. В роботах [6, 13] автор брала участь у формуванні та аналізі каталогу елементів орбіт, в роботі [6] автором написаний третій розділ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 14 таких наукових та науково-практичних конференціях:

Міжнародна нарада „Optical and Radio Sources – Location and Connection”, 2003 р., Миколаїв;

Міжнародна конференція „Research of artificial and natural NEOs and other Solar System bodies with CCD ground-based telescope”, 2004 р., Миколаїв;

Міжнародний науковий семінар „Наблюдение ИСЗ и космического мусора”, 2004 р., Львів;

Міжнародна наукова конференція „Системный анализ и управление”, 2004 р., Євпаторія;

Міжнародна молодіжна науково-практична конференція „Человек и космос”, 2004 р., Дніпропетровськ;

Міжнародна конференція „Изучение объектов околоземного пространства и малых тел Солнечной системы”, 2006 р., Миколаїв;
 Міжнародна конференція „Astronomy and space physics at Kyiv University”, 2005 р., Київ;
 Міжнародна науково-практична конференція „Университетские микроспутники – перспективы и реальность”, 2006 р., Євпаторія;
 Міжнародна конференція „Modern problems of astronomy”, 2007 р., Одеса;
 Міжнародна конференція „Околоземная астрономия – 2007”, 2007 р., Терск, Росія;
 Міжнародна конференція „Наблюдение околоземных космических объектов”, 2007 р., Звенигород, Росія;
 IAU Symposium №. 248 „A giant step: from milli- to micro-arcsecond astrometry”, 2007 р., Шанхай, Китай;
 Міжнародна нарада „Methods and Instruments in Astronomy: from Galileo Telescopes to Space Projects”, 2010 р., Миколаїв;
 Всеросійська конференція „ВАК–2010”, 2010 р., п. Нижній Архиз, Росія;
 на семінарах НДІ МАО та ГАО НАН України.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 19 наукових праць, з яких 3 статті [1–3] у фахових наукових журналах, 1 авторське свідощтво [4], 5 робіт [5–9] у збірниках наукових праць та 10 тез доповідей [10–19] на науково-технічних та науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків і додатка. Повний обсяг дисертації становить 127 сторінок, в тому числі 36 рисунків та 23 таблиці. Список використаних джерел містить 99 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, проведено стислий огляд стану проблеми, визначено задачі дослідження, зв'язок із програмами і темами НДР НДІ МАО, сформульовано мету роботи і визначено наукову новизну та практичну значущість роботи, визначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, дано інформацію про публікацію та апробацію результатів дисертаційних досліджень.

У першому розділі «Спостереження космічних об'єктів» розглянуто основні напрями досліджень КО в навколосемному космічному просторі, методи спостережень КО, існуючі каталоги елементів орбіт КО та сучасні оптичні телескопи, що застосовуються для спостережень КО.

З моменту запуску першого КО 4 жовтня 1957 р. щорічно здійснюється від 50 до 120 запусків. Згідно з даними звіту відділу NASA з

відстеження штучних космічних об'єктів на кінець 2010 р. у каталозі космічних об'єктів Стратегічного Командування Збройних сил США (ККО СКЗС США) налічувалося близько 16000 об'єктів, які на цей час знаходилися на навколосеземних орбітах, з них – 729 на ГСО. За даними Європейського центру управління космічними об'єктами [21] в області геосинхронних орбіт зареєстровано 1238 КО, з них працюючими є лише 391. Тобто 68% всіх об'єктів на геосинхронних орбітах становить космічне сміття. Відповідно до визначення Комітету ООН з використання космічного простору в мирних цілях, КС визначається як всі антропогенні об'єкти, які знаходяться на навколосеземній орбіті або повертаються в атмосферу Землі, включаючи їхні фрагменти та елементи, які не функціонують [22]. Космічне сміття становить загрозу для функціонування працюючих космічних апаратів та, внаслідок зіткнень, може стати причиною ще більшого засмічення області геосинхронних орбіт [23]. Тому із закінченням активної роботи геосинхронні КО переводять на орбіти захоронення. Але в результаті прецесії площини орбіти неактивні КО з плином часу повертаються в область геостаціонарної орбіти [30]. Найбільш складними для спостережень та каталогізації КО на ГСО є малорозмірне КС за рахунок малої яскравості та КО з великим відношенням площі до маси за рахунок великої швидкості руху. Тому дуже необхідними є регулярні спостереження та ведення каталогу елементів орбіт усіх КО на ГСО.

Зазвичай спостереження КО на ГСО проводиться в оптичному діапазоні. Це викликано тим, що в радіодіапазоні прийнятий відбитий сигнал слабшає з висотою за законом $1/r^4$ [33].

Найпоширенішим оптичним методом спостережень геосинхронних КО є спостереження в режимі накопичення, при нерухомому телескопі. При таких спостереженнях на одному кадрі отримують зображення опорних зір у вигляді витягнутих треків та КО у вигляді треків чи крапок в залежності від швидкості руху КО. В такому разі час експонування зображень обмежений швидкістю КО та довжиною треків зображень опорних зір [32]. Обмеження часу експонування зображення знижує проникну силу телескопа. Також спостереження проводять в режимах супроводу КО телескопом та часового ведення телескопа, в першому випадку експозиція обмежується довжиною треків зір, у другому – довжиною трека КО. Тобто усі методи спостережень КО, що використовуються на сьогодні, приводять до обмеження експозиції.

В першому розділі представлений опис існуючих каталогів елементів орбіт КО. Описуються наступні каталоги: Space-Track – відкрита частина ККО СКЗС США, «Зональний каталог геосинхронних супутників» під редакцією Т. Б. Омарова і Г. Бичкова, «Каталог орбіт геосинхронних супутників» під редакцією А.С. Сочіліной, каталоги серії «ГОСКУ», каталог Європейського космічного агентства «Класифікація геосинхронних об'єктів».

Також в першому розділі наведено опис сучасних оптичних телескопів, що застосовуються для спостережень КО на ГСО в Росії, Європі, США та Японії.

У другому розділі «Комбінований метод спостережень» обґрунтовано необхідність проведення спостережень комбінованим методом, описано суть комбінованого методу спостережень.

Комбінований метод спостережень був розроблений для спостережень об'єктів, що рухаються відносно зір, таких як КО та АЗЗ. Суть комбінованого методу спостережень полягає у відокремленні процесів отримання зображень об'єкта спостережень та опорних зір, із застосуванням оптимальних режимів роботи ПЗЗ-камери, або оптимального часу експонування. КМС спрямований на одержання крапкових зображень об'єктів спостережень та опорних зір.

Основними режимами роботи ПЗЗ-камери при спостереженнях комбінованим методом є режим накопичення заряду та режим синхронного переносу заряду. Режим синхронного переносу заряду ПЗЗ-камери (РСПЗ) (time delay and integration) дозволяє одержувати крапкові зображення об'єктів, що рівномірно рухаються уздовж стовпців ПЗЗ-матриці, за умови, що швидкість перенесення зарядових пакетів по ПЗЗ-матриці збігається зі швидкістю руху об'єкта в площині матриці. РСПЗ можна назвати електронним супроводом об'єкта спостережень. РСПЗ забезпечує формування крапкових зображень рухомих об'єктів на нерухомому телескопі. Крім того, перенос заряду вздовж стовпців ПЗЗ-матриці приводить до усереднення неоднорідності чутливості пікселів ПЗЗ-матриці, тобто отримане в РСПЗ зображення є більш рівномірним порівняно з зображенням, отриманим в режимі накопичення заряду.

У класичному застосуванні РСПЗ час експозиції дорівнює часу проходження зображення об'єкта через всю матрицю. Найчастіше така експозиція надлишкова внаслідок того, що:

- значно перевищує ефективну експозицію;
- призводить до перенасичення зображень яскравих КО;
- для таких об'єктів, як КО на середніх, геоперехідних та низьких орбітах починає проявлятися нерівномірність їх руху, що обумовлює відмінність зображення об'єкта від крапкового.

Для розширення області застосування РСПЗ у НДІ МАО розроблена методика застосування РСПЗ з вкороченою експозицією. При застосуванні вкороченої експозиції під час накопичення зображення камера працює в РСПЗ, після завершення експозиції відбувається швидке зчитування сигналу з ПЗЗ-матриці.

Для спостережень об'єктів, що рухаються в довільному напрямку, необхідний поворот ПЗЗ-камери таким чином, щоб стовпці ПЗЗ-матриці були

зорієнтовані паралельно напрямку видимого руху об'єкта. Для цього в НДІ МАО застосовується спеціальний пристрій – поворотна платформа. Поворотна платформа – механічний пристрій, що обертає ПЗЗ-камеру навколо осі об'єктива, оснащений двигуном та датчиком кута. Кут повороту ПЗЗ-камери розраховується з видимих кутових швидкостей об'єкта:

$$\beta = \arctg(v_{\delta} / v_r),$$

де β – кут повороту, v_r – видима кутова швидкість за прямим піднесенням, v_{δ} – видима кутова швидкість за схиленням.

Усі спостереження з використанням КМС та поворотної платформи були виконані на телескопі ШАК НДІ МАО ($\lambda = 31^{\circ}58'$ східної довготи, $\varphi = 46^{\circ}58'$ північної широти, $h = 87$ м). Телескоп ШАК оснащений:

- об'єктивом системи Максудова з діаметром 300 мм та фокусною відстанню 1500 мм, труба якого встановлена на паралактичному монтуванні;
- приводами, які включають двигуни наведення, редуктори та передачі, а також абсолютні датчики кута повороту;
- ПЗЗ-камерою Alta U9000 3056×3056 пікселів, яка встановлена на поворотній платформі.

Виконано дослідження залежності проникної сили телескопа ШАК від режимів роботи ПЗЗ-камери. Для зір 10–16^m, з інтервалом усереднення в 0.5^m, отримані середні значення співвідношення сигнал/шум. Як приклад в таблиці 1 наведено середні значення співвідношення сигнал/шум для зір 12.75–13.25^m, зображення яких отримані з використанням різних експозицій. Треба відмітити, що в режимі накопичення заряду на нерухомому телескопі ШАК отримати зображення зір у вигляді точки можна тільки з експозицією до 0.5 с.

Таблиця 1

Співвідношення сигнал/шум для зір 12.75^m – 13.25^m

Експозиція (с)	Режим	Співвідношення сигнал/шум
0.5	Накопичення заряду	4
5	РСПЗ	25
15	РСПЗ	42
30	РСПЗ	53
60	РСПЗ	79

Із таблиці 1 видно, що при використанні РСПЗ, сигнал/шум зростає до 20 разів по відношенню до режиму накопичення заряду. Це вказує на ефективність використання РСПЗ.

Комбінований метод спостережень дозволяє ефективно спостерігати КО на геосинхронних, геоперехідних, високоапогейних та середніх орбітах, а також астероїди, що зближуються із Землею на відстань менше 0.05 а.о.

Для підтвердження ефективності спостережень комбінованим методом були проведені спостереження АЗЗ 2003UV11. На момент спостереження АЗЗ мав швидкість видимого руху $134.3''/хв$ за прямим піднесенням та $-10.9''/хв$ за схиленням. На рис. 1 наведено зображення об'єкта в режимах: а) накопичення заряду на телескопі з часовим веденням, б) РСПЗ із використанням поворотної платформи на нерухомому телескопі. Експозиція в обох випадках дорівнює 50 с.

При використанні РСПЗ з поворотною платформою отримане крапкове зображення АЗЗ зі співвідношенням сигнал/шум 147, при використанні режиму накопичення заряду АЗЗ має витягнуте зображення довжиною 123" із середнім співвідношенням сигнал/шум 15. Тобто використання РСПЗ з поворотною платформою дозволило збільшити співвідношення сигнал/шум в 9.8 разів порівняно з режимом накопичення.

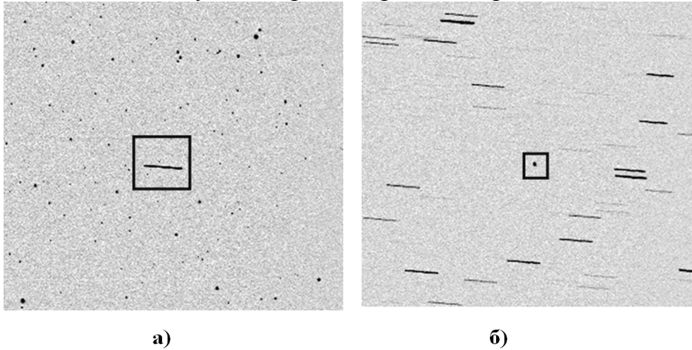


Рис. 1 Зображення отримані: а) в режимі накопичення заряду, б) в РСПЗ з використанням поворотної платформи.

Обчислення екваторіальних координат КО виконується відносно координат опорних зір, а точність останніх залежить від якості зображення. Залежно від напрямку руху об'єкта відносно напрямку руху зір використовуються два режими роботи ПЗЗ-камери для отримання якісного (у вигляді крапок) зображення опорних зір:

1. Режим накопичення заряду з експозицією 0.5 с. Використовується при спостереженні КО, тому що напрям видимого руху КО відрізняється від напрямку руху зір.
2. РСПЗ з експозицією 15 с. Використовується при спостереженні АЗЗ, тому що напрям видимого руху АЗЗ мало відрізняється від напрямку руху зір.

У *третьому розділі* «Редукція спостережень» описано метод обчислення екваторіальних координат космічних об'єктів при спостереженнях комбінованим методом.

Попередня обробка спостережень полягає у вирівнюванні фону зображення вздовж стовпців та рядків. Екваторіальні координати об'єктів, що спостерігаються, визначаються відносним способом – відносно опорних зір, що розташовані на окремих зображеннях. Для ототожнення опорних зір використовувалася програма «Astrometrica». Як опорний каталог був обраний каталог UCAC2. Пошук прямокутних координат КО виконувався методом середньозваженого з використанням програмного забезпечення, розробленого в НДІ МАО. Середня похибка приведення прямокутних координат КО в систему координат опорних зір складає ± 0.1 пікселя, що з урахуванням масштабу пікселя відповідає $\pm 0.33''$ для зображень з подвійним бінуванням.

Задача переходу від вимірних координат в системі матриці до екваторіальних координат вирішується шляхом введення ідеальних координат ξ, η . Зв'язок між вимірними та ідеальними координатами подається у вигляді степеневих рядів (1) та вирішується методом найменших квадратів.

$$\begin{aligned}\xi &= ax + by + c + \dots, \\ \eta &= dx + ey + f + \dots,\end{aligned}\tag{1}$$

де ξ, η – ідеальні координати об'єкта; x, y – прямокутні координати об'єкта в системі ПЗЗ-матриці, які віднесені до оптичного центра кадру; a, b, c, d, e, f – редукційні сталі.

В залежності від необхідної точності визначення положень об'єкта спостережень використовуються різні моделі редукції, які враховують те чи інше число членів степеневого ряду. Для вибору моделі редукції на телескопі САК проводились дослідження впливу моделі редукції на значення (О–С) опорних зір, відносно каталогу UCAC2, в залежності від прямокутних координат. Були побудовані тривимірні графіки розподілення похибок (О–С). Для лінійної (модель шести сталих) та квадратичної (модель дванадцяти сталих) моделей редукції було виявлено нерівномірність розподілення (О–С) (рис. 2а). Кубічна модель редукції (модель двадцяти сталих) дозволяє отримувати рівномірне розподілення (О–С) по полю матриці (рис. 2б).

Нерівномірність розподілення (О–С) у випадку використання лінійної та квадратичної моделей редукції викликано недосконалістю оптичної системи телескопа ШАК. Використання кубічної моделі редукції дозволяє врахувати вплив спотворень оптичної системи, а також поліпшити СКВ положень опорних зір. Для лінійної моделі редукції отримані СКВ: $\pm 0.39''$ за

прямим піднесенням та $\pm 0.37''$ за схиленням. Для квадратичної моделі СКВ склали $\pm 0.38''$ та $\pm 0.37''$. Для кубічної моделі отримано наступні значення СКВ: $\pm 0.29''$ за прямим піднесенням та $\pm 0.27''$ за схиленням.

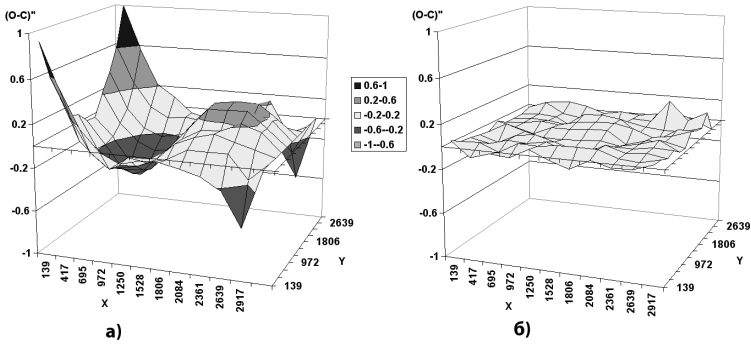


Рис. 2. Розподіл (O–C)'' по полю ПЗЗ-матриці для: а) лінійної моделі редукції, б) кубічної моделі редукції.

У зв'язку з тим, що при спостереженнях комбінованим методом зображення опорних зір і об'єкта спостережень одержують роздільно, необхідний перерахунок редукційних постійних та екваторіальних координат центра зображення на момент спостереження об'єкта. Для цього в НДІ МАО розроблена модифікована модель редукції (ММР).

В ММР розрахунок екваторіальних координат оптичного центра та редукційних сталей зображення з об'єктом проводиться наступним методом. Складаються лінійні рівняння виду:

$$\begin{aligned}\alpha_i &= a + b \cdot t_i, \\ \delta_i &= c + d \cdot t_i,\end{aligned}$$

де t_i – час спостереження i -того кадру із зображенням опорних зір на середину експозиції; α_i – координата оптичного центра зображення або редукційна стала кадру з опорними зорями за прямим піднесенням, δ_i – координата оптичного центра зображення або редукційна стала кадру з опорними зорями за схиленням; a, b, c, d – сталі. Система рівнянь вирішується методом найменших квадратів. Далі, використовуючи знайдені коефіцієнти a, b, c, d та час спостереження КО, знаходимо координати оптичного центра та редукційні сталі зображення з КО. Використовуючи редукційні сталі для зображень з КО та прямокутні координати КО в системі матриці обчислюються екваторіальні координати КО.

Для дослідження похибки обчислень координат з використанням ММР проведено тестові спостереження зір із застосуванням комбінованого методу спостережень. Спостереження проводились в нульовому положенні поворотної платформи, яке відповідає напрямку добового руху зір. Послідовність режимів роботи ПЗЗ-камери та експозицій імітувала етапи спостережень АЗЗ або КО.

Для імітації спостережень АЗЗ проведені спостереження опорних зір в режимі вкороченого переносу заряду з експозицією 15 с («кадр») та зір теж в режимі вкороченого переносу заряду, але з експозицією 60 с («полоса»). Екваторіальні координати зір на «полосах» були отримані з класичної редукції програмою «Astrometrica» та з використанням модифікованої моделі редукції. В результаті порівняння не було виявлено систематичної похибки, а випадкова похибка одного спостереження знаходилась в межах $\pm 0.3''$, що відповідає випадковій похибці редукції опорних зір з використанням програми «Astrometrica».

Для імітації спостережень геосинхронних КО проведені спостереження опорних зір в режимі накопичення з експозицією 0.5 с («кадр») та зір в режимі вкороченого переносу заряду з експозицією 15 с («полоса»). Екваторіальні координати зір на «полосах» були отримані з класичної редукції програмою «Astrometrica» та з використанням модифікованої моделі редукції. В результаті порівняння виявлено систематичну похибку за прямим піднесенням, яка склала $1.1'' \text{ sec } \delta$, за схиленням систематичної похибки не виявлено. Тестові спостереження проводилися для схилень $-20^\circ - +60^\circ$ з кроком 20° , для часових кутів $-30^\circ - +60^\circ$ з кроком 30° , та різного бінкування. Враховуючи те, що систематична похибка не змінюється зі зміною бінкування, можна припустити, що причиною систематичної похибки в прямому піднесенні є відмінності в режимах роботи ПЗЗ-камери. Отримана систематична похибка враховується на етапі обчислення екваторіальних координат КО.

Ще однією можливістю оцінки похибки обчислень координат з використанням ММР є порівняння отриманих зі спостережень координат КО, оснащених кутовими відбивачами, з ефемеридою Міжнародної служби лазерної локації (International laser ranging service – ILRS). Для цього на телескопі ШАК були проведені спостереження п'яти навігаційних середньоорбітальних КО. Координати КО було отримано з використанням ММР. В результаті порівняння отримано СКВ $0.44''$ за прямим піднесенням та $0.60''$ за схиленням.

Також оцінка точності ММР була проведена за допомогою порівняння координат АЗЗ, отриманих зі спостережень КМС на телескопі ШАК. Для порівняння екваторіальних координат на моменти спостережень програмою Horizons були розраховані ефемериди Лабораторії реактивного руху США. Результати порівняння координат АЗЗ, отриманих в НДІ МАО з

використанням ММР, та ефемерид, розрахованих програмою Horizons, приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати порівняння координат АЗЗ з ефемеридою Horizons.

Номер АЗЗ	Швидкість ["/хв]		Mag	Відстань до Землі [а.о.]	Кількість кадрів	Середнє (О-С) ["]		СКВ (О-С) ["]	
	α	δ				α	δ		
2005RC34	6.5	21.1	14.4	0.037	179	-0.11	-0.12	0.42	0.32
2008TT26	28.8	-36.0	14.7	0.010	75	0.04	0.01	0.41	0.23
2008SV11	15.0	-19.4	12.8	0.045	22	-0.25	-0.18	0.27	0.15
2005YU55	-61.2	21.5	15.3	0.016	29	0.03	-0.10	0.23	0.26
2010JO33	68.3	4.6	15.9	0.009	29	0.10	-0.20	0.38	0.26

Порівняння (О-С), отриманих в НДІ МАО, з (О-С), отриманими в інших обсерваторіях для АЗЗ 2008ТТ26 за даними проекту NEODyS (Near Earth Objects – Dynamic Site), представлені на рис. 3. Спостереження проводилися з 21 по 23 жовтня 2008 р. На момент спостережень АЗЗ знаходився на відстані 0.0091–0.0103 а.о. від Землі.

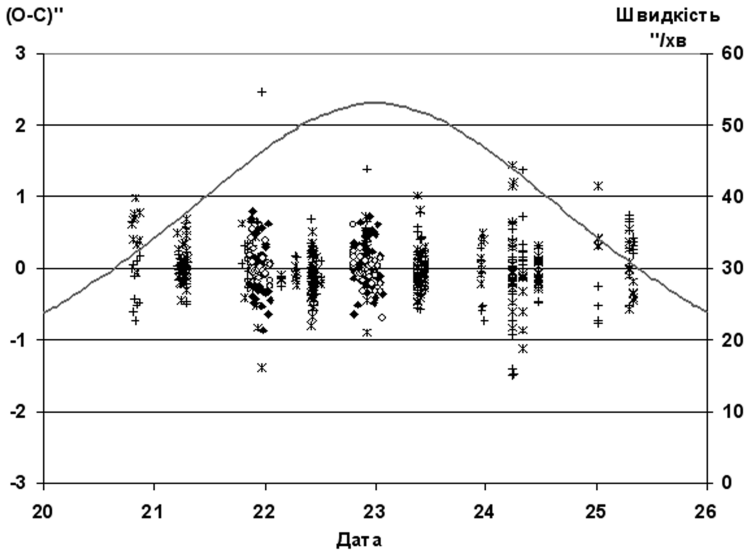


Рис. 3. (О-С) АЗЗ 2008ТТ26, де ♦ та ○ – пряме піднесення та схилення за спостереженнями НДІ МАО, ж та + – пряме піднесення та схилення за спостереженнями інших обсерваторій, лінією позначено швидкість видимого руху АЗЗ.

Усього за даними спостережень було отримано 334 положення п'яти АЗЗ, з яких п'ятдесят дев'ять положень були надіслані до Міжнародного центру малих планет. СКВ спостережень склало $\pm 0.34''$ за прямим піднесенням та $\pm 0.24''$ за схиленням, що відповідає світовому рівню точності для такого роду спостережень.

У *четвертому розділі* «Каталог положень та елементів орбіт геосинхронних космічних об'єктів» наведено формат каталогу, а також оцінку точності положень, векторів стану та елементів орбіт геосинхронних КО.

Для спостережень було складено список 73 КО на ГСО. До списку спостережень увійшли КО зі швидкістю дрейфу за довготою менше 20° за добу. Швидкість дрейфу обмежувалась для того, щоб обрані КО якнайдовше знаходилися в зоні видимості телескопа ШАК для забезпечення регулярних спостережень.

У 2008–2010 рр. з використанням КМС на телескопі ШАК отримано 31883 положення 67 КО на геосинхронних орбітах. За результатами спостережень проведено оцінку точності отриманих положень відносно кеplerової орбіти і отримані СКВ $\pm 0.33''$ – $\pm 0.66''$ за прямим піднесенням та $\pm 0.26''$ – $\pm 0.91''$ за схиленням для КО 10–16^m. Оцінка точності результатів спостережень на телескопі ШАК з використанням КМС в порівнянні з точністю спостережень інших обсерваторій наведена в таблиці 3.

Таблиця 3
Середньоквадратичне відхилення положень геосинхронних КО.

Установа	Телескоп	СКВ
Терскольська філія ІНАСАН [26]	Цейс 2000	0.5''
Терскольська філія ІНАСАН [24]	Цейс 2000	0.275'' – 0.414''
Гиссарська обсерваторія [27]	ВАУ	2''
Уральський державний університет [28]	SBG	1.5''–3.5''
Уральський державний університет [28]	АЗТ 3	1''
НДІ МАО	ШАК	0.3'' – 0.9''

В КраО за результатами спостережень на телескопі ЗТШ [25] отримані значення внутрішньої точності оцінки положення КО на ГСО краще 0.5''. Базуючись на даних, представлених у таблиці 3, можна сказати, що точність спостережень КО на ГСО в НДІ МАО відповідає кращому рівню точності для спостережень геосинхронних КО.

Отриманий каталог положень КО на ГСО застосовується спільно з АО НДІ ОНУ для уточнення моделі руху ШСЗ. Для розрахунку елементів орбіт та ефемерид КО використовувалось програмне забезпечення, розроблене співробітниками Одеської астрономічної обсерваторії. Модель руху не потребує наявності початкових умов при обчисленні елементів орбіти. Для первинного визначення вектора стану (X , Y , Z , V_x , V_y , V_z), на момент часу

опорних спостережень, використовувався аналітичний метод Лапласа. Корекція первинного вектора стану проводилась методом диференціальних поправок до мінімальної різниці між обчисленими та отриманими зі спостережень координатами КО. Диференційні рівняння руху вирішувалися чисельним методом Еверхарта 15-го порядку, з використанням автоматичної корекції кроку інтегрування [34]. В процесі інтегрування враховувались наступні збурюючі фактори:

- збурення від геопотенціалу (до 15 порядку зональних та тесеральних гармонік);
- збурення від Місяця та Сонця (положення Місяця та Сонця вираховувались за допомогою чисельної моделі DE405);
- припливи у твердій корі (модель Лява у вигляді додаткових коефіцієнтів до другої та третьої зональних гармонік геопотенціалу);
- збурення від світлового тиску.

При обчисленні векторів стану та елементів орбіт використовуються результати спостережень на двох або трьох обертах КО на орбіті. Результатом роботи програмного забезпечення є вектор стану КО, який включає компоненти геоцентричних декартових координат та компоненти швидкості в системі ISRF на епоху J2000.0 та елементи орбіти КО.

За даними, що увійшли до каталогу положень, вищезгаданим методом, для 67 геосинхронних КО було розраховано вектори стану та елементи збуреної орбіти. З обчислених елементів орбіт та векторів стану сформовано каталог елементів орбіт. Каталог представлений в двох видах: у вигляді векторів стану (таблиця 4) та у вигляді елементів орбіт (таблиця 5).

Таблиця 4

Формат каталогу геоцентричних векторів стану

№	Епоха [MJD]	X [м]	Y [м]	Z [м]	V_x [м/с]	V_y [м/с]	V_z [м/с]
7392	54924.00096	-20502272.0	-35713381.6	-9265188.3	2670.9	-1516.2	-60.6

Примітка. № – номер в каталозі ККО СКЗС США, X , Y , Z – прямокутні координати КО в геоцентричній системі координат на епоху J2000.0, виражені в метрах; V_x , V_y , V_z – компоненти швидкості КО, виражені в метрах.

Таблиця 5

Формат каталогу елементів орбіт

№	Епоха [MJD]	T^0 [MJD]	a [м]	n [обертів/добу]	e	i [°]	ω [°]	Ω [°]
7392	54924.00096	54923.42569	42177553.9	1.00226	0.00085	12.732	57.054	335.426

Примітка. T^0 – момент проходження перигею, a – велика піввісь, n – середній рух, e – ексцентриситет, ω – аргумент перигею, Ω – довгота висхідного вузла.

Аналіз точності розрахованих параметрів орбіт виконано через

порівняння ефемериди (С), обчисленої з векторів стану, з положеннями (О) КО з каталогу, з різницею епох між вектором стану та положеннями від однієї доби до 200 діб. Отримані (О–С) знаходяться в межах $\pm 0.15^\circ$ за прямим піднесенням та $\pm 0.05^\circ$ за схиленням (рис. 4). Кожна точка на графіку відповідає середньому значенню (О–С) для спостережень, які належать до одного оберту КО на орбіті. В роботі [29] отримані теоретичні розрахунки точності прогнозу на 200 діб, яка складає $0^\circ - 0.35^\circ$, тобто результати, отримані автором, кращі за результати отримані в роботі [29].

Отримані результати порівняння свідчать про те, що похибка обчислення ефемерид зростає зі збільшенням різниці між епохою вектора стану та положеннями КО. Крім того, похибка обчислення ефемерид за прямим піднесенням у 7.7 разів вище за похибку за схиленням. Такий стан справ може бути обумовлений недостатнім врахуванням збурюючих факторів при обчисленні ефемерид.

Отримана точність обчислення ефемерид, при полі зору телескопа ШАК в $1.39^\circ \times 1.39^\circ$, дозволяє проводити сеанси спостережень геосинхронних КО раз на 200 діб. Точність обчислення ефемерид, продуктивність телескопа ШАК та метеоумови в м. Миколаєві дозволяють оновлювати елементи орбіти 700 КО на ГСО з періодичністю в півроку.

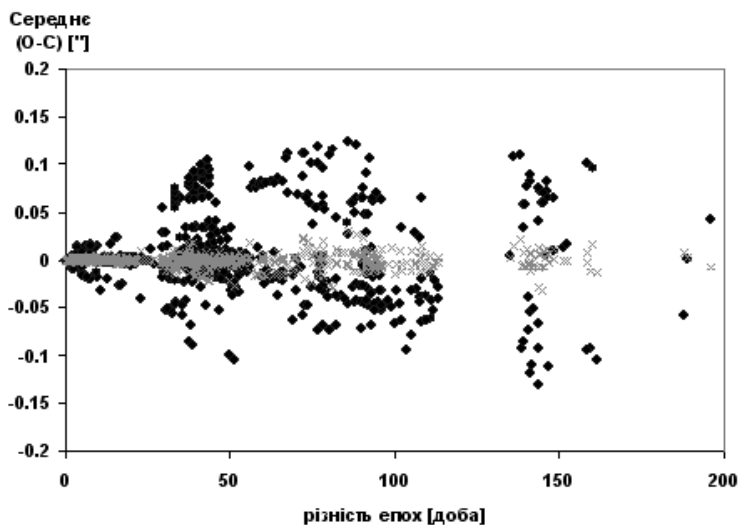


Рис. 4. Залежність (О–С) від різниці епох, де ● – (О–С) за прямим піднесенням, × – (О–С) за схиленням.

У висновках викладені найважливіші результати, отримані в дисертації. **У додатку А** представлений каталог векторів стану та елементів орбіт геосинхронних КО.

ВИСНОВКИ

Метою роботи було формування каталогу положень та елементів орбіт космічних об'єктів на геосинхронних орбітах з використанням комбінованого методу ПЗЗ-спостережень.

За 2008–2010 роки була виконана програма оптичних спостережень та отримано каталог 31883 положень 67 геосинхронних КО в екваторіальній системі координат на епоху J2000. В процесі дослідження було вирішено ряд задач, пов'язаних з методом обробки даних, починаючи від проблем первинної обробки ПЗЗ-кадрів та закінчуючи вибором редуційних моделей. В ході роботи автором проведено 40% спостережень, які увійшли до каталогу, та обробка усіх спостережень.

Як найбільш важливі результати проведених досліджень можна виділити наступні:

1. Вперше впроваджено для постійних спостережень КО на ГСО комбінований метод ПЗЗ-спостережень, який забезпечує відокремлення процесів отримання зображень опорних зір та КО із застосуванням оптимальних режимів роботи ПЗЗ-камери.

2. Розроблено та впроваджено в практику астрономічних досліджень модифікований метод редуції спостережень. Метод полягає в астрометричній редуції прямокутних координат КО, зображення яких відокремлені в часі від зображення опорних зір та отримані в іншому режимі роботи ПЗЗ-камери.

3. Отримано 31883 положення 67 геосинхронних КО в екваторіальній системі координат, які оформлені у вигляді каталогу положень на епоху J2000. Середньоквадратична похибка спостережень КО 10–16^m відносно кеплерової орбіти склала $\pm 0.33''$ – $\pm 0.66''$ за прямим піднесенням та $\pm 0.26''$ – $\pm 0.91''$ за схиленням, що відповідає кращому світовому рівню точності для такого роду спостережень.

4. З використанням каталогу положень проведено розрахунок векторів стану та елементів орбіт 67 геосинхронних КО та отримано каталоги в текстовому вигляді. З використанням векторів стану розраховано ефемериди на інтервалі прогнозування від однієї доби до 200 дб та проведено порівняння ефемериди (С) з даними спостережень (О). Отримані при порівнянні (О–С) не перевищують $\pm 0.15^\circ$ за прямим піднесенням та $\pm 0.05^\circ$ за схиленням.

5. Впроваджено КМС для спостережень астероїдів, що зближуються із Землею (АЗЗ) на відстань менше 0.05 а.о. За результатами спостережень отримано 334 положення п'яти АЗЗ. Середньоквадратичне відхилення (СКВ) спостережень АЗЗ відносно ефемериди Лабораторії реактивного руху США склало $\pm 0.34''$ за прямим піднесенням та $\pm 0.24''$ за схиленням, що відповідає світовому рівню точності для такого роду спостережень.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Bazyey O.A. The method for fast determination of geostationary Earth satellite orbit from angular coordinates measurements/ Bazyey O.A., **Sibiryakova E.S.**, Shulga A.V.// Odessa Astronomical Publications. – 2005. –V. 18. – P. 8–13.
2. Козырев Е.С. Реализация комбинированного метода в НИИ НАО для наблюдения геосинхронных спутников/ Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Odessa Astronomical Publications. – 2007. – V. 20, № 2. – P. 53–54.
3. Козырев Е.С. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов / Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 5. – С. 71–76.
4. **Сибирякова Е.С.** Визначення екваторіальних координат геостационарних супутників (Sputnik). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 9399 від 19.02.2004 р.
5. Козырев Е.С. Регулярные наблюдения геостационарных спутников комбинированным ПЗС-методом/ Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В. // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 5. – С. 39–45.
6. Базей А. А. Использование телескопа САК-300 для ведения каталога искусственных спутников Земли в НИИ НАО/ Базей А.А., Ковальчук А.Н., Козырев Е.С., Лаврухина Р.В., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Труды конференции “Изучение объектов околоземного пространства и малых тел Солнечной системы”. – Николаев, 2007. – С. 126–132.
7. Козырев Е.С. Применение поворотной платформы для наблюдений объектов околоземного пространства комбинированным методом/ Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Сборник трудов конференции “Околоземная астрономия 2007“. – Нальчик, 2008. – С. 288 – 292.
8. Козырев Е.С. Совместный проект НИИ «Николаевская Астрономическая Обсерватория» и Львовской астрономической обсерватории по позиционным наблюдениям ИСЗ / Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В., Апуневич С.В., Билинский А.И., Благодарь Я.Т., Вирун Н.В., Вовчик Е.Б., Логвиненко А.А., Мартынюк-Лотоцкий К.П.// Сборник трудов конференции «Околоземная астрономия 2007». – Нальчик, 2008. – С. 326–331.
9. Shulga O. Observation of the fast NEO objects with prolonged exposure/ Shulga O., Kozuyev Y., **Sibiryakova Y.** // Proc. of IAU Symposium

- № 248 «A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry». – Shanghai, 2007.– P. 128–129.
10. Козырев Е.С. Регулярные наблюдения геостационарных спутников комбинированным ПЗС методом/ Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В. // Сборник тезисов Третьей Украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. – Кацевели, 2003. – С. 170.
 11. Bazey A. Telescopes for observation of artificial satellites of the Earth in the research institute NAO/ Bazey A., Kovalchuk A., Kozirev E., **Sibiryakova E.**, Shulga A.// Proceedings of the International conference “Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes”. – Nikolaev, 2004 – P. 18.
 12. Базей А.А. Комплекс ПЗС-телескопов НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» для наблюдений ИСЗ и космического мусора/ Базей А.А., Ковальчук А.Н., Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Сборник тезисов международного научного семинара “Наблюдения искусственных спутников Земли и космического мусора”. – Львов, 2004. – С. 28.
 13. Базей А.А. Ведение каталога искусственных спутников Земли в НИИ «НАО»/ Базей А.А., Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Сборник тезисов 9-й международной конференции “Системный анализ и управление”. – Евпатория, 2004. – С. 112.
 14. Shulga A. Observations of artificial Earth satellites/ Shulga A., Bazey A., Kozirev E., **Sibiryakova E.**// Abstract Book of the International conference “Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future”. – Kiev, 2004. – P. 169.
 15. Kovalchuk A. Development and application of the combined method of CCD observations/ Kovalchuk A., Kozirev E., Lavruhina R., **Sibiryakova E.**, Shulga A.// Abstract Book of the International conference “Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System”. – Nikolaev, 2006.– P. 60.
 16. Козырев Е.С. Автоматические наблюдения объектов на геостационарных и низких орбитах на телескопе САК в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория»/ Козырев Е.С., Ковальчук А.Н., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Радиотехнические тетради. – 2008. – № 36. – С. 42.
 17. Сибирякова Е.С. Методы проведения и обработки наблюдений ИСЗ в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория»/ **Сибирякова Е.С.**, Козырев Е.С., Шульга А.В.// Радиотехнические тетради. – 2008. – № 36. – С. 43.

18. Козырев Е.С. Исследование точности вычисления экваториальных координат при наблюдениях комбинированным методом/ Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Всероссийская Астрономическая Конференция. – Нижний Архыз, 2010. – С. 17.
19. Козырев Е.С. Наблюдение АСЗ с высокой эфемеридной скоростью/ Козырев Е.С., **Сибирякова Е.С.**, Шульга А.В.// Всероссийская Астрономическая Конференция. – Нижний Архыз, 2010. – С. 17–18.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

20. Абросимов В.М. Изучение объектов в ближнем космосе с помощью телескопа АЗТ-8, оснащенного ПЗС-камерой/ Абросимов В.М., Ковальчук А.Н., Малевинский С.В. и др.// Космічна наука і технологія.– 2004. – Т. 10, № 1. – С. 79–84.
21. Choc R. Classification of geosynchronous objects/ Choc R., Jehn R.// Issue 12. – Darmstadt, Germany: ESOC, 2010. – 127 p.
22. Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space // General Assembly Official Records – Sixty-second Session – Supplement №. 20 – Режим доступу до документів:
http://www.oosa.unvienna.org/oosa/Reports/gadocs/A_62_20R.pdf.
23. IADC Space Debris Mitigation Guidelines// IADC-02-01 –Revision 1 – September 2007 – Режим доступу до документів: http://www.iadc-online.org/Documents/Docu/IADC_Mitigation_Guidelines_Rev1_Sep07.pdf
24. Сергеев А.В. Новые возможности Терскольской обсерватории для исследования «космического мусора» в околоземном пространстве / Сергеев А.В., Тарадий В.К., Бахтигараев Н.С. и др.// Сборник трудов конференции «Околоземная астрономия 2009». – Москва, 2010. – С. 105–109.
25. Бирюков В.В. Оптический контроль околоземного космического пространства в Крымской обсерватории: текущее состояние и перспективы развития/ Бирюков В.В., Румянцев В.В., Борисов Г.В.// Радиотехнические тетради. – 2008. – № 36. – С. 28–29.
26. Андреев М.В. О наблюдениях в Институте астрономии Академии наук России малоразмерных геостационарных объектов в 2006 г./ Андреев М.В., Бахтигараев Н.С., Крючков С.В. и др.// Радиотехнические тетради. – 2008. – № 36. – С. 16–20.
27. Гулямов М.И. Наблюдательная база Института астрофизики АН Таджикистана. Современное состояние и перспективы развития/ Гулямов М.И., Миникулов Н.Х.// Радиотехнические тетради. – 2008. – № 36. – С. 32.

28. Захарова П.Е Система мониторинга геосинхронных объектов Коуровской астрономической обсерватории УрГУ/ Захарова П.Е, Кузнецов Э.Д., Гламазда Д.В. и др.// Материалы международной конференции «Околоземная астрономия 2007». – Нальчик, 2008. – С. 314–317.
29. Musci R. Concept for a Catalogue of Space Debris in Geo/ Musci R., Schildknecht T., Flohrer T., Beutler, G.// Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris. – ESA/ESOC, 2005. – P. 601 – 606.
30. Рыхлова Л.В. Новые проблемы околоземной астрономии/ Рыхлова Л.В., Бахтигараев Н.С.// Сборник трудов конференции «Околоземная астрономия 2009». – Москва, 2010. – С. 9–15.
31. Спішев В.П. Повернення орбіт геосинхронних об'єктів у площину екватора і ризик зіткнення на геостационарній орбіті/ Спішев В.П., Мотрунич І.І., Клімич В.У.// Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 1. – С. 49–53.
32. Schildknecht T. Optical surveys for space debris/ Schildknecht T.// Astronomy and Astrophysics Review. – 2007.– V. 14, № 1. – P. 41–111.
33. NASA handbook for limiting orbital debris. – Washington, 2008. – 174 p.. Режим доступу до документу:
www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/NHBK871914.pdf
34. Базей А. А. Применение методов Эверхарта 15, 17, 19, 21 порядков для вычисления траектории движения небесных тел в околопланетном пространстве/ Базей А. А., Кара И. В.// Вісник Астрономічної школи. – 2009. – Т. 6, № 2. – С. 155–157.

АНОТАЦІЯ

Сибірякова Є.С. Застосування комбінованого методу ПЗЗ-спостережень для формування каталогу положень та елементів орбіт геосинхронних космічних об'єктів – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка – Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, 2010.

Дисертація присвячена створенню каталогу положень та елементів орбіт космічних об'єктів на геосинхронних орбітах з використанням комбінованого методу ПЗЗ-спостережень. Для досягнення мети роботи уточнено метод спостережень з використанням поворотної платформи. Поворотна платформа – механічний пристрій, що обертає ПЗЗ-камеру навколо осі об'єктива для розміщення стовпців ПЗЗ-матриці в положення, паралельне напрямку руху об'єкта спостереження. Розроблено та впроваджено в практику астрономічних досліджень оригінальний метод

редукції спостережень. Складено програму спостережень та отримано каталог 31883 положень 67 геосинхронних космічних об'єктів (КО) в екваторіальній системі координат. На базі положень геосинхронних КО сформовано каталог векторів стану та елементів орбіт та проведено дослідження точності обчислення ефемерид за отриманими векторами стану.

Ключові слова: позиційні спостереження, геосинхронні космічні об'єкти, метод ПЗС-спостережень, каталог положень та елементів орбіт.

АННОТАЦІЯ

Сибирякова Е.С. Применение комбинированного метода ПЗС-наблюдений для формирования каталога положений и элементов орбит геосинхронных космических объектов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика – Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, 2010.

Диссертация посвящена созданию каталога положений и элементов орбит космических объектов (КО) на геосинхронных орбитах (ГСО) с использованием комбинированного метода ПЗС-наблюдений, который заключается в обособлении процессов получения изображений опорных звезд и КО, что позволяет при наблюдении применять оптимальные режимы работы ПЗС-камеры. Основным режимом наблюдений КО на ГСО в НИИ Николаевская астрономическая обсерватория (НИИ НАО) является режим синхронного переноса заряда (РСПЗ)(time delay integration). Для наблюдений подвижных относительно звезд КО на неподвижном в процессе накопления изображения телескопе в РСПЗ используется специальное механическое устройство – поворотная платформа (ПП). ПП поворачивает ПЗС-камеру вокруг оси объектива и размещает столбцы ПЗС-матрицы параллельно направлению движения объекта наблюдений. Такой метод наблюдений подвижных относительно звезд КО позволяет увеличить проникающую силу телескопа за счет увеличения времени экспонирования изображения. КМН эффективно применяется в НИИ НАО для наблюдений КО на геосинхронных, геопереходных, средних и низких орбитах, а также астероидов сближающихся с Землей на расстояния менее 0.05 а.е.

Разработан модифицированный метод астрометрической редукции наблюдений. Метод заключается в редукции прямоугольных координат КО, изображения которых отделены во времени от изображений опорных звезд и получены в другом режиме работы ПЗС-камеры. Составлена программа наблюдений с учетом зоны обзора телескопа САК, в список наблюдаемых объектов вошли неконтролируемые геосинхронные КО.

Получены 31883 положения 67 геосинхронных КО в экваториальной

системе координат, которые оформлены в виде каталога положений на эпоху J2000. Среднеквадратичная ошибка положений КО 10–16 звездной величины относительно кеплеровой орбиты составила $\pm 0.33''$ – $\pm 0.66''$ по прямому восхождению и $\pm 0.26''$ – $\pm 0.91''$ по склонению, что соответствует лучшему уровню точности для наблюдений геосинхронных КО. С использованием каталога положений проведено вычисление векторов состояния и элементов орбит 67 геосинхронных КО. По полученным данным сформирован каталог векторов состояния и элементов орбит геосинхронных КО. Используя полученные из наблюдений вектора состояния, вычислены эфемериды на интервал прогнозирования от одних до 200 суток и проведено сравнение эфемериды (С) с данными наблюдений (О). (О–С), полученные при сравнении, не превышают $\pm 0.15^\circ$ по прямому восхождению и $\pm 0.05^\circ$ по склонению.

Ключевые слова: позиционные наблюдения, геосинхронные космические объекты, метод ПЗС-наблюдений, каталог положений и элементов орбит.

ABSTRACT

Sybiryakova Y.S. The combined CCD observation method using for catalogue of positions and orbit elements of geosynchronous objects producing. – Manuscript.

Thesis for a degree of the candidate in Physics and Mathematics sciences on specialty 01.03.01 – Astrometry and Celestial Mechanics. – Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2010.

The dissertation is devoted to a catalogue of positions and orbit elements of space objects on geosynchronous orbits, using the combined CCD-observation method. The observation method was improved using a rotation device to achieve work goal. The rotation device is automated mechanism which revolves the CCD metrics around objective's optical axis, to align the CCD-matrix columns in to position parallel to the direction of observation object's movement. The original method for observations reduction was designed and applied to practice of astronomical observations. The observation program was composed; catalogue of 31883 positions of 67 geosynchronous objects in equatorial coordinate system was obtained. The catalogue of state vectors and orbit elements was formed on the base of positions of geosynchronous objects; research of prediction accuracy by obtained state vectors was carried out.

Key words: coordinate observations, geosynchronous objects, CCD observation method, catalogue of positions and orbit elements.