

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.02.074>

УДК 523.492

**М. О. Куліченко, Н. В. Майгурова,  
О. В. Шульга, В. Ф. Крючковський**

Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія»,  
вул. Обсерваторна, 1, Миколаїв, 54005, Україна  
[niiko4kulichenko@gmail.com](mailto:niiko4kulichenko@gmail.com), [nadiiamaigurova@gmail.com](mailto:nadiiamaigurova@gmail.com),  
[shulga-av@ukr.net](mailto:shulga-av@ukr.net), [serenion.chou@gmail.com](mailto:serenion.chou@gmail.com)

## **Оцінка точності оптичних спостережень геостаціонарних супутників**

*Постійний моніторинг штучних космічних об'єктів потребує періодичного контролю якості даних спостережень. Оцінка внутрішньої точності спостережень у вигляді середньої квадратичної похибки положень дозволяє контролювати і виявляти грубі відхилення у масиві первинних даних. Для штучних супутників Землі також можлива процедура зовнішнього порівняння елементів орбіти, розрахованих в науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ МАО), з точними даними, представленими на сайті Міжнародної служби лазерного вимірювання (ILRS) або Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS). Таке порівняння дозволяє виявити проблеми з синхронізацією часу, помітити та оцінити систематичні помилки та ін. У НДІ МАО більше 10 років провадяться регулярні спостереження штучних супутників на різних орбітах з використанням кількох телескопів та формується каталог елементів їхніх орбіт у форматі TLE (two-line element). Програмне забезпечення для розрахунку елементів орбіти розроблено у співпраці з НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету. У даній роботі представлено аналіз результатів обробки масиву спостережень 149 геостаціонарних супутників (ГСС). Спостереження були отримані протягом 2020...2021 рр. з використанням комплексу телескопів НДІ МАО. Синхронізація часу забезпечувалася приймачем GPS Resolution-T із середньою квадратичною похибкою 40 нс. Всі спостереження ГСС проводились із використанням ком-*

бінованого методу спостережень, розробленого в НДІ МАО. Всього було отримано 134461 положень ГСС, для яких визначено залишкові різниці  $O - C$  відносно орбіти, розрахованої в НДІ МАО. Середня квадратична похибка положень ГСС в діапазоні видимих зоряних величин  $9^m \dots 13^m$  становить 0.5 за прямим піднесенням та схиленням. Порівняння орбітальних положень ГСС, розрахованих за елементами орбіт НДІ МАО і даними сайту ILRS, показало, що різниці між відповідними геоцентричними декартовими координатами на момент початку прогнозу становлять:  $dX = 0.72$  км,  $dY = -0.52$  км та  $dZ = 1.28$  км.

**Ключові слова:** наземні ПЗЗ-спостереження, геостаціонарні супутники, елементи орбіти

**Вступ.** З початку космічної ери кількість об'єктів техногенного походження в навколоземному просторі стає дедалі більшою за рахунок нових запусків КА. Космічне сміття, що накопичується на орбітах, становить серйозну загрозу як для безпеки космічних місій, так і для населення Землі. Станом на початок жовтня 2021 року, згідно з даними сайту Celestrak, загальна кількість каталогізованих космічних об'єктів становила 49324, і з них функціонують лише 4931 [<https://celestrak.com/satcat/boxscore>]. Оскільки для вирішення багатьох наукових, військових, навігаційних та інших задач найбільш вигідною є геостаціонарна орбіта, там перебуває велика частина діючих апаратів. У світлі інтенсивного застосування розвиненими країнами супутників зростає усвідомлення того, що можливості геостаціонарної орбіти не безмежні, і тому потрібно направляти значні зусилля на підтримку в робочому стані систем контролю космічного простору. Незважаючи на те що координати геостаціонарних супутників (ГСС) методом радіолокації обчислюються точніше, оптичні спостереження залишаються основним джерелом інформації для моніторингу та каталогізації об'єктів в цій галузі. У 2011 р. в Україні було створено мережу УМОС (Українська мережа оптичних станцій дослідження навколоземного космічного простору [<http://mao.uran.ua/umos/index.php?slab=slabid-7>]) для регулярних оптичних спостережень космічних об'єктів. Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ МАО) є активним учасником цієї мережі в галузі позиційних спостережень (статистику спостережень за останні три роки наведено у табл. 1). Метою даної роботи є отримання оцінок позиційної точності оптичних спостережень штучних супутників за результатами обробки масиву спостережень ГСС за 2020...2021 рр., та отримання оцінок зовнішньої точності цих спостережень шляхом порівняння з даними Міжнародної служби лазерної дальнометрії (ILRS) [<https://cddis.nasa.gov/archive/slr/>].

**Методика спостережень.** Для позиційних спостережень об'єктів, які мають великі видимі швидкості руху, в НДІ МАО був розроблений та впроваджений у практику комплекс оригінальних ме-

**Таблиця 1. Статистика спостережень ГСС, отриманих у НДІ МАО**

| Рік    | Кількість ночей | Кількість об'єктів | Кількість положень |
|--------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 2019   | 72              | 30                 | 14266              |
| 2020   | 150             | 149                | 57271              |
| 2021*  | 102             | 61                 | 77190              |
| Всього | 324             | 149                | 148727             |

\*станом на 01.10.2021 р.

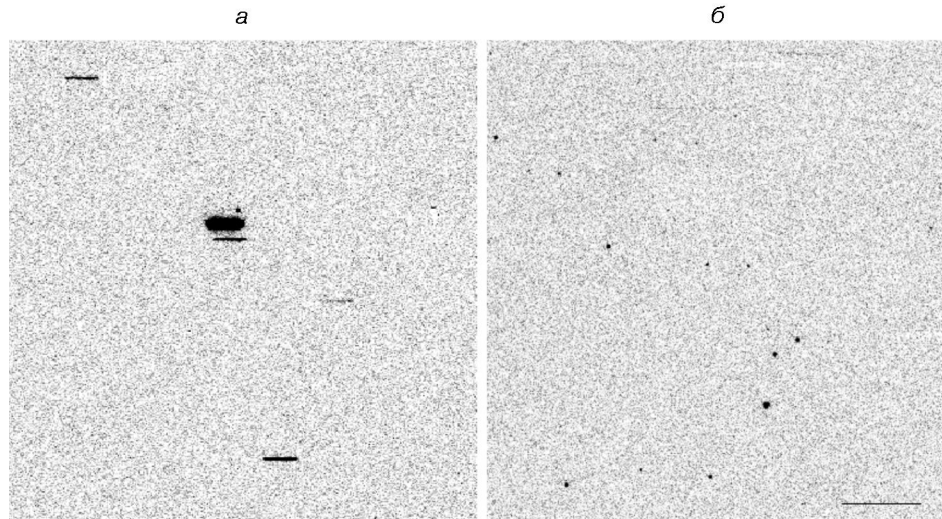


Рис. 1. Фрагменти з кадрів спостережень супутника IRNSS1F (N41384) в ніч 04 травня 2021 р. на телескопі КТ-50: *а* — зображення супутника, *б* — опорні зірки

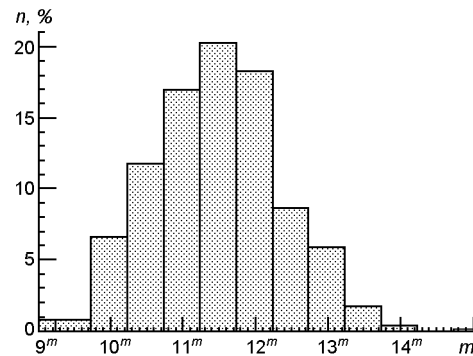
тодів, спільною рисою яких є нерухомість телескопа під час формування кадрів (тобто відсутність механічного супроводу) [4, 6]. Спостереження ГСС виконуються із застосуванням комбінованого методу [3], суть якого полягає у розділенні процесів отримання зображень програмного об'єкта і опорних зірок на різних кадрах при нерухомому телескопі. Для отримання точкових зображень об'єкта і зірок використовуються різні способи накопичення сигналу, що дає можливість варіювати час експозиції в залежності від видимої швидкості і яскравості об'єкта. На рис. 1 наведено приклад зображень, отриманих за результатами спостережень супутника IRNSS-1F (41384) в ніч 04 травня 2021 р. на телескопі КТ-50 комплексу «Мобітел».

**Телескопи.** Оптичні спостереження ГСС виконуються на трьох телескопах, що були модернізовані або створені у НДІ МАО [1, 7]. Усі телескопи оснащено повнокадровими ПЗЗ-приймачами. Прив'язка спостережень до часу на здійснюється за сигналами GPS-приймача «Trimble Resolution-T» [<https://xdevs.com/doc/Trimble/Data%20Sheets/Resolution%20T.pdf>]. Керування процесом спостереження на усіх телескопах виконується розподіленим програмним комплексом та може здійснюватися у віддаленому режимі. Інформацію про параметри телескопів наведено у табл. 2.

**Таблиця 2.** Основні характеристики інструментів, що використовуються для спостережень ГСС

| Телескоп            | Швидкісний автоматичний комплекс | Комплекс «Мобітел»  |                     |
|---------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
|                     |                                  | КТ-50               | «Мезон»             |
| $D/f$ , мм          | 300/1510                         | 500/3000            | 230/800             |
| ПЗЗ-камера:         | «Apogee Alta U9000»              | «Apogee Alta U9000» | «Apogee Alta U9000» |
| Розмір, пкл         | 3056 3056                        | 3056 3056           | 3056 3056           |
| Розмір пікселя, мкм | 12                               | 12                  | 12                  |
| Масштаб, /пкл       | 1.66                             | 0.84                | 3.21                |
| Поле зору           | 84 84                            | 43 43               | 156 156             |

Рис. 2. Гістограма розподілу ГСС по значеннях видимої зоряної величини



**Обробка.** Перший етап включає фільтрацію отриманих зображень і вимір прямокутних координат об'єкта у системі матриці. Для отримання топоцентричних екваторіальних координат застосовується модифікований метод астрометричної редукції (ММР), який є зміненою схемою класичного методу Тернера для фотографічної редукції спостережень [2]. Основна ідея ММР — інтерполяція редукційних коефіцієнтів, отриманих в результаті обробки кадрів з опорними зірками, на момент часу, який відповідає кадру з об'єктом [5].

**Результат обробки і внутрішня точність.** Масив даних, який отримується в результаті обробки спостережень, містить топоцентричні екваторіальні координати (пряме піднесення і схилення) і видимі зоряні величини  $m$  супутників на момент спостереження в системі опорного каталогу. Гістограму розподілу спостережуваних об'єктів по значеннях видимої зоряної величини  $m$  наведено на рис. 2.

Як можна бачити з наведеної гістограми, ГСС є досить яскравими об'єктами (95% з них мають зоряну величину від 10<sup>m</sup> до 13<sup>m</sup>). Ця обставина дозволяє спостерігати їх у режимі скороченої експозиції, що дає можливість отримати по 25...35 положень за одну ніч спостережень для кожного з 20...25 об'єктів.

Елементи орбіти у форматі TLE, що відповідають спрощеній моделі руху SGP4/SDP4 (Simplified General Perturbations), і ефемериди ГСС у форматі CPF (Consolidated Prediction Format) розраховуються з

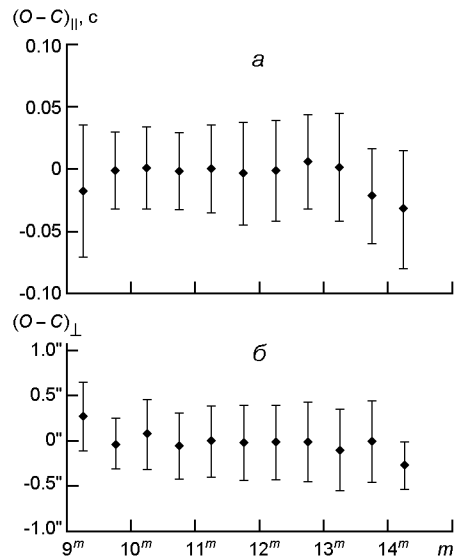
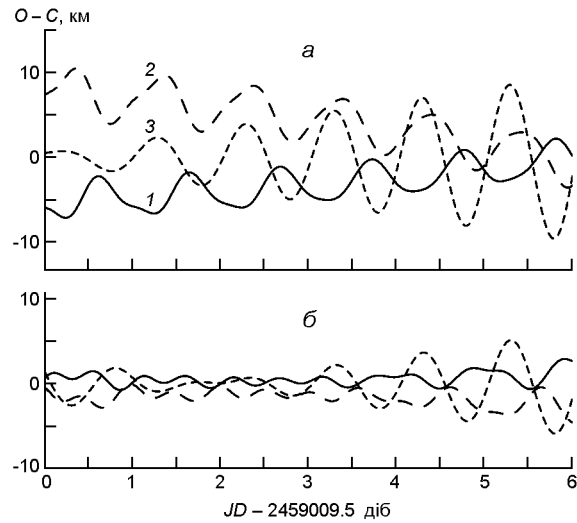


Рис. 3. Залежність залишкових різниць  $O - C$  від видимої зоряної величини  $m$  об'єкта:  $a$  — вздовж орбіти супутника,  $b$  — перпендикулярно до орбіти супутника

використанням програмного забезпечення, розробленого спільно з НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету [8]. Елементи орбіти обчислюються на основі декількох серій спостережень, що мінімізує похибки їхньої оцінки. За оцінку внутрішньої точності спостережень можна використовувати середню квадратичну похибку залишкових різниць  $(O - C)$  топоцентричних екваторіальних координат супутника, де  $O$  — спостережувані положення,  $C$  — положення, обчислені за елементами орбіти. Середня квадратична похибка положень ГСС в діапазоні видимих зоряних величин  $9^m \dots 13^m$  становить 0.5 як для прямого піднесення, так і для схилення. Також було обчислено залишкові різниці  $O - C$  уздовж та перпендикулярно до руху супутника по орбіті. Залежність  $O - C$  від видимої зоряної величини об'єкта наведено на рис. 3. Середні значення середньої квадратичної похибки залишкових різниць  $(O - C)$  в цьому випадку дорівнюють 0.5 (0.035 с) та 0.5 для напрямків вздовж та перпендикулярно до орбіти супутника відповідно.

**Оцінка зовнішньої точності.** Для оцінки зовнішньої точності наших спостережень були використані високоточні дані спостережень супутників ILRS з каталогу NORAD [[https://cddis.nasa.gov/archive/slr/cpf\\_predicts/](https://cddis.nasa.gov/archive/slr/cpf_predicts/)]. Були реалізовані два підходи для зовнішнього порівняння. У першому варіанті порівнювались прогнози значення векторів стану, що обчислювались за елементами орбіт у форматі TLE, які виконували роль початкових умов прогнозування. Вектор стану об'єкта включає компоненти геоцентричних декартових координат і компоненти швидкості в системі ICRS (International Celestial Reference System) на епоху J2000. Необхідність прогнозування викликана тим, що порівнювані елементи у форматі TLE мають різну епоху. Для перетворення TLE у формат векторів стану та прогнозування використовувалась спрощена модель руху SGP4/SDP4, а саме її реалізація на мові програмування Python 3, а також стандартна біб-

Рис. 4. Залежність залишкових різниць  $O - C$  від часу: *a* — за даними каталогу NORAD; *б* — за даними НДІ МАО. Крива 1 — для  $dX$ , 2 —  $dY$ , 3 —  $dZ$



ліотека *astropy* [<https://docs.astropy.org/en/stable/index.html>].

На рис. 4 наведено результати порівняння прогнозних координат об'єкта IRNSS-1F (N41384) з високоточними геоцентричними координатами, що обчислено службою ILRS у форматі CPF в системі ITRS (International Terrestrial Reference System) у вигляді залежностей різниць від часу. На рис. 4*a* наведено різниці, обчислені для початкових умов, отриманих з каталогу NORAD у форматі TLE на епоху  $JD = 2459009.73472503$ . Стартовою точкою прогнозу  $t_0$  було обрано юліанську дату  $JD = 2459009.5$  (2020.06.08 12:00 UTC), період прогнозу становив 7 діб (168 год). Рис. 4*б* містить різниці на епоху  $JD = 2459008.41875000$ , отримані за таким же чином спрогнозованими початковими умовами, обчисленими у рамках моделі, що застосовується у НДІ МАО. Порівняння показало, що для початкових умов з каталогу NORAD на момент початку прогнозу значення різниць з положеннями, отриманими ILRS, дорівнюють  $dX = -5.95$  км,  $dY = 7.4$  км,  $dZ = 0.52$  км, а для початкових умов, обчислених в НДІ МАО, —  $dX = 0.72$  км,  $dY = -0.52$  км,  $dZ = 1.28$  км. Як видно, зміна залишкових різниць з часом для семиденного періоду прогнозування також підтверджує можливість отримання більш точних елементів орбіт ГСС навіть попри недоліки спрощеної моделі руху.

Другий підхід полягає у безпосередньому порівнянні отриманих зі спостережень топоцентричних екваторіальних координат ГСС із екваторіальними координатами, обчисленими за інтерпольованими значеннями високоточних геоцентричних положень у форматі CPF за даними сайту ILRS. Інтерполяція проводилась поліномом Лагранжа по 10 точках. Перетворення систем координат реалізовано на мові програмування Python 3 із застосуванням стандартної бібліотеки *astropy*. На рис. 5 показані обчислені таким чином різниці для об'єкта IRNSS-1F (N41384) за період спостережень з 08 червня 2020 р. по 17 липня 2020 р. (39.24 доби). Як видно, стандартне відхилення залишкових різниць для схилення становить 1 , для прямого піднесення ця

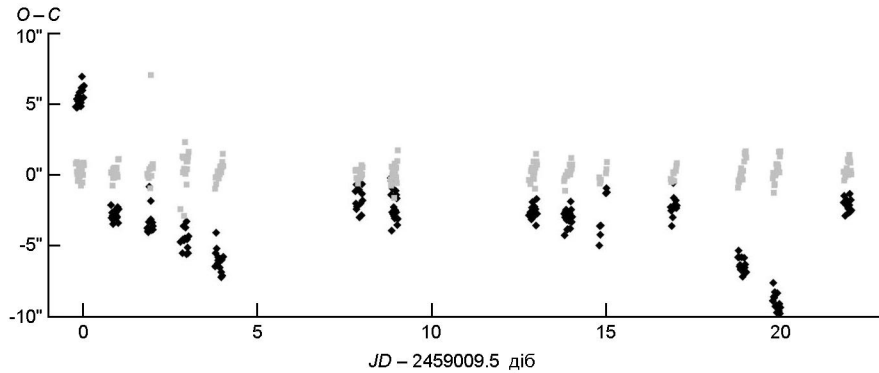


Рис. 5. Залишкові різниці  $O - C$  по відношенню до даних ILRS для об'єкта IRNSS-1F (N41384), сірі точки — схилення, чорні — пряме сходження

величина дорівнює 2 . Слід зауважити, що різниці за схиленням майже не мають систематичного зсуву, на відміну від різниць за прямим піднесенням, для яких систематичний зсув в середньому дорівнює 2.5 , крім цього, спостерігаються значні викиди у деякі дати спостережень. Ймовірною причиною таких випадків можуть бути недоліки синхронізації під час спостережень.

**Висновки.** Протягом 2020...2021 рр. за результатами оптичних ПЗЗ-спостережень у НДІ МАО було отримано 134461 положень для 149 ГСС. Середня квадратична похибка спостережень близька до 0.5 по обох координатах для об'єктів, що мають видимі зоряні величини у інтервалі  $9^m \dots 13^m$ .

Порівняння з даними служби ILRS показало, що точність обчислення елементів орбіт за допомогою програмного забезпечення, що використовується у НДІ МАО, є кращою, ніж точність відповідних даних у каталозі NORAD. Різниці між відповідними геоцентричними прямокутними положеннями становлять 0.72 км,  $-0.52$  км та 1.28 км відповідно для координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  на епоху 2459009.5 (12:00 UTC 08 червня 2020 р.), що відповідала моменту початку прогнозу. Прогнозування початкових умов у форматі вектору стану на семиденний період також показало переваги елементів орбіт, обчислених за допомогою програмного забезпечення, що використовується в НДІ МАО. Зовнішнє порівняння вимірних екваторіальних координат ГСС з високоточними даними ILRS виявило наявність нерегулярних відхилень у системі прямого піднесення, ймовірною причиною яких можуть бути недоліки синхронізації процесу спостережень.

1. Базей А., Ковальчук А., Козырев Е., Сибирякова Е., Шульга А. Использование телескопа САК-300 для ведения каталога искусственных спутников Земли в НИИ НАО. *Изучение объектов околоземного пространства и малых тел Солнечной системы*. Под ред. Г. И. Пинигина. Николаев: Атолл, 2007. С. 126—132.

2. Киселев А. А. *Теоретические основания фотографической астрометрии*. М.: Наука. Гл. Ред. физ.-мат. Лит., 1989. 264 с.
3. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Исследование точности астрометрической редукиции при использовании комбинированного метода наблюдений. *Космічна наука і технологія*. 2010. № 5. С. 71—76 .
4. *Патент на корисну модель № 116724*. Спосіб спостереження космічних об'єктів. Зареєстровано в державному реєстрі патентів України 25.05.2017. URL: [http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017\\_Patent\\_116374.pdf](http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017_Patent_116374.pdf)
5. Сибирякова Е. С., Шульга А. В., Вовк В. С., Куличенко Н. А., Козырев Е. С. Позиционные наблюдения комет комбинированным методом. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2015. 31. № 6. С. 47—54.
6. Сибирякова Е. С., Шульга О. В., Вовк В. С., Калюжний М. П., Бушуев Ф. І., Куличенко М. О., Халолей М. І., Чернозуб В. М. Спостереження штучних супутників Землі з використанням комплексу телескопів НДІ МАО. *Наука та інновації*. 2017. № 1. С. 11—16.
7. Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С. и др. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства. *Космічна наука і технологія*. 2012. 18. № 4. С. 52—58.
8. Kara I. V., Kozyrev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects. *Bull. Crimean Astrophys. Observ.* 2011. 107. P. 56—60.

## REFERENCES

1. Bazej A., Kovalchuk A., Kozyrev E., Sibiryakova E., Shulga A. (2007) Using SAK-300 telescope for catalog maintenance of artificial Earth satellites at RI NAO. *Studies of the near-Earth and small bodies of the Solar system*. Ed. G. I. Pinigin. Nikolaev: Atoll. 126—132. (In Russian)
2. Kiselev A. A. (1989) *Theoretical foundations of photographic astrometry*. M.: Nauka. Gl. Red. fiz.-mat. Lit., 264. (In Russian)
3. Kozyrev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V. (2010) Estimation of astrometric reduction accuracy for the combined method of celestial object observations. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. 16(5). 71—76. (In Russian)
4. *Utility model patent №116724*. (2017) Method of space objects observation. Registered in State Register of Patents of Ukraine 25.05.2017. URL: [http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017\\_Patent\\_116724.pdf](http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017_Patent_116724.pdf) (in Ukrainian)
5. Sybiryakova E. S., Shulga O. V., Vovk V. S., Kulichenko M. O., Kozyrev E. S. (2015) Positional observation of comet by using of combined method. *Kinematika i Fizika Nebes. Til*. 31(6). 47—54.
6. Sybiryakova Ye. S., Shulga O. V., Vovk V. S., Kaliuzhnyi M. P., Bushuiev F. I., Kulichenko M. O., Haloley M. I., Chernozub V. M. (2017) Artificial Satellites' Observation Using the Complex of Telescopes of RI «MAO». *Nauka ta innovatsii*. № 1. 11—16. (in Ukrainian)
7. Shulga O. V., Kozyrev Y. S., Sybiryakova Y. S., Khalaley M. I., Chernozub V. M. (2012) The mobile telescope complex of RI MAO for observation of near-Earth space objects. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. 18(4). 52—58. (In Russian)
8. Kara I. V., Kozyrev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V. (2011) NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects. *Bull. Crimean Astrophys. Observ.* 107. 56—60.



*M. O. Kulichenko, N. V. Maigurova, O. V. Shulga, V. F. Kryuchkovskiy*  
Research Institute “Mykolaiv Astronomical Observatory”

#### ACCURACY ESTIMATION OF OPTICAL OBSERVATIONS OF THE GEOSTATIONARY SATELLITES

Continuous monitoring of artificial space objects needs periodical control of quality of observational data. Estimation of internal accuracy allows to control and exclude outliers in the array of primary data. For artificial satellites it is also possible to compare orbital elements calculated by Research Institute “Mykolaiv Astronomical Observatory” (RI MAO) with precise data which provided by International Laser-Ranging Service (ILRS) or Global Navigation Satellite System (GNSS). Such comparison allows to detect problems with time synchronization, reveal and estimate systematic errors etc. RI MAO carries out regular observations of artificial satellites in different orbits using several telescopes and forms catalog of their orbital elements in TLE format during more than 10 years. Software for orbital elements calculation was developed in collaboration with Astronomical observatory of Odessa National university. This paper presents an analysis of the processing results of the observational array of 149 geostationary satellites (GSS). Observations were performed using RI MAO Telescope Complex during 2020...2021. Time synchronization is provided with GPS Resolution-T receiver with  $RMS = 40$  ns. All GSS observations were carried out using the combined method developed at the RI MAO. A total of 134461 positions were received for which residual ( $O - C$ ) differences were calculated with respect to the computed orbit. The mean square error of observations of the GSS in the apparent magnitude range  $9^m \dots 13^m$  was  $0.5''$  in right ascension and declination. Computed orbital elements were compared with precise ILRS data. Comparison of the orbital positions of the GSS, calculated from the RI MAO orbital elements with the ILRS data showed that the differences between the corresponding geocentric cartesian coordinates were  $dX = 0.72$  km,  $dY = -0.52$  km and  $dZ = 1.28$  km at the start of the forecast.  
*Keywords:* ground-based CCD observations, geostationary satellites, orbital elements.

Стаття надійшла до редакції 22.10.2021  
Після доопрацювання 22.10.2021  
Прийнята до друку 16.12.2021