

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 18
1 + 2012

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

ЗМІСТ

11-а Українська конференція з космічних досліджень

Дегтярев А. В., Макаров А. Л., Матвиенко С. А., Прокопов А. В., Романько В. Н. Аналіз перспектив розширення функціональних можливостей українського геостационарного супутника зв'язи

Рябов М. И., Вольвач А. Е., Сухарев А. Л., Донских А. И., Адобовский В. В., Куклина Н. Я., Шабалина О. А., Губарь Г. А., Покидайло С. Л. Временной спектр колебаний уровня Черного моря и его возможная связь с динамикой изменения положения RT-22 КРАО как элемента европейской геодинимической РСДБ-сети

Кислов А. М., Романенко В. Г., Фенченко В. Н. Тепловой анализ космических аппаратов с переменными на витке ориентацией и геометрической конфигурацией. Новая версия пакета программ TRASSA

Кошкин Н. И., Коробейникова Е. А., Лопаченко В. В., Меликянц С. М., Страхова С. Л., Шакун Л. С. О характере движения микроспутника с парусом в атмосфере («NanoSail-D»)

Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н., Власенко В. П. Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском

CONTENTS

3 The 11-th Ukrainian conference on space research

5 *Degtyarev A. V., Makarov A. L., Matvienko S. A., Prokopov A. V., Romanko V. N.* An analysis of the outlook for widening functional capabilities of the Ukrainian geostationary communication satellite

13 *Ryabov M. I., Volvach A. E., Sukharev A. L., Donskikh A. I., Adobovskii V. V., Kuklina N. Ya., Shabalina O. A., Gubar G. A., Pokidaylo S. L.* A temporal spectrum of the Bleak Sea level variations and a possible relation between this spectrum and dynamics of changes in the position of the CrAO RT-22 as an element of the European geodynamic VLBI network

21 *Kislov A. M., Romanenko V. G., Fenchenko V. N.* The thermal analysis of spacecrafts with orientation and geometric configuration varying during an orbit revolution. A new version of the software TRASSA

31 *Koshkin N. I., Korobeynikova E. A., Lopachenko V. V., Meliklyants S. M., Strakhova S. L., Shakun L. S.* On the motion of a microsatellite with the sail in the atmosphere (NanoSail-D)

39 *Savanevich V. E., Bryukhovetskiy A. B., Kozhukhov A. M., Dikov E. N., Vlasenko V. P.* The program CoLiTec for automated detection of faint celestial bodies

- Тарадій В. К., Сергеев А. В.* Наземная поддержка стартов и решение задач навигации в околоземном пространстве по данным оптических наблюдений на пике Терскол **47** *Tarady V. K., Sergeev A. V.* Optical observations at the Terskol Peak Observatory for ground-based launch support and solving navigation problems in outer space
- Епишев В. П., Климик В. У., Кудак В. И.* Возмущения движения геосинхронных спутников под действием отражённого солнечного и инфракрасного излучения Земли **55** *Yepishev V. P., Klimyk V. U., Kudak V. I.* Disturbances in motions of geosynchronous satellites under the effect of reflected solar radiation and infrared radiation of the Earth
- Епишев В. П., Исак И. И., Кудак В. И., Мотрунич И. И., Найбауэр И. Ф., Кошкин Н. И., Билинский А. И., Мартынюк-Лотоцкий К. П., Благодыр Я. Т., Лопаченко В. В., Рыхальский В. В., Рыщенко С. В., Жуковецкий А. В.* Результаты исследований поведения на орбите ИСЗ в нештатном режиме под воздействием околоземного космического пространства **60** *Epishev V. P., Isak I. I., Kudak V. I., Motrunich I. I., Noibauer I. F., Koshkin N. I., Bilinskii A. I., Martyniuk-Lototskij K. P., Blagodyr Ya. T., Lopachenko V. V., Rykhalskij V. V., Ryschenko S. V., Zhukovetskij A. V.* Some results of studies of the behaviour of a satellite in orbit in contingency mode under the near-Earth space influence
- Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А.* Обобщенный сценарий эволюции солнечных циклов слабых фотосферных и сильных магнитных полей **68** *Zyelyk Ya. I., Stepanian N. N., Andryeyeva O. A.* Generalized scenario for the evolution of solar cycles of weak photospheric and strong magnetic fields
- Логинов А. А., Черемных О. К., Криводубский В. Н., Сальников Н. Н.* Гидродинамическая модель торсионных колебаний Солнца **74** *Loginov A. A., Cheremnykh O. K., Krivodubskij V. N., Salnikov N. N.* Hydrodynamic model of torsional oscillations of the Sun

НАШИ АВТОРИ

82 OUR AUTHORS

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 20.02.11. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.
Ум. друк. арк. 8,82. Обл.-вид. арк. 9,26. Тираж 100 прим. Зам. № 3208.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України,
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

11-а УКРАЇНСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ З КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

З 29 серпня по 2 вересня 2011 р. у Національному центрі управління та випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ, Євпаторія) відбулась 11-а Українська конференція з космічних досліджень.

Під час роботи конференції було проведено обговорення актуальних проблем космічних досліджень в чотирьох секціях та двох тематичних підсекціях. Загальна кількість учасників склала близько 140 фахівців з провідних наукових центрів України (Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Львівського центру Інституту космічних досліджень, Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне», Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, Інституту технічної механіки, ІПМ, Київського та Харківського національних університетів), а також Білорусі, Казахстану, Польщі та Росії. Заслухано 10 пленарних та 120 секційних доповідей, проведено дискусії та круглі столи з пріоритетних наукових та прикладних проектів ЗНТПУ (проект ІОНОСАТ, СКАКО, «Дистанційні аерокосмічні дослідження»). Продовжено анкетування фахівців щодо пріоритетних напрямів нової космічної програми України (ЗНТКПУ) на 2013—2017 рр., обговорено пропозиції щодо нагальних завдань поточної космічної діяльності.

В результаті обговорень ухвалено наступне рішення.

1. Вважати проекти з наукових досліджень, передбачені у Загальнодержавній цільовій науково-технічній космічній програмі України (ЗНТКПУ) на 2008—2012 роки, необхідною умовою успішного розвитку наукового та інноваційного потенціалу України. Звернутися до ДКАУ з проханням забезпечити необхідне фінансування дослідницьких проектів діючої ЗНТКПУ та передбачити в проекті ЗНТКПУ на 2013—2017 роки фінансування наукових проектів не менше ніж 25 % від загального обсягу видатків на Програму.

2. Вважати науковий проект ІОНОСАТ пріоритетним проектом Космічної програми і схвалити загальний план його здійснення, включаючи виконання космічного експерименту «Потенціал» на борту КА «Січ-2» (2011 р.), «Іоносат-мікро» (в ході випробувального запуску мікросупутника за допомогою РН «Циклон-4» у 2013 р.). Доручити ІКД НАНУ—ДКАУ започаткувати роботу щодо створення Міжнародного науково-координаційного комітету проекту ІОНОСАТ.

3. Відзначити високий рівень досліджень з проблем фізики космосу, космічної радіофізики та космічної погоди; при плануванні проектів з

цього напрямку в рамках ЗНТКПУ особливу увагу приділити інтеграції космічних та наземних досліджень з цієї проблематики.

4. Вважати доцільним обговорення на НТР ДКАУ пріоритетних завдань та шляхів розвитку вітчизняної системи дослідження Землі з космосу, поклавши в основу пропозиції, узагальнені НЦ АКДЗ.

5. Рекомендувати в найближчій перспективі створити науково-координаційні секції при НТР ДКАУ, зокрема секцію з вивчення Землі з космосу, координаційну раду з організації оптичних спостережень ШСЗ та ін.

Визнати необхідним підготувати «Науково-прикладну програму використання даних ДЗЗ, зокрема «Січ-2», та в межах ЗНТКПУ забезпечити її виконання.

6. Відзначити високий рівень вітчизняних досліджень з космічної біології та рекомендувати відновлення підтримки цього напрямку в рамках ЗНТКПУ, а також прискорити підготовку російсько-української програми наукових та технологічних експериментів на МКС із включенням проектів з космічної біології.

7. Рекомендувати ДКАУ в ході виконання ЗНТКПУ на 2013—2017 рр. підготувати нову концепцію СКАКО, провести її обговорення за участю астрономічної спільноти України. Пропонується результати роботи СКАКО відображати на сайті ДКАУ як сторінку «КАТАЛОГ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ».

8. Включити до ЗНТКПУ на 2013—2017 рр. заходи (розділ), присвячений залученню талановитої молоді в космічну галузь. Схвалити діяльність колективу НТУУ КПІ з підготовки проекту університетського супутника та рекомендувати ДКАУ сприяти цій діяльності, зокрема шляхом конкурсу наукових проектів для здійснення на такому супутнику.

9. Взяти до уваги, що наступна 12-а Українська конференція з космічних досліджень відбудеться в НЦУВКЗ у вересні 2012 р. Ця конференція буде частиною космічного форуму, який заплановано провести спільно з російськими та міжнародними організаціями в рамках підготовки міжнародного проекту МАКСМ та української конференції GEO-UA.

10. Вважати рівень підготовки та проведення 11-ї української конференції з космічних досліджень високим та висловити подяку НЦУВКЗ та ІКД НАНУ—ДКАУ.

О. П. Федоров
заступник Голови Програмного комітету конференції
директор ІКД НАНУ—ДКАУ

УДК 621.371

А. В. Дегтярев¹, А. Л. Макаров¹, С. А. Матвиенко¹, А. В. Прокопов², В. Н. Романько³

¹ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ, e-mail: info@yuzhnoye.com

² Національний університет цивільного захисту України, Харків, e-mail: alexvas49@mail.ru

³ Національний науковий центр «Інститут метрології», Харків, e-mail: sc2@metrology.kharkov.ua

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УКРАИНСКОГО ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА СВЯЗИ

Розглянуто доцільність розширення функцій українського геостационарного супутника зв'язку з метою реалізації радіофізичного методу вимірювань параметрів гравітаційного поля Землі та удосконалення системи координатно-часового забезпечення країни. При цьому планується використання космічного апарата типу EGNOS як функціональне доповнення для поширення диференціальних поправок до сигналів глобальних навігаційних супутникових систем («Galileo», GPS, ГЛОНАСС), а також як елемент високоточної синхронізації віддаленого еталонного годинника.

ВВЕДЕНИЕ

С начала 1990-х гг. ГП «КБ «Южное» активно участвует в проектах создания геостационарного спутника связи (ГССС), который сначала носил название «Гороскоп», а сейчас «Либідь». На спутник связи был выпущен эскизный проект и разработана конструкторская документация. В настоящее время спутник находится на стадии изготовления, его запуск планируется в середине 2013 г. С учетом высокой стоимости спутника связи (порядка 200–300 млн евро) представляется целесообразным рассмотреть возможность более широкого функционального использования ГССС «Либідь» и возложить на него решение целого ряда как ранее известных, так и вновь формулируемых специальных задач.

Следует заметить, что начиная с 1998 г. Украина в рамках Общегосударственной (Национальной) космической программы целеустремленно приближается к участию в европейских проектах, среди которых самым приоритетным является проект глобальной навигационной спутниковой

системы (ГНСС) «Галилео». Одним из этапов создания ГНСС «Галилео» является проект создания европейской геостационарной службы навигационного покрытия EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), которая предполагает использование трех геостационарных спутников связи для ретрансляции на территорию стран ЕС навигационного сигнала [13, 17]. EGNOS введена в эксплуатацию в 2009 г. В настоящее время Украина продолжает сотрудничать с ЕС в области навигации в рамках проекта ускорения украинско-европейского сотрудничества в космической сфере, первый семинар которого состоялся в Киеве 4–5 февраля 2009 г., а второй — в Евпатории 22–25 сентября 2009 г. На наш взгляд, расширение группировки ГССС службы EGNOS за счет ГССС «Либідь» приведет к увеличению числа потребителей навигационной информации и будет способствовать дальнейшему развитию проекта.

Другой интересной задачей, решение которой возможно с помощью ГССС, является реализация метода сличения наземных часов с использованием сигналов, переизлучаемых геостационарными спутниками, позволяющего на больших расстояниях сличать первичные стандарты

частоты при неопределенности 10^{-15} за сутки. Необходимо отметить лидирующие позиции в области создания спутниковых систем единого времени Национального института информационных и коммуникационных технологий (НИСТ, Япония), где уже созданы оптические и цезиевые стандарты частоты, с относительной стабильностью не хуже 10^{-16} , которые используются для создания и эксплуатации системы точного времени путем установки стандарта частоты на геостационарный спутник связи ETS-8. В настоящее время японская национальная система точного времени связана с европейской РТВ и американской USNO, и таким образом получена замкнутая линия дуплексной синхронизации TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) по всему земному шару [14, 16]. В Украине, к сожалению, на сегодняшний день нет национальной системы передачи сигналов единого времени [10].

И наконец, представляет интерес исследовать возможность использования ГССС в качестве базового элемента технической подсистемы мониторинга гравитационного поля Земли, что приобретает особую актуальность в свете последних техногенных событий в Японии. Предпосылками для такого исследования является предложенный одним из авторов настоящей работы радиофизический метод определения характеристик гравитационного поля Земли [6].

Целью настоящей работы является анализ целесообразности расширения функций украинского геостационарного спутника связи с целью реализации радиофизического метода измерения параметров гравитационного поля Земли и совершенствования системы координатно-временного обеспечения страны.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА СВЯЗИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Проведем анализ решений задач мониторинга путем сопоставления возможностей ГССС с возможностями известных ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, «Галилео»). В качестве дополнительной функции мониторинга рассматривается контроль гравитационного поля Земли (ГПЗ) с помощью

предложенного недавно радиофизического метода измерения ГПЗ [5, 9], использующего релятивистский эффект смещения частоты электромагнитного сигнала распространяющегося в неоднородном гравитационном поле.

Радиофизический метод измерения гравитационного потенциала базируется на использовании релятивистского эффекта «красное смещение» (смещения частоты электромагнитного сигнала, распространяющегося в неоднородном гравитационном поле).

Основным исходным соотношением в данном случае является известное уравнение теории относительности, связывающее гравитационный потенциал u_0 в точке, где сигнал имеет частоту f_0 , с гравитационным потенциалом u_1 в точке, где частота сигнала равна f_1 [12]:

$$\frac{f_0 - f_1}{f} = \frac{1}{c^2}(u_1 - u_0), \quad (1)$$

где c — скорость света.

Прежде чем перейти к анализу радиофизического метода измерения ГПЗ, оценим величину гравитационного сдвига частоты сигнала с геостационарного спутника связи. В соответствии с (1)

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{u_1 - u_0}{c^2} = \frac{\frac{a_{00}}{R_3} - \frac{a_{00}}{R_3 + H}}{c^2} = 5.9085 \cdot 10^{-10},$$

где $a_{00} = 3.986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$, $R_3 = 6378.136 \text{ км}$, $H = 36400 \text{ км}$, $c = 300000 \text{ км/с}$.

Поскольку в настоящее время в Харьковском ННЦ «Институт метрологии» используется водородный стандарт с относительной погрешностью по частоте до $4 \cdot 10^{-15}$, то технически представляется возможным измерять гравитационное смещение частоты.

Для вывода уравнений измерения радиофизического метода учтем, что в общем случае (с учетом взаимного перемещения источника и приемника сигнала) смещение частоты сигнала определяется известным соотношением теории относительности [13]

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{1}{c^2}(u_1 - u_0) + \frac{v^2}{2c^2}, \quad (2)$$

означающим, что сигнал с частотой f_0 , излучае-

мый в точке с гравитационным потенциалом u_0 , приходит в точку с гравитационным потенциалом u_1 с уже измененной частотой f_1 (v — скорость движения источника сигнала относительно приемника).

Таким образом, для сигналов ГНСС смещение частоты вызывают в общем случае два релятивистских эффекта: во-первых, относительное движение источника и приемника сигнала, проявляющееся в виде квадратичного эффекта Доплера, учитываемого последним слагаемым в правой части (2), во-вторых, изменение гравитационного потенциала на пути распространения электромагнитного сигнала, учитываемое первым слагаемым в правой части (2).

Ясно, что для решения интересующей нас обратной задачи — восстановления пространственного профиля гравитационного потенциала по результатам наблюдений смещения частоты — квадратичный эффект Доплера будет мешающим фактором, вклад которого должен быть исключен из результатов измерений. В случае ГНСС («Galileo», GPS, ГЛОНАСС) для такого исключения вместо измерений скорости космических аппаратов (КА) можно воспользоваться передаваемой КА ГНСС эфемеридной информацией (в части параметров скорости КА). В случае КА на геостационарной орбите (ГССС), относительное движение отсутствует, и в уравнении (2) можно просто положить $v = 0$.

Оценим количественно разницу в требованиях к точности измерения релятивистского сдвига частоты, обеспечивающих необходимые характеристики точности восстановления гравитационного потенциала в околоземном космическом пространстве для случаев КА GPS (ГЛОНАСС) и геостационарного КА (далее для краткости — КА ГССС).

Представляя (2) в виде

$$u_1 = u_0 + \frac{f_0 - f_1}{f_0} c^2 - \frac{v^2}{2}$$

и учитывая, что $f_1 \approx f_0 \approx f$, $m_{f1} \approx m_{f2} \approx m_f$, получим уравнение погрешности

$$m_{u1}^2 = m_{u0}^2 + c^4 \cdot 2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2} + v^2 m_v^2. \quad (3)$$

Будем считать, что гравитационный потенциал u_0 в точке, где располагается ИСЗ, известен с погрешностью m_{u0} , которая дает вклад в уравнение (2), гораздо меньший, чем погрешность измерения частоты m_f . Это вполне оправданно, поскольку для высот порядка 20000—30000 км и более над поверхностью Земли (где и располагаются КА в рассматриваемой нами задаче) достаточно точными оказываются известные модели гравитационного потенциала (например EGM96, EGM2008 [8]). Используя модели [8], будем считать, что при определении u_0 всегда можно выбрать такое количество членов разложения в ряд по полиномам Лежандра в модели геопотенциала, чтобы выполнялось условие

$$m_{u0}^2 \ll c^4 \cdot 2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2},$$

которое позволяет при оценке требований к точности рассматривать упрощенное уравнение

$$m_u^2 = c^4 \cdot 2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2} + v^2 m_v^2. \quad (4)$$

Здесь и далее для простоты мы опускаем индекс 1 в обозначении погрешности определения гравитационного потенциала.

Если теперь считать, что

$$v^2 m_v^2 \ll c^4 \cdot 2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2} \quad (5)$$

(это справедливо во всех случаях использования ГССС, а также в тех случаях, когда при использовании GPS (ГЛОНАСС) скорость КА определяется достаточно точно), то, пренебрегая последним слагаемым в правой части (4), получаем

$$m_u^2 = c^4 \cdot 2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2}. \quad (6)$$

Этот вариант подробно рассмотрен в работе [6].

Таким образом, в своих оценках требований к точности мы можем опираться на результаты [6]. Еще раз подчеркнем, что непосредственно результаты [6] применимы для ГССС, для GPS (ГЛОНАСС) они применимы лишь при выполнении условия (5).

Выясним, как изменятся результаты [6] (т. е., как изменятся требования к точности измерения частоты) в тех случаях, когда необходим учет слу-

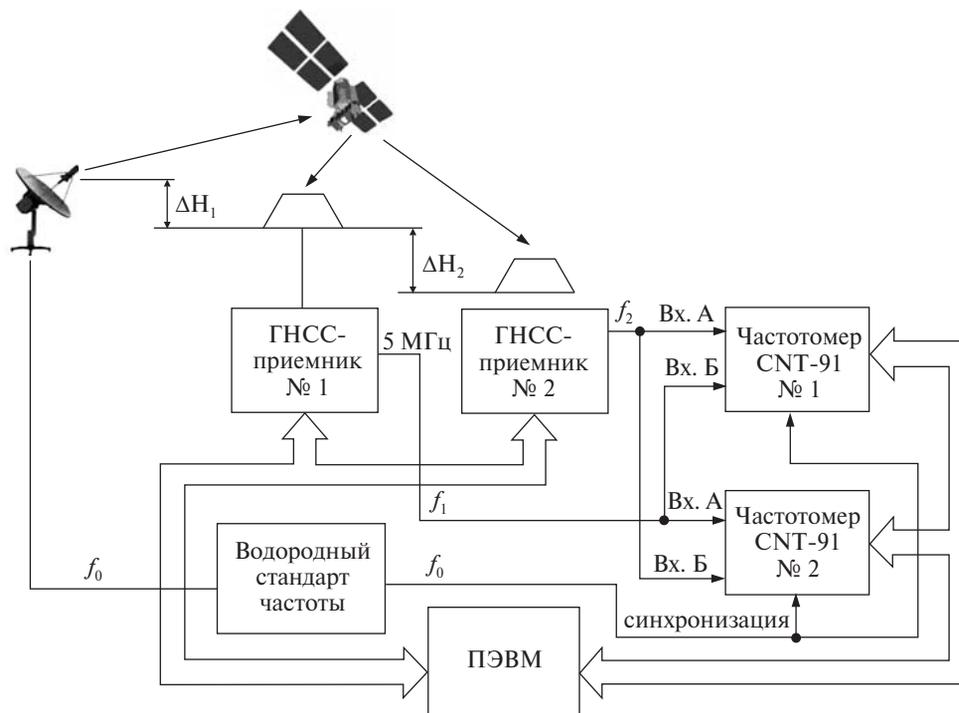


Рис. 1. Структурная схема ПТК «Гравика»

чая $vm_v \neq 0$. Согласно [1, 4] слагаемое vm_v можно выразить через орбитальную v_0 и радиальную v_n составляющие скорости, характеристики которых приведены в названных работах:

$$v = \sqrt{v_0^2 + v_n^2}, \quad v^2 \cdot m_v^2 = v_0^2 \cdot m_{v_0}^2 + v_n^2 \cdot m_{v_n}^2. \quad (7)$$

Для оценки воспользуемся приведенными в работах [1, 2, 4] значениями параметров $v = 3874$ м/с, $v_n = 900$ м/с, $m_{v_0} = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с, $m_{v_n} = 2 \cdot 10^{-3}$ м/с, соответствующими по точности эфемеридной информации, поступающей с борта КА ГЛОНАСС при суточном прогнозе. Подставляя приведенные значения в (7), получим оценку вклада неточного определения скорости КА в уравнение (4), определяющее требования к точности измерения частоты: $v^2 \cdot m_v^2 = 4.52$ м⁴/с⁴.

Таким образом, уравнение (4) для GPS (ГЛОНАСС) в условиях, когда для определения скорости КА используется эфемеридная информация с параметрами согласно [4], принимает вид

$$m_u^2 = c^4 \cdot 2 \cdot \frac{m_f^2}{f^2} + 4.52. \quad (8)$$

Данное уравнение имеет решение при $m_u^2 \geq 4.52$. Поэтому вариант с $m_g = 10^{-5}$ м/с², $\Delta x = 100$ км (см. таблицу в работе [6], где для данного варианта $m_u^2 = 0.49$) в рассматриваемом случае, когда для определения скорости ИСЗ используется эфемеридная информация, вообще не реализуется с применением ГНСС. Здесь уместно отметить, что таблица в работе [6] получена для заданных значений m_u , соответствующих определенным значениям m_g , путем расчетов с использованием уравнения (6), т. е. по сути для ГССС. Варианты с другими значениями m_u в данной таблице в принципе могут быть реализованы с применением ГНСС. Но чтобы сделать однозначный вывод об этом и задать необходимые количественные требования к точности, необходимо пересчитать значения m_f / f с использованием уравнения (8). Результаты такого пересчета представлены в таблице,

где для сравнения приведены и табличные данные [6].

Анализ приведенных в таблице требований к погрешности определения частоты сигнала m_f/f при реализации радиофизического метода восстановления профиля гравитационного потенциала с помощью ГНСС показывает, что более перспективным в этом плане является ГССС. Использование ГССС позволяет построить более точные модели гравитационного потенциала при менее жестких, чем в случае ГНСС, требованиях к точности измерения гравитационного смещения частоты. Следует отметить, что и в случае ГНСС можно снизить требования к точности измерения смещения частоты, если обеспечить более точные методы определения скорости движения КА. Этот вопрос, однако, требует специального рассмотрения.

Результаты теоретического анализа были подтверждены экспериментом с программно-техническим комплексом «Гравика», созданным с использованием высокоточных средств измерительной техники, входящих в состав ГПЭ единиц времени-частоты Украины.

На рис. 1 изображена структурная схема программно-технического комплекса (ПТК) «Гравика», предназначенного для определения ускорения свободного падения радиофизическим методом путем дифференциальных измерений.

Результаты одной из сессий экспериментальных наблюдений представлены на рис. 2.

Для определения систематических погрешностей измерительных приборов частотомеры были подключены перекрестным образом. Для уменьшения влияния на результат погрешностей дальномерных измерений и инструментальных погрешностей, имеющих в основном случайный характер, было проведено обесшумливание данных с помощью прямого вейвлет-преобразования (вейвлет db4, 12 уровней декомпозиции), пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и дальнейшего восстановления сигнала [3]. После этого построена линия тренда. Значение коэффициента при линейном члене уравнения линии тренда и дает нам величину гравитационного смещения частоты, полученную в результате проведения эксперимента. Принятые меры поз-

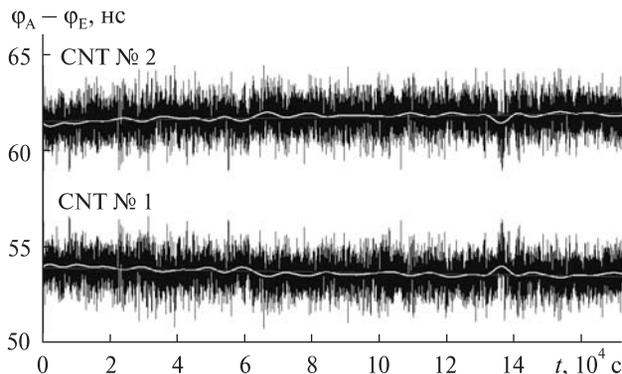


Рис. 2. Разность фаз сигналов с частотой 5 МГц на выходе опорных генераторов приемников FlaxPak при подключении двух частотомеров CNT-91 при разности высот размещения антенн $\Delta H = 7.905$ м на интервале времени измерения двое суток. По записям получены тренды: $\Delta\varphi = -8.73 \cdot 10^{-7}t + 53.9$ нс для CNT № 1 и $\Delta\varphi = 9.039 \cdot 10^{-7}t + 61.52$ нс для CNT № 2

Количественные требования к точности расчетов

m_g , 10^{-5} м/с ²	Δx , км	m_{a0} , м ² /с ²	m_f / f , 10^{-16} (ГССС по данным [6])	m_f / f , 10^{-16} (ГНСС, расчет по формуле (8))
1	100	0.7	0.055	—
	400	2.8	0.22	0.14
5	100	3.5	0.28	0.22
	400	14.0	1.1	1.1
10	100	7.0	0.56	0.53
	400	28.0	2.2	2.2
100	100	70.0	5.6	5.6
	400	280.0	22.0	22.0

воляют утверждать, что ускорение свободного падения на поверхности Земли с помощью двух ГНСС-приемников, имеющих специальный частотный выход, может измеряться на базе 10 м с точностью до 10^{-3} м/с² [7, 11].

В целом проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для использования ГНСС с целью организации мониторинга гравитационного поля Земли с требуемой точностью измерений (с погрешностью на уровне $(1...2) \times 10^{-5}$ м/с²), необходимо обеспечить относитель-

ную погрешность измерения частоты сигнала ГНСС на уровне $(1...2) \cdot 10^{-17}$.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА СВЯЗИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНЫХ ЗАДАЧ

Активное развитие ракетно-космической отрасли, наземных и космических телекоммуникационных и радионавигационных систем, решение различных научных и практических задач требует постоянного совершенствования время-частотного обеспечения. Следует отметить, что за последние 50 лет относительная погрешность первичных эталонов уменьшилась с 10^{-10} до 10^{-15} , то есть точность возросла в среднем на порядок каждые 10 лет. Национальные метрологические институты США, Германии, Франции, имеющие в настоящее время эталоны с использованием «цезиевых фонтанов», ведут работы по созданию оптических эталонов частоты и эталонов частоты на основе «плененных» ионов. Проведенные исследования показывают возможность достижения относительных погрешностей частоты $10^{-17}...10^{-18}$ [<http://fsm.jpl.nasa.gov/abstracts.htm>].

Необходимость повышения точности воспроизведения шкал времени и частоты эталонами перманентных станций мониторинга гравитационного поля радиофизическим методом неизбежно требует улучшения качества работы систем синхронизации шкал потребителей время-частотной информации.

На сегодняшний день активный способ двухсторонней связи через ретранслятор ГССС в режиме фазовых измерений обеспечивает самую высокую точность синхронизации удаленных эталонов. Активный способ предполагает наличие приемопередающей аппаратуры как в синхронизирующем (ведущем), так и в синхронизируемых (ведомых) пунктах и двухсторонний (дуплексный) обмен по каналам связи между ведущим и ведомыми пунктами. При этом важна взаимность приемного и передающего каналов либо знание разности задержки в режиме приема и передачи сигнала.

Метод сличения при помощи двусторонней передачи является по существу разностным и

позволяет избежать неопределенностей точных координат часов, определения траекторий распространения сигналов и учета задержек в тропосфере и ионосфере. Этот метод позволяет на больших расстояниях сличать стандарты частоты при неопределенности 10^{-15} за сутки [14, 16]. По соглашению частоты сличаются на определенных интервалах времени в геоцентрической системе координат. Точность сличений возрастает при увеличении интервала до нескольких суток, а при постоянном мониторинге можно достичь точностей, заявленных в первой части работы.

Как правило, при использовании группировок ГССС для целей время-частотной синхронизации делается акцент на следующих достоинствах этих систем для обеспечения высокоточного сличения шкал времени и частоты [15]:

а) геостационарные спутники всегда находятся в поле радиовидимости, что дает возможность постоянно следить за фазой сигнала и использовать преимущества фазовых измерений;

б) при работе с сигналами геостационарных спутников можно использовать направленные антенны с высоким коэффициентом усиления, в результате чего увеличивается выигрыш в отношении сигнал/шум, и следовательно, снижается погрешность измерений;

в) сигналы геостационарных спутников генерируются и контролируются сетью на основе приемников GPS с применением современных стандартов частоты, что обеспечивает высокую стабильность сигналов;

г) в зоне покрытия геостационарных КА можно с применением ионосферной модели использовать оценки задержек сигналов в режиме реального времени и достичь необходимого уровня точности для одночастотных измерений.

Для учета влияния гравитации на частоту принятых сигналов необходимо знать высоту места, где находятся часы, над поверхностью геоида. Чтобы сличить расположенные в разных местах стандарты частоты с нестабильностью 10^{-16} , необходимо знать высоту до долей метра, сличение на уровне 10^{-18} требует знания высот до 1 см, что вполне достижимо с помощью ГНСС «Galileo», если на борту навигационных спутников будут стоять водородные генераторы. Проведенные

оценки показывают возможность измерять возмущения, которые испытывает геоид, вызванные приливными колебаниями земной коры, океаническими приливами и течениями, барическими колебаниями уровня моря, сезонными перераспределениями водных и воздушных масс и долговременными процессами таяния ледников и тектонического движения плит. Однако следует заметить, что повышение точности выше определенного уровня переводит проблему хранения времени в разряд нерешаемых, поскольку сличению таких часов препятствует нестабильность геоида.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования достаточно обосновано показывают возможные направления функционального дополнения сфер применения украинского ГССС «Либідь»:

- расширение группировки ГССС-службы EGNOS, что приведет к увеличению числа потребителей навигационной информации и будет способствовать дальнейшему развитию этого проекта;

- использование в качестве базового элемента ретрансляции эталонных сигналов технической подсистемы мониторинга гравитационного поля Земли радиофизическим методом, что позволит измерять возмущения испытываемые геоидом с достаточной для их идентификации точностью;

- обеспечение высокоточного сличения шкал времени и частоты эталонных средств измерительной техники, что является необходимым условием активного развития ракетно-космической отрасли, наземных и космических телекоммуникационных и радионавигационных систем, решения различных научных и практических задач.

1. Бакитько Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. — М.: Радиотехника, 2010. — 800 с.
2. Гофман-Велленгоф Б., Лихтенеггер Г., Коллинз Д. Глобальная система визначення місцеположень (GPS). Теорія і практика / Пер. з англ. за ред. акад. НАН України Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1996. — 380 с.

3. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике Изд-е 2-е, дополненное и переработанное. — М.: СОЛОН-Пресс, 2004. — 400 с.
4. ИКД ГЛОНАСС. Редакция 5.0. — М.: КНИЦ, 2002. — 57 с.
5. Матвиенко С. А. Система измерения гравитационного поля Земли на базе навигационных спутниковых систем // Космич. техніка. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. — Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2008. — Вып. 1 — С. 65—80.
6. Матвиенко С. А., Прокопов А. В., Романько В. Н. К теории радиофизического метода определения гравитационного потенциала Земли // Укр. метрологічний журн. — 2009. — № 1. — С. 6—10.
7. Матвиенко С., Сидоренко Г., Романько В. и др. Радиофизический метод измерения параметров гравитационного поля космических тел // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць. — Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2011. — Вип. 1 (21). — С. 91—96.
8. Назаренко А. И. Погрешности прогнозирования движения спутников в гравитационном поле Земли / Под ред. Р. Р. Назирова. — М.: ИКИ РАН, 2010. — 226 с. — (Сер. Механика, управление и информатика).
9. Пат. № 84704 Україна, МПК 7: G 01 S 5/14. Супутникова радіонавігаційна система / Матвиенко С. А. — Заявл. 19.12.2005; Опубл. 25.11.2008.
10. Романько В. М. Принципи побудови відомчої служби часу // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія—2008): Наук. праці 6-ї Міжнар. наук.-техн. конф. — Х.: ННЦ «Інститут метрології», 2008. — Т. 1. — С. 126—129.
11. Сидоренко Г. С., Романько В. Н., Матвиенко С. А., Прокопов А. В. Радиофизический метод измерений ускорения свободного падения с использованием эффекта гравитационного смещения частоты сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Укр. метрологічний журн. — 2010. — Вип. 4. — С. 3—11.
12. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Rev. Relativity. — 2003.— 6.— P.1—45.
13. Basker S., Solari G., Ventura-Traveset J., Motefusco C. The Transition from ESTB to EGNOS: Managing User Expectation // GNSS 2003: The European Navigation Conference, 22 — 25 April 2003, Austria. — Graz, 2003.
14. Bauch A., Achkar J., Bize S. Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the 10⁻¹⁵ uncertainty level // Metrologia. — 2006. — 43. — P. 109—120.
15. Fenton P., Powers E., Klepczynski B. Capabilities of the WAAS and EGNOS using high gain antennas for time distribution and frequency transfer // Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2001, Sep-

- tember 11–14, 2001. — Salt Lake City, 2001. — P. 2214–2219.
16. *Schafer W., Pawlitzki A., Kuhn T.* New trends in two-way time and frequency transfer via satellite // Proceedings of the 31st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 7–9 December 1999 / Ed. by L. E. Breakiron. — Dana Point: USNO, 1999. — 670 p.
17. *Ventura-Traveset J., Michel P., Gauthier L.* Architecture, mission and signal processing aspects of the EGNOS system: the first European Implementation of GNSS // Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications: DSP 2001, Sesimbra, Portugal, 1–3 October 2001.

Надійшла до редакції 01.10.11

*A. V. Degtyarev, A. L. Makarov, S. A. Matvienko,
A.V. Prokopov, V. N. Romanko*

AN ANALYSIS OF THE OUTLOOK FOR WIDENING FUNCTIONAL CAPABILITIES OF THE UKRAINIAN GEOSTATIONARY COMMUNICATION SATELLITE

We consider the possibility to enhance the functions of the Ukrainian geostationary communication satellite to realize the radiophysical method of measuring the Earth's gravitational field parameters and improving the system of position and time determination. It is planned to use an EGNOS-type spacecraft as a functional adjunct to the spread of differential corrections in signals of the global navigational satellite systems (Galileo, GPS, GLONASS) and also as an element of high-precision synchronization of remote reference clock.

УДК 523.62-726

М. И. Рябов¹, А. Е. Вольвач², А. Л. Сухарев¹, А. И. Донских³, В. В. Адобовский⁴,
Н. Я. Куклина⁵, О. А. Шабалина⁵, Г. А. Губарь⁶, С. Л. Покидайло⁶

¹ Одеська обсерваторія УРАН-4 Інституту радіоастрономії Національної академії наук України

² Лабораторія радіоастрономії НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти і науки України

³ Кафедра астрономії фізичного факультету Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова

⁴ Одеський філіал Інституту біології Південних морів ім. О. О. Ковалевського Національної академії наук України

⁵ Експериментальне відділення Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України

⁶ Ялтинська Морська гідрометеорологічна станція Міністерства надзвичайних ситуацій України

ВРЕМЕННОЙ СПЕКТР КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ЧЕРНОГО МОРЯ И ЕГО ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С ДИНАМИКОЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РТ-22 КРАО КАК ЭЛЕМЕНТА ЕВРОПЕЙСКОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ РСДБ-СЕТИ

У рамках міжнародних геодинамічних РНДБ-програм протягом 1994–2010 рр. визначено координати телескопа РТ-22 станції «Сімеїз». Зіставлено значення із середньомісячними значеннями рівня Чорного моря, отриманими на станціях в Одесі, Очакові, Севастополі, Ялті і Кацивелі. Всі пункти вимірювань рівня моря мають різні системи водостоку, що дає можливість досліджувати глобальні геодинамічні процеси і їхню залежність від циклу сонячної активності. Застосування програм розрахунків спектру часових варіацій рівня моря в різних пунктах показує збіг періодів від одного року до 11 і 22 р. За допомогою вейвлет-аналізу визначено особливості прояву цих періодів для кожної станції рівня моря окремо.

ВВЕДЕНИЕ

На базе станций космической геодезии и геодинимики лаборатории радиоастрономии Научно-исследовательского института «Крымская астрофизическая обсерватория» (ЛРА НИИ КраО) и Крымской лазерной обсерватории ГАО НАН Украины (КЛО ГАО НАНУ) создан уникальный геодинимический полигон «Симеиз — Кацивели», который объединяет все три технологии наблюдений — РСДБ-станцию «Симеиз», два лазерных спутниковых дальномера, две станции радиотехнических наблюдений спутников глобальных навигационных систем и датчик уровня моря. Близкое расположение (<3 км) дает возможность контролировать их положение прямыми геодезическими измерениями.

Все станции геодезии и геодинимики ЛРА НИИ КраО и КЛО ГАО НАНУ являются интегрированными в соответствующие международные службы. Полученные данные используются для исследования динамики Земли, разнообразных геофизических явлений, построения задач базового координатно-временного обеспечения Украины, потребностей космической навигации.

Для различных точек океанов и морей вычисляются средние уровни. Они являются исходными уровнями для определения абсолютных высот земной поверхности и глубин морей. В каждой стране за стандарт принята одна такая точка. В СССР отсчеты глубин и высот велись от уровня Финского залива в Кронштадте (нулевой уровень). В Западной Европе все отсчеты производятся от уровня Северного моря.

Медленное и длительное изменение уровня океана (вековые колебания) может быть вызва-

© М. И. РЯБОВ, А. Е. ВОЛЬВАЧ, А. Л. СУХАРЕВ,
А. И. ДОНСКИХ, В. В. АДОБОВСКИЙ, Н. Я. КУКЛИНА,
О. А. ШАБАЛИНА, Г. А. ГУБАРЬ, С. Л. ПОКИДАЙЛО, 2012

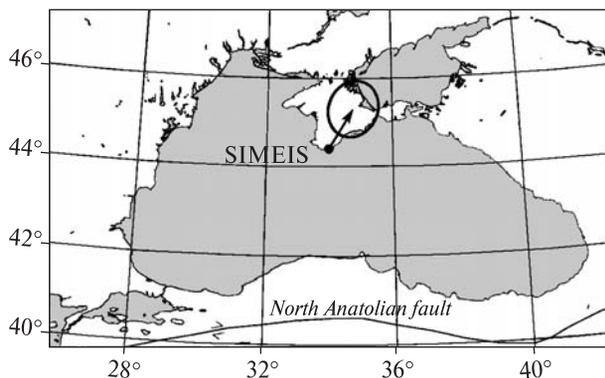


Рис. 1. Движение станции «Симеиз»

но двумя причинами. Уровень океана может повышаться или понижаться в связи с увеличением или уменьшением воды в нем, например, в связи с покровными оледенениями (эти изменения называют гидрократическими, или эвстатическими). Колебания уровня могут быть вызваны изменением емкости океана в связи с процессами, происходящими внутри Земли, и колебаниями земной коры (геократические изменения). Эти колебания не зависят от изменений количества воды и определяются поднятием или опусканием участков литосферы. Опускание дна океанов вызовет понижение его уровня, поднятие дна — повышение.

ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ РСДБ-СТАНЦИИ «СИМЕИЗ»

Радиогалактики и квазары — удаленные космические объекты, исследование которых имеет фундаментальное и прикладное значение. Мощное энерговыделение при относительно малых размерах делает их доступными для наблюдений на огромных космологических расстояниях, а понимание физики этих объектов позволяет уточнить представления об эволюции Вселенной.

Наблюдения предельно удаленных квазаров, большая часть которых в картинной плоскости неподвижна, на миллисекундном уровне на протяжении сотен лет, методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) позволяет с точностью до длины волны измерять

расстояния между наземными пунктами, разнесенными на тысячи километров друг от друга.

С участием РТ-22 КраО в глобальной сети геодинамических РСДБ-станций регулярно проводятся наблюдения внегалактических источников. Наблюдательные программы являются суммой общих усилий для решения задач построения земной и глобальной систем координат, а также для определения параметров вращения Земли, проводимых под эгидой международной службы РСДБ. Эти наблюдения могут быть использованы для точных измерений различных эффектов. Получаемые значения горизонтальных и вертикальных движений представляют принципиальный интерес для теории глобальной тектоники литосферных плит.

По РСДБ-наблюдениям, выполненным по международным геодинамическим программам на протяжении 1994—2010 гг., получены оценки горизонтальной и вертикальной скорости движения станции «Симеиз». Проанализировав массив из 2.7 млн наблюдений, определено, что станция перемещается в северо-восточном направлении с абсолютной скоростью 32.8 мм/год, а относительно Евразийской тектонической плиты — со скоростью 2.9 мм/год в том же северо-восточном направлении (рис. 1). Возможные систематические эффекты были тщательно исследованы, и оценена надежность определения формальных значений ошибок. Дополнительно исследована стабильность положения станции относительно местных маркеров.

Проведенные исследования показали, что тектоническое движение в восточном Средиземноморье сложное. Оно является результатом взаимодействия Евразийской, Африканской и Аравийской плит. Граница тектонических плит связана с Северо-Анатолийским трансформным разломом. Анатолийский блок движется в западном направлении вдоль разлома, его в свою очередь толкают в северном направлении Аравийская и Африканская плиты, что вызывает деформацию в южной части Евразийской плиты.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

На протяжении более ста лет уровень моря измеряется традиционно на береговых прилив-

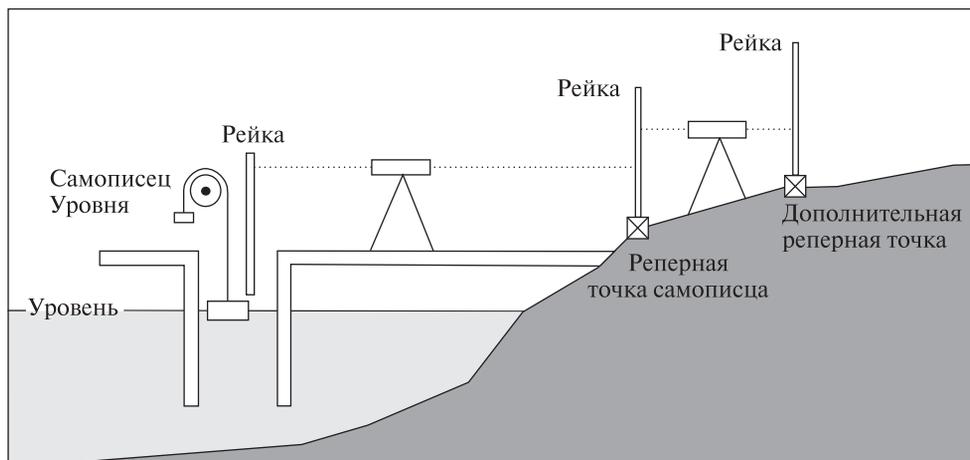


Рис. 2. Схема системы измерения уровня моря с помощью самописца

ных станциях [1]. Измерения производятся относительно ближайших геодезических реперов при помощи самописца уровня, соединённого с поплавком. Этот поплавок помещён в колодец, чтобы избежать влияния на измерения ветрового волнения. Самая распространённая система такого поста изображена на рис. 2.

Топогеодезическая привязка площадки для самописца производится регулярно для учета её оседания. Измеритель уровня может также испытывать вертикальные перемещения в результате тектонических движений. Это усложняет проблему определения глобальных изменений уровня по данным приливных станций. Несмотря на то что станции измерения расположены редко (например, по береговой линии Черного моря — трех десятков постов) такая система предоставляет точные долгопериодические измерения уровня моря, чего пока не могут предложить спутниковые альтиметрические измерения, период наблюдения которых всего порядка 15 лет. В настоящее время альтиметрические методы измерений уровня Мирового океана принято считать менее точными, чем береговые измерения. В связи с этим они, как правило, не применяются для изучения региональных особенностей изменения уровня Мирового океана, а служат для оценки тенденций изменения среднелобального уровня.

Уровнем моря называется высота поверхности моря, свободной от влияния ветровых волн и зыби, измеряемая относительно условного горизонта. Уровенной поверхностью называется поверхность морей и океанов, нормальная к направлению силы тяжести. Для практических и научных целей принято вычислять следующие характеристики уровней. Средний суточный уровень вычисляется как среднее из ежечасных (при наличии самописца уровня) или срочных (по водомерной рейке) значений уровня за сутки.

Средний месячный уровень вычисляется как среднее из ежемесячных или срочных значений уровня за месяц. Средние месячные уровни одного и того же пункта могут различаться на несколько десятков сантиметров.

Средний годовой уровень определяется как среднее из ежечасных или срочных значений уровня за год. Можно рассчитывать средний годовой уровень из средних месячных уровней. Изменения средних годовых уровней невелики — до 20 см.

Средний многолетний уровень определяется как среднее арифметическое из средних годовых уровней за определённый период времени. При этом, чтобы обеспечить нужную точность, необходимо иметь достаточно продолжительный ряд наблюдений.

Средний многолетний уровень, остающийся неизменным при увеличении ряда наблюдений, включённых в усреднение, называется нормальным уровнем.

О ВОЗМОЖНОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РТ-22 С КОЛЕБАНИЕМ УРОВНЯ ЧЕРНОГО МОРЯ — ТЕКТОНИКА ПЛИТ И РАЗЛОМОВ

Результаты измерения положения базы РТ-22.

На рис. 3 приведены изменения координат X , Y , Z положения станции «Симеиз» в период с 1994 по 2010 гг.

Заметно наличие трендов и периодических колебаний координат. При проведении соответствующих процедур интерполяции и сглаживания методом фурье-анализа определялись основные периоды динамики движения РТ-22. На рис. 4 приведены частотные спектры вариации координат РТ-22. Видно, что по координате X максимальная амплитуда изменений приходится на частоту 0.62 (1.61 г.), второй пик соответствует частоте 1.02 (0.97 г.). По координате Y также основной максимум соответствует частоте 0.62, а вторичный максимум 1.005 (0.99 г.). Для координаты Z проявились два равных пика, соответствующие частотам 0.59 (1.7 г.) и 1.02 (0.97 г.).

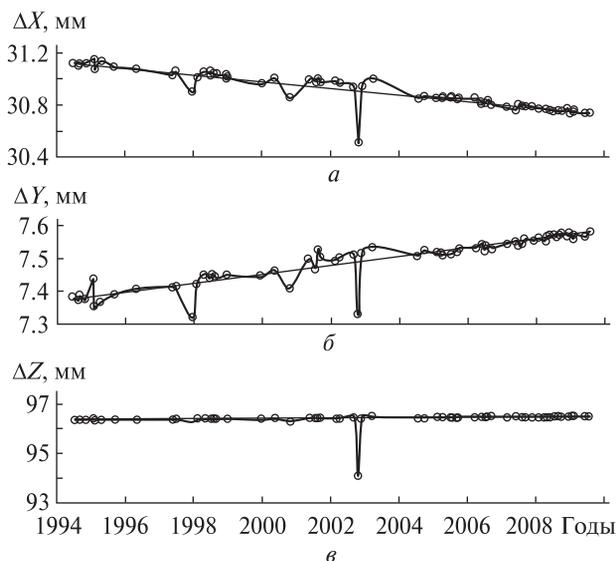


Рис. 3. Изменение положения РТ-22 по координатам X (а), Y (б), Z (в)

Результаты измерений уровня Черного моря.

Наблюдения над уровнем моря в любой точке Мирового океана показывают, что его действительная поверхность не остаётся в покое, а находится в непрерывном колебании под влиянием многих сил и отклоняется от поверхности геоида. Эти силы можно объединить в следующие группы.

Колебания уровня моря, вызванные гидрометеорологическими процессами — атмосферным давлением, ветром, осадками, испарением, речным стоком, тепловыми процессами в море и т. д.

Влияние космических сил на положение уровня моря. Приливообразующие силы Солнца и Луны возбуждают правильные во времени периодические колебания всей поверхности Мирового океана. И только в отдельных, небольших по площади морях, слабо связанных с океаном (Чёрное, Балтийское, Азовское и др.), приливные колебания не превышают 20—30 см.

Колебания уровня под воздействием геодинамических сил. Геодинамические силы вызывают различные по характеру колебания уровня.

Вековые колебания уровня обусловлены медленными вертикальными движениями суши — поднятием или опусканием. Следует иметь в виду, что эти колебания уровня являются кажущимися, так как они происходят не от изменений самого уровня моря, а от поднятия или опускания берега, на котором установлена водомерная рейка.

Тектонические колебания уровня — колебания уровня моря, вызванные землетрясением, моретрясением, извержением подводных и надводных вулканов. Эти явления вызывают резкие и зачастую катастрофические колебания уровня моря (цунами, сильные сейши).

Эвстатические колебания уровня — изменения Мирового океана, связанные с изменениями общего объёма воды в нём, а также с изменениями ёмкости морей и океанов.

Колебания уровня моря, связанные с циклом солнечной активности, обусловлены закономерностями воздействия солнечной активности на климат, определяющих наличие засушливых периодов в максимуме цикла и влажных периодов в минимуме цикла [2].

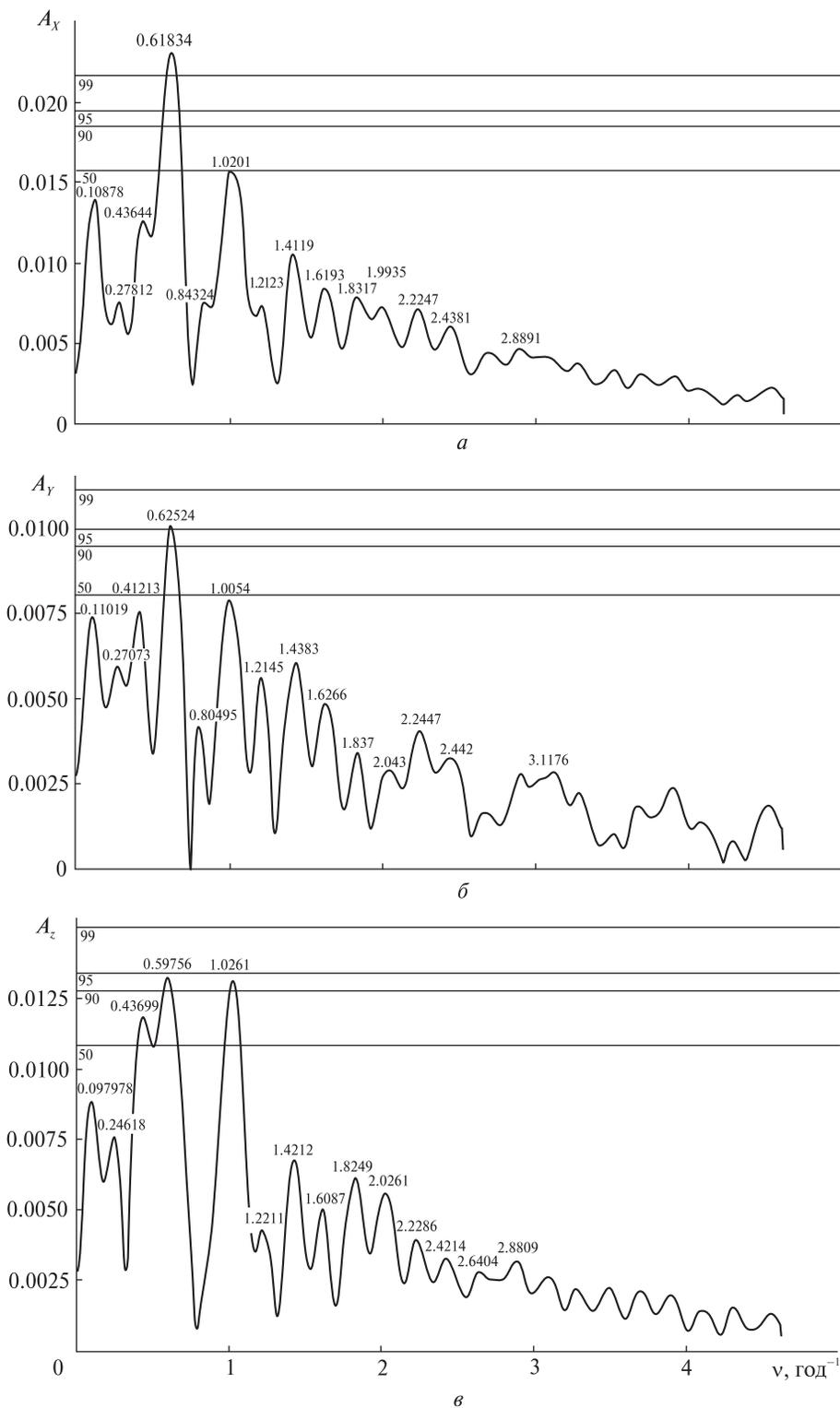


Рис. 4. Частотный спектр изменения положения РТ-22 по координатам X (а), Y (б), Z (в)

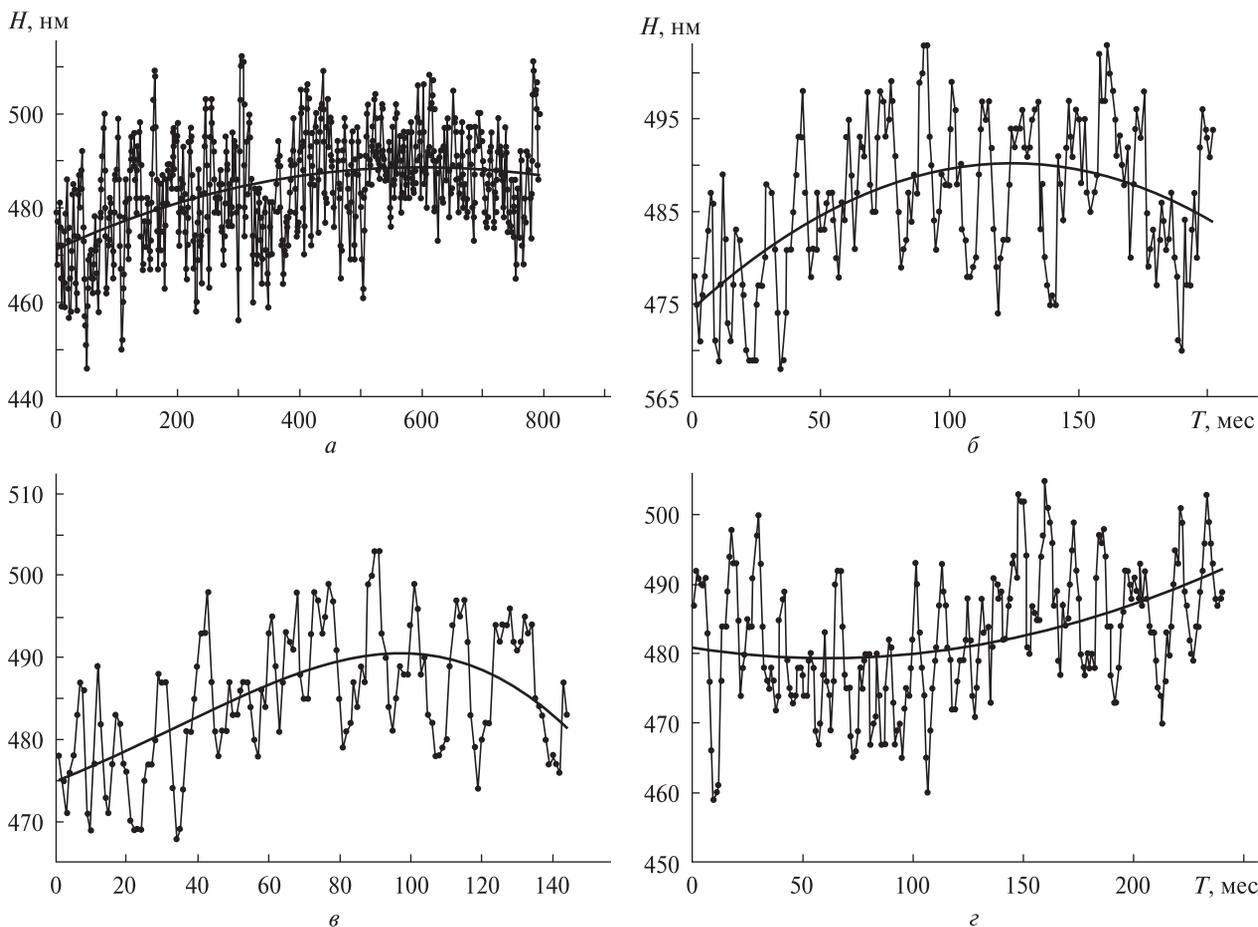


Рис. 5. Результаты измерений уровня моря в Одессе за 1945—2010 гг. (а), в Качивели за 1992—2010 гг. (б), в Ялте за 1992—2003 гг. (е), в Очакове в 1986—2005 гг. (з)

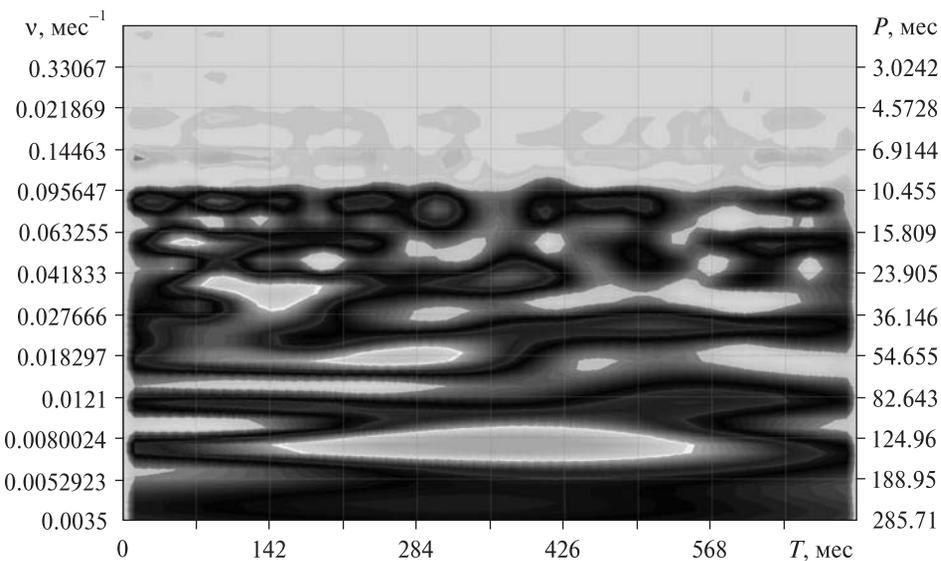


Рис. 6. Вейвлет-анализ изменения уровня моря в Одессе за 1875—2010 гг.

Для анализа использовались данные многолетних наблюдений уровня моря в Одессе, Ялте, Кацивели и Очакове (см. рис. 5).

Результаты обработки временных рядов методом фурье-анализа по всем исследуемым станциям приведены в таблице.

Исследуемые данные были различной продолжительности. Тем не менее, основной годовой период проявился по всем станциям. Наиболее интенсивным он оказался на станции Одесса. Меньшее значение периодограммы соответствует удаленным от речных стоков станциям в Ялте и Кацивели. В тоже время на всех станциях выделяется период в 20 месяцев. По наиболее продолжительным измерениям на станции Одесса обнаруживается наличие 11-летнего периода. Перспективой дальнейшего анализа является

Основные периоды P изменений уровня Черного моря по данным уровневых станций в Очакове, Одессе, Ялте и Кацивели

Станция	P , мес	Величина периодограммы
Очаков (1986—2005 гг.)	6	376
	12	5 000
	14	624
	17	675
	20	698
	40	743
Одесса (1945—2010 гг.)	6	146
	12	12 839
	20	1799
	28	1346
	44	2851
	53	1777
	99	1761
132	2806	
Ялта (1992—2003 гг.)	396	3173
	6	225
	10	282
	12	1 420
	14	586
	21	358
Кацивели (1992—2009 гг.)	29	643
	6	363
	12	1 986
	17	594
	40	754

использование вейвлет-анализа, который позволяет обнаружить динамику появления и изменения основных периодов. Пример эффективности этого метода продемонстрирован на рис. 6, где показаны изменения основных периодов на интервале времени с 1875 г. по настоящее время на станции Одесса. Здесь видно наличие 11-летнего периода, годового периода и других, приведенных в таблице. Однако также хорошо наблюдается «прерывание» отдельных периодов или их дрейф в сторону уменьшения или увеличения. Все эти эффекты станут предметом дальнейшего исследования по всем исследуемым станциям.

ВЫВОДЫ

Применяемый для рассмотрения метод фурье- и вейвлет-анализа исследования колебаний уровня моря и динамики движения базы РТ-22 является перспективным в связи с длительными рядами наблюдений и широким спектром колебаний. Каждый из обнаруженных периодов колебаний уровня моря может стать основой для детального изучения основных причин этим колебаний.

На основе данных обработки по станциям в Одессе, Ялте, Кацивели, Севастополе и Очакове получены следующие результаты.

1. На станциях в Одессе, Ялте, Кацивели и Очакове наблюдаются годовые и полугодовые составляющие. Причиной их появления является сезонная составляющая, которая связана со стоком рек в весенний и летний периоды.

2. Максимальное значение годовой и полугодовой составляющих зафиксированы в Одессе и Очакове. В Ялте и Кацивели их амплитуды имеют меньшее значение. Это связано с близким расположением Одессы и Очакова к стокам крупных рек, таких как Дунай и Южный Буг.

3. Наличие 11-летнего цикла обнаружено в данных наиболее продолжительных измерений уровня моря по станции Одесса (1945—2010 гг.). Основная причина наличия такой периодичности связана с влиянием цикла солнечной активности на динамику атмосферной циркуляции и скорости вращения Земли.

4. Наличие циклов продолжительностью свыше года, наблюдаемых одновременно на раз-

личных станциях, может быть объяснено колебательными процессами, происходящими на разломе, который разделяет акваторию Чёрного моря на западную и восточную части.

5. Наличие периодических изменений координат базы РТ-22 с периодом около одного года говорит о возможности прямой связи с изменениями уровня моря, а период около двух лет может быть обусловлен тектоническими процессами.

1. *Безруков Ю. Ф.* Колебания уровня и волны в Мировом океане: Учеб. пособие. — Симферополь: Таврический Нац. ун-т им. В. И. Вернадского, 2001. — 50 с.
2. *Рябов М. И., Вольвач А. Е., Адобовский В. В. и др.* О зависимости геодинамических характеристик Черного моря по данным многолетнего мониторинга изменений его уровня от фазы солнечного цикла // Тр. X Гаумовской астрономической конференции-школы. — Одесса: Астропринт, 2010. — С. 185.

Надійшла до редакції 01.10.11

*M. I. Ryabov, A. E. Volvach, A. L. Sukharev,
A. I. Donskikh, V. V. Adobovskii, N. Ya. Kuklina,
O. A. Shabalina, G. A. Gubar, S. L. Pokidaylo*

A TEMPORAL SPECTRUM OF THE BLEAK SEA LEVEL VARIATIONS AND A POSSIBLE RELATION BETWEEN THIS SPECTRUM AND DYNAMICS OF CHANGES IN THE POSITION OF THE CRAO RT-22 AS AN ELEMENT OF THE EUROPEAN GEODYNAMIC VLBI NETWORK

Using some results of the international geodynamic VLBI program for 1994—2010, the coordinates of the station Simeiz are determined. The measurement results for the Simeiz RT-22 coordinates are compared with long-term monthly-averaged measurements for the Black Sea level which are performed at the stations located in Odesa, Ochakov, Sevastopol, Yalta and Katsively. All the stations of the sea level measurements have a different water flow, which gives the opportunity to explore global geodynamic processes and a relationship between them and a solar activity cycle. A spectrum of sea level variations in various points shows the presence of periods from one to 11 and 22 years. The periods for each level station separately are estimated with the use of wavelet analysis.

УДК 621:3+536:24+519.682

А. М. Кислов, В. Г. Романенко, В. Н. Фенченко

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ НА ВИТКЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ. НОВАЯ ВЕРСИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ TRASSA

Розроблено нову версію пакету програм TRASSA для розрахунку орбітальних теплових режимів КА. Новий пакет дає можливість враховувати програмні зміни орієнтації КА і керовані повороти та/або зміщення окремих компонентів супутника протягом орбітального витка. Поліпшено інтерфейс побудови базової геометричної моделі КА. Наведено приклад розв'язання зовнішньої задачі радіаційного теплообміну КА змінної орієнтації та конфігурації.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] описан пакет программ TRASSA для компьютерного моделирования и расчета теплового режима космических аппаратов с фиксированной конфигурацией (без подвижных элементов) и с какой-то одной из представленных в пакете пространственной ориентацией.

В то же время многие спутники для решения различных целевых задач изменяют на витке свою ориентацию, то есть совершают программные повороты корпуса, а научные приборы и отдельные элементы (панели солнечных батарей, антенны и др.) совершают управляемые повороты и смещения относительно корпуса аппарата [<http://www.arkos.kharkov.ua/sutkm.php>]. Например, космический аппарат «Січ-2» для дистанционного зондирования Земли имеет на витке два базовых режима ориентации — «на Солнце» (основной) и «на Землю» в районе съемки [3].

После программных поворотов аппарата, управляемых поворотов и смещений его элементов изменяются геометрическая конфигурация КА, его ориентация относительно Солнца и Земли, взаимное положение элементов относительно друг друга. Вследствие этого изменяются пото-

ки излучения от Солнца и Земли, падающие на элементы конструкции аппарата, то есть изменяются условия внешнего и внутреннего лучистого теплообмена, что приводит к изменению температурного режима элементов и приборов спутника.

Для моделирования тепловых режимов космических аппаратов с учетом изменения их ориентации и геометрической конфигурации на витке предназначена новая версия пакета программ TRASSA2. Пакет разработан в среде Delphi 7 на языке Object Pascal для работы на компьютерах с Windows-98, 2000, XP, NT.

СОСТАВ И ЗАДАЧИ ПАКЕТА ПРОГРАММ

Пакет программ TRASSA2 включает англоязычные программные системы OASIS2 и ANTRES2 (главные меню приведены в табл. 1, 2). Каждая программа имеет сервисный инструментарий и справочную систему с «Руководством пользователя» и сборником контрольно-тестовых задач. Программы тестированы на различных задачах, для которых решения получены аналитически или другими численными методами.

Все исходные данные для программ вводятся в диалоговом режиме в соответствующие окна. Выполняется автоматический контроль значений параметров на полноту, допустимость и

Таблица 1. Главное меню программы OASIS2

Меню	Раздел	Описание команд и режимов
Ogm-file		Работа с бинарными <i>ogm</i> -файлами — базами данных ОГМ
	New	Создать новый <i>ogm</i> -файл
	Open	Открыть существующий <i>ogm</i> -файл
	Save as...	Сделать копию текущего <i>ogm</i> -файла
Building		Построение ОГМ КА
	Construct	Сборка базовой ОГМ из типовых примитивов
	Common view	Трёхмерная графическая визуализация ГМ
	Cross section	Графическая визуализация поперечных сечений ГМ
	Transform	Преобразование текущей ГМ путем вращений и/или сдвигов ее подсистем (блоков, компонентов)
	Merge	Объединение двух <i>ogm</i> -файлов в один <i>ogm</i> -файл
	Configure	Построение базы конфигураций ОГМ — бинарного <i>cnf</i> -файла
	Configuration view	3-мерная графическая визуализация конфигураций ГМ
	Facets amount	Справка о числе элементарных граней в текущем <i>ogm</i> -файле
	<i>Ogm-file</i> ToText	Создать текстовый <i>tgm</i> -файл для бинарных записей <i>ogm</i> -файла
	<i>Cnf-file</i> ToText	Создать текстовый <i>tcf</i> -файл для бинарных записей <i>cnf</i> -файла
Orb		КА в условиях орбитального полета
	Orbit conds	Формирование текстового <i>drr</i> -файла: <i>Орбитальные условия КА</i>
	Cosmic view	Графическая 3-мерная визуализация данных <i>drr</i> -файла
	Calculation	Решение внешней и внутренней лучистых задач КА
Non-orb	—	Расчет лучистого теплообмена КА в термовакuumной камере
Result		Визуализация результатов
	Plots	Построение графиков распределения поглощенных гранями КА внешних потоков на расчетном периоде
	Tables	Формирование таблиц внешних лучистых потоков на грани КА
	Facets areas	Формирование таблицы площадей граней
	Exchange factor	Просмотр РУК между гранью-эмиттером и гранями-приемниками в заданной конфигурации ОГМ
Edit	—	Встроенный текстовый редактор для просмотра, редактирования и копирования текстовых входных и выходных файлов
Tools		Инструментарий: сервисные файлы и процедуры
	Primitives album	Альбом используемых типовых примитивов в <i>bmp</i> -рисунках
	CartesianToSpherical	Пересчет декартовых координат в сферические координаты
	EulerAnglToSpherical	Пересчет углов Эйлера в сферические координаты базисных ортов <i>i, j</i> повернутой СК относительно ее исходного положения
	SphericalToEulerAngl	Пересчет сферических координат базисных ортов <i>i, j</i> повернутой СК относительно ее исходного положения в углы Эйлера
	Continued fraction	Расчет подходящих цепных дробей для выбора числа расчетных витков орбиты — периодичности внешнего облучения КА
	Date of Sun-Locus	Расчет календарной даты по положению Солнца
	Sun-synchronous orb	Расчет наклонения солнечно-синхронной орбиты по высоте перигея и наоборот
	Time-Locus	Пересчет истинной аномалии КА в текущее время и доли орбитального периода
Help		Вызов справок
	User Manual	«Руководство пользователя» программы OASIS2
	Tests suite	Сборник контрольно-тестовых задач

совместимость с выдачей сообщений при обнаружении ошибок. В зависимости от постановки задачи программы могут работать автономно или в составе пакета.

В новой версии пакета улучшен пользовательский интерфейс программ, в частности за счет введения контекстных окон, которые предоставляют возможность извлекать необходимые параметры в предпроцессорном и послепроцессорном режимах работы.

Программная система OASIS2 предназначена для построения оптико-геометрических моделей и решения задач внешнего и внутреннего лучистого теплообмена КА в орбитальных условиях. В расширенном изложении OASIS2 выполняет такие основные функции.

1. Построение в выбранной пользовательской системе координат *базовой* оптико-геометрической модели (ОГМ) космического аппарата в виде бинарного *ogm*-файла из набора типовых фигур-примитивов, записанных в базе данных OASIS2. В новой версии может выполняться также сборка ОГМ путем объединения предварительно построенных отдельных блоков (*ogm*-файлов). Здесь мы используем термин *примитив* — англоязычный вариант конструктива [1], который представляет собой систему конечных элементов базовых типов поверхностей: плоскости, сферы, эллипсоида, круговых цилиндра и конуса со своими оптическими характеристиками в солнечном спектре и в тепловом ИК-диапазоне (собственное излучение Земли и элементов КА).

Таблица 2. Главное меню программы ANTRES2

Меню	Раздел	Описание команд и режимов
Dtr-file	—	Открыть текстовый файл данных для расчета теплового режима и выполнить контролируемый ввод
Edit	—	Открыть файл и загрузить его в встроенный текстовый редактор
Absorbed flow	—	Просмотр графиков распределения поглощенных внешних потоков на расчетном периоде в вершинах графа расчетных элементов (ГРЭ)
Calculation	—	Расчет теплового режима
Result		Визуализация результатов
	Plots of nodes temperature	Построение графиков температуры для вершин ГРЭ
	Table of nodes temperature	Формирование таблицы температур для вершин ГРЭ
	Thermostatic switches	Формирование таблицы состояний температурных ключей: вентилятора, нагревателей и жалюзи
	Plots of arcs temperature	Построение графиков распределения температуры в одномерном элементе (дуге ГРЭ) для заданных моментов времени
	Tables of arcs temperature	Формирование таблиц температуры для дуг ГРЭ
	Heat balance of node	Просмотр составляющих теплового баланса для вершины ГРЭ
	Heat balance of arc	Просмотр составляющих теплового баланса дуги ГРЭ
Tools		Сервисные программы
	Calculator	Программа записи и расчета выражений
	Cubic spline	Редактирование табличной функции для интерполяции кубическим сплайном
	Honeycomb	Расчет эффективных коэффициентов теплопроводности для ортотропного слоя сотового заполнителя
	Two-layer structure	Расчет эффективного коэффициента продольной теплопроводности бипластины
Help		Вызов справок
	User Manual	«Руководство пользователя» программы ANTRES2
	Tests suite	Сборник контрольно-тестовых задач

2. Изображение трехмерной геометрической модели КА и ее фрагментов в выбранном ракурсе. Предусмотрена возможность изображения сечений модели и невидимых линий, маркировка рабочих сторон граней, масштабирование выделенной окрестности на рисунке.

3. Создание переменной геометрии КА (при наличии подвижных компонентов) — базы данных по *виртуальным конфигурациям* КА на расчетном орбитальном витке в формате бинарного *cnf*-файла. Каждая запись *cnf*-файла определяет преобразование базовой конфигурации в виртуальную для заданного момента времени или положения на витке. Под виртуальной конфигурацией подразумевается ОГМ, явно не задаваемая в виде *ogm*-файла, но воспроизводимая по мере надобности в соответствующих режимах.

4. Воспроизведение в режиме трехмерной графической визуализации виртуальных конфигураций КА. Возможен просмотр изображения конфигураций или их фрагментов в различных ракурсах (*any side*), со стороны (*Sun*) или против Солнца (*anti-Sun*), в направлении зенита (*zenith*) или надира (*nadir*).

5. Моделирование орбитального движения КА и вычисление данных, необходимых для расчета потоков излучения от Земли и Солнца. Вычисляются: текущие параметры орбиты с учетом вековых возмущений от второй зональной гармоники геопотенциала; положение КА на витке и его ориентация в заданной последовательности программных поворотов; орты направлений на Солнце и центр Земли в пользовательской системе координат.

6. Трехмерное изображение в выбранном ракурсе взаимного положения Земли, КА и его орбиты, Солнца на эклиптике в геоэквиаторальной системе координат.

7. Решение методом Монте-Карло задач внешнего и внутреннего лучистого теплообмена КА на витке.

Моделирование поступательного и вращательного движения элементов КА предусмотрено в программах ESARAD [<http://www.techcentreuk.alstom.com>] и NEVADA [<http://www.tac1.com/product.html>]. В программе RadCad [<http://www.crtech.com/radcad.html>] пакета Thermal Desktop

моделируется смещение и поворот отдельных элементов и группы элементов КА на витке.

Программная система ANTRES2 предназначена для расчета температурных полей в элементах КА и реализует методику расчета теплового режима [1], обобщенную на переменную геометрию КА с учетом его программных поворотов. Программа ANTRES2 при работе в пакетном режиме использует результаты решения задач лучистого теплообмена, полученные OASIS2 в виде последовательности бинарных файлов, соответствующих заданным на витке зонам различной ориентации КА и его виртуальным геометрическим конфигурациям.

ПОСТРОЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КА НА ВИТКЕ

При построении оптико-геометрических моделей КА (ОГМ) используется связанная с КА прямоугольная декартова пользовательская система координат (ПСК), которая выбирается из соображений простоты и удобства построения ОГМ.

Переменные геометрические модели КА являются вариациями первоначально выбранной *базовой* ОГМ, которая строится в пункте меню «Building» в режиме команды «Construct» (см. табл. 1). Базовая ОГМ может быть также собрана из предварительно построенных блоков. Исходные установки подвижных блоков в базовой ОГМ задаются так, чтобы определение их ориентации на различных участках витка было как можно проще.

Пусть построена некоторая базовая ОГМ, данные о которой записаны в бинарный файл *Task#0.ogm*, где *Task* — назначенное имя задачи, а суффикс *#0* идентифицирует ОГМ как базовую модель. Записи, состав которых приведен в [1], содержат информацию о типовых примитивах ОГМ, включая данные об установке примитива в ПСК: точку привязки и сферические координаты осей абсцисс и ординат локальной СК примитива. Список примитивов, из которых построена базовая ОГМ, описывается интервалом $1 \dots N_s$.

Предполагается, что в ОГМ КА имеется N_{tb} подвижных блоков. Каждый блок характеризуется списком-выборкой примитивов из интер-

вала $1 \dots N_s$ и собственной СК X_{ib}, Y_{ib}, Z_{ib} , ассоциированной с локальной СК одного из примитивов в этой выборке. В заданные моменты времени t_m , отсчитываемые от перигея ($m = 1, 2, \dots, M; t_1 = 0, t_M < P$, где P — орбитальный период), каждый блок поворачивается вокруг неподвижной относительно ПСК точки на заданные углы поворота вокруг заданных направленных осей вращения или поступательно перемещается на заданные сдвиги вдоль осей ПСК (подробнее см. в разделе *Пример расчета*).

Построение переменной ОГМ КА, аналогичное построению базовой ОГМ, реализуется в режиме команды «Configure» путем создания базы данных для виртуальных конфигураций КА на расчетном витке орбиты в виде бинарного файла записей Task#0.cnf. Запись для виртуальной конфигурации включает следующие параметры:

- количество подвижных блоков $N_{ib} < 10$;
- момент автоматического обновления конфигурации на витке. Этот момент может быть задан истинной аномалией или временем в минутах. Если задана истинная аномалия, то текущее время вычисляется автоматически, и наоборот;
- координаты точки вращения (X_o, Y_o, Z_o) или сдвиги (dX, dY, dZ) и список примитивов, образующих подвижный блок;
- направляющие косинусы c_1, c_2, c_3 оси вращения и угол p поворота блока вокруг этой оси. Для каждого блока предусмотрено три оси поворота. Если осей поворота меньше трех, то «лишние» оси задаются произвольно с углом поворота, равным нулю. Сдвиг блока реализуется, если все три угла поворота равны нулю.

Для заданного угла поворота p и направляющих косинусов c_1, c_2, c_3 положительной оси вращения, так что $p > 0$ соответствует вращению правого винта в направлении положительной оси, матрица вращения определяется выражением [2]

$$\mathbf{A} \equiv [a_{ij}] = \cos p \cdot \mathbf{I} + (1 - \cos p) \cdot \begin{pmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 \end{pmatrix} + \sin p \cdot \begin{pmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} — единичная матрица; $i, j = 1, 2, 3$.

При построении виртуальных конфигураций часто требуется повернуть какой-либо блок осью Z_{ib} в заданном направлении, например по вектору Солнца или вектору центра Земли, что связано с весьма громоздкими вычислениями направляющих косинусов оси вращения и угла поворота. Для таких случаев в программе предусмотрена процедура предварительного вычисления параметров поворота (команда «Pre-count»).

Предположим, что в ПСК задан некоторый направляющий вектор $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)$ и заданы сферические угловые координаты L_{Xib}, P_{Xib} и L_{Yib}, P_{Yib} осей X_{ib}, Y_{ib} СК блока в базовой ОГМ. Нужно вычислить направление оси $\mathbf{c} = (c_1, c_2, c_3)$ и угол p , такие, чтобы после поворота блока вокруг этой оси на угол p ось Z_{ib} имела направление вектора \mathbf{a} . Алгоритм вычисления параметров поворота выглядит следующим образом.

Вычисляется матрица $\mathbf{R}(L_{Xib}, P_{Xib}, L_{Yib}, P_{Yib})$, преобразующая сферические координаты осей блока в направляющие косинусы этих осей в прямоугольной декартовой ПСК. Для вектора \mathbf{a} определяются долготный L_a и полярный P_a углы.

Вычисляются матрицы вращения $\mathbf{A}_2(P_a)$ и $\mathbf{A}_3(L_a)$ вокруг осей Y и Z ПСК соответственно на угол P_a и L_a .

Находится результирующая матрица \mathbf{A} , поворачивающая блок так, что ось Z_{ib} СК блока принимает направление вектора \mathbf{a} : $\mathbf{A} = [a_{ij}] = \mathbf{A}_3(L_a) \times \mathbf{A}_2(P_a) \times \mathbf{R}$; $i, j = 1, 2, 3$.

Определяются угол поворота p и направляющие косинусы c_1, c_2, c_3 положительной оси вращения [2]

$$p = \arccos\left(\frac{1}{2}(a_{11} + a_{22} + a_{33} - 1)\right),$$

$$c_1 = \frac{a_{32} - a_{23}}{2 \sin p}, \quad c_2 = \frac{a_{13} - a_{31}}{2 \sin p}, \quad c_3 = \frac{a_{21} - a_{12}}{2 \sin p}, \quad (2)$$

угол $p > 0$ соответствует вращению правого винта, вворачиваемого в направлении положительной оси вращения.

Воспроизведение взаимного положения блоков ОГМ в заданных точках витка выполняется в режиме команд «Configuration view» и «Orb|Calculation». При этом используется база конфигураций (файл Task#0.cnf) и копия файла

Task#0.ogm базовой конфигурации, который и преобразуется в файл виртуальной конфигурации.

Рассмотрим вращение блока в m -й записи файла конфигураций, который описывается некоторой выборкой примитивов (n_1, \dots, n_{N_p}) , относительно заданной точки $W(X_o, Y_o, Z_o)$ последовательно вокруг осей, направленных по векторам $\mathbf{c}_j = (c_{1j}, c_{2j}, c_{3j})$, на углы $p_j, j=1, 2, 3$.

Выполняется параллельный перенос СК блока как твердого тела из точки W в начало ПСК (пересчитываются точки привязки всех N_p примитивов рассматриваемого блока).

В соответствии с (1) выполняем три последовательных поворота, которые описываются углами p_j и осями вращения с направляющими векторами \mathbf{c}_j , и получаем результирующую матрицу вращения блока вокруг начала ПСК. При этом пересчитываются точки привязки и сферические координаты осей абсцисс и ординат всех примитивов выборки (n_1, \dots, n_{N_p}) .

Выполняется обратный параллельный перенос блока, повернутого вокруг начала ПСК, в исходную точку вращения $W(X_o, Y_o, Z_o)$.

Если число поворотных блоков $N_{ib} > 1$, то организуется цикл от 1 до N_{ib} . Кроме того, организуется внешний цикл по конфигурациям: в режиме «Calculation» от 1 до M , а в режиме «Configuration view» — для выбранной выборки из интервала 1 ... M .

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА КА

Моделирование внешнего и внутреннего лучистого теплообмена КА реализуется программой OASIS2 по вычислительной схеме [1], обобщенной на переменные ориентацию и геометрию КА на витке. Орбитальные условия КА (параметры орбиты, ориентация КА на различных участках витка для базовой конфигурации) задаются в разделе меню «Orb|Orbit conds».

Изменение ориентации корпуса КА на витке характеризуется матрицей ориентации из девяти

ти колонок и N строк, где N — число зон постоянной ориентации КА на витке. Состав строки представлен одномерной табл. 3.

В табл. 3 номер зоны принимает значение в интервале 1 ... N ; bSA (базовая система координат БСК) задается своим номером: 1 — экваториальная, 2 — перигейная, 3 — орбитальная, 4 — эллиптическая СК; компоненты $L_{X_s}, P_{X_s}, L_{Y_s}, P_{Y_s}$ — это установочные долготный и полярный углы оси абсцисс X_s и оси ординат Y_s системы координат КА в БСК; в зоне постоянной ориентации предусмотрено вращение КА вокруг одной из координатных осей ПСК (X_u, Y_u, Z_u) с заданной угловой скоростью W ; момент изменения ориентации КА отсчитывается от момента прохождения перигея. Строки упорядочены по временному параметру t_{reor} .

Матрица ориентации используется для расчета векторов направления на центр Земли и на Солнце в ПСК. В частном случае $N = 1$ процедура расчета этих векторов описана в работе [1]. В обобщенном варианте при $N > 1$, как и в случае $N = 1$, организуется цикл от 1 до N_c , где N_c — число заданных расчетных положений КА на витке. Расчет векторов выполняется сначала по данным 1-й строки матрицы ориентации, затем, после достижения момента изменения ориентации, — по данным 2-й строки и т. д. до завершения цикла.

Переменная геометрическая модель КА на витке представляется последовательностью M виртуальных конфигураций. Общее решение задачи лучистого теплообмена определяется комбинацией решения частных задач, полученных для отдельных конфигураций в соответствующих зонах витка.

Решения частных задач вычисляются в режиме «Orb|Calculation» последовательно для всех заданных конфигураций $m = 1, 2, \dots, M$. При этом программа выполняет декомпозицию заданной конфигурации ОГМ на расчетные элементарные грани, из которых состоят примитивы. Инфор-

Таблица 3. Строка матрицы ориентации

Zone Зона	bSA БСК	L_{X_s}	P_{X_s}	L_{Y_s}	P_{Y_s}	Axis Ось вращения	W , град/с Угловая скорость	Turn moment, min Момент изменения ориентации t_{reor}
--------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------------------	----------------------------------	--

мация о гранях формируется в виде автономных записей, описывающих грань в ПСК. Запись для грани включает тип базовой несущей поверхности, данные о положении и ориентации в ПСК, термооптические характеристики рабочей стороны и параметры, задающие ее границы. Эти данные в виде упорядоченных внутренних структур используются при решении задачи лучистого переноса в системе расчетных граней виртуальной конфигурации. При декомпозиции автоматически создается файл с таблицей соответствия упорядоченных номеров граней в ПСК структурным номерам граней примитивов. Этот файл используется в режиме команды меню «Result» программы OASIS2, а также при формировании файла исходных данных Task#0.dtg для программы ANTRES2.

После декомпозиции выполняется совместное решение внутренней и внешней радиационных задач: 1) расчет разрешающих угловых коэффициентов между гранями ОГМ; 2) вычисление лучистых потоков от Земли и Солнца, поглощенных гранями ОГМ в расчетных точках орбитального витка.

Для решения задач лучистого теплообмена используется метод Монте-Карло. Результаты решения лучистой задачи в виде бинарных файлов Task#m.gtg ($m = 1, 2, \dots, M$) являются входными данными программы ANTRES2 при расчете температурного режима КА.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

В новой версии пакета основные изменения содержатся в программе OASIS2. Приведен иллюстративный пример расчета с использованием этой программы.

Постановка задачи. Рассматривается микроспутник, состоящий из корпуса в форме параллелепипеда $75 \times 75 \times 95$ см, двух панелей СБ 65×80 см и входного отверстия прибора с подвижной крышкой на нижней грани корпуса (рис. 1). Панели установлены на фланцах с шарнирами и могут поворачиваться вокруг трех осей. Боковые стенки корпуса, основания корпуса и фланцы, рабочие и тыльные стороны панелей имеют соответственно термооптические характеристики: $\varepsilon = 0.9, 0.92$ и $0.92, 0.88$ и 0.8 ; $\alpha_s = 0.9, 0.95$ и $0.95, 0.72$ и 0.7 .

Орбита круговая солнечно-синхронная высотой 758 км, период обращения 100 мин. Для расчетного витка долгота восходящего узла $\Omega = 9.5$ ч и аргумент перигея $\omega = 50^\circ$ (выход из тени) на дату весеннего равноденствия. Солнечная постоянная 1380 Вт/м^2 , тепловая эмиссия Земли 230 Вт/м^2 , альbedo Земли 0.3.

В течение 40 мин при истинной аномалии $0 \leq \theta < 144^\circ$ (на освещенном участке витка) корпус КА ориентирован в базовой орбитальной СК: ось $+Z$ направлена в зенит, ось $+X$ образует угол 60° с плоскостью орбиты со стороны ее северного полюса. Панели СБ все время устанавливаются нормально к вектору Солнца, крышка прибора открыта.

На втором участке витка ориентация КА солнечная: ось $+Z$ направлена на Солнце, ось $+X$ перпендикулярна к плоскости эклиптики и направлена в ее южный полюс; панели СБ параллельны основанию корпуса, прибор закрыт крышкой.

Задача состоит в вычислении временной зависимости потоков излучения, поглощенных поверхностями КА в течение орбитального витка.

Решение задачи с использованием программы OASIS2 (табл. 1).

1. Назначается имя задачи: MicroSat#0. В режиме команды «Building|Construct» формируется [1] из набора примитивов («Tools|Primitives album») базовая ОГМ КА (панели СБ параллельны основаниям корпуса, прибор открыт) и сохраняется в бинарном файле MicroSat#0.omg. Базовая конфигурация КА и соответствующий ей список примитивов приведены на рис. 1.

2. В режиме команды «Orb|Orbit conds» посредством диалогового окна «Database of orbital conditions» задаются параметры, необходимые для решения задачи внешнего лучистого теплообмена КА. Число расчетных положений КА на витке («Number of loci on orbit revolution») принято равным $N_c = 100$, число зон фиксированной ориентации $N = 2$ («Number of Zones of SC stable orientation»), ориентация КА в 1-й зоне в течение 40 мин орбитальная ($bSA = 3$), во 2-й зоне — солнечная ($bSA = 4$). Заданные параметры сохраняются в текстовом файле MicroSat#0.dtg. С использованием этих данных по команде

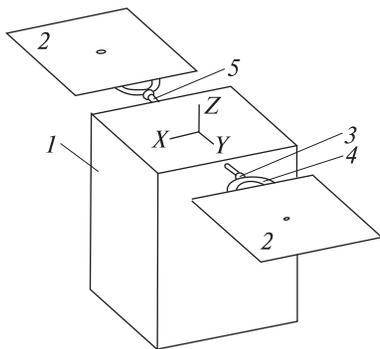


Рис. 1. Базовая конфигурации и окно списка примитивов геометрической модели КА: 1 – корпус, 2 – панели СБ (рабочие стороны отмечены маркерами), 3 – шарнир, 4 – фланец, 5 – выдвижной шток; прибор 6 и крышка прибора 7 не показаны; XYZ – ПСК (бортовая)

Name of primitive (constructive unit)	№	Type
Корпус: параллелепипед 75*75*95 см	1	52
Шток-1 выдвижной (-Y)	2	30
Шарнир-1 (-Y)	3	20
Фланец СБ-1 (-Y)	4	10
Панель-1 СБ (рабочая сторона) -Y	5	4
Панель-1 СБ (тыльная сторона) -Y	6	0
Шток-2 выдвижной (+Y)	7	30
Шарнир-2 (-X)	8	20
Фланец СБ-2 (+Y)	9	10
Панель-2 СБ (рабочая сторона) +Y	10	4
Панель-2 СБ (тыльная сторона) +Y	11	0
Прибор	12	30
Крышка прибора	13	10

Records: 13

Buttons: Clear, Choose

Mark the start of interval of items.

Рис. 2. Окна управления базой конфигураций (а) и ввода параметров конфигураций (б)

No.	Time, min	True anomaly, deg
1	0	0
2	5	18
3	10	36
4	15	54
5	20	72
6	25	90
7	30	108
8	35	126
9	40	144

Records: 9

Buttons: Close, Add, Delete, Edit, Copy

а

Block	List of block primitives	Xo (dX)	Yo (dY)	Zo (dZ)
1	3.6	0	-0.545	-0.03
Axis	cosA	cosB	cosG	Angle, deg.
1.1	0.154359	0.983333	-0.096068	117.067
1.2	1	0	0	0
1.3	0	0	1	0
L_Xtb	p_Xtb	L_Ytb	p_Ytb	
0	90	90	90	

б

«Pre-count» вычисляются в ПСК направления на центр Земли и на Солнце в расчетных точках витка (текстовый файл MicroSat#0.loc).

3. Правильность сформированных данных контролируется в режиме команды «Cosmic view» посредством 3-мерного графического изображения и справочной информации нему. Справоч-

ная информация содержит данные о положении Солнца на эклиптике, параметрах орбиты и некоторых дополнительных характеристиках: угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце (beta-angle), время пребывания КА в тени Земли, истинные аномалии начала и конца теневого участка и др.

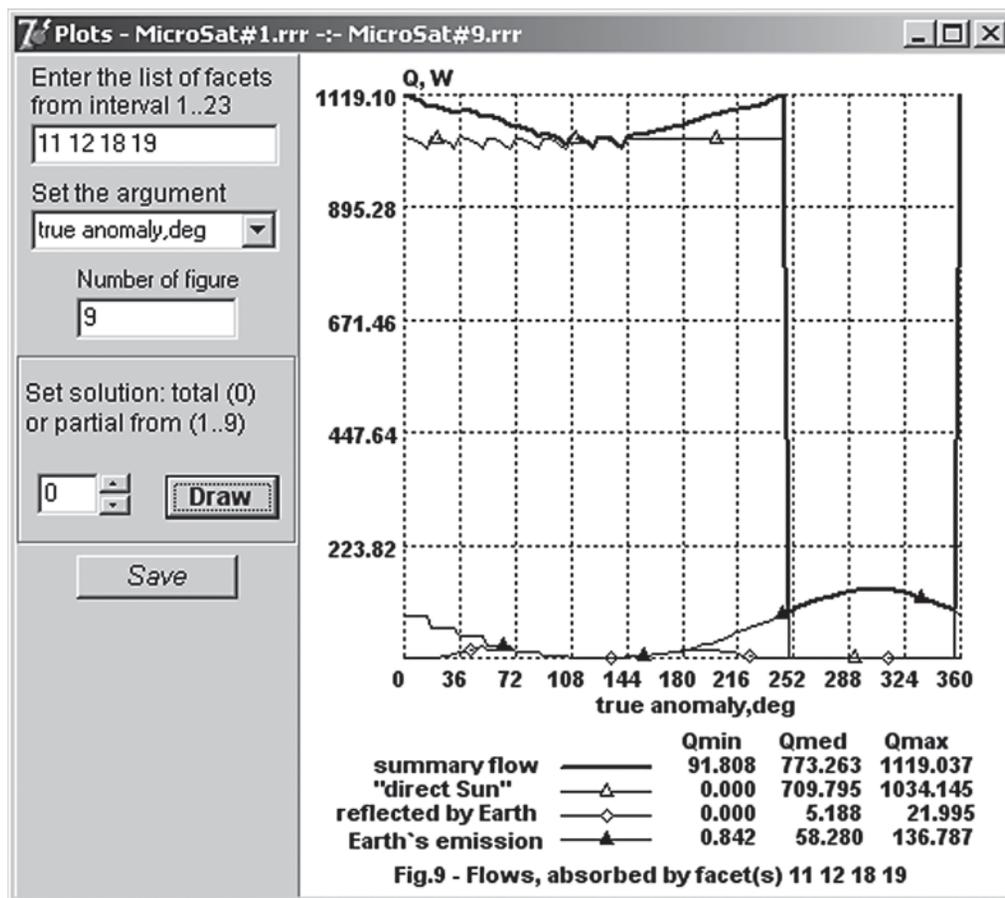


Рис. 3. Окно изображения результатов с графиками поглощенных лучистых потоков рабочими сторонами панелей СБ

4. В режиме «Building|Configure» создается база виртуальных конфигураций в виде бинарного файла MicroSat#0.cnf для описания поворотов СБ и крышки прибора относительно корпуса КА в течение витка. Принимается, что управляемые повороты СБ в 1-й зоне витка выполняются не в каждой расчетной точке, а периодически с шагом $\Delta\theta = 18^\circ$. При этом геометрическая модель КА имеет восемь конфигураций в 1-й зоне витка и одну — во 2-й зоне.

База конфигураций КА создается в окне «Configurations database» (рис. 2, а) аналогично построению базовой конфигурации в режиме «Building|Construct». Параметры записи для конфигураций ОГМ вводятся в окне «Editor of configuration» (рис. 2, б). В окне на рис. 2, б записа-

ны параметры поворота блока примитивов 3 ... 6 (панель — 1 СБ) для построения конфигурации #1 в интервале истинной аномалии $0 \leq \theta < 18^\circ$.

Записи последующих из восьми конфигураций в 1-й зоне витка отличаются только направлением оси и углом поворота панелей СБ в зависимости от направления вектора Солнца. Конфигурация #9 (2-я зона витка) образуется из базовой ОГМ поворотом крышки вокруг направления оси +X на угол 180° в положение «прибор закрыт».

5. Построение виртуальных конфигураций ОГМ проверяется в режиме 3-мерной графической визуализации «Configuration view». Графическая визуализация реализуется в рабочем окне «Configurations of OGM».

6. В поле «Configuration» окна «Database of orbital conditions» последовательно устанавливаются номера m конфигураций ($m = 1, 2, \dots, 9$) и для них в режиме «Calculation» решаются частные задачи лучистого теплообмена КА. В результате девяти постановок формируется последовательность выходных файлов MicroSat#1.rgr, ..., MicroSat#9.rgr.

7. Результаты решения задачи лучистого теплообмена КА в виде графиков и таблиц для выбранных граней ОГМ формируются в режиме команды «Result|Plots» в окне «Plots» изображаются в виде графиков общее и частные решения задачи лучистого теплообмена.

На рис. 3 приведено общее решение радиационной задачи для панелей СБ. Пилообразный характер графика для поглощенного потока от Солнца в зоне орбитальной ориентации КА ($0 \leq \theta < 144^\circ$) обусловлен принятым шагом коррекции ориентации панелей $\Delta\theta = 18^\circ$. На освещенном участке 2-й зоны витка ($144^\circ \leq \theta < 248^\circ$) при солнечной ориентации КА этот поток имеет постоянное значение. Погрешность значений пилообразного потока относительно постоянного составляет 2 %.

1. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г., Фенченко В. Н. Пакет программ TRASSA для расчета тепловых режимов космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 4. — С. 3—16.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1970. — 720 с.
3. Лизунов Г. В., Глемба В. И., Корепанов В. Е. и др. Космический эксперимент «Потенциал» на борту спутника «Січ-2» // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 4. — С. 3—8.

Надійшла до редакції 01.10.11

A. M. Kislov, V. G. Romanenko, V. N. Fenchenko

THE THERMAL ANALYSIS
OF SPACECRAFTS WITH ORIENTATION
AND GEOMETRIC CONFIGURATION
VARYING DURING AN ORBIT REVOLUTION.
A NEW VERSION OF THE SOFTWARE TRASSA

A new version of the software TRASSA for the calculation of thermal modes of a spacecraft is developed. The new package enables us to take into account the changes in the spacecraft orientation and controlled turns and/or displacements of separate components of a spacecraft during an orbital revolution. The construction interface for the basic geometric model of a spacecraft is improved. An example of the solution of external radiation problem for a spacecraft with variable orientation and configuration is given.

УДК 520.82.054 + 521.31

Н. И. Кошкин¹, Е. А. Коробейникова¹, В. В. Лопаченко², С. М. Меликянц¹,
С. Л. Страхова¹, Л. С. Шакун¹

¹ Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»

Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Одеса

² Національний центр управління та випробування космічних засобів
Державного космічного агентства України, Євпаторія

О ХАРАКТЕРЕ ДВИЖЕНИЯ МИКРОСПУТНИКА С ПАРУСОМ В АТМОСФЕРЕ («NanoSail-D»)

Розглянуто гальмування супутника з вітрилом у верхній атмосфері Землі, а також досліджено його рух навколо центра мас. У січні 2011 р. мікросупутник «NanoSail-D» розвернув вітрило і продовжив автономний політ на висоті 635 км. Очевидно, через швидке обертання вітрила час життя супутника на орбіті перевищить попередній прогноз (~100 діб) принаймні утричі. Фотометричні спостереження виявили регулярні коливання блиску з періодом декілька секунд. З травня по серпень 2011 р. кутова швидкість обертання вітрила плавно збільшувалась. Причиною цього була взаємодія з потоком частинок верхньої атмосфери, внаслідок чого він перейшов у режим розкручування, що знизило ефективність гальмування. Представлено результати моделювання зміни блиску і обертання супутника.

ВВЕДЕНИЕ

Микроспутник НАСА «NanoSail-D» вместе с пятью другими космическими аппаратами (КА), был запущен на низкую околоземную орбиту в ноябре 2010 г. Еще до полета он был назван «солнечный парус», хотя основным фактором воздействия на КА является разреженная верхняя атмосфера Земли. Аппарат предназначен для отработки технологий разворачивания в космосе дешевых и легких парусов для сведения отработавших свой срок космических объектов с низких орбит за счет дополнительного торможения в атмосфере [3]. Парус в таком случае действует как аэродинамический тормоз, постепенно замедляя скорость спутника и приближая к плотным слоям атмосферы, где он должен благополучно сгореть.

В момент отделения «NanoSail-D» от своего спутника-носителя FASTSAT выяснилось, что капсула «парусника» застряла. Недели безус-

пешных попыток освободить аппарат уменьшали надежду операторов на успех миссии. Однако 17 января случилось неожиданное: телеметрия ясно указывала на то, что КА вышел в открытый космос. 20 января «NanoSail-D» получил команду раскрыть парус, и спустя несколько секунд раздвижные направляющие вытянули квадрат тонкой серебристой светоотражающей пленки площадью около 10 м². До настоящего времени только один космический аппарат успешно раскрывал солнечный парус — это японский зонд IKAROS, который впервые в истории космонавтики использовал давление солнечного света в качестве основного движителя. Неожиданный счастливый поворот судьбы позволил космическому аппарату «NanoSail-D» также развернуть свой парус на высоте 650 км над поверхностью Земли. Это первый в истории космический аппарат с парусом, совершающий полет в атмосфере вокруг Земли. Он получил номер 37361 по каталогу НОРАД и международный номер 2010-062L.

Начальная орбита КА на 20 января 2011 г. составляла: высота над Землей — 650 км, среднее движение — 14.78, наклонение орбиты — 72°,

© Н. И. КОШКИН, Е. А. КОРОБЕЙНИКОВА,
В. В. ЛОПАЧЕНКО, С. М. МЕЛИКЯНЦ,
С. Л. СТРАХОВА, Л. С. ШАКУН, 2012

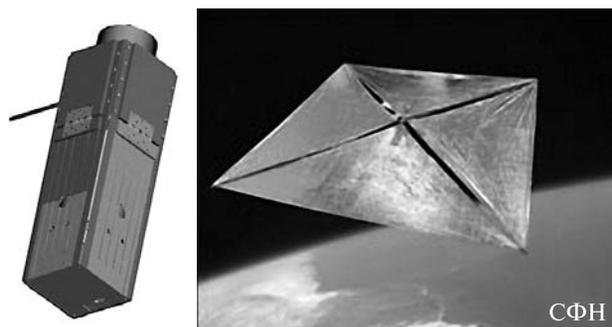


Рис. 1. Вид космического аппарата «NanoSail-D» до и после разворачивания паруса

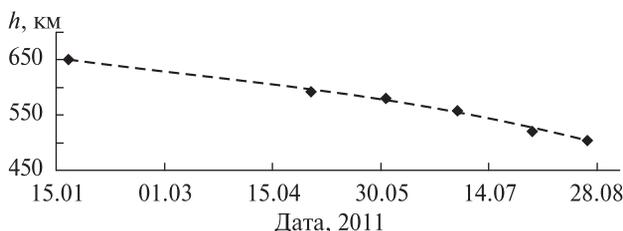


Рис. 2. Наблюдаемый темп снижения средней высоты полета космического аппарата «NanoSail-D»

эксцентриситет — 0.002. Форма паруса — четыре треугольные секции (рис. 1). Масса КА — 4 кг.

Прогнозировалась, что КА «NanoSail-D» через 70—120 сут после разворачивания паруса должен сгореть в атмосфере Земли [http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/11-010.html]. За это время необходимо было получить ценную информацию о взаимодействии паруса с атмосферой и проанализировать поведение КА. Однако по непонятным ведомственным причинам проект попал в разряд военных, и доступ к орбитальным данным КА «NanoSail-D» был ограничен — на сайте Space-track.org для гражданских пользователей этих данных нет. Вместе с тем проект был широко разрекламирован среди любителей на сайте spaceweather.com, для которых даже была объявлена денежная премия за наиболее удачные фотографии полета паруса.

Батареи «NanoSail-D» разрядились в течение нескольких дней, после чего сигнал радиомаяка был утерян. Но за это время радиолюбители успели записать радиопередачи со спутника. В дальнейшем осталась возможность только для

наблюдателей КА в оптическом диапазоне. Ожидалось, что «NanoSail-D» будет тусклым на протяжении большей части своей миссии, однако краткие вспышки яркости должны были сделать его видимым для невооруженного глаза. А по мере быстрого снижения высоты полета видимая яркость парусника должна была увеличиваться.

ОРБИТАЛЬНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «NANOSAIL-D»

На данный момент предполетный прогноз торможения КА оправдывается лишь в общем. К концу августа 2011 г. парусник снизился только до высоты 500 км (рис. 2).

Причину такого незначительного снижения орбиты полета КА авторы проекта видят в регулярном плоском вращении паруса вместо случайного его кувыркания или же стационарного полета с направленной вперед нормалью к средней плоскости паруса [http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html, http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2011/11-055.html]. Фактически это признание того, что параметры паруса не оптимальны, и вращение его не предусматривалось в проекте. Такая ситуация еще больше привлекает внимание к полету и торможению первого парусника, а также к характеру его вращения вокруг центра масс.

На рис. 3 показано изменение dn/dt среднего движения КА «NanoSail-D» (кривая 1) на наблюдаемом интервале времени по данным сайтов nanosaild.engr.scu.edu/dashboard/ и calsky.com (наблюдаемые и расчетные значения). Эта величина характеризует темп торможения, точнее снижения КА. Видим, что характерная величина dn/dt для паруса равна 0.001 и имеет тенденцию к увеличению со временем. Для сравнения приведен параметр dn/dt для другого КО 86052C на похожей орбите (кривая 2). Этот КО имеет существенно меньшее отношение площади поперечного сечения к массе объекта, вследствие чего скорость снижения его орбиты почти на два порядка ниже. Колебания величины dn/dt зависят прежде всего от вариаций плотности атмосферы на высоте полета КА и от возможного изменения средней площади проекции попереч-

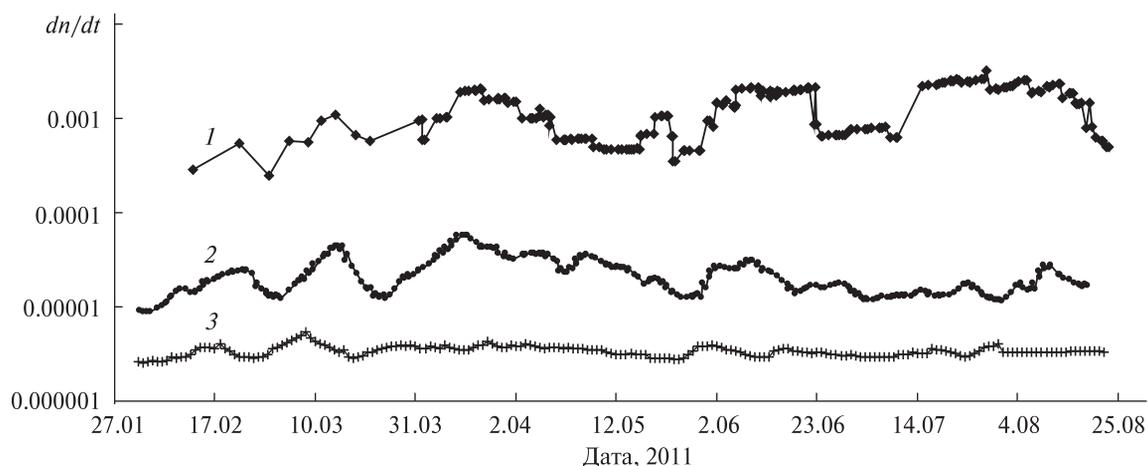


Рис. 3. Скорость dn/dt изменения среднего движения: 1 — КА «NanoSail-D», 2 — КА 86052C_SL-8Deb, кривая 3 — вариации потока $F_{10.7}$ радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см в относительных единицах

ного сечения КА по отношению к направлению его полета. Кривая 3 на рис. 3 дает представление о характере вариаций потока радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см (в относительных единицах) на рассматриваемом интервале времени.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «NANOSAIL-D»

Судить о кинематике вращения вокруг центра масс КА «NanoSail-D» можно на основе фотометрических наблюдений [1] на станциях Украинской сети оптических наблюдений и исследования спутников (УМОС) в Одессе (Астрономическая обсерватория Одесского университета) и в Евпатории (НЦУИКС). Первая кривая блеска была получена в Одессе (рис. 4, а) при неблагоприятных погодных условиях. Наблюдаемый блеск КА оставался почти постоянным и не давал оснований предполагать наличие быстрого вращения паруса.

Но уже через четыре дня 26 апреля в Евпатории в двух соседних проходах были получены аperiodические колебания блеска «NanoSail-D» (рис. 4, б).

Фотометрические наблюдения КА «NanoSail-D», полученные в Одессе 6 июня (рис. 4, в), уже зафиксировали быструю переменность с амплитудой до одной звездной величины. Надежно определен фотометрический период около

5.3 с, в пределах которого четко видны 12 колебаний блеска.

По-видимому, в результате взаимодействия с потоком частиц верхней атмосферы спутник перешел в режим вращения около оси, которая не совпадает с осью симметрии. На рис. 4, г показана «средняя кривая» блеска «NanoSail-D» от 6 июня 2011 г. за восемь фотометрических периодов. Видно, что характер вариаций блеска на интервале около 1 мин не изменился.

Частотный спектр кривой блеска от 6 июня 2011 г. содержит несколько максимумов. Низкочастотная часть «частотограммы» показана на рис. 5.

На периодограмме и визуально на кривой блеска хорошо выделяется основной устойчивый период около 5.3 с (см. рис. 4, в и среднюю кривую на рис. 4, г). На этом интервале укладывается 12 равноотстоящих колебаний блеска (период около 0.44 с), соответствующие пики также хорошо выражены на периодограмме. Наибольший пик с периодом 1.31 сек составляет около четверти от основного, но он, как нам представляется, не соответствует физическому вращению КА. По-видимому, период 5.3 с является периодом быстрой прецессии оси вращения, а сам период вращения равен 1/3 от него, и на периодограмме выражен очень слабо в силу быстрого изменения амплитуды и среднего блеска КА за период.

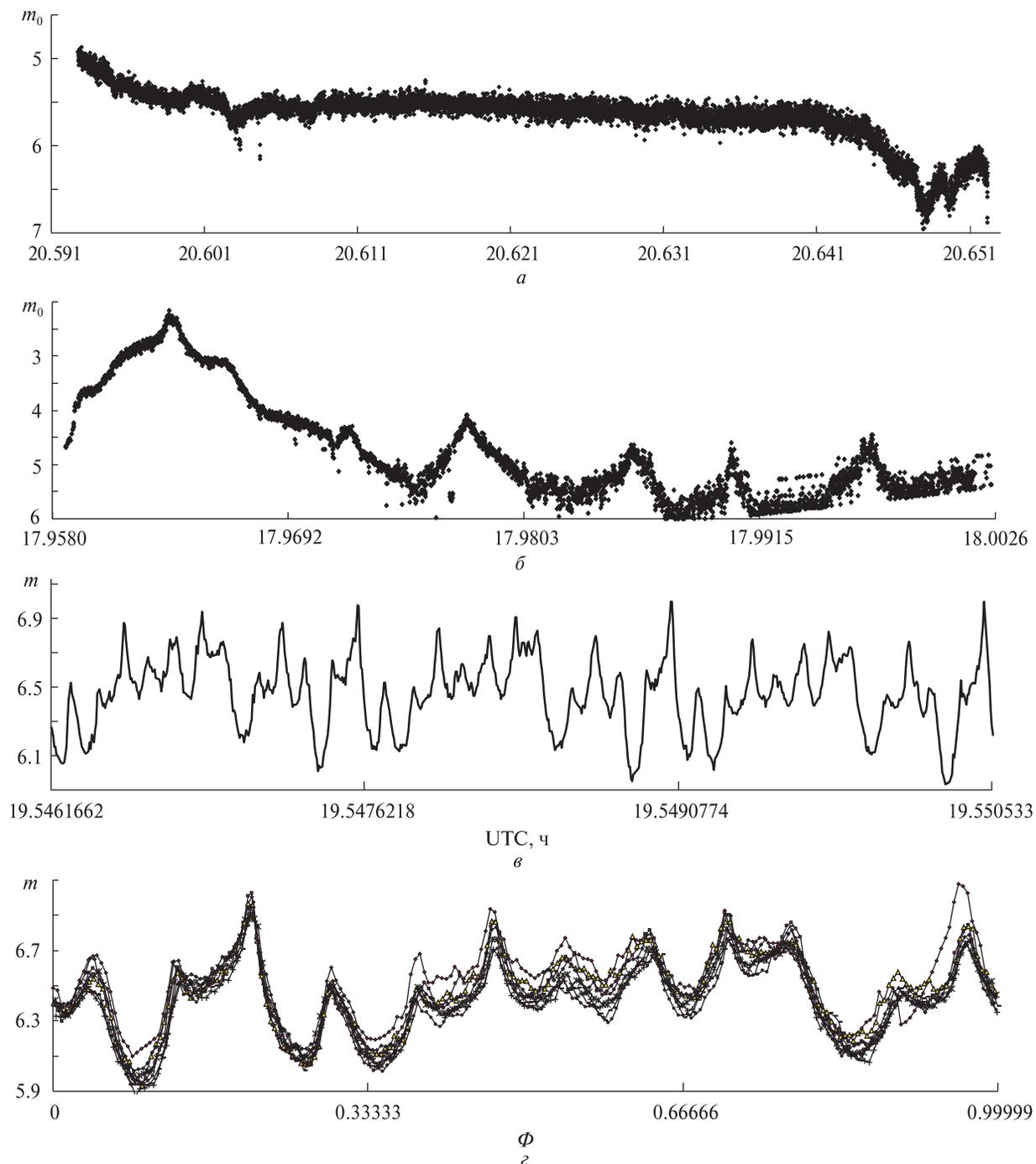


Рис. 4. Видимый блеск m_0 космического аппарата «NanoSail-D»: *a* — от 22 апреля 2011 г. (блеск — в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км); интервал наблюдений 3.6 мин (Одесса, телескоп КТ-50 с ТВ-ПЗС WAT-902H2 Sup), *б* — 26 апреля 2011 г. (первое прохождение); интервал наблюдений 2.6 мин (Евпатория, АЗТ-28, VNC-748), *в* — блеск m (в относительных звездных величинах) для трех фотометрических периодов (Одесса, 6 июня 2011 г., телескоп КТ-50), *г* — вид «средней» кривой блеска за восемь периодов (Одесса, 6 июня 2011 г., средний период $P = 5.24$ с, Φ — фаза вращения)

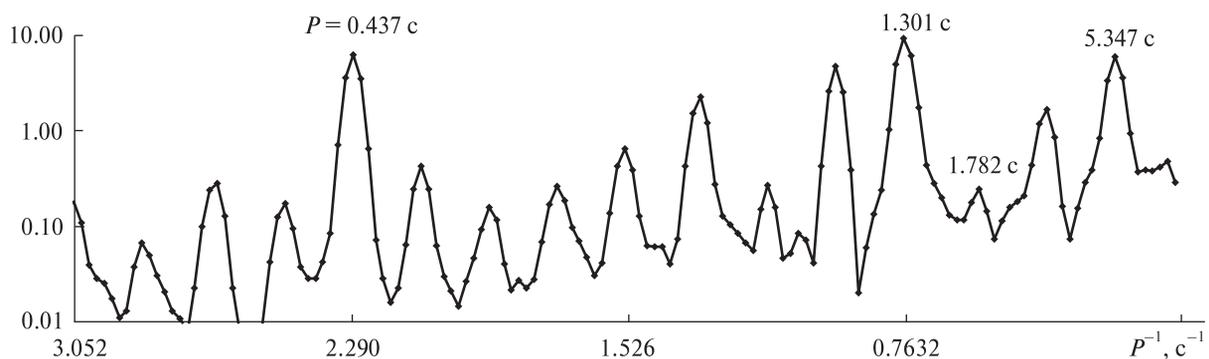


Рис. 5. Низкочастотная часть спектра кривой блеска от 6 июня 2011 г.

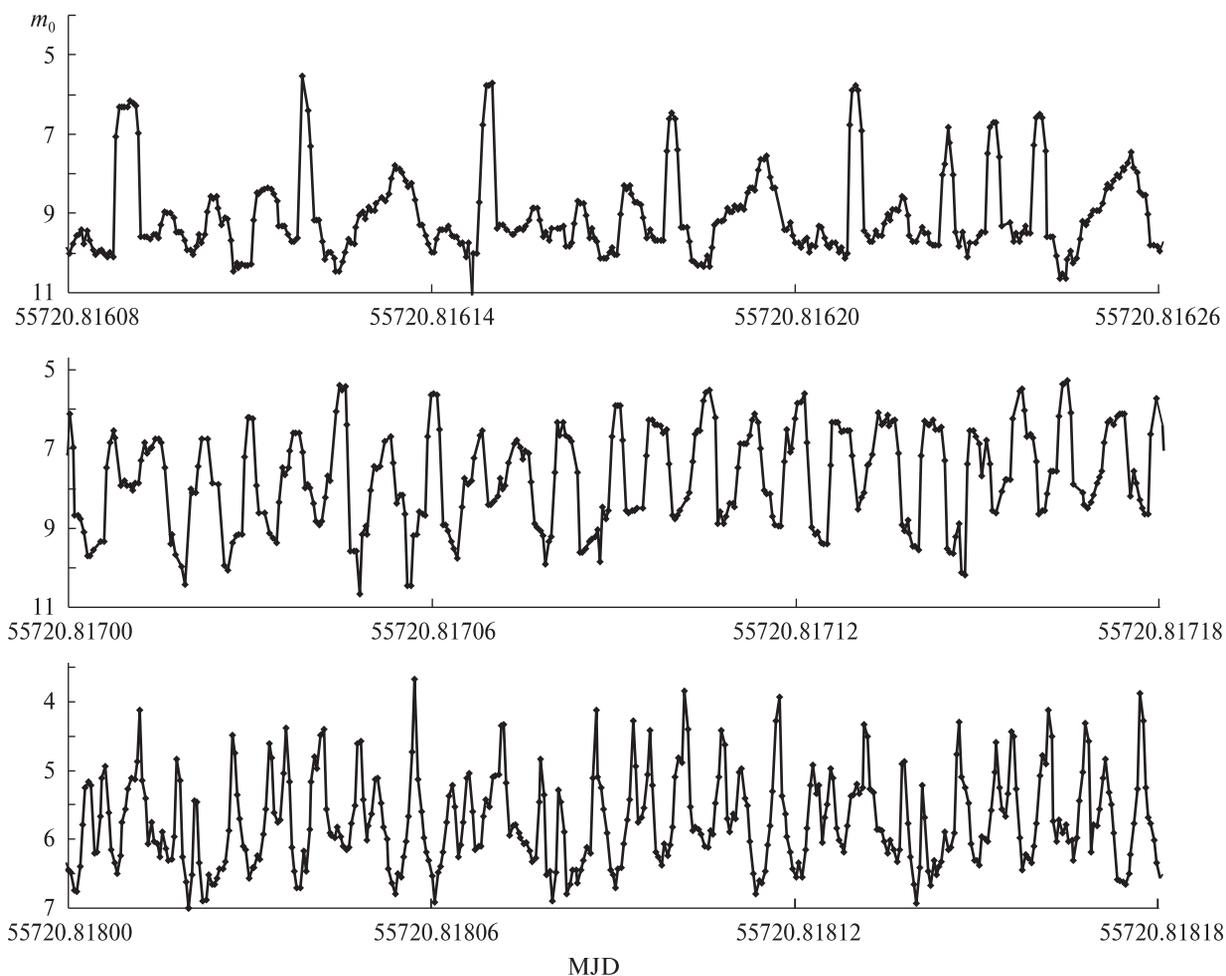


Рис. 6. Три фрагмента кривой блеска космического аппарата «NanoSail-D» от 8 июня 2011 г. (Евпатория, АЗТ-28, VNC-748)

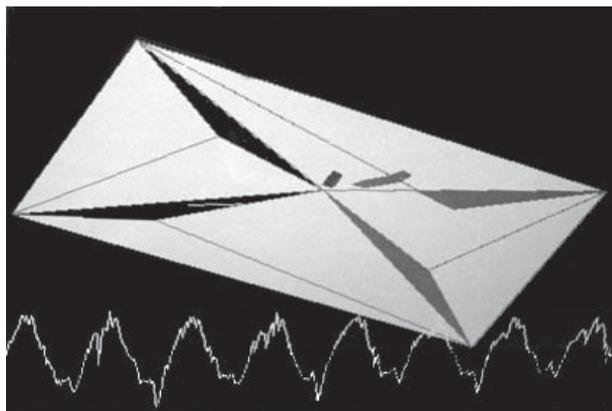


Рис. 7. Вид модели паруса с «прогибом» на середине одной стороны каждого сектора. Серым цветом показаны тени на поверхности паруса

Отметим, что также 6 июня за несколько часов до наблюдений в Одессе видеофильм пролета «NanoSail-D» записал любитель Кевин Феттер из Канады при условиях, подобных одесским. Кривые блеска оказались почти идентичными по форме, а период равен 5.27 с.

8 июня 2011 г. в Евпатории были получены новые продолжительные наблюдения «NanoSail-D». Изменения блеска однозначно свидетельствуют о быстром вращении КА. Фотометрический период уменьшился до 5.07 с, амплитуда достигает $2-4^m$, а число видимых всплесков яркости КА за период изменяется от 8 равноотстоящих до 12 неравноотстоящих. Характер

кривой блеска изменяется с изменением ракурса видимости КА. Его можно объяснить, предположив, что КА совершает уже четыре оборота за один фотометрический период, определяемый периодом прецессии оси вращения. Три фрагмента этого прохождения показаны на рис. 6.

МОДЕЛЬ ПАРУСА И ПРЕЦЕССИЯ ОСИ ВРАЩЕНИЯ

Объяснением наблюдаемого характера колебаний блеска КА, возможно, является то, что четыре треугольных сектора (секции) паруса не лежат в плоскости (так как они закреплены только в вершинах). Например, они могут быть выгнуты в форме «пропеллера». Такая форма паруса объясняет быстрое его вращение как результат действия раскручивающего момента сил от набегающего потока частиц. При вращении КА каждая секция дает свой блик и максимум на кривой блеска с периодичностью $1/4$ периода вращения и $1/12$ или $1/16$ периода прецессии. При этом изменение амплитуды колебаний блеска внутри одного оборота дает основание предполагать, что ось вращения не совпадает с осью симметрии паруса: выступающая штанга с массивным радиопередатчиком должна отклониться в сторону от набегающего потока частиц, что обеспечивает максимальный момент инерции тела.

Для исследования поведения КА «NanoSail-D» и объяснения результатов фотометрии нами было проведено предварительное моделирование возможных вариантов вращения КА и фор-

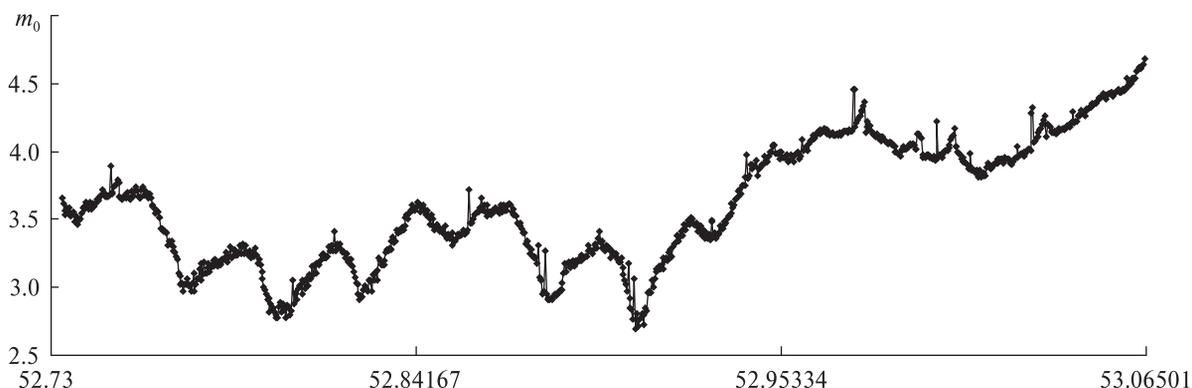


Рис. 8. Фрагмент теоретической кривой блеска модели паруса в виде прецессирующего «пропеллера». $P_{rot} = P_{prec}/3$. По оси абсцисс отложено время в относительных единицах — интервал соответствует одному периоду прецессии

мы его паруса (см. рис. 7). Основные алгоритмы и возможности программы оптико-геометрического моделирования описаны в работе [2].

На рис. 8 приведена теоретическая кривая блеска модели КА «NanoSail-D» для условий наблюдения 6 июня 2011 г. Вращение происходит вокруг оси, близкой к оси симметрии КА, с периодом, равным 1/3 периода прецессии. В данном варианте каждый из четырех секторов модели имеет «прогиб» на середине одной стороны, что делает ее похожей на «пропеллер». На рисунке показан участок, соответствующий одному витку прецессии оси вращения с раствором 6° вокруг направления орбитальной скорости КА. Моделирование показывает, что на кривой блеска проявляются все 12 локальных максимумов блеска от каждого отдельного сектора паруса (за три оборота), а их амплитуда изменяется по мере пролета КА над пунктом наблюдения. В целом амплитуда колебаний блеска близка к наблюдаемой, однако для описания больших колебаний блеска КА 8 июня необходимо уточнить соотношение зеркального и диффузного коэффициентов отражения поверхности паруса.

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Новые фотометрические наблюдения КА «NanoSail-D» удалось получить в Одессе 16 августа в 18^h37^m UTC (длительность 3.8 мин, фотометрический период равен 2.88 с) и 17 августа 2011 г. в 18^h19^m UTC (длительность 0.7 мин, период — 0.86 с). Кривые блеска в оба прохождения имеют амплитуду 2—3^m, одинаковый характер колебаний блеска внутри фотометрического периода и, по-видимому, период вращения, равный четверти от периода прецессии $P_{rot} = P_{prec}/4$.

Отметим, что любители также внесли свой вклад в исследование вращения атмосферного паруса. Наблюдатель М. Ландбрэк (Германия) с помощью простой камеры записал треки КА среди звезд 24 мая и 3 июня 2011 г. и измерил блеск спутника вдоль трека [http://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=08&month=06&year=2011]. На первой кривой период составляет около 6.5 с. На последней кривой блеска можно увидеть период модуляции около 5.5 с, при ос-

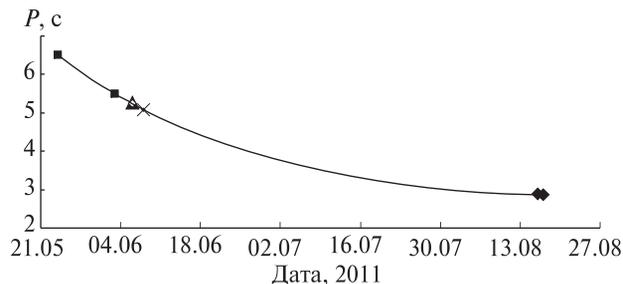


Рис. 9. Изменение периода вращения (прецессии) космического аппарата «NanoSail-D» по измерениям М. Лангбрэка (квадратики), К. Феттера (треугольник), НЦУИКС (крестик) и АО Одесского университета (ромбики)

новном колебании с периодом около 1.4 с. Амплитуда близка к 0.3^m.

На рис. 9 показан итоговый ход уменьшения периода вращения (прецессии) КА «NanoSail-D» на всем интервале полученных наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутник «NanoSail-D» имеет сложную кинематику вращения, которая отражается в постоянно изменяющихся кривых блеска. Ориентация оси вращения, по-видимому, не постоянна, и имеет место быстрая прецессия, скорость которой плавно увеличивается, т. е. КА продолжает раскручиваться. Соотношение периода прецессии P_{prec} оси вращения и периода собственного вращения P_{rot} изменяется, и в разное время было кратно 3 и 4. Вращение явилось следствием гибкости паруса и влияния на него значительных динамических нагрузок, в результате чего поверхность приняла форму, которая способствовала преобразованию момента импульса набегающего потока частиц в момент вращения паруса. Проведенное моделирование показывает, что прецессия оси вращения КА происходит вокруг направления орбитальной скорости спутника.

«NanoSail-D» находится на орбите, его история еще не окончена, и работа над определением параметров его вращения и характером торможения в атмосфере продолжается. Однако можно сказать, что форма паруса в виде отдельных секций, закрепленных лишь по углам, приводит к возникновению вращающего момента. Это снижает эффективность работы паруса, а в дру-

гих случаях может привести, например, к скручиванию троса крепления паруса.

1. Бурлак Н., Драгомирецкий В., Кошкин Н. и др. Наблюдения низкоорбитальных КО с телевизионной ПЗС-камерой // Наблюдение околоземного космического пространства (Материалы Междунар. конф.), Звенигород, Россия, 23—25 января 2007 г. — (<http://lfvn.astronomer.ru/report/0000018/Od/index1.htm>).
2. Меликянц С., Шакун Л., Кошкин Н. и др. Использование оптико-геометрического моделирования для интерпретации наблюдаемых кривых блеска ИСЗ // *Odessa Astron. Pubs.* — 2007. — 20, part 2. — P. 72—75.
3. Alhorn D. C., Casas J. P., Agasid E. F., et al. NanoSail-D: The small satellite that could! // *Proceedings of the 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, UT, USA, 8—11 Aug. 2011. — Paper: SSC11-VI-1. — (<http://smallsat.org/sessions/session6>).

Надійшла до редакції 01.10.11

N. I. Koshkin, E. A. Korobeynikova, V. V. Lopachenko, S. M. Melikyants, S. L. Strakhova, L. S. Shakun

ON THE MOTION OF A MICROSATELLITE WITH THE SAIL IN THE ATMOSPHERE (NANOSAIL-D)

The drag of the satellite NanoSail-D with the sail in the Earth's upper atmosphere is considered and the satellite motion around the center of mass is studied. The satellite is a prototype of future mechanisms for accelerated deorbit of the space debris. The satellite's dynamics is supposed to be a cause of the insufficiently quick braking of the sail. Photometric observations discover different changes in the satellite's brightness, including some regular variability. In the latter case, the photometric period is about several seconds with 12 clearly visible variations within the period. This favours the view that in the result of interaction with a particle flux of the upper atmosphere the sail switched over to the mode of rotation around an axis which does not coincide with the axis of symmetry and, possibly, rapidly precesses in space. Some results of the simulation of the NanoSail-D rotation are presented.

УДК 004.932: 523.44: 621.383.7

В. Е. Саваневич¹, А. Б. Брюховецкий², А. М. Кожухов², Е. Н. Диков³, В. П. Власенко²

¹Харківський національний університет радіоелектроніки МОНМС України, Харків

²Національний центр управління та випробувань космічних засобів

Державного космічного агентства України, Євпаторія

³Науково-дослідний проектно-конструкторський інститут мікрографії, Харків

ПРОГРАММА CoLiTec АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ СО СЛАБЫМ БЛЕСКОМ

Представлено короткий опис програми для автоматизованого виявлення астероїдів на серії ПЗ-кадрів. Програма складається з окремих модулів, які описані у роботі. Наведено обчислювальні методи, які були використані при створенні програми, результати застосування програми у обсерваторіях, де спостерігаються астероїди.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение программ автоматизированного обнаружения астероидов позволяет значительно повысить эффективность работы обсерваторий, наблюдающих астероиды. Данные сайта Центра малых планет (Minor Planet Center, MPC) Международного астрономического союза [<http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/CountObsByYear.txt>] говорят о том, что обсерватории, оснащенные подобным программным обеспечением, получают большую часть измерений астероидов, поступающих в MPC. При этом в открытом доступе подобных программ практически нет, а имеющиеся обладают низкими показателями качества обнаружения [1]. На момент начала исследований в Украине и в других странах СНГ не было ни одной действующей программы автоматизированного обнаружения астероидов и комет. Это обстоятельство приводило к весьма низкой эффективности наблюдений малых тел Солнечной системы в обсерваториях этих стран. Такая программа была разработана авторами в 2009 — 2010 гг. и названа CoLiTec.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Программа CoLiTec организационно состоит из независимых модулей (рис. 1). В качестве исходных данных в программе используется серия ПЗС-кадров с изображением участка небесной сферы, а также опорный звездный каталог.

В модуле внутрикадровой (первичной) обработки серии кадров сначала учитываются дефектные («битые» и «горячие») пиксели ПЗС-матрицы и исключаются крупноструктурные составляющие изображения, обычно соответствующие фону.

После этого методом [7], разработанным авторами, складываются кадры с накоплением сигнала от движущегося объекта (СКДО) с получением суперкадров. При этом для оценки взаимного смещения кадров проводится взаимное отождествление отметок, отождествленных со звездным каталогом, на базовом и складываемом кадрах. Учет дробности взаимного сдвига складываемых кадров и направления движения астероида проводится с применением «площадного» похода. Суть «площадного» подхода заключается в сложении в суммарный пиксель (суперпиксель) долей яркости исходных пикселей, пропорциональных долям площадей исходных пикселей, попадающим в площадь текущего суперпикселя (рис. 2).

© В. Е. САВАНЕВИЧ, А. Б. БРЮХОВЕЦКИЙ, А. М. КОЖУХОВ, Е. Н. ДИКОВ, В. П. ВЛАСЕНКО, 2012

итогового кадра относительно текущего кадра по соответствующим координатам, t_1 — первый кадр подсерии, для которой проводится СКДО, $N_{\text{СКДО}}$ — количество кадров подсерии, участвующих в СКДО, $\gamma_{00r} = (1 - |d\Delta x_r|)(1 - |d\Delta y_r|)$, $\gamma_{10r} = |d\Delta x_r|(1 - |d\Delta y_r|)$, $\gamma_{01r} = (1 - |d\Delta x_r|)|d\Delta y_r|$, $\gamma_{11r} = |d\Delta x_r||d\Delta y_r|$ — веса пикселя, определяемые «площадным подходом», $d\Delta x_r = \Delta x_r - E(\Delta x_r)$, $d\Delta y_r = \Delta y_r - E(\Delta y_r)$, $\Delta x_r = \hat{V}_x(\tau_r - \tau_0) + \hat{d}x_r$, $\Delta y_r = \hat{V}_y(\tau_r - \tau_0) + \hat{d}y_r$ — значения сдвигов текущего кадра относительно базового по соответствующим координатам,

$$\hat{d}x_r = \frac{1}{N'_{\text{пер}}} \sum_{i=1}^{i=N'_{\text{пер}}} \sum_{j=1}^{j=N'_{\text{пер}}} (x_{ji} - x_{i0}); \hat{d}y_r = \frac{1}{N'_{\text{пер}}} \sum_{i=1}^{i=N'_{\text{пер}}} \sum_{j=1}^{j=N'_{\text{пер}}} (y_{ji} - y_{i0})$$

— используемые оценки смещения координат центра текущего кадра относительно координат центра базового кадра, x_{i0} , y_{i0} — координаты i -й отметки базового кадра, x_{jr} , y_{jr} — координаты j -й отметки текущего кадра, отождествленной с i -й отметкой базового кадра, $N'_{\text{пер}}$ — количество взаимосоответствующих пар отметок на текущем и базовом кадре, \hat{V}_x, \hat{V}_y — используемые оценки скоростей видимого движения астероида в картинной плоскости телескопа с ПЗС-камерой по соответствующим координатам, τ_0 — временная привязка кадра, принятого за базовый, τ_r — временная привязка текущего складываемого кадра, $E(\cdot)$ — операция выделения целой части,

$$j_{xr} = \begin{cases} -1, & \Delta x_r < 0, \\ 1, & \Delta x_r \geq 0, \end{cases} \quad j_{yr} = \begin{cases} -1, & \Delta y_r < 0, \\ 1, & \Delta y_r \geq 0 \end{cases}$$

— коэффициенты, определяющие выбор смещаемых пикселей, амплитуда которых записывается в очередной пиксель суперкадра, в зависимости от направления (знака) сдвига складываемого кадра относительно базового по каждой координате, M_p — элемент матрицы размытия.

Согласно (1) в ik -й пиксель суперкадра записываются амплитуды всех пикселей текущего кадра, расположенные в пределах размера матрицы размытия от основного пикселя текущего кадра. Вес записываемой амплитуды от каждого пикселя определяется весом соответствующего элемента матрицы размытия, а также весом основного пикселя, определяемого долей его площади, попадающей в площадь текущего суперпикселя.

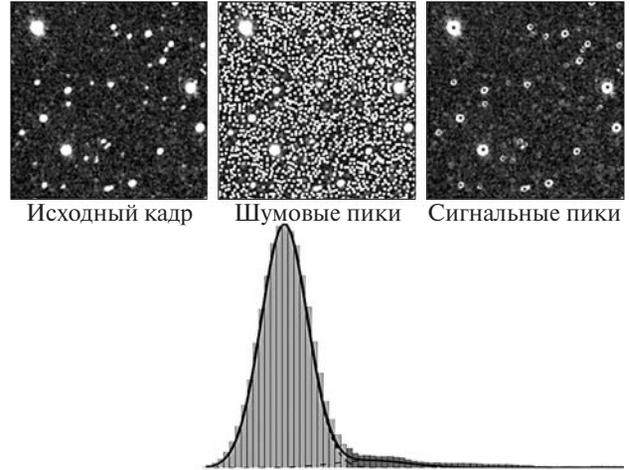


Рис. 3. Решающее правило обнаружения сигналов от небесных объектов

На полученных после СКДО суперкадрах проводится предварительная селекция сигналов от небесных объектов, основанная на сравнении с порогом значений пространственной свертки между принятым излучением, в окрестности пика изображения, и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала.

При этом считается, что сигналы от небесных объектов формируются в окрестностях пиков изображения, а значения пространственной свертки для «фоновых» пиков изображения на кадре распределены по нормальному закону (рис. 3). Решающее правило предварительной селекции сигналов от небесных объектов в этом случае принимает вид

$$A_{it} = \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОС}}} v_{ikt} A_{ikt} > \Pi_1,$$

где A_{it} — амплитуда сигнала, подлежащего обнаружению, соответствующая пространственной свертке между принятым излучением в окрестности пика изображения и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала.

При этом пороговое значение Π_1 для каждого кадра равно

$$\Pi_1 = \bar{A}_t + k_{\text{от}} \hat{\sigma}_{At},$$

где \bar{A}_t — среднее значение пространственной свертки, соответствующее шуму, $\hat{\sigma}_{At}$ — СКО шумовых значений свертки, $k_{\text{от}}$ — коэффициент

пропорциональности, определяемый для каждого телескопа с ПЗС-камерой экспериментально и находящийся обычно в пределах между 2 и 3.

Для определения порога отбраковки пиков изображения, в окрестностях которых отсутствуют сигналы от небесных объектов, производится приближенное выделение нормальной («фоновой») составляющей смеси распределений значений пространственной свертки. Это делается по итерационной вычислительной схеме, основанной на свойстве равенства значений медианы и среднего для нормально распределенных случайных величин.

Далее, в модуле внутрикадровой обработки оцениваются координаты и амплитуды сигналов на суперкадрах (формирование отметок) методом, уточненным в работе [4]. Используемый метод учитывает факт оценки непрерывных параметров (положение объекта) по дискретному пространству наблюдений (значения потенциалов пикселей ПЗС-матрицы). Данный учет стал возможен благодаря использованию математического аппарата группированных выборок для описания потенциалов пикселей, соответствующих координатам падения сигнальных и шумовых фотонов. Метод впервые в рамках технологии группированных выборок расширяет модель координат падения шумовых фотонов до плоской шумовой подложки с параметрами, постоянными в пределах исследуемого строба.

В рамках метода [4] оценка координат производится решением системы трансцендентных уравнений, которые решаются методом последовательных приближений:

$$\begin{aligned} \hat{x}_t &= \frac{\sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt} m_{x_i}^{\text{пок}}}{\sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt}}, \\ \hat{y}_t &= \frac{\sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt} m_{y_k}^{\text{пок}}}{\sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt}}, \\ v_{ikt}^* &= A_{ikt} / \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} A_{ikt}, \\ \lambda_{ikt} &= \frac{\hat{p}_1 F_{y_k}(y_t; \sigma_\Phi^2) F_{x_i}(x_t; \sigma_\Phi^2)}{v_{ikt}(\Theta)}, \\ m_{x_i}^{\text{пок}} &= m_x + \frac{\sigma^2}{F_{x_i}(m_x; \sigma^2)} (N_{x_{ij}}(m_x; \sigma^2) - N_{x_{iw}}(m_x; \sigma^2)), \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{z_i}(m_z; \sigma^2) = \int_{z_{ji}}^{z_{ji}^*} N_z(m_z; \sigma^2) dx,$$

$$N_z(m_z; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(z - m_z)^2\right],$$

$$\hat{p}_1 = \frac{1}{N_{\text{СВКОс}}} \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} \lambda_{ikt},$$

где $N_{\text{СВКОс}}$ — количество пикселей в исследуемом стробе внутрикадровой обработки, в которых предполагается наличие сигнала (СВКОс), v_{ikt}^* — опытная относительная частота попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы в t -м кадре, A_{ikt} — амплитуда ik -го пикселя t -го ПЗС-кадра, \hat{x}_t — оценка координаты x астероида на t -м ПЗС-кадре, $m_{x_i}^{\text{пок}}$ — локальное математическое ожидание случайной величины на интервале $[x_{ni}, x_{ki}]$ [3], \hat{p}_1 — оценка относительного веса сигнальных фотонов в СВКОс.

Перед решением системы уравнений (2) производится вычитание наклонной плоской шумовой подложки из данного сигнала в пределах СВКО:

$$v_{ikt}^* = v_{ikt}^* - (\hat{A}_{\text{ш}}^{\text{int}} x_{itc} + \hat{B}_{\text{ш}}^{\text{int}} y_{kte} + \hat{C}_{\text{ш}}^{\text{int}}),$$

где v_{ikt}^* — опытная частота попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы, принадлежащий области предполагаемого наличия сигнала от астероида, x_{itc}, y_{kte} — прямоугольные координаты привязки ik -го пикселя ПЗС-матрицы, принадлежащего области предполагаемого наличия сигнала от астероида; $\hat{A}_{\text{ш}}^{\text{int}} = \Delta_{\text{ПЗС}}^2 A_{\text{ш}}$, $\hat{B}_{\text{ш}}^{\text{int}} = \Delta_{\text{ПЗС}}^2 B_{\text{ш}}$, $\hat{C}_{\text{ш}}^{\text{int}} = \Delta_{\text{ПЗС}}^2 C_{\text{ш}}$ — интегральные параметры плоской шумовой подложки, определяемые использованием процедуры МНК-оценки.

По полученным оценкам координат сигнала от небесных объектов в системе координат ПЗС-кадра проводится оценка их экваториальных координат [5].

Полученные в результате работы модуля внутрикадровой обработки данные представляются в виде совокупности отметок. Отметки содержат оценки амплитуд и экваториальные координаты предполагаемых небесных объектов, а также оценки координат данных объектов в системе координат ПЗС-матрицы базового кадра.

В модуле формирования внутреннего каталога неподвижных объектов (внутренний каталог)

производится отбор и отбраковка объектов, неподвижных на серии кадров.

В модуле отождествления отметок проводится отождествление отметок от неподвижных объектов со звездами опорного звездного каталога решением венгерским методом задачи о назначениях на двудольном графе, одна доля которого представляет отметки кадра, а вторая — объекты звездного каталога. В результате формируются взаимосоответствующие пары «звезда — отождествленная со звездой отметка», которые используются в модуле внутрикадровой (первичной) обработки и в модуле оценки видимого блеска.

В модуле оценки видимого блеска объектов определяются коэффициенты разработанной в работе [8] двухдиапазонной кусочно-линейной модели зависимости значения видимого блеска астероида от амплитуды его сигнала на ПЗС-кадре (модели фотометрического пересчета):

$$\begin{cases} \hat{m}_{it} = m_{0it} + k_{\text{фот}1t} A_{\text{lg}it}, & \text{при } A_{it} \geq A_{\text{кр}t}; \\ \hat{m}_{it} = \hat{m}_{it} + k_{\text{фот}2t} (A_{\text{lg}it} - \bar{A}_{\text{lg}1t}), & \text{при } A_{it} < A_{\text{кр}t}, \end{cases}$$

где A_{it} — амплитуда сигнала на ПЗС-кадре, соответствующего оптическому сигналу от i -й опорной звезды, \hat{m}_{it} — оценка звездной величины сигнала от i -й опорной звезды на t -м кадре, m_{0it} — фотометрический нуль-пункт (видимый блеск звезды, оптический сигнал от которой при данных условиях наблюдения соответствует отметке с единичной амплитудой), $k_{\text{фот}1t}$, $k_{\text{фот}2t}$ — коэффициенты пересчета, $\bar{A}_{\text{lg}1t} = -2.5 \lg A_{\text{кр}t}$, $A_{\text{кр}t}$ — критическое значение амплитуды сигнала, для амплитуд меньше которого однодиапазонная МНК-оценка отражает соотношение между данными параметрами с ошибками, превышающими предварительно заданное значение, m'_{it} — оценка видимого блеска, соответствующая критическому значению амплитуды.

Коэффициенты m_{0it} , $k_{\text{фот}1t}$, $k_{\text{фот}2t}$ определяются при помощи МНК по совокупности объектов внутреннего каталога, отождествленных со звездами. Критическое значение амплитуды определяется решением методом Фибоначчи оптимизационной задачи по критерию минимума суммы квадратов невязок между каталожным и

оценочным значением видимого блеска звезд [6]. Затем по полученным коэффициентам модели фотометрического пересчета оценивается видимый блеск объектов, принадлежащих данной серии ПЗС-кадров, и формируется порог отбраковки по видимому блеску.

Подобный подход связан с тем, что использование линейной однодиапазонной модели фотометрического пересчета для большого диапазона значений амплитуд приводит к снижению точности оценки видимого блеска в области малых амплитуд. А именно в области малых амплитуд находится большая часть сигналов от астероидов, что приводит к падению точности оценки блеска большинства астероидов. Применение квадратичной однодиапазонной модели фотометрического пересчета не приводит к повышению точности оценки из-за линейной зависимости между входным и выходными сигналами в ПЗС-камере [11]. Указанные обстоятельства привели к введению двухдиапазонной кусочно-линейной модели фотометрического пересчета.

В модуле предварительного обнаружения траекторий производится предварительное обнаружение объектов на основе накопления статистик, пропорциональных энергии сигналов, вдоль возможных траекторий движения объекта (методом собирания света) [9]. Данное накопление сигналов реализуется за счет использования многозначного преобразования координат объектов, допускающего многоэтапную реализацию. Многозначное преобразование позволяет накопить сигналы вдоль всех возможных траекторий движения небесных тел.

Физически наблюдаемая область пространства, в соответствии с принятой моделью движения, разбивается на пересекающиеся пространственно-временные стробы (пространственные стробы, перемещающиеся от кадра к кадру) так, чтобы из одного из них объект за время обнаружения не вышел [2]. Каждому стробу отводится накопитель, а сигналы от небесных объектов накапливаются во всех накопителях стробов, которым они принадлежат. При реализации метода в качестве модели видимого движения объекта используется модель прямолинейного и равномерного движения объекта на плоскости.

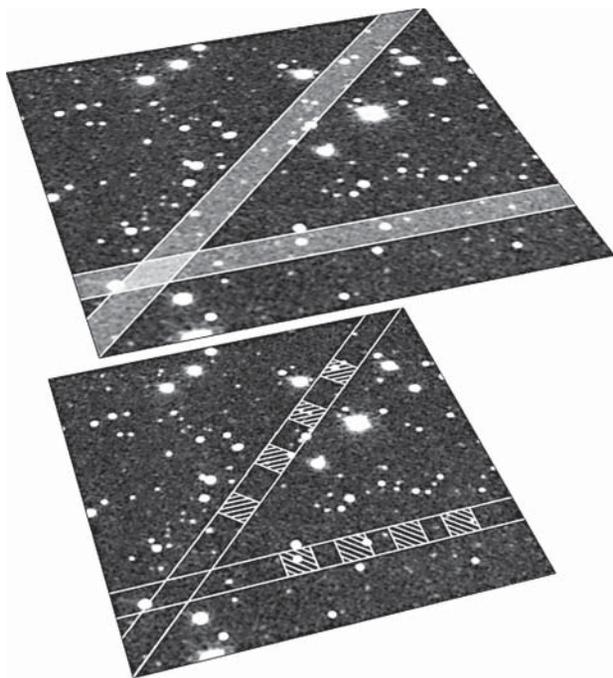


Рис. 4. Двухэтапность метода предварительного обнаружения астероида

На первом этапе (рис. 4) отдельные траектории объединяются в классы (в один класс входят все траектории соответствующие одной прямой) и исследуются соответствующие пространственные области. При принятии решения о возможном наличии небесного тела на одной из исследуемых прямых используется второй этап – исследование пространственно-временных областей, принадлежащих выделенной прямой. В качестве энергетической статистики используется оценка видимого блеска объекта. В методе обеспечивается возможность попадания отметки от сигнала в два или три строка по траверсной дальности и начальному положению (рис. 5). Данная возможность необходима для реализации полного покрытия зоны обзора при использовании оценок координат объектов с ошибками.

В модуле амплитудно-координатного обнаружения производится МНК-оценка параметров движения предварительно обнаруженных объектов, а также принятие решения о наличии среди них астероидов (принятие решения об обнаружении астероида). Решающее правило (РП)

для случая ненулевой вероятности пропуска отметки от астероида на отдельных кадрах серии имеет вид [10]:

$$\sum_{t=1}^K \gamma_{tjx} (x_{kt(j)} - \hat{x}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^K \gamma_{tjy} (y_{kt(j)} - \hat{y}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^K \gamma_{ja} (A_{kt(j)} - A_{\theta_jcp})^2 \geq \Pi'_{tre}(K), \quad (3)$$

$$\Pi'_{tre}(K) = \Pi_{tre} - \sum_{t=K+1}^T \ln \frac{1 - D_{\theta t(j)}}{1 - F_t},$$

где $\Pi'_{tre}(K)$ – порог обнаружения астероида при условии формирования отметок от астероида на K из T кадров, Π_{tre} – порог обнаружения астероида, определяемый экспериментально, $\gamma_{tjx} = 1/\sigma_{tjx}^2$, $\gamma_{tjy} = 1/\sigma_{tjy}^2$ – весовые коэффициенты, прямо пропорциональные точности оценки координат объекта, $\gamma_{ja} = 1/\sigma_{ja}^2$ – весовой коэффициент, зависящий от точности оценки амплитуды сигналов.

РП обнаружения астероида (3) предписывает на каждом кадре выбирать «лучшую» отметку для продолжения траектории исследуемого объекта. «Лучшая» отметка должна иметь не очень большие отклонения от траектории астероида (кинематическая составляющая), а значение амплитуды «лучшей» отметки (соответствующая оценка видимого блеска) должно не очень сильно отличаться от амплитуды других отметок, сформированных сигналами от данного объекта (энергетическая составляющая). Применение в РП подобной энергетической составляющей связано с большим разбросом (в разы) амплитуд сигналов от астероидов при резких изменениях условий наблюдения за время длительных серий наблюдений.

В модуле отождествления траекторий производится отождествление обнаруженных астероидов, с известными астероидами, которые находились на исследуемом участке небесной сферы. Данные об известных астероидах получают из локальной базы параметров орбит астероидов или из сервера MPC при помощи модуля чекера. Модуль чекера также дает возможность получить NEOCP-рейтинг вновь открытых астероидов с сайта MPC [http://www.minorplanetcenter.net/iau/NEO/PossNEO.html].

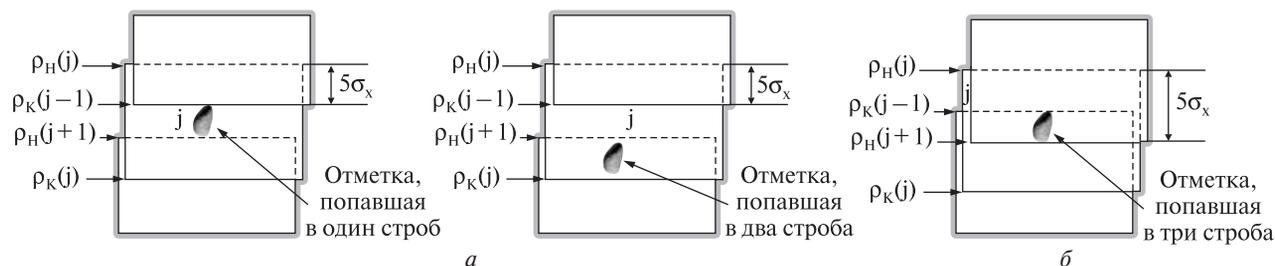


Рис. 5. Обеспечение возможности попадания отметки от сигнала в несколько стробов на примере стробов по траверсной дальности: *а* — обеспечение возможности попадания отметки в один или два строба, *б* — обеспечение возможности попадания отметки в три строба

В модуле визуального контроля результата наблюдателю предоставляется возможность окончательного принятия решения об обнаружении астероидов. Контроль результатов осуществляется путем визуального наблюдения участка ПЗС-кадров серии, в котором обнаружен объект, методом бликования. По окончании работы модуля совокупность объектов, по которым было принято решение об их принадлежности астероидам, преобразуется в отчет о наблюдениях в формате, принятом в MPC (MPC-report). Полученный отчет с измерениями отправляется наблюдателем на сервер MPC посредством электронной почты.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

На сегодняшний день программа успешно эксплуатируется в Андрушевской астрономической обсерватории (ААО) (телескоп Цейса с диаметром зеркала 60 см, оснащенный ПЗС-камерой FLI PL09000). За время использования программы с мая 2010 г. по сентябрь 2011 г. ААО было открыто 66 астероидов [http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html]. В мае 2010 г. в ААО было сделано первое открытие астероида в автоматизированном режиме на территории СНГ. С 27 ноября 2010 г. программа эксплуатируется в российской дистанционно управляемой обсерваторией ISON-NM, расположенной в штате Нью-Мексико (США) (астрограф Astroworks Centurion-18 с диаметром зеркала 45 см, оснащенный ПЗС-камерой FLI ML09000-65). При этом в период с 27 ноября 2010 г. по сентябрь 2011 г. были открыты 471 астероид и две кометы. 10 декабря

2010 г. с использованием программы CoLiTec была открыта комета C/2010 X1 (Elenin) [http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K10/K10XA1.html], которая стала первой кометой, открытой российским астрономом за последние 20 лет. Всего при помощи программы CoLiTec послано в MPC 158 015 измерений, открыто 539 объектов. Среди них две кометы (C/2010 X1 (Elenin) и P/2011 NO1 [http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11O10.html]), два троянских астероида Юпитера (2011 QJ9, 2011 QQ47) и один AC3 (2011 QY37). Еще двум астероидам были посвящены отдельные электронные циркуляры MPC (2011 HY52, AAO, и 2011 QD23, обсерватория ISON-NM).

ВЫВОДЫ

Программа CoLiTec является первой на территории СНГ программой автоматизированного обнаружения астероидов. Программа успешно используется для обнаружения новых астероидов и комет в двух обсерваториях, наблюдающих малые тела Солнечной системы, что подтверждается более чем 500 открытиями с ее помощью объектами и может быть использована и в других астрономических обсерваториях Украины и мира, занимающихся наблюдениями астероидов.

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на повышении эффективности используемых в программе методов (уменьшение вычислительных затрат, повышение точности оценки местоположения сигналов от объектов, снижении уровня ложных обнаружений астероидов).

1. Новичонок А. О. С/2010 X1 (Elenin): первая комета в новейшей истории России // Открытие. Исследования. Наблюдения. — Тула: Фрешбук, 2011. — 78 с.
2. Пат. України на корисну модель № 58937. Спосіб виявлення рухомих об'єктів / Саваневич В. Є., Кожухов О. М., Брюховецький О. Б., Діков Є. М., Власенко В. П. // ДП «Український інститут промислової власності», бюл. № 8, 26.04.2011 р.
3. Саваневич В. Е. Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении // Радиоэлектроника и информатика. — 1999. — № 1. — С. 4—8.
4. Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Оценка координат астероида на дискретном изображении // Радиотехника. — 2010. — Вып. 162. — С. 78—86.
5. Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре // Системы обработки информации: 36. науч. пр. — Харьков: ХУПС, 2010. — Вып. 6 (87). — С. 172—179.
6. Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б. и др. Определение оптимального критического значения амплитуды для двудиапазонного фотометрического пересчета // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 4/9 (52). — С. 4—7.
7. Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., Власенко В. П. Метод сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от астероида со слабым блеском и ненулевым видимым движением на серии ПЗС-кадров // Системы озброєння та військова техніка. — Харьков: ХУПС, 2010. — Вып. 3 (23). — С. 154—159.
8. Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., Власенко В. П. Оценка блеска астероида по амплитуде его сигнала на ПЗС-кадре // Системы управління навігації та зв'язку: 36. науч. пр. — Київ: ЦНДІ НіУ, 2010. — Вып. 3 (15). — С. 46—50.
9. Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., Диков Е. Н. Метод обнаружения астероидов, основанный на накоплении сигналов вдоль траекторий с неизвестными параметрами // Системы обработки информации: 36. науч. пр. — Харьков: ХУПС, 2011. — Вып. 2 (92). — С. 137—144.
10. Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., Диков Е. Н. Обнаружение и оценка параметров траектории астероида // Радиоэлектроника и информатика. — 2011. — Вып. 1 (52). — С. 15—21.
11. McLean I. S. Electronic Imaging in Astronomy. Detectors and Instrumentation (Second Edition). — Berlin: Springer-Praxis, 2008. — 552 p.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. E. Savanevich, A. B. Bryukhovetskiy,
A. M. Kozhukhov, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko

THE PROGRAM COLITEC FOR AUTOMATED DETECTION OF FAINT CELESTIAL BODIES

A short description of the software program CoLiTec (CLT) for the automated detection of asteroids with the use of CCD frame series is given. The program consists of several separate modules. The computational procedures used for the software elaboration are described. Some results of the software application for the detection of small bodies of the solar system are presented.

УДК 629.78+521.3+520.3

В. К. Тарадий, А. В. Сергеев

Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України, Київ

НАЗЕМНАЯ ПОДДЕРЖКА СТАРТОВ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ

Описується застосування астрономічних комплексів високогірної обсерваторії Терскол для відстеження подій та процесів, що відбуваються у навколосемному просторі при космічних стартах. Наводяться практичні результати наземних оптичних спостережень з метою одержання високоточних траєкторних даних та контролю стану космічного апарата.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение успешной навигации искусственных небесных объектов (ИНО) в околоземном пространстве требует решения ряда задач:

- организации и выполнения специальных позиционных и фотометрических наблюдений на этапах выведения объекта на заданную орбиту, при переводе его в точку стояния, при полёте в окрестности этой точки, а также на различных этапах активного и пассивного полета объекта;

- независимого определения по данным наблюдений параметров орбитального движения небесных объектов с целью обеспечения прецизионного контроля качества управления их навигацией и верификации траекторных измерений, полученных другими техническими средствами;

- прогноза движения сопровождаемого космического аппарата и сопутствующих объектов;

- мониторинга окрестностей ИНО с целью обнаружения в непосредственной близости к нему посторонних объектов;

- независимого фотометрического и визуального контроля процессов на ИНО (раскрытие панелей солнечных батарей, разделение блоков ИНО, его вращение, выбросы газа, включение двигателей и др.);

- оперативного мониторинга объекта в критических точках и ситуациях (задержка для обработки и передачи координат и блеска не более 20—30 с).

Следует отметить, что дополнительные возможности при решении навигационных задач по данным оптических наблюдений ИНО с применением разработанной методики появились в связи с созданием на пике Терскол современного научного комплекса «Цейс-2000», включающего в качестве штатных приборов ПЗС-приемники излучения, а также допускающего использование оперативных методов обработки цифровых изображений [1, 3, 4].

Высокая проникающая способность комплекса «Цейс-2000» и автоматизация процесса цифровой обработки ПЗС-изображений обеспечили возможности поиска объектов и их фрагментов, наблюдения процессов фрагментации объектов в реальном времени на переходных и геостационарных орбитах, а также значительно снизили влияние климатических факторов и условий наблюдений. Начиная с 2004 г., после внедрения автоматической процедуры первичной обработки ПЗС-наблюдений и использования более точного каталога UCAC2, точности позиционных измерений значительно улучшились, и средние квадратичные погрешности результатов не превосходят 0.30".

С ноября 1997 г. по настоящее время астрономическая обсерватория на пике Терскол выполнила наземное сопровождение более 20 стартов космических аппаратов, включая проекты «Купон», «Ямал-100», «Бонум», «КазСат», «Тугауа 1», «Электро-Л» и другие. В табл. 1 приведены данные для некоторых стартов.

Оптические наблюдения с помощью астрономического комплекса двухметрового зеркального телескопа на пике Терскол позволяют независимо контролировать правильность отработки многих операций, выполняемых ИНО в период запуска, в том числе:

- определение параметров движения связки — разгонный блок (РБ) и космический аппарат (КА), а также сопутствующих объектов на переходной орбите;
- визуальные наблюдения процесса отделения КА от разгонного блока и определение параметров этого процесса;
- фрагментации блока КА (плановые и аварийные);
- фотометрические наблюдения и подтверждение степени раскрытия солнечных батарей КА;

- изучение параметров вращения КА и его фрагментов.

Для ярких объектов, с целью одновременного наблюдения событий на нескольких объектах или фрагментах, дополнительно использовались малые автоматические телескопы «Celestron 11» и «Meade 14», которые обеспечивали непрерывность как позиционных наблюдений, так и слежение за событиями и процессами на объектах и в окружающем пространстве [2].

ПОЗИЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРОГНОЗ ДВИЖЕНИЯ

Знание с высокими точностями положений ИНО и окружающих их объектов в заданные моменты времени имеет первостепенное значение для осуществления навигации в околоземном пространстве. Эти положения могут быть найдены лишь после определения их орбит по данным наблюдений и вычисления высокоточных значений эфемерид. Выбор модели сил, действующих на КА, зависит от длины орбитальной дуги, на которой вычисляется движение КА, и высоты перигея его орбиты. Выполненные нами мо-

Таблица 1. Поддержка стартов астрономическими комплексами на пике Терскол

Дата	Название ИСЗ	Номер по каталогу NORAD	Количество наблюдений		Средние квадратичные ошибки наблюдений	
			позиционных	фотометрических	позиционных	фотометрических
28.05—31.05.1999	«Горизонт-28»	93069A	17	—	0.5—1.1"	—
28.05—31.05.1999	«Горизонт-31»	96005A	31	—	0.4—0.7"	—
22.06—24.06.1999	«Raduga 1-3»	94008A	22	—	0.5—0.6"	—
20.07—22.08.1999	«Бонум-1»	98068A	77	—	0.7—1.5"	—
08.09—22.09.1999	«Ямал-100»	99047B	81	380	0.8—1.2"	0.3—0.7 ^m
08.09—24.09.1999	«Ямал-100»	99047C	77	280	0.7—1.0"	0.4—0.8 ^m
07.10—06.11.1999	«Ямал-100»	99047B	50	243	0.7—1.5"	0.3—0.7 ^m
01.11—02.11.1999	«Ямал-100»	99047C	17	—	0.9—1.6"	—
15.11—03.02.2000	«Горизонт-28»	93069A	79	—	0.7—1.7"	—
20.11—03.02.2000	«Ямал-100»	99047C	147	—	0.5—1.5"	—
01.02—30.04.2000	«Горизонт-28»	93069A	149	—	0.8—1.4"	—
01.02—30.04.2000	«Ямал-100»	99047C	148	—	0.8—1.2"	—
14.05—22.06.2000	«Ямал-100»	99047B	54	237	0.3—1.2"	0.2—0.4 ^m
17.06—21.06.2000	«БРИЗ-М»	00029B	25	202	0.8—1.3"	0.05—0.4 ^m
08.06—09.06.2000	«Горизонт-45»	00029A	20	—	0.8—1.3"	—
30.11—05.12.2000	РБ ДМ	00077D	80	84	1.8—2.2"	0.05—0.9 ^m
30.11—03.12.2000	«Sirius-3»	00077A	44	46	1.9—3.0"	0.04—0.7 ^m
20.01—22.07.2011	«Электро-Л»	37344U	2640	~5000	0.3—0.4"	0.3—0.4 ^m
19.07—28.07.2011	«Спектр-Р»	37755	178	~1000	0.3—0.4"	0.3 ^m

дельные расчеты показали, что для вычисления с погрешностью $0.5''$ сферических координат КА при высоте перигея его орбиты 20000 км достаточно учитывать гармоники в разложении геопотенциала до 8-й степени и порядка, при высоте перигея 6000 км — до 20-й степени и порядка, а при высоте перигея 1700 км — до 35-й степени и порядка. Учитываемые возмущения в движении ИНО должны включать также и гравитационные притяжения объекта Луной и Солнцем. При этом координаты Луны и Солнца берутся из фундаментальных эфемерид LE200/DE200. На движение геостационарных КА заметное влияние оказывает солнечное световое давление. Величина смещения КА под его действием зависит также и от отношения площади поперечного сечения спутника к его массе (A/M). Как показали расчеты для ГИСЗ с $A/M = 0.05 \text{ м}^2/\text{кг}$, его смещение по долготе на дуге 5 сут достигает $20''$, а на дуге 30 сут — около $120''$. Таким образом, для надежного определения орбиты спутника необходимо знать соответствующее значение A/M и изменение этого параметра со временем, если КА имеет сложную форму и вращается относительно Земли. Если же величина A/M неизвестна априори, то из анализа высокоточных позиционных наблюдений спутника на продолжительных интервалах времени можно достаточно уверенно определить дифференциальную поправку к принятому усредненному значению произведения интегрального коэффициента отражения солнечного излучения на величину A/M .

Реализованный программный комплекс для определения орбит КА и вычисления их эфемерид состоит из двух частей, а именно:

- программ определений орбит КА на основе наблюдений;
- программ вычислений эфемерид КА на основе элементов их орбит.

Исходными данными для программы определения орбиты КА по позиционным наблюдениям являются:

а) сформированный по итогам сеанса наблюдений файл расположенных в хронологической последовательности значений топоцентрических экваториальных координат КА (прямого восхождения и склонения);

б) прямоугольные геоцентрические координаты пункта наблюдений.

Для определения элементов орбиты достаточно 5—8 измерений на орбитальной дуге. Момент наблюдения, приведенный в шкале времени UTC, соответствует моменту получения экспозиции ПЗС-камеры. Этот момент не исправлен за абберационное время, поскольку для его вычисления необходимо знать расстояние между ПЗС-камерой и объектом, а оно становится известным только после определения орбиты объекта. В качестве начальных условий для уравнений движения объекта нами выбраны прямоугольные координаты и составляющие вектора скорости на некоторый начальный момент. Обычно выбирают момент первого наблюдения обрабатываемой орбитальной дуги, хотя это может быть и любой другой момент, предшествующий моменту первого используемого наблюдения.

Начальные значения координат и составляющих вектора скорости КА вычисляются по двум наблюдениям в предположении круговой орбиты. После этого выполняется численное интегрирование на интервале всей обрабатываемой дуги. Начальные условия уравнений движения определяются методом дифференциального улучшения. Для этого составляются уравнения невязок по прямому восхождению и склонению. Для нахождения коэффициентов уравнений невязок используется метод вариаций. Для этого производится совместное интегрирование трех уравнений движения второго порядка и 18 вариационных уравнений второго порядка.

Уравнения невязок по прямому восхождению и склонению составляются для каждого наблюдения. Решая систему этих уравнений, получаем значения поправок к начальным условиям уравнений движения. Процесс уравнивания производится итеративно до сходимости. Обычно достаточно выполнить 3—6 итераций на дуге. В итоге орбитального анализа вычисляются значения прямоугольных геоцентрических координат и составляющих вектора скорости объекта на заданный момент времени, исправленные за время распространения света от КА до наблюдателя (световой промежуток). Эти значения использу-

ются в первоочередном порядке для моделирования полученных результатов наблюдений на данной орбитальной дуге с целью их верификации.

Вычисление прогнозных эфемеридных значений экваториальных координат КА для будущих моментов наблюдений производится путем численного интегрирования уравнений движения спутника с использованием программы, реализующей алгоритм метода Адамса с переменным шагом и с переменным порядком, основанный на разделенных разностях.

АКТУАЛЬНОСТЬ НАЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В связи с густой заселенностью геостационарной зоны (ГСЗ) искусственными и естественными небесными объектами мировым сообществом были установлены жесткие ограничения на изменения положений ГИСЗ относительно выделенной ему точки на орбите во избежание столкновений с каким-нибудь из других объектов. Именно поэтому основной задачей при осуществлении навигации КА на ГСО является обеспечение его полета при установке в рабочую точку и при полете в рабочей точке с отклонениями по широте и долготе, не превышающими 0.1° . Эта задача решается с помощью коррекций положений КА относительно рабочей точки. Методы оптических наблюдений с помощью астрономического комплекса «Цейс-2000» в обсерватории на пике Терскол позволяют определять в зависимости от точности используемых опорных каталогов положения КА на орбитах с критическим наклоном с погрешностями $0.3\text{--}1.5''$. Оперативность выдачи результатов таких измерений составляет от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от требований к точности и скорости передачи информации. Поскольку допустимые пределы изменений положений ИНО относительно рабочей точки на ГСО более чем на два порядка по величине превосходят эти погрешности, то можно утверждать, что оптические измерения на пике Терскол могут обеспечивать надежный контроль как качества программы управляемых маневров, так и верификацию данных измерений других наземных служб, особенно на этапах полетных испытаний.

После обнаружения и уверенного отождествления фрагментов разделившегося ИНО всегда возникает необходимость определения орбит появившихся объектов (в том числе объектов-осколков). Фотометрический мониторинг, выполнявшийся всегда в процессе оптических наблюдений ИНО, позволяет зарегистрировать процессы и события на этих объектах, такие как раскрытие панелей солнечных батарей, разделение модулей или фрагментов КА, сброс топлива или газа, работа системы ориентации КА, вращение объекта и др. Кроме того, оптическое сопровождение актуально для поддержки работ по совершенствованию космической техники в связи с необходимостью повышения точности, надежности и оперативности получения информации о реализованных характеристиках выведения ИНО на орбиту и данных о его состоянии и траектории полета. При этом оптические средства обеспечивают наземные службы независимой информацией о состоянии объекта и осуществляют мониторинг событий в случаях нарушения штатных схем управления полетом. В соответствии с рабочими планами исследований были проведены позиционные наблюдения и определены орбиты для многих ИНО и их фрагментов, в том числе для КА «Горизонт-45» в июне 2000 г., «Сириус-3» в декабре 2000 г., «Экран» в апреле 2001 г., «Нимик-2» в декабре 2002 г., АМС-9 в июне 2003 г., «Глонасс» в декабре 2003 г., «Интелсат-10» в июне 2004 г., АМС-12 в феврале 2005 г. и других. Отметим, что при исследованиях динамики активных и пассивных фрагментов в рамках программы модернизации РБ основное внимание после разделения ИНО уделялось наблюдениям разгонных блоков и появившихся сопутствующих фрагментов.

ПОДДЕРЖКА СТАРТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЭЛЕКТРО-Л»

В качестве примера работы обсерватории на пике Терскол по сопровождению старта и навигации КА в околоземном пространстве рассмотрим мониторинг старта КА «Электро-Л», выполненный в период с января по июль 2011 г.

Объект наблюдений, головной блок (ГБ), на геопереходной орбите был уверенно обнаружен

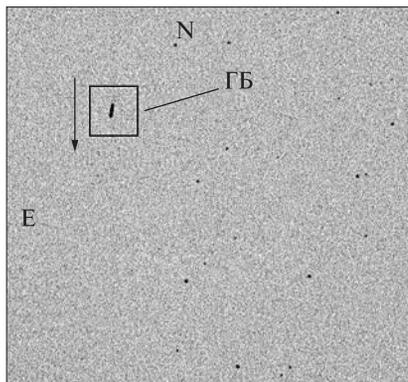


Рис. 1. Обнаружение головного блока «Электро-Л» на геопереходной орбите в 16^h19^m57^s UTC 20 января 2011 г.

средствами обсерватории на пике Терскол в момент времени 16^h19^m57^s UTC 20 января 2011 г. На рис. 1 показано изображение ГБ среди звезд на момент обнаружения. Факт обнаружения ГБ и его движение, близкое к расчетной геопереходной орбите, был своевременно передан по каналам связи наземным службам сопровождения. В дальнейшем выполнялись сопровождение и съемка ГБ на фоне звезд до момента входа в тень Земли. Оперативная обработка изображений позволила вычислить параметры реальной геопереходной орбиты для оценки ситуации и дальнейшего сопровождения полета ГБ. Результаты позиционных наблюдений и элементы орбиты приведены в табл. 2.

Из данных анализа были получены оценки отклонения полета ГБ от расчетной орбиты и, попутно, оценки качества публикуемых данных каталога NORAD. Параметры сравниваемых элементов приведены в табл. 3, а расхождение прогноза движения с данными наблюдений — в табл. 4.

После выхода головного блока из тени позиционные наблюдения и мониторинг окрестностей были продолжены с целью удержания объекта в

Таблица 2. Данные позиционных наблюдений головного блока «Электро-Л» 20 января 2011 г. до момента разделения

UTC	α	δ
16 ^h 48 ^m 05.506 ^s	06 ^h 02 ^m 27.323 ^s	+42°37'27.92"
16 ^h 50 ^m 04.998 ^s	06 ^h 11 ^m 38.675 ^s	+41°17'43.10"
16 ^h 52 ^m 06.301 ^s	06 ^h 19 ^m 50.161 ^s	+40°01'52.54"
16 ^h 54 ^m 12.443 ^s	06 ^h 27 ^m 22.522 ^s	+38°47'59.44"
16 ^h 56 ^m 14.186 ^s	06 ^h 33 ^m 52.304 ^s	+37°41'04.93"
16 ^h 58 ^m 05.608 ^s	06 ^h 39 ^m 15.502 ^s	+36°43'15.75"
17 ^h 02 ^m 08.188 ^s	06 ^h 49 ^m 30.713 ^s	+34°47'16.02"
17 ^h 06 ^m 01.267 ^s	06 ^h 57 ^m 52.314 ^s	+33°06'45.32"
17 ^h 10 ^m 14.178 ^s	07 ^h 05 ^m 42.029 ^s	+31°27'41.37"
17 ^h 20 ^m 18.810 ^s	07 ^h 20 ^m 45.698 ^s	+28°03'19.55"
17 ^h 22 ^m 20.747 ^s	07 ^h 23 ^m 20.098 ^s	+27°26'34.32"
17 ^h 24 ^m 25.049 ^s	07 ^h 25 ^m 50.053 ^s	+26°50'20.36"
17 ^h 28 ^m 09.234 ^s	07 ^h 30 ^m 03.352 ^s	+25°47'59.69"
17 ^h 32 ^m 07.034 ^s	07 ^h 34 ^m 11.019 ^s	+24°45'34.69"
17 ^h 36 ^m 08.109 ^s	07 ^h 38 ^m 03.125 ^s	+23°45'43.83"
17 ^h 39 ^m 58.523 ^s	07 ^h 41 ^m 30.005 ^s	+22°51'24.37"
17 ^h 44 ^m 09.153 ^s	07 ^h 45 ^m 00.194 ^s	+21°55'07.54"
17 ^h 47 ^m 55.728 ^s	07 ^h 47 ^m 58.546 ^s	+21°06'30.93"

Элементы орбиты

$$a = 24463.167338 \text{ км}, e = 0.724668, i = 48.577212^\circ, \pi = 0.049562^\circ, \Omega = 315.809538^\circ \text{ М.Ап.} = 39.928195^\circ$$

Ортогональные координаты и их ошибки:

$$\begin{aligned} X &= -2284.734522 \pm 0.644061 \text{ км}, \\ V_x &= -3.000561 \pm 0.000364 \text{ км/с} \\ Y &= 17570.142542 \pm 1.856608 \text{ км}, \\ V_y &= 3.370175 \pm 0.000371 \text{ км/с} \\ Z &= 12473.507147 \pm 1.116223 \text{ км}, \\ V_z &= 0.368318 \pm 0.000078 \text{ км/с} \end{aligned}$$

поле зрения телескопов и контроля событий и посторонних объектов в окрестности полета ГБ. Основной массив астрометрических и фотометрических наблюдений получен перед этапом разделения ГБ, который был запланирован на 20 января 21^h28^m12.7^s UTC. В ночь 21—22 января наблюдения

Таблица 3. Сравнение элементов геопереходной орбиты головного блока на эпоху 20 января 2011 г.

Данные	UTC	a , км	e	i , град	π , град	Ω , град	Mean An., град
Прогноз орбиты ГБ	160908.810	24508.3978	0.725319	48.6001	360.0000	315.8833	2.4475
Наблюдения NORAD	160446.678	26610.227	0.7243666	48.5201	359.9588	315.8221	359.8545
Наблюдения Терскол	171509.171	24463.167338	0.724668	48.577212	0.049562	315.809538	39.928195

Таблица 4. Рассогласование орбит прогноза движения головного блока с данными наблюдений Терскола (20 января 2011 г.)

UTC	MJD	H, м	V, м/с	Ang.Separ., град
16 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.694444	21185	27.083	0.0869
17 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.708333	46270	28.058	0.1205
17 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.722222	77860	30.159	0.1553
17 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.736111	112644	32.416	0.1891
18 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.750000	150127	34.706	0.2223
18 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.763889	190161	37.042	0.2553
18 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.777778	232722	39.456	0.2887
19 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.791667	277857	41.989	0.3230
19 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.805556	325674	44.681	0.3585
19 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.819444	376325	47.574	0.3959
20 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.833333	430010	50.719	0.4355
20 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.847222	486987	54.169	0.4781
20 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.861111	547572	57.990	0.5243
21 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.875000	612146	62.264	0.5749
21 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.888889	681182	67.092	0.6310

Таблица 5. Параметры орбиты космического аппарата «Электро-Л» по данным позиционных наблюдений 21—22 января 2011 г.

Элементы орбиты

$$a = 41930.894918 \text{ км}, e = 0.006243, i = 0.447316^\circ, \\ \pi = 5.131190^\circ, \Omega = 285.594548^\circ, \text{М.Ап.} = 190.932927^\circ$$

Ортогональные координаты и их ошибки

$$X = -22057.892492 \pm 0.012660 \text{ км}; \\ V_x = -2.610148 \pm 0.000002 \text{ км/с} \\ Y = 35962.017773 \pm 0.017415 \text{ км}; \\ V_y = -1.605265 \pm 0.000003 \text{ км/с} \\ Z = -90.395274 \pm 0.010263 \text{ км}; \\ V_z = -0.022997 \pm 0.000001 \text{ км/с}$$

были проведены в несколько этапов с целью вычисления элементов орбиты для анализа данных и верификации работы наземных комплексов сопровождения. Полная обработка всех снимков за ночь 21—22 января позволила получить значительно более точные параметры движения «Электро-Л», которые представлены в табл. 5.

По завершению маневра разделения модулей ГБ оптические средства обсерватории Терскол также выполняли позиционные наблюдения полета РБ «Фрегат-СБ» в период 20—23 января 2011 г. с целью контроля процесса увода разгон-

Таблица 6. Позиционные наблюдения разгонного блока «Фрегат-СБ» в ночь 22—23 января 2011 г.

UTC	α	δ	$(O-C)_a$	$(O-C)_\delta$
16 ^h 45 ^m 13.450 ^s	05 ^h 52 ^m 58.811 ^s	-06°24'44.63"	0.26"	0.14"
16 47 36.673	05 55 27.412	-06 24 57.06	-0.21	-0.19
16 50 15.711	05 58 12.408	-06 25 10.33	-0.06	0.07
16 52 54.750	06 00 57.326	-06 25 23.55	-0.16	0.49
16 55 17.893	06 03 25.720	-06 25 36.27	-0.06	0.14
17 58 40.439	07 08 49.034	-06 31 29.63	0.25	-0.02
18 01 03.742	07 11 16.180	-06 31 44.32	0.10	-0.68
18 03 42.951	07 13 59.597	-06 31 59.36	-0.12	-0.09
18 06 22.154	07 16 42.956	-06 32 14.96	-0.18	-0.02
18 09 01.358	07 19 26.281	-06 32 30.66	0.14	-0.00
19 56 31.536	09 08 53.638	-06 43 14.23	0.30	-0.23
20 01 17.647	09 13 42.900	-06 43 41.72	0.17	-0.11
20 03 40.675	09 16 07.577	-06 43 54.51	2.07	<u>0.84</u>
20 08 26.731	09 20 56.464	-06 44 22.75	0.62	-0.07
20 13 44.648	09 26 17.411	-06 44 52.78	-0.10	0.05
20 15 04.130	09 27 37.571	-06 44 59.32	<u>-1.04</u>	<u>1.00</u>
20 49 35.689	10 02 24.679	-06 48 09.33	-0.46	-0.21
20 51 42.952	10 04 32.659	-06 48 20.26	-0.62	-0.01
20 54 53.821	10 07 44.296	-06 48 37.14	<u>-4.76</u>	-0.29
20 57 32.890	10 10 24.498	-06 48 50.59	-0.25	-0.03
21 58 28.808	11 11 30.547	-06 53 35.23	0.33	0.50
00 19 32.024	13 32 24.150	-06 59 41.45	0.00	-0.00
00 23 14.749	13 36 06.652	-06 59 44.47	-0.15	0.03
00 24 34.286	13 37 26.156	-06 59 46.64	0.39	<u>-1.14</u>
00 28 01.085	13 40 52.750	-06 59 47.66	-0.22	0.23
00 30 08.293	13 42 59.886	-06 59 49.13	0.03	0.07

Элементы орбиты

$$a = 41472.496851 \text{ км}, e = 0.014480, i = 0.497240^\circ, \\ \pi = 78.327646^\circ, \Omega = 290.753317^\circ, \text{М.Ап.} = 115.176368^\circ$$

Ортогональные координаты и их ошибки:

$$X = -24381.741031 \pm 0.017214 \text{ км}, \\ V_x = -2.523365 \pm 0.000002 \text{ км/с} \\ Y = 33872.321068 \pm 0.033558 \text{ км}, \\ V_y = -1.766988 \pm 0.000005 \text{ км/с} \\ Z = -93.705944 \pm 0.014673 \text{ км}, \\ V_z = -0.025913 \pm 0.000001 \text{ км/с}$$

ного блока на орбиту его дальнейшего пребывания в пассивном режиме. Данные наблюдений и вычислений параметров орбиты РБ «Фрегат-СБ» представлены в табл. 6.

При фотометрическом мониторинге состояния ГБ на геопереходной орбите основное вни-

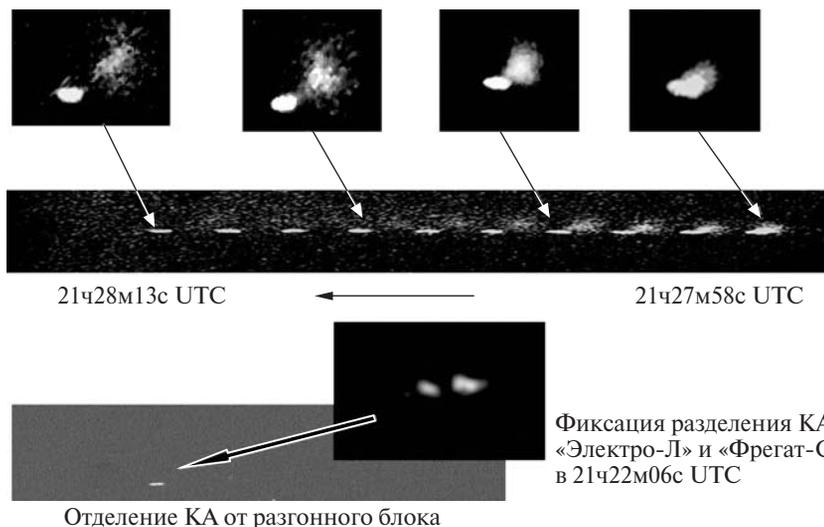


Рис. 2. Вспышка в 21 ч 28 мин UTC и облако в окрестности головного блока в момент разделения КА и РБ

мание уделялось контролю этапа отделе-ния КА «Электро-Л» от РБ «Фрегат-СБ». С этой целью до и после планового момента разделения проводилась скоростная съемка (интервал между снимками менее 1.5 с) головного блока и визуальный контроль оператором событий в реальном времени. Данные съемки архивировались для последующего анализа, и при необходимости могут быть заново просмотрены для анализа проблемных или нештатных ситуаций.

В процессе мониторинга этапа разделения оператором комплекса была зафиксирована вспышка и облако в окрестности ГБ. Динамика последовательности развития облака показана на рис. 2, где также показаны траектория движения связки и относительные положения модулей для отдельных моментов времени. Эта вспышка была обнаружена в момент времени, близкий к плановой команде на разделение. Дальнейший мониторинг полета ГБ позволил в 21^h33^m06^s UTC надежно зафиксировать раздельный полет КА «Электро-Л» и РБ «Фрегат-СБ». Данные об оптической вспышке, облаке газа и подтверждение визуального разделения ГБ на модули РБ и КА были оперативно сообщены наземным службам сопровождения запуска по каналам связи.

В дальнейшем мониторинг РБ «Фрегат-СБ» проводился с целью отслеживания отработки команд и исследования его физического состояния. На рис. 3 показано изменение траектории

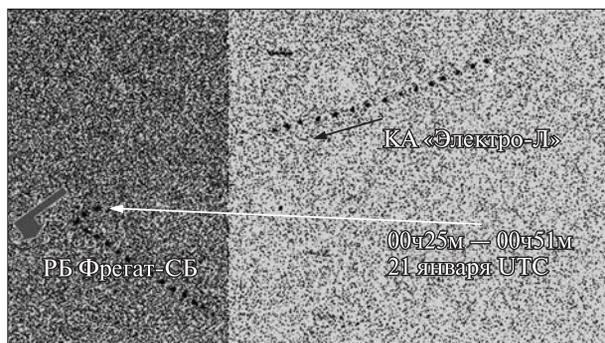


Рис. 3. Маневр увода разгонного блока на орбиту пребывания

движения РБ «Фрегат-СБ» на этапе четвертого включения двигательной установки для выполнения запланированного штатного маневра увода на орбиту пребывания.

При дальнейшем сопровождении полета в одной из серий фотометрических наблюдений, около 1^h32^m24^s 21.01.2011 UTC, было зафиксировано появление нескольких фрагментов, отлетающих в разных направлениях от РБ «Фрегат-СБ». В серии из 170 последовательных кадров зафиксированы быстрые и глубокие изменения блеска этих фрагментов, вплоть до полного исчезновения. Около 2^h20^m 21.01.2011 UTC был зафиксирован второй эпизод отделения фрагмента, который был ярче, чем фрагменты первого эпизода. Второй эпизод представлен на рис. 4, где показаны относительные положения фрагмента в отдельные моменты

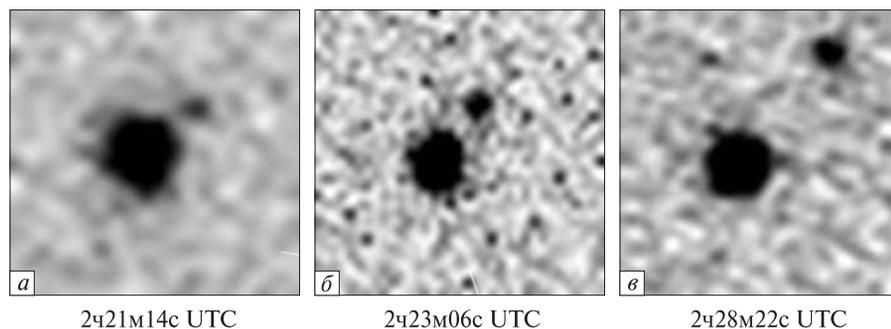


Рис. 4. Фрагментация разгонного блока «Фрегат-СБ» 21 января 2011 г.

времени. Изменения характера кривой блеска РБ, также представленной на рис. 4, коррелирует с процессами фрагментации РБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обсерватории на пике Терскол создан и много лет успешно функционирует астрономический комплекс наземной поддержки стартов и навигации космических аппаратов в околоземном пространстве. Выполнено сопровождение более 20 стартов и испытаний космической техники. Сопровождение запуска КА «Электро-Л» в январе 2011 г. от фазы пассивного полета связи РБ «Фрегат-СБ» и КА «Электро-Л» до фазы дрейфа КА «Электро-Л» в точку стояния и выхода РБ «Фрегат-СБ» на орбиту пребывания демонстрирует возможности астрономического комплекса терскольской обсерватории. В процессе этой работы было выполнено:

- расчет эфемерид для мониторинга положений и событий;
- поиск, обнаружение и своевременная передача информации о полете ГБ на геопереходной орбите;
- вычисление элементов орбиты и прогноз движения РБ «Фрегат-СБ» и КА «Электро-Л» в период мониторинга для обеспечения работ наземных служб;
- независимое и своевременное подтверждение запланированных событий на орбите, включая разделение модулей ГБ, маневры модулей движения РБ «Фрегат-СБ» и КА «Электро-Л» и их взаимное расположение;
- обнаружение и фиксация оптических явлений на РБ «Фрегат-СБ»;
- обнаружение и фиксация фрагментации РБ «Фрегат-СБ»;

- обнаружение и фиксация изменения параметров вращения РБ «Фрегат-СБ» на интервале времени отделения фрагментов;

- вся полученная информация оперативно передавалась по каналам связи наземным службам сопровождения старта.

1. Сергеев А. В., Жиляев Б. Е., Стеценко К. О. и др. Спектрометр низкого разрешения для быстрой спектроскопии малых тел Солнечной системы // Околоземная астрономия–2009: Сб. тр. конф. (Казань, 23–26 августа 2009 г.) — Москва: ГЕОС, 2010. — С. 278–282.
2. Сергеев А. В., Тарадий В. К., Бахтигараев Н. С. и др. Новые возможности терскольской обсерватории для исследования космического мусора в околоземном пространстве // Околоземная астрономия 2009. Сборник трудов конференции (Казань, 23–26 августа 2009 г.) — Москва: ГЕОС, 2010. — С. 105–109.
3. Тарадий В. К. Навигация искусственных небесных тел по данным оптических наблюдений в обсерватории на пике Терскол // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото съемка. — 2006. — № 2. — С. 82–97.
4. Тарадий В. К., Сергеев А. В., Карпов Н. В. Прецизионный измерительный комплекс определения положения объектов в ближнем космосе // Измерительная техника. — 2006. — № 3. — С. 38–42.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. K. Tarady, A. V. Sergeev

OPTICAL OBSERVATIONS AT THE TERSKOL PEAK OBSERVATORY FOR GROUND-BASED LAUNCH SUPPORT AND SOLVING NAVIGATION PROBLEMS IN OUTER SPACE

We describe the use of astronomical facilities at the high-altitude Terskol Peak Observatory for the monitoring of events and processes which are occurred in the outer space during space launches. Some practical results derived from ground-based optical observations and used for precise flight path determination as well as for control over the state of a spacecraft are presented.

УДК 521.1

В. П. Епишев, В. У. Климик, В. И. Кудак

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

ВОЗМУЩЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОТРАЖЁННОГО СОЛНЕЧНОГО И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ

Досліджуються періодичні та вікові зміни елементів орбіт геосинхронних супутників під дією відбитого Землею сонячного світла та ІЧ-випромінювання Землі. Визначено максимальні амплітуди періодичних змін і максимальні швидкості вікових змін. Аналіз проведено на основі обчислень, виконаних для 16 супутників, вибраних з російського каталогу.

Для вычисления изменения элементов орбит геосинхронных спутников (ГС) под действием отражённого земной поверхностью солнечного излучения или ИК-излучения Земли мы использовали формулу расчёта вектора ускорения объекта вследствие давления на него солнечного излучения из [2, 4]:

$$\mathbf{a} = -\gamma_1 C_R \frac{S}{m} P_0 \frac{r_c^2}{|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_{sp}|^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_{sp}}{|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_{sp}|} + \frac{S}{m} P_0 \frac{R^2}{r_{sp}^2} \cdot (\alpha + \beta \cdot \gamma_2) \cdot \left(\frac{\mathbf{r}_{sp}}{r_{sp}} \right),$$

давление света $P_0 = 0.00000465 \text{ Н/м}^2$. Так как в данном случае прямое солнечное излучение исключается, теневая функция γ_1 равна нулю. Второе слагаемое содержит величину α , определяющую поток ИК-излучения от Земли, и альбедо земной поверхности β . В рассматриваемой модели принимается $\alpha = 0.25 \cdot \cos^2 \varphi$, $\beta = 0.45 \cdot \sin(5/9\pi - \psi)$, где $\varphi = \arcsin(z_{sp}/r_{sp})$ — широта подспутниковой точки, $\psi = \arccos\{(x_c x + y_c y + z_c z)/(r_c r_{sp})\}$ — угол между направлением на Солнце и на спутник от Земли. Наблюдения показывают, что ошибка модели незначительна.

При вычислении ускорения от отражённого Землёй света принимаем $\alpha = 0$, а при вычислении ускорения от ИК-излучения Земли $\beta = 0$.

Вычисления в обоих случаях проводились на интервале нескольких суток и лет с шагом 0.001 сут для 16 объектов, выбранных из российского каталога ГС [6] таким образом, чтобы значения отношения эффективной площади к массе S/m по возможности равномерно охватывали всю область значений S/m каталожных объектов. Векторы ускорения использовались в уравнениях Лагранжа в форме Гаусса [1] для вычисления производных от элементов орбит. Изменение элементов орбит на данном часовом интервале определяли численным интегрированием.

Вид кривых изменения элементов орбит от прямого солнечного излучения [2, 5] не изменится, если исключить влияние излучения от Земли, т. е. положить $\alpha = 0$ и $\beta = 0$. В большинстве случаев им можно пренебречь. Но актуальными остаются две задачи: определение ошибок вычисления элементов орбит, обусловленных излучением от Земли (эта задача решается вычислением амплитуды долгопериодических изменений от земного излучения) и исследование возможности вековых возмущений в результате такого излучения.

ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ ОТ ОТРАЖЁННОГО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Изменения *большой полуоси* на небольших интервалах времени имеют периодическую негар-

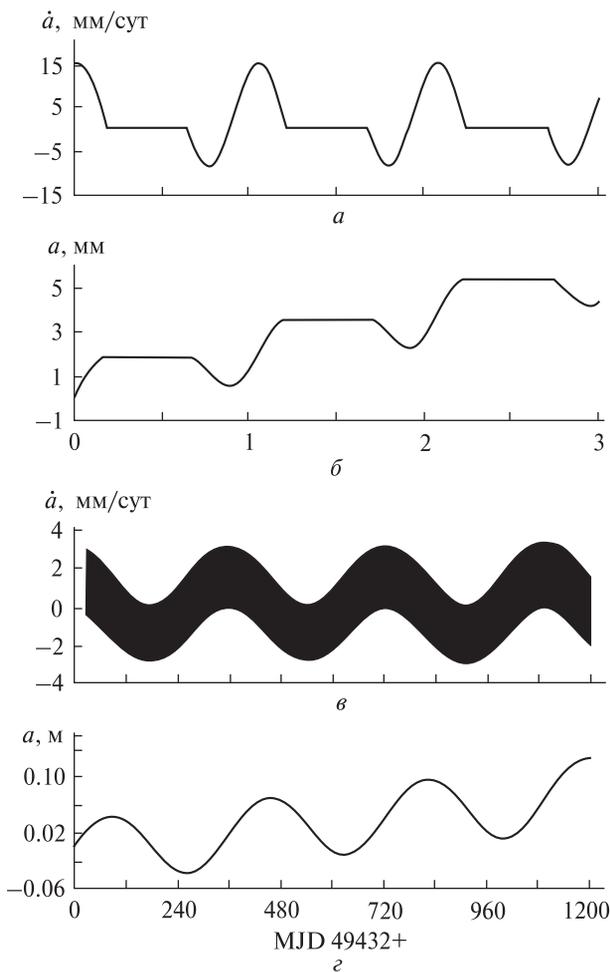


Рис. 1. Изменение производной \dot{a} (а) и большой полуоси a (б) ГС 84023А под воздействием на него отражённого Землёй солнечного света на интервале 3 сут; в, з — то же для ГС 89004F на интервале 3.3 года

моническую составляющую с периодом 1 сут. Негармоничность обусловлена прерывностью действия на ГС отражённого Землёй излучения. Кривые изменения полуоси a и её производной на рис. 1, а, б приведены для ГС 84023А, который в каталоге [6] имеет максимальное значение отношения S/m . Но и для такого спутника с большой парусностью амплитуда краткопериодических изменений a не превышает 2 мм.

Линейная составляющая изменения полуоси a (рис. 1, б) является отрезком кривой долгопериодических изменений a , которая имеет гармоническую составляющую с периодом 1 год

(рис. 1, з). Амплитуда A долгопериодических изменений небольшая, но у ГС с большим S/m она может достигать 0.4 м. Иногда A изменяется с периодом около 10 лет. Есть также линейная составляющая $a = kt + b$, что видно на рис. 1, з. Она определялась как линия регрессии для каждого из 16 ГО по вычисленным значениям a на интервале около 15 лет с шагом 0.001 сут. Линия регрессии проходит через начало координат ($b = 0$). Коэффициент k (м/сут), определяющий среднюю скорость изменения полуоси, всегда положительный и пропорциональный S/m ($\text{м}^2/\text{кг}$): $k = 0.0139 \cdot S/m$. Коэффициент корреляции $\rho = 0.993$.

При интегрировании уравнений Лагранжа использовали нулевые начальные условия. Поэтому a означает не большую полуось, а её изменение относительно начальной даты MJD 49432.

Для каталожных ГС ($0.0016 < S/m < 0.0370 \text{ м}^2/\text{кг}$) увеличение большой полуоси за 100 лет находится в пределах от 0.8 до 18.8 м. Это в три раза меньше уменьшения за 100 лет большой полуоси в результате прохождения ГО через тень Земли [3].

Средние квадратичные отклонения σ значений a от линий регрессии не превышают 0.15 м. Расчеты показывают, что амплитуду долгопериодических изменений можно оценить величиной $A = 1.5\sigma$, т. е. она в большинстве случаев не превышает 0.23 м.

Изменение производной большой полуоси на больших интервалах времени на графике (рис. 1, в) представляется синусоидальной полосой в результате слияний отдельных суточных колебаний (рис 1, а) в сплошную область. Амплитуда долгопериодических колебаний производной не сильно отличается от амплитуд суточных колебаний производной. Но суточные колебания полуоси очень слабые по сравнению с амплитудой долгопериодических изменений a . На рис. 1, з они не заметны.

Вид кривых изменения эксцентриситета, аргумента перигея и средней аномалии, а также их производных под воздействием отражённого Землёй излучения такой же, как соответствующие кривые для большой полуоси (рис. 1, б). Наклон орбиты и долгота восходящего узла практически не изменяются при воздействии на ГС

отражённого света или собственного ИК-излучения Земли. Их изменения на интервале нескольких суток определяются величинами порядка 10^{-20} (рис. 2). А за 100 лет наклон орбиты (например ГС 74017F) увеличится на $0.3 \cdot 10^{-16}$ град. Исследования таких малых изменений не представляют практического интереса.

Амплитуда долгопериодических изменений *эксцентриситета* (её период один год) не превышает $0.76 \cdot 10^{-6}$. Она пропорциональна отношению S/m : $A = (21.98 \cdot S/m - 0.0056) \cdot 10^{-6}$. Коэффициент корреляции $\rho = 0.991$.

Для определения линейной составляющей $e = kt + b$ изменения эксцентриситета использовали значения e на интервале около 15 лет. По вычислениям для 16 ГО скорость изменения эксцентриситета под воздействием отражённого Землёй излучения за сутки равна $k = (-0.000022 \pm \pm 0.000151) \cdot 10^{-6}$. За 100 лет значение e изменится на $\Delta e_{\text{в}} = (-0.8 \pm 5.5) \cdot 10^{-6}$. Эксцентриситет может увеличиться или уменьшиться. Вековыми изменениями в данном случае можно пренебречь.

Изменение *аргумента перигея* имеет годовую гармонику и слабо выраженную линейную составляющую. Амплитуда долгопериодических колебаний $A = 0.031 \pm 0.030^\circ$. С параметром S/m и эксцентриситетом она коррелирует слабо.

Линейные составляющие $\omega = kt + b$ определялись на интервале 15 лет. Для отдельных ГС этот интервал укорачивался, чтобы исключить области, где $e = 0$. По данным 16 ГС средняя скорость изменения аргумента перигея составляет $1.7 \pm \pm 6.2$ мкград/сут. За 100 лет ω изменится на $\Delta\omega = 0.06 \pm 0.22^\circ$. Можно считать, что и в этом случае вековых изменений нет.

Долгопериодические (период 1 год) изменения *средней аномалии* от отражённого Землёй солнечного излучения имеют сравнительно большую амплитуду. По результатам вычислений для 15 ГС средняя на 10-летнем интервале амплитуда $A = 0.047^\circ$. Но у ГС с малым эксцентриситетом она может достигать 0.24° .

С использованием того же массива значений M и метода наименьших квадратов вычислялся линейный тренд. Средняя скорость изменения аргумента перигея оказалась равной $1.01 \pm \pm 6.17$ мкград. Следовательно, за 100 лет M мо-

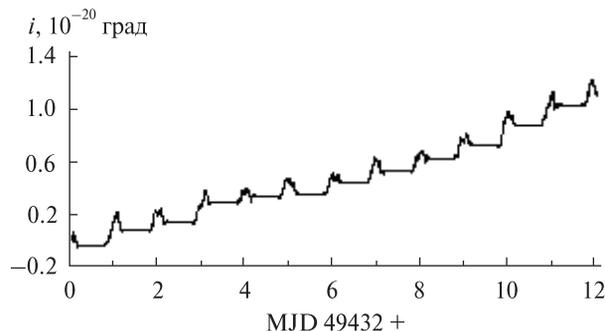


Рис. 2. Изменение наклона орбиты ГС 74017F под воздействием на него отражённого Землёй солнечного света на интервале 12 сут

жет измениться на $\Delta M = 0.037 \pm 0.225^\circ$ — величина такого же порядка, как и $\Delta\omega$.

ВЛИЯНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ НА ДВИЖЕНИЕ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ

Под действием ИК-излучения Земли изменение производной *большой полуоси* представляет собой гармоническое колебание с периодом 1 сут, а сама полуось является суммой двух составляющих: гармонической с периодом 1 сут и линейной (рис. 3, а). Эта линейная составляющая представляет собой вековые изменения, так как долгопериодических изменений не обнаружено (рис. 3, б). Линейная составляющая ($a = kt + b$) вычислялась для 16 ГС на интервале 15 лет. Коэффициент корреляции очень высокий: $\rho = 0.999994 \pm 0.000015$. Свободный член $b \approx 0$. Средняя скорость k изменения полуоси для 16 ГС пропорциональна парусности S/m : $k_i = 0.0189 \cdot S/m$ (коэффициент корреляции $\rho = 0.99989$). Вековые изменения полуоси от ИК-излучения Земли относительно большие: за 100 лет большая полуось у разных ГС увеличивается на 1.1—25.6 м.

Среднее квадратичное отклонение σ значений полуоси от линии регрессии обусловлено в основном краткопериодическими изменениями a . Оно очень малое: $\sigma = 0.7 \pm 0.4$ мм. Амплитуда периодических изменений не превышает 1.7 мм.

Изменение *эксцентриситета* ГС от ИК-излучения Земли имеет только суточную гармонику с очень малой амплитудой, которая с высоким

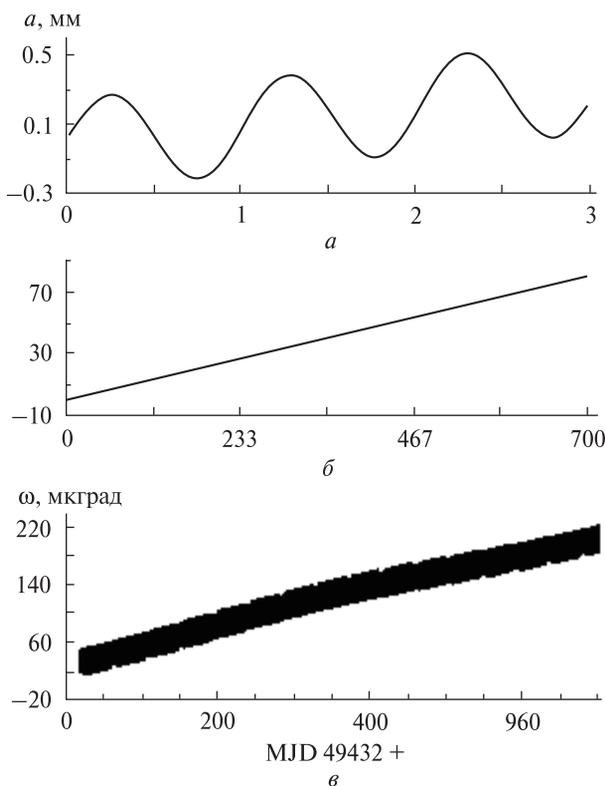


Рис. 3. Изменения под воздействием ИК-излучения Земли для ГС 89004F: *a*, *b* — большой оси *a* на интервале 3 сут и 2 лет, *ω* — аргумента перигея *ω* на интервале 2 лет

значением коэффициента корреляции ($\rho = 0.994$) линейно зависит от S/m : $A = (0.115S/m) \cdot 10^{-6}$. Амплитуда суточных колебаний равна $(0.18 - 4.3) \cdot 10^{-9}$.

Можно полагать, что эксцентриситет e ГС под воздействием ИК-излучения Земли не имеет вековых изменений. Значения e вычислялись на интервале 15 лет. Определены линии регрессии изменения e от времени для 16 спутников. Средняя скорость изменения эксцентриситета за сутки составила $(-10 \pm 29) \cdot 10^{-14}$. За 100 лет e изменится на $\Delta e_i = (-0.004 \pm 0.011) \cdot 10^{-6}$. Он может увеличиться или уменьшиться.

Изменение аргумента перигея ГС от ИК-излучения Земли имеет только суточную гармонику с относительно большой амплитудой. На рис. 3, *в* суточные колебания сливаются в сплошную полосу. Определялись изменения ω 16 ГС на интервале 15 лет за исключением тех областей, где

$e < 0.0001$. Амплитуда A суточных изменений ω зависит от e : при изменении e от 0.02 до 0.0001 амплитуда увеличивается от 0.2 до 230 мкград. Среднее значение амплитуды суточных изменений $A = 81$ мкград.

Линии регрессии изменения аргумента перигея от ИК-излучения Земли вычислялись для всех 16 ГС. Средняя скорость изменения ω всегда положительная и равна 0.485 ± 0.461 мкград/сут. За 100 лет ω увеличится на $0.029 \pm 0.017^\circ$. Эта скорость сильно коррелирует с параметром S/m .

Кривая изменения средней аномалии M от инфракрасного излучения Земли является суммой гармоники с периодом 1 сутки и линейной составляющей. На больших интервалах времени она изменяется аналогично ω (рис. 5), но линейная составляющая убывает. Амплитуда A суточных изменений M сильно зависит от эксцентриситета. По вычислениям для 16 ГС среднее значение амплитуды $A_{cp} = 0.00045^\circ$, но при малых значениях эксцентриситета ($e = 0.000063$) она может составлять 0.003° .

Средняя скорость линейного изменения M для каждого ГС определялась на интервале 15 лет. Она с высоким коэффициентом корреляции ($\rho = -0.9994$) зависит от параметра S/m . По данным 16 ГС она равна -2.35 ± 1.37 мкград/сут. За 100 лет M уменьшится на $0.086 \pm 0.050^\circ$.

ВЫВОДЫ

Под воздействием отражённого Землёй солнечного излучения вековые изменения происходят только у большой полуоси, увеличение на несколько метров за 100 лет. Период долгопериодических изменений элементов орбит a , e , ω , M ГС равен одному году, амплитуды могут выходить за пределы точности элементов орбит, приведённых в каталогах ГС. Краткопериодическими изменениями можно пренебречь.

Долгота восходящего узла и наклон орбиты практически не изменяются под воздействием отражённого и ИК-излучения Земли.

ИК-излучение Земли приводит к вековым изменениям в a и e (увеличение), а также в M (уменьшение). Долгопериодических изменений нет. Амплитуда суточных колебаний в большинстве случаев относительно небольшая.

1. Арнольд Курт. Методы спутниковой геодезии. — М.: Недра, 1973. — 224 с.
2. Єпішев В. П., Клімук В. У., Кудак В. И. Возмущение геосинхронных спутников под действием давления солнечного излучения // *Околоземная астрономия-2009*. — М., 2009. — С. 42—48.
3. Єпішев В. П., Клімук В. У., Мотрунич І. І. Зміни в русі геосинхронних об'єктів внаслідок впливу на них випромінювання від землі та їх проходження через тінь землі // *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. фіз.* — 2010. — Вип. 28. — С. 157—164.
4. Клімук В. У., Єпішев В. П., Мотрунич І. І. та ін. Збурення в русі геосинхронних супутників під дією сонячного випромінювання // *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. фіз.* — 2008. — Вип. 23. — С. 164—171. — (http://www.nbu.gov.ua/portal/natura/Nvuu/Fiz/2008_23/Klim.pdf).
5. Кудак В. И. Клімук В. У. Єпішев В. П. Оценка возмущений от солнечного излучения в элементах орбит геосинхронных спутников методом гармоник // *Астрофиз. бюллетень*. — 2010. — 65, № 3. — С. 317—325. — (<http://w0.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Bulletin/Vol65/N3/p317.pdf>).
6. Сочилина А. С., Кіладзе Р. И., Григорьев К. В., Вершков А. Н. Каталог орбит геостационарных спутников. — С.-Петербург: ИТА РАН, 1996. — 104 с.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. P. Yepishev, V. U. Klimuk, V. I. Kudak

DISTURBANCES IN MOTIONS OF GEOSYNCHRONOUS SATELLITES UNDER THE EFFECT OF REFLECTED SOLAR RADIATION AND INFRARED RADIATION OF THE EARTH

We investigate periodic and secular variations of orbital elements of geosynchronous satellites under the effect of the sunlight reflected by the Earth and of infrared radiation of the Earth. The maximum amplitudes of periodic changes and maximum velocities of secular variations are determined. The investigation is performed on the basis of calculations for 16 geosynchronous satellites from the Russian catalogue.

УДК 629.783.054 : 535.24

**В. П. Епишев¹, И. И. Исак¹, В. И. Кудак¹, И. И. Мотрунич¹, И. Ф. Найбауэр¹,
Н. И. Кошкин², А. И. Билинский³, К. П. Мартынюк-Лотоцкий³, Я. Т. Благодыр³,
В. В. Лопаченко⁴, В. В. Рыхальский⁴, С. В. Рыщенко⁵, А. В. Жуковецкий⁵**

¹Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

²Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова, Одеса

³Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету ім. Івана Франка, Львів

⁴Національний центр управління і випробовування космічних систем, Євпаторія

⁵Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля, Дунаївці

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ НА ОРБИТЕ ИСЗ В НЕШТАТНОМ РЕЖИМЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Приведено результати аналізу поведінки на орбіті космічного апарата «EgyptSat» у нештатному режимі у порівнянні з параметрами вільного обертання інших ШСЗ. Висувається версія виникнення нештатної ситуації з даним об'єктом. Показано, що об'єднання високоточної координатної інформації з фотометричною, отриманих з різних пунктів спостережень, дозволяє оперативно і ефективно аналізувати поведінку космічних апаратів на орбіті, з якими немає зв'язку.

Объединение высокоточной координатной информации с фотометрической позволяет изучать поведение космического аппарата (КА) на орбите, с которым по разным причинам отсутствует связь, определять его ориентацию, контуры и форму, оптические характеристики поверхности и их изменение со временем [1, 5].

Рассмотрим задачу поведения на орбите КА с которым нет связи. Ее успешное решение возможно только при комплексном подходе, в котором должны быть результаты качественной фотометрии, полученной синхронно с результатами позиционных наблюдений ИСЗ, соответствующие компьютерные программы, необходимые знания теории возмущенного движения ИСЗ.

Именно фотометрия дает возможность фиксировать появление в поле зрения наблюдателя отдельных фрагментов поверхности спутни-

ка, освещенных Солнцем. Периодичность их появления вследствие вращения ИСЗ вокруг собственной оси позволяет оценить, и довольно точно, период изменения блеска наблюдаемого объекта. Но от фиксации изменения блеска ИСЗ до установления точного значения собственного, а затем и прецессионного периода его вращения, лежит долгий путь сложных расчетов с их всесторонним анализом, в том числе с подключением информации, полученной по другим каналам. Например — данные анализа скорости изменения ориентации в пространстве одной из главных осей КА, сведения о форме его поверхности.

В Лаборатории космических исследований Ужгородского национального университета (ЛКИ УжНУ) создана программа «Период», в которой реализован алгоритм поиска скрытой периодичности процессов произвольной природы [7]. Метод неоднократно совершенствовался с учетом набранного опыта и расширен на поиск скрытой периодичности в пространственно-часовых реализациях с нарушением непрерывности. В решении нашей задачи означает, что в

© В. П. ЕПИШЕВ, И. И. ИСАК, В. И. КУДАК,
И. И. МОТРУНИЧ, И. Ф. НАЙБАУЭР, Н. И. КОШКИН,
А. И. БИЛИНСКИЙ, К. П. МАРТЫНЮК-ЛОТОЦКИЙ,
Я. Т. БЛАГОДЫР, В. В. ЛОПАЧЕНКО, В. В. РЫХАЛЬСКИЙ,
С. В. РЫЩЕНКО, А. В. ЖУКОВЕЦКИЙ, 2012

реализации (записи блеска) между интервалами наблюдений длительностью в несколько минут есть большие временные разрывы (сутки и более).

Усовершенствованная программа позволила в нашем случае не только объединить результаты наблюдений, разнесенные во времени, но и установить периодические процессы, значительно более длительные, чем время одного интервала наблюдений.

Результаты фотометрических и позиционных синхронных наблюдений дают возможность также получить необходимую информацию об ориентации неуправляемого ИСЗ на моменты наблюдений. Здесь расчеты базируются на законах зеркального и диффузного отражения света с учетом разных стереометрических форм, которые имеют фрагменты поверхности ИСЗ [2, 3].

В ЛКИ УжНУ определение всех нужных направлений, в том числе и осей объекта, ведется относительно положения плоскости орбиты на момент наблюдений. Это положение определяется в двух системах координат — горизонтальной и экваториальной.

В горизонтальной системе координат картина происходящих на орбите событий разворачивается относительно наблюдателя, что позволяет ему более наглядно представить ее характер. Основные же вычисления проводятся в экваториальной спутникоцентрической системе координат. Объединение полученных расчетов с данными изменения блеска ИСЗ позволяет сделать достаточно точные выводы и о характере вращения ИСЗ, и об изменении его ориентации на исследуемом интервале наблюдений.

Такой подход, отработанный на изучении вращения реальных ИСЗ, пребывающих на разных высотах в эпохи их дестабилизации и поло-

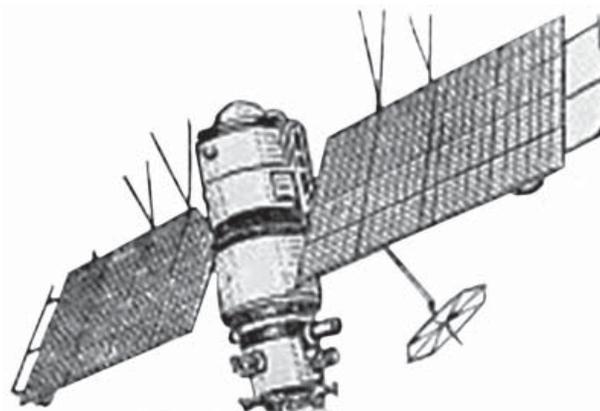


Рис. 1. ИСЗ системы «Метеор»

мок, оправдал себя неоднократно и помог накопить огромный опыт в решении задач по оценке природы и величины возмущающих факторов, действующих на космический объект [4, 6]. Он же был применен и при анализе вращения КА «EgyptSat» в нештатной ситуации.

Для того чтобы глубже представить, что же произошло с аппаратом «EgyptSat», рассмотрим вначале результаты определения периода собственного вращения на длительных временных интервалах, пребывающих на разных высотах в дестабилизированном режиме трех ИСЗ системы «Метеор», и одного китайского ИСЗ «Feng-Yun-1A».

Данные о периодах наблюдений, высоте H полета спутников, наклоне i их орбит, пределах ΔP_0 изменений периода собственного вращения ИСЗ на всем интервале наблюдений, пределах $\Delta P_{пр}$ изменений периода прецессионного вращения ИСЗ приведены в табл. 1.

ИСЗ «Метеор». Внешний вид и типичная кривая блеска ИСЗ системы «Метеор» приведена на рис. 1 и 2.

Таблица 1. Отдельные орбитальные и вращательные характеристики исследуемых ИСЗ

ИСЗ	Номер ИСЗ	Время наблюдений	H , км	i , град	ΔP_0 , с	$\Delta P_{пр}$, с
«Метеор-1»	64053A	1977(IX)—1982(X)	607—863	65	93—125	584—708
«Метеор-М»	69084A	1973(XII)—1983(XII)	618—673	81	78—109	490—766
«Метеор-М»	71059A	1976(IV)—1983(XII)	613—640	81	10—99	546—406
«Feng-Yun-1A»	88080A	1990(III)—1990(X)	900	99	25—32	575—588
«EgyptSat»	07012A	2010(VII)—2010(VIII)	660	98	118—122	24.5—24.6

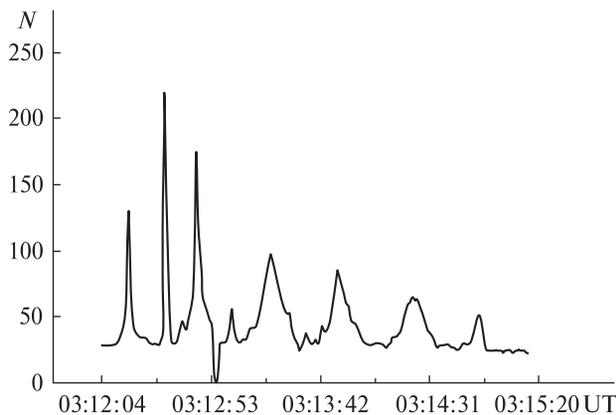
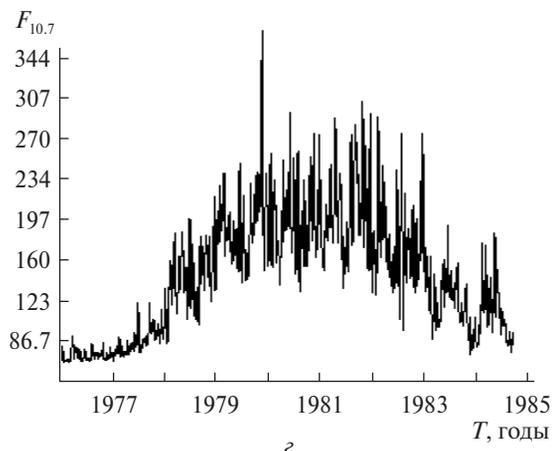
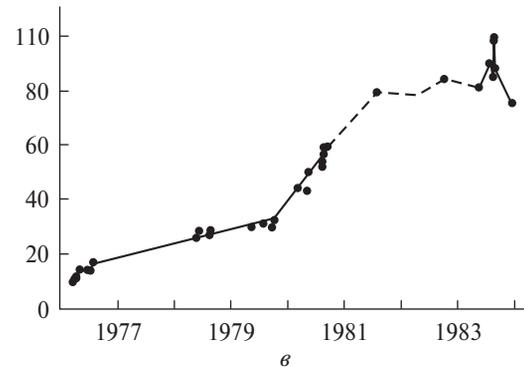
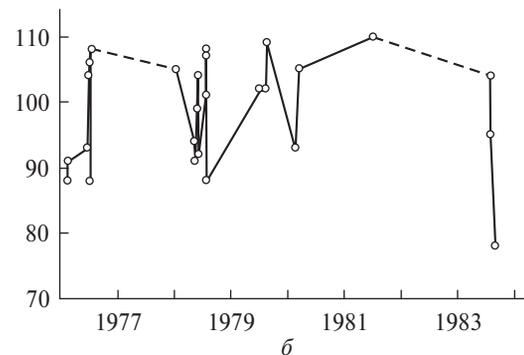
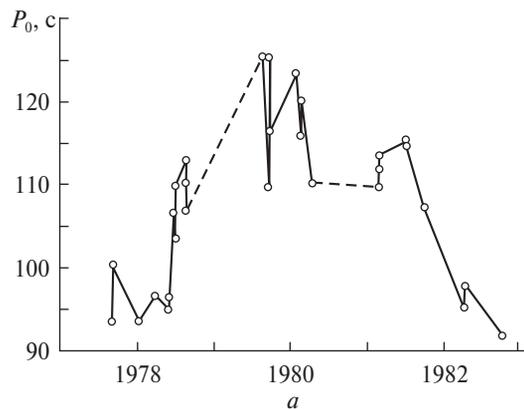


Рис. 2. Видимая кривая блеска объекта «Метеор» (71059A) за 12 октября 1979 г. (N — амплитуда изменения сигнала)

Вид кривых блеска объектов данной системы практически одинаков. Его изменения связаны с увеличением периодов собственного и прецессионного вращения ИСЗ и переходом их в режим «кувыркания». На рис. 3, *a—в* приведены графики изменения периодов собственного вращения исследуемых ИСЗ системы «Метеор» в режиме дестабилизации на длительных (5—8 лет) интервалах наблюдений. На рис. 3, *г* для сравнения показаны изменения солнечного излучения на $\lambda = 10.7$ см в годы наблюдения этих спутников.

Объекты 64053 и 69054 наблюдались уже в режиме «кувыркания». А ИСЗ 71059 — от момента отключения на спутнике стабилизирующих устройств и до полного вхождения в режим «кувыркания». Только в таком режиме космический аппарат ведет себя как полностью свободное тело. И его вращение даже может коррелировать с изменениями солнечной активности, если спутник находится на достаточной высоте, где возмущающий момент, рожденный солнечным излучением, больше за аэродинамический (объект 64053). На меньших высотах преобладают аэродинамические возмущения (объект 69054).

Рис. 3. Изменения периода P собственного вращения на интервале нескольких лет: *a* — ИСЗ «Метеор» (64053), *б* — ИСЗ «Метеор» (69054), *в* — ИСЗ «Метеор» (71059); *г* — поток солнечного излучения на $\lambda = 10.7$ см во время максимума 21-го цикла солнечной активности



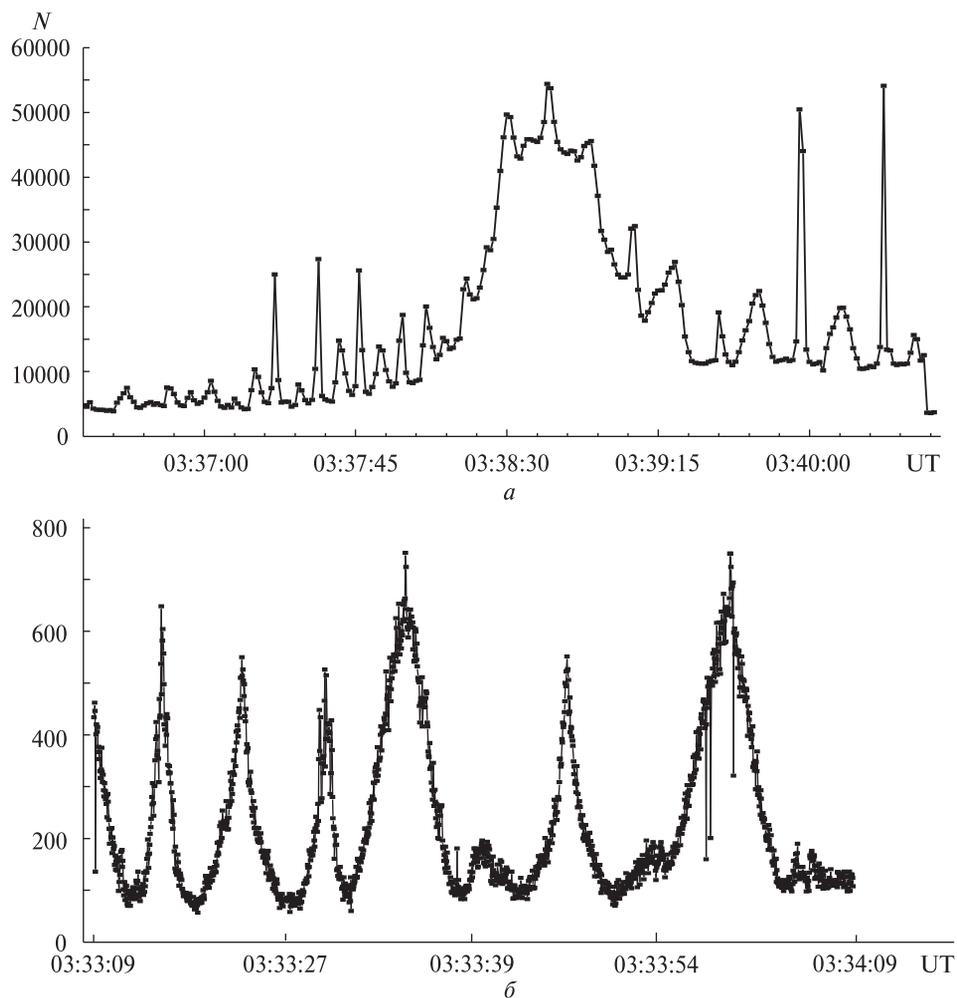


Рис. 4. Видимая кривая блеска ИСЗ «Feng-Yun-1A»: *a* — записанная 10 октября 1990 г., *б* — записанная 19 октября 1990 г. (*N* — число фотоэлектронов)

После отключения стабилизирующих устройств спутник практически сразу начинает быстро вращаться вокруг собственной оси, с последующим (до нескольких лет) затуханием, и постепенным переходом в режим «кувыркания». Эту типичную картину наглядно видно на примере объекта 71059.

ИСЗ «Feng-Yun-1A». Наблюдения данного объекта велись на относительно небольшом интервале времени после двухгодичного его пребывания в режиме дестабилизации. Две приведенные кривые его блеска отличаются между собой только из-за разной ориентации спутника относительно наблюдателя. Так, на

кривой блеска (рис. 4, *a*) в момент широкого максимума, ось собственного вращения объекта была обращена к наблюдателю. На рис. 4, *б* отображено изменение блеска ИСЗ при другом ракурсе относительно наблюдателя. На рис. 5 отображены направления двух осей, вокруг которых происходило видимое вращение данного спутника.

Полученные результаты помогли впоследствии построить модель вращения ИСЗ «Египт-Sat». Здесь следует отметить, что «Feng-Yun-1A» и после двух лет пребывания в режиме дестабилизации еще довольно быстро вращался и не достиг режима «кувыркания».

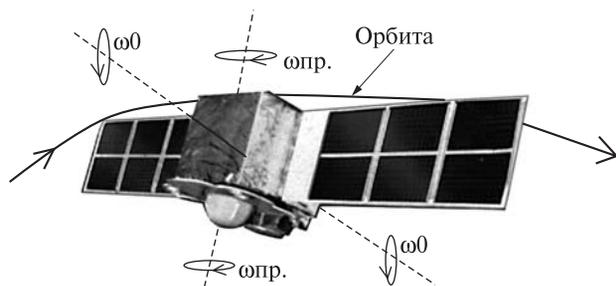
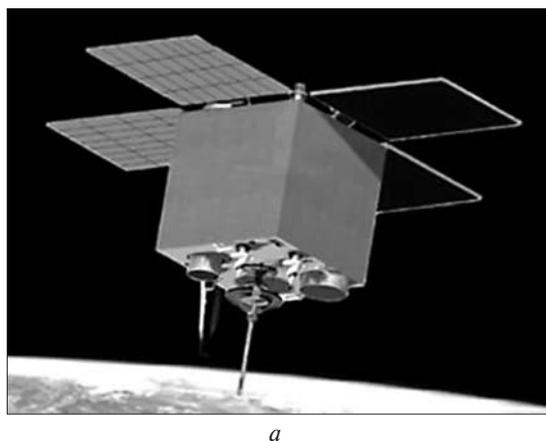
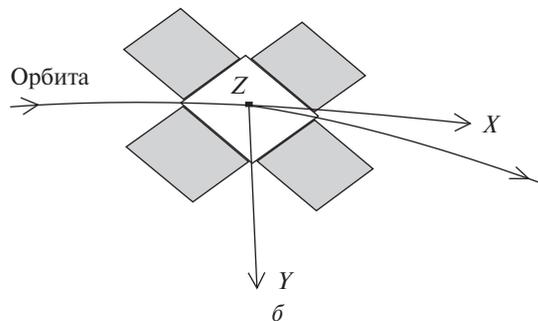


Рис. 5. Схема вращения ИСЗ «Feng-Yun-1A»



а



б

Рис. 6. ИСЗ «EgyptSat» на орбите (а) и его ориентация в штатном режиме (б, вид сверху)

ИСЗ «EgyptSat» (рис. 6). В июле 2010 г., еще до истечения гарантийного срока работы ИСЗ, его поведение на орбите резко изменилось. КА практически перестал повиноваться средствам радиоконтроля. Тогда к ним были подключены имеющиеся в Украине средства оптических наблюдений ИСЗ — обсерватории Львовского и Одесского университетов, ЛКИ УжНУ и станции слежения НКАУ в пп. Дунаевцы и Евпато-

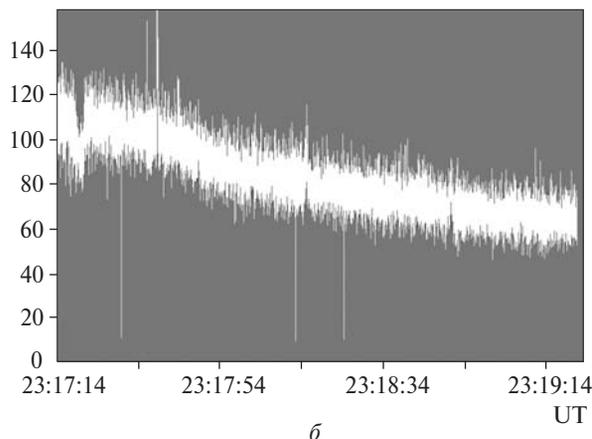
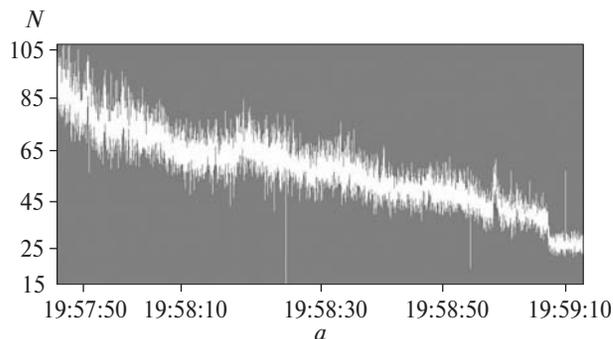


Рис. 7. Видимые кривые блеска ИСЗ в штатном режиме полета: а — для «EgyptSat» 26 февраля 2008 г., б — для «SaudiSat-3» 12 августа 2010 г. (получены на станции Дунаевцы)

рия. На протяжении месяца на перечисленных пунктах велись фотометрические наблюдения этого объекта. Было зафиксировано более 40 его проходов. Время записи фотометрической информации на отдельных пунктах колебались от 15 до 240 с. Обработка и анализ поступающих результатов наблюдений в оперативном режиме проводилась в ЛКИ УжНУ. Всего было проанализировано информацию по 25 прохождениям ИСЗ. Остальную из-за разных причин отбраковали. Оказалось, что вследствие какого-то одноразового воздействия на КА возникло его медленное вращение вокруг перпендикулярной к плоскости орбиты оси Y с периодом 24.5 мин. Кроме того, конусообразное движение вертикальной оси объекта Z вокруг направления радиуса-вектора с периодом в среднем 120 с, с постепенным уходом этой оси с плоскости орбиты порой до 55° . Последнее вращение, на наш

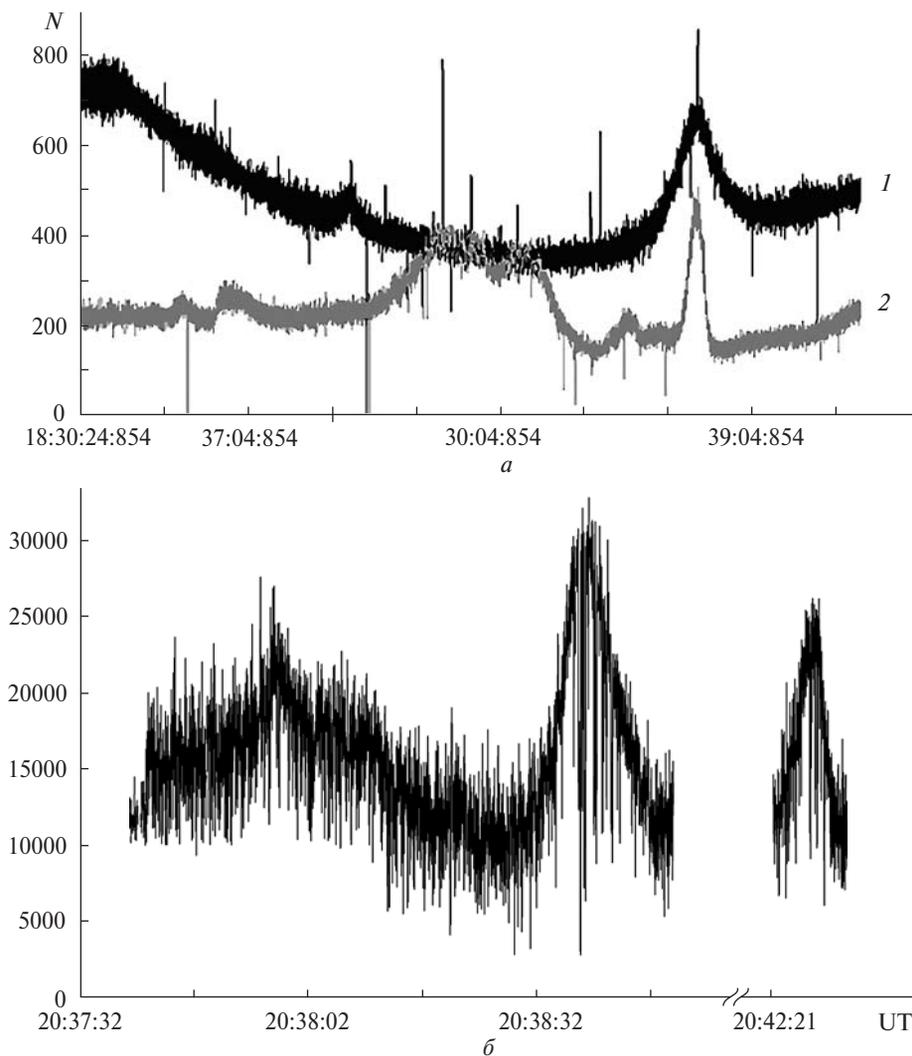


Рис. 8. Видимая кривая блеска ИСЗ «EgyptSat», полученные 23 августа 2010 г.: *а* — на станции Дунаевцы (*1* — интегральный свет, *2* — зеленая область спектра), *б* — на станции Львов (интегральный свет)

взгляд, было вызвано уже воздействием на ИСЗ возникшего аэродинамического момента.

На рис. 7 приводятся кривые блеска двух одинаковых по форме объектов «EgyptSat» и «SaudiSat-3», когда они находились на орбите в штатном режиме.

Как только ИСЗ «EgyptSat» вышел из штатного режима, характер перепада его блеска резко изменился. На рис. 8 для примера приводим две кривые блеска из 25 обработанных. Результаты обработки всех 25 прохождений данного объек-

та по упомянутой выше методике приведены в табл. 2.

В таблице приведены дата, пункт и интервал наблюдений из одного пункта в шкале всемирного времени UT, количество M характерных максимумов блеска на кривой (зеркальных или квазизеркальных), которые служили исходной информацией для определения ориентации ИСЗ, значение узла орбиты объекта на момент наблюдений (наклон орбиты имел постоянное значение $i = 97.9965^\circ$), значение угла ν между на-

Таблица 2. Результаты анализа оптических наблюдений ИСЗ «EgyptSat» в режиме дестабилизации

Дата, 2010 г.	Станция	УТ (начало — конец)	M	Ω , град	ν , град	β , град	P_z , с	P_y , мин	Видимый сегмент поверхности ИСЗ
29 июля	Львов	20 ^h 03 ^m 01 ^s — 20 ^h 08 ^m 16 ^s	3	103.9	55—31	29	117.9	—	Верх и боковые грани
29 июля	Ужгород	20 ^h 04 ^m 59 ^s — 20 ^h 07 ^m 00 ^s	1	103.9	43	29	117.9	—	
4 августа	Одесса	19 ^h 50 ^m 02 ^s — 19 ^h 51 ^m 46 ^s	2	109.7	29—22	16—21	118.3	—	Частично верх, далее нижняя часть
10 августа	Львов	19 ^h 35 ^m 06 ^s — 19 ^h 35 ^m 17 ^s	1	115.6	58	30	119.3	24.523	Нижняя часть, торец
10 августа	Львов	21 ^h 13 ^m 03 ^s — 21 ^h 13 ^m 19 ^s	1	115.7	51	16*	119.3	24.523	Частично верх, далее нижняя часть
10 августа	Ужгород	21 ^h 13 ^m 15 ^s — 21 ^h 15 ^m 03 ^s	2	115.7	45—42	17*	119.3	24.523	Частично верх, далее нижняя часть
11 августа	Одесса	20 ^h 04 ^m 52 ^s — 20 ^h 05 ^m 35 ^s	3	116.6	38—35	1—2*	120.0	24.523	Нижняя часть, торец
11 августа	Ужгород	20 ^h 05 ^m 57 ^s — 20 ^h 06 ^m 30 ^s	2	116.6	45—39	32	120.0	24.523	
12 августа	Дунаевцы	20 ^h 34 ^m 36 ^s — 20 ^h 37 ^m 17 ^s	1	117.5	43.7	13*	120.0	24.523	Верх
12 августа	Львов	18 ^h 58 ^m 46 ^s — 19 ^h 00 ^m 31 ^s	1	117.5	61	48	120.0	24.523	Нижняя часть, торец
12 августа	Львов	20 ^h 34 ^m 55 ^s — 20 ^h 39 ^m 04 ^s	2	117.5	52—12	1*	120.0	24.523	Верх
13 августа	Евпатория	19 ^h 31 ^m 03 ^s — 19 ^h 31 ^m 19 ^s	1	118.5	—	—	120.0	24.523	Верх
13 августа	Дунаевцы	19 ^h 27 ^m 35 ^s — 19 ^h 31 ^m 45 ^s	3	118.5	59—49—52	27—34	120.0	24.523	Нижняя часть, торец
14 августа	Львов	19 ^h 57 ^m 28 ^s — 19 ^h 57 ^m 42 ^s	1	119.5	56	19	120.2	—	Верх
14 августа	Евпатория	18 ^h 21 ^m 00 ^s — 18 ^h 22 ^m 48 ^s	3	119.4	—	—	120.2	—	Верх
20 августа	Дунаевцы	19 ^h 43 ^m 23 ^s — 19 ^h 48 ^m 23 ^s	2	125.4	45—38	24—51	121.4	24.541	Нижняя и боковая части
20 августа	Ужгород	19 ^h 44 ^m 10 ^s — 19 ^h 46 ^m 45 ^s	2	125.4	44—38	25—50	121.4	24.541	
21 августа	Львов	20 ^h 15 ^m 28 ^s — 20 ^h 17 ^m 38 ^s	2	126.4	19—20	27	121.4	24.541	Нижняя часть, торец
22 августа	Львов	19 ^h 06 ^m 19 ^s — 19 ^h 09 ^m 39 ^s	1	127.4	59	37	121.4	24.541	Нижняя часть, боковые грани
22 августа	Львов	20 ^h 44 ^m 23 ^s — 20 ^h 45 ^m 05 ^s	2	127.4	41—38	10°—11°	121.4	24.541	Верх
23 августа	Дунаевцы	19 ^h 36 ^m 25 ^s — 19 ^h 39 ^m 25 ^s	3	128.5	53—42	28—50	121.4	24.541	Частично верх, потом нижняя часть — боковая грань, торец
23 августа	Львов	19 ^h 36 ^m 42 ^s — 19 ^h 41 ^m 21 ^s	2	128.5	53—46	32—46 — 26	121.4	24.541	
25 августа	Львов	20 ^h 37 ^m 32 ^s — 20 ^h 40 ^m 51 ^s	3	130.3	34—10	0—2	121.6	24.554	Нижняя часть, торец
29 августа	Львов	19 ^h 23 ^m 29 ^s — 19 ^h 26 ^m 29 ^s	2	134.2	51—50	40—29	121.6	24.561	Нижняя часть, торец
29 августа	Львов	21 ^h 01 ^m 26 ^s — 21 ^h 03 ^m 10 ^s	2	134.2	30—24	18*—17*	121.6	24.561	Нижняя часть, боковые грани

правлением квазинормали (близкой к реальной) и радиусом-вектором ИСЗ в момент очередного максимума блеска, значение угла β отклонения квазинормали в левую сторону от плоскости орбиты (обозначено звездочкой) и в правую, период P_z собственного вращения спутника (оси Z) вокруг радиуса-вектора, период P_y вращения спутника вокруг оси Y на интервале нескольких прохождений, видимая наблюдателю сторона спутника, а именно: нижняя часть объекта — торцевая сторона спутника и нижние стороны

панелей солнечных батарей; верхняя — это четыре панели и верхняя сторона корпуса спутника, боковая часть — одна из четырех граней корпуса ИСЗ (рис. 6, а).

На основе полученных результатов построена модель вращения ИСЗ «EgyptSat» в двух плоскостях. Схематически она отображена на рис. 9.

ВЫВОДЫ

1. Установленное вращение ИСЗ «EgyptSat» в режиме дестабилизации в августе 2010 г. не отве-

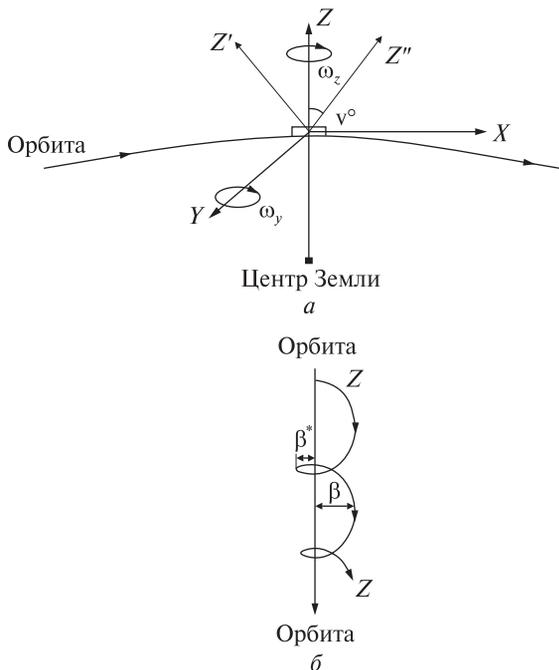


Рис. 9. а — схема вращения ИСЗ «EgyptSat» в орбитальной системе координат, б — след на небесной сфере конца оси Z ИСЗ «EgyptSat», видимый наблюдателю находящемуся в плоскости орбиты во время его фотометрии в августе 2010 г.

чало вращению космического объекта, у которого полностью отключена система стабилизации.

2. Одной из причин возникновения нештатной ситуации с египетским спутником, на наш взгляд, мог стать сбой, возможно одноразовый вследствие удара извне, в работе главного стабилизирующего маховика. Маховик после сбоя не отключился, но изменился режим его работы, что привело к вращению ИСЗ вокруг оси Y с периодом $P_y \approx 24.5$ мин.

3. Возникшее вращение спутника, в свою очередь, вывело его панели солнечных батарей и корпус из оптимального положения относительно направления вектора возмущающего аэродинамического момента, действующего на ИСЗ. Это привело к еще одному вращению объекта вокруг направления радиуса-вектора его оси Z с периодом $P_z \approx 120$ с и постепенным увеличением угла отклонения данной оси от плоскости орбиты. В этом случае главную дестабилизирующую

роль во вращении ИСЗ выполняло уже сопротивление земной атмосферы.

1. Ардашев А. Ю., Дородницына О. А., Рыклова А. В. и др. Оптические наблюдения высокоорбитальных космических объектов для контроля космического пространства // Околоземная астрономия (Космический мусор) / Под ред. А. Г. Масевича. — М.: Космоинформ, 1998. — С. 128—144.
2. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению // Астрометрия и астрофизика. — 1983. — Вып. 50. — С. 89—93.
3. Епишев В. П., Исак И. И., Кудак В. И. и др. Определение ориентации ИСЗ по наземным наблюдениям // Радиотехнические тетради. — 2008. — № 36. — С. 53—54. — (Тр. Первой междунар. конф. «Наблюдения околоземного космического пространства», 22—24 января 2008 г.).
4. Епишев В. П., Исак И. И., Мотрунич И. И. и др. Метод определения величины и природы возмущений, оказывающих воздействие на вращение ИСЗ // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 56. — С. 152—155.
5. Епишев В. П., Исак И. И., Мотрунич И. И. и др. Идентификация искусственных космических объектов: пути решения задачи // Околоземная астрономия-2005. — Казань, 2006. — С. 267—273.
6. Епишев В. П., Исак И. И., Мотрунич И. И. и др. Возмущения во вращении ИСЗ и их причинная взаимосвязь. Результаты исследований // Околоземная астрономия — 2009 (Казань, ИАРАН, КГУ). — М.: ГЕОС, 2010. — С. 35—41.
7. Исак И. И. Решение задач поиска скрытых периодичностей методом наименьших квадратов // Науч. информ. ИНАСАН. — 1994. — Вып. 72. — 14 с.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. P. Epishev, I. I. Isak, V. I. Kudak, I. I. Motrunich, I. F. Noibauer, N. I. Koshkin, A. I. Bilinskii, K. P. Martyniuk-Lototskij, Ya. T. Blagodyr, V. V. Lopachenko, V. V. Rykhalskij, S. V. Ryschenko, A. V. Zhukovetskij

SOME RESULTS OF STUDIES OF THE BEHAVIOUR OF A SATELLITE IN ORBIT IN CONTINGENCY MODE UNDER THE NEAR-EARTH SPACE INFLUENCE

We give some results of our analysis of the behaviour of the spacecraft EgyptSat in orbit in contingency mode as compared with free rotation parameters for other satellites. We propose a conception of an emergency situation with the object. It is shown that the integration of high-precision coordinate and photometric information obtained from different points allows one rapidly and efficiently to analyze the behaviour of spacecrafts which are in orbit without radio connection.

УДК 519.246.8: 517.443: 523.9-327

Я. И. Зельк¹, Н. Н. Степанян², О. А. Андреева²

¹ Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
та Державного космічного агентства України, Київ

² Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», Научный, Крым

ОБОБЩЕННЫЙ СЦЕНАРИЙ ЭВОЛЮЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ СЛАБЫХ ФОТОСФЕРНЫХ И СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

На основі оброблення даних спостережень досліджено еволюцію протягом трьох сонячних циклів великомасштабних магнітних полів на Сонці та встановлено узагальнений сценарій зміни сонячних циклів слабких фотосферних і сильних (в активних областях) полів. Виявлено, що поряд з істотними відмінностями еволюції слабких і сильних магнітних полів, має місце і тісний зв'язок їхньої поведінки у виділених інтервалах напруженості якщо як характеристику для порівняння розглядати швидкість зростання сумарного потоку поля.

Изучение магнитных полей на Солнце было начато Г. В. Бэбкоком и Г. Д. Бэбкоком [14]. В работе [15] Г. В. Бэбкок высказал предположение о связи магнитных полей активных областей с общим магнитным полем Солнца. В 1960-х годах по наблюдениям на двойном магнитографе [15] в Крымской астрофизической обсерватории А. Б. Северным [9–11, 16–19] было показано, что на Солнце нет когерентного общего магнитного поля. Оно складывается из мелких элементов разного размера, напряженности и знака. Лишь результаты значительного пространственного усреднения позволяют обнаружить в некоторых крупномасштабных структурах преобладание потока магнитного поля той или иной полярности. Именно такого рода пространственное усреднение (сглаживание) имеет место при уменьшении пространственной разрешающей способности наблюдений. В подробном анализе наблюдений полярных и экваториальных зон Солнца А. Б. Северным были исследованы различные крупномасштабные солнечные образования, характеризующиеся напряженностью магнитных полей в них от единиц гаусс в фоновых полях до тысяч гаусс в солнечных пятнах. В работе [9, 17] было показано, что поле поляр-

ных областей Солнца отличается от поля типа диполя или равномерно намагниченной сферы. А. Б. Северным впервые отмечены трудности в интерпретации фонового поля как рассеянного поля хвостовых частей активных областей.

Ввиду ограниченности объема работы авторы не имеют возможности привести здесь подробный анализ (который ими сделан) литературных источников по сформулированной проблеме. Сошлемся лишь на свои статьи [1, 4–8, 12, 13, 21], в которых исследовано дифференциальное вращение и широтный дрейф слабых фотосферных магнитных полей на основе синоптических карт магнитных полей Солнца, полученных в обсерватории NSO/Kitt Peak (США) (<http://nso.kp.nso.edu/>) и безвозмездно предоставленных авторам. Было установлено, что особенности дифференциального вращения магнитных образований, а также цикличность изменения их широтного распределения для слабых и сильных магнитных полей на Солнце существенно различаются. Однако анализ широтно-временных распределений скорости роста потока суммарного магнитного поля N- и S-полярности разной напряженности и их эволюции до настоящего времени не проводился.

Целью работы является исследование закономерностей эволюции крупномасштабных маг-

нитных полей на Солнце и установление общего сценария изменения солнечных циклов слабых фотосферных и сильных (в активных областях) магнитных полей на основе данных наблюдений. Полученные результаты позволяют обнаружить, наряду с рассмотренными в работах [1, 4—8, 12, 13, 21] существенными различиями в поведении слабых и сильных магнитных полей, их тесную связь.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи.

1) Исследование широтно-временных распределений скорости роста суммарного магнитного поля разной напряженности, их эволюции в течение трех солнечных циклов и их связи с характеристиками вращения.

2) Сравнение широтно-временной зависимости роста потока суммарного магнитного поля разной напряженности на 26-летнем интервале наблюдений с временной зависимостью относительного числа солнечных пятен и с широтно-временной зависимостью площадей солнечных пятен.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В настоящей работе и в работах [1, 4—8, 12, 13, 21] используются данные наблюдений с помощью магнитографов обсерватории NSO/Kitt Peak (<http://nsokp.nso.edu/>), любезно предоставленные авторам настоящей статьи доктором Дж. Харви еще до выставления их в интернете. Использованные здесь данные получены в NSO/Kitt Peak при кооперации с NSF/NOAO, NASA/GSFC и NOAA/SEL.

Данные соответствуют временному интервалу от 1 января 1977 г. до 1 октября 2003 г. Это соответствует 357 кэррингтоновским оборотам Солнца № 1650—2006. Данные охватывают три солнечных цикла, от фазы роста 21-го до фазы спада 23-го цикла. Материал наблюдений представляет собой синоптические карты, каждая из которых соответствует одному кэррингтоновскому обороту и составлена из результатов ежедневных измерений продольного вектора напряженности магнитного поля Солнца. Обработка синоптических карт проводилась в выделенных интервалах напряженности магнитного поля N- и S-полярности из диапазона значений

по модулю [0; 20] мТл. На основании анализа гистограмм количества пикселей на карте в зависимости от напряженности в диапазоне [0; 20] мТл было выделено пять характерных интервалов модуля напряженности магнитного поля [0; 0.5), [0.5; 1), [1; 2), [2; 5), [5; 20) мТл.

Из временных рядов потоков напряженности магнитного поля $N(H_k, t_l, \varphi_n)$ и $S(H_k, t_l, \varphi_n)$, отражающих зависимости положительной (N) и отрицательной (S) полярности в выделенных пятиградусных широтных зонах, построенных методом, изложенным в работе [7], получены временные ряды потока суммарного магнитного поля $Sum(H_k, t_l, \varphi_n)$ как суммы модулей соответствующих значений потоков:

$$Sum(H_k, t_l, \varphi_n) = |N(H_k, t_l, \varphi_n)| + |S(H_k, t_l, \varphi_n)|. \quad (1)$$

Здесь H_k ($k = 1, 2, \dots, 7$) — интервалы модуля напряженности магнитного поля, указанные выше из диапазона напряженности [0; 20] мТл; φ_n ($n = \pm 5, \pm 10, \dots, \pm 65, \pm 70$) — 28 пятиградусных широтных зон в диапазоне широт $[-70^\circ; 70^\circ]$ на Солнце; t_l ($l = 1, 2, \dots, 128520$) — временные отсчеты на 26-летнем интервале наблюдений; шаг дискретизации по времени $\Delta t = 0.0757$, что соответствует 1° по долготе.

Для каждого из пяти интервалов модуля напряженности магнитного поля в каждом из 28 рядов длиной по 128520 отсчетов каждый член ряда (1) представляет собой поток суммарного магнитного поля напряженностью H_k N- и S-полярности в относительных единицах на центральном меридиане Солнца в широтной зоне φ_n от элементарной площадки длиной 1° по долготе и шириной 5° по широте в момент времени t_l .

Аналогичным образом строятся временные ряды данных $dif_Sum(H_k, t_l, \varphi_n)$ для первой разности двух последовательных отсчетов каждого ряда $Sum(H_k, t_l, \varphi_n)$:

$$dif_Sum(H_k, t_l, \varphi_n) = \\ = Sum(H_k, (t_l + \Delta t), \varphi_n) - Sum(H_k, t_l, \varphi_n), \quad (2)$$

который при каждом значении напряженности H_k в каждый момент времени t_l на каждой широте φ_n характеризует рост во времени потока суммарного магнитного поля.

ШИРОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА ПОТОКА СУММАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

По значениям скорости роста потока суммарного магнитного поля в соответствии с временными рядами (2) в 28 пятиградусных широтных зонах в диапазоне $[-70^\circ; 70^\circ]$ для пяти указанных выше интервалов напряженности магнитного поля в диапазоне $[0; 20]$ мТл построены карты широтно-временной зависимости потока дисбаланса на 26-летнем временном интервале наблюдений. Для интервала напряженности $[0.5; 1)$ мТл и $[2; 5)$ мТл скорость роста потока суммарного магнитного поля в относительных единицах представлена в виде изолиний в координатах время — широта на рис. 1. Жирной кривой отображена «нулевая» изолиния, разделяющая область роста (положительная скорость роста, определяемая рядом (3)) и область убывания (отрицательная скорость роста) потока суммарного магнитного поля.

Анализ эволюции скорости роста потока суммарного магнитного поля в диапазоне напряженности $[0; 20]$ мТл на 26-летнем временном интервале на основании карт, аналогичных приведенным на рис. 1, приводит к следующим выводам.

В эволюции областей роста потока суммарного магнитного поля четко наблюдаются три цикла активности — с 21-го по 23-й. Для 22-го и 23-го циклов переход от убывания потока к возрастанию происходит около 1985 г. и 1995 г. соответственно, тогда как максимум скорости роста потока наступает через два года: в 1987 г. и 1997 г. соответственно.

Быстрый рост потока суммарного магнитного поля начинается на широтах $20-25^\circ$ в обеих полушарах. Затем локальные максимумы скорости роста смещаются к более низким и высоким широтам, распространяясь к полюсам примерно в течение 6—8 лет, а к экватору — 5—6 лет.

Для полей более высокой напряженности скорость роста потока на высоких широтах меньше, чем на низких широтах. На всех широтах (особенно ярко для полей малой напряженности) проявляются квазидвухлетние (с периодом приблизительно 2.2 г.) колебания скорости изменения потока суммарного магнитного поля, что согласуется с теоретическими представлениями.

ЭВОЛЮЦИЯ ОБЛАСТЕЙ РОСТА ПОТОКА СУММАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СТАБИЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ СТРУКТУР ПОТОКА С ДОСТОВЕРНЫМИ ПЕРИОДАМИ

В работах [1, 4] оценено стационарное дифференциальное вращение фоновых магнитных полей на Солнце с применением методов спектрального анализа, среди которых наиболее эффективным для решения этой задачи оказался метод Уэлча [2, 3, 20]. При определении стационарного вращения магнитных полей на Солнце в каждом из семи интервалов модуля напряженности магнитного поля определялись статистически достоверные пики спектральной плотности мощности $PSD(H_k, \varphi_n, P)$ (P — период вращения), вычисленной по каждому из 28 временных рядов, и соответствующие этим пикам достоверные периоды вращения P_peak . На основании проведенного в работе [8] анализа широтного распределения указанных пиков выделены такие наиболее достоверные периоды вращения с некоторыми узкими интервалами их окрестностей, которые преобладают в более чем пяти пятиградусных широтных зонах во всех интервалах напряженности магнитного поля из диапазона $[0; 20]$ мТл:

$$\begin{aligned} P_1 &= 26.91 \pm 0.15 \text{ сут,} \\ P_2 &= 28.09 \pm 0.15 \text{ сут,} \\ P_3 &= 30.32 \pm 0.25 \text{ сут.} \end{aligned} \quad (3)$$

Для анализа широтно-временных изменений вращения фоновых магнитных полей разной напряженности N- и S-полярности скорости роста потока суммарного магнитного поля по аналогии с [5] к каждому из временных рядов (1) применялся спектральный анализ по методу Уэлча в скользящем временном окне шириной 1 год со сдвигом на полгода. На 26-летнем временном интервале наблюдений для рядов (1) было получено по 52 зависимости спектральной плотности мощности от напряженности H , времени t , широты φ , периода P на последовательных годичных интервалах, отстоящих друг от друга на полгода, и построены зависимости вида

$$PSD_Sum(H, t, \varphi, P) \quad (4)$$

на всем временном интервале наблюдений.

В указанных узких интервалах $[P_{LO}; P_{UP}]$ достоверных периодов вращения (3) с соответ-

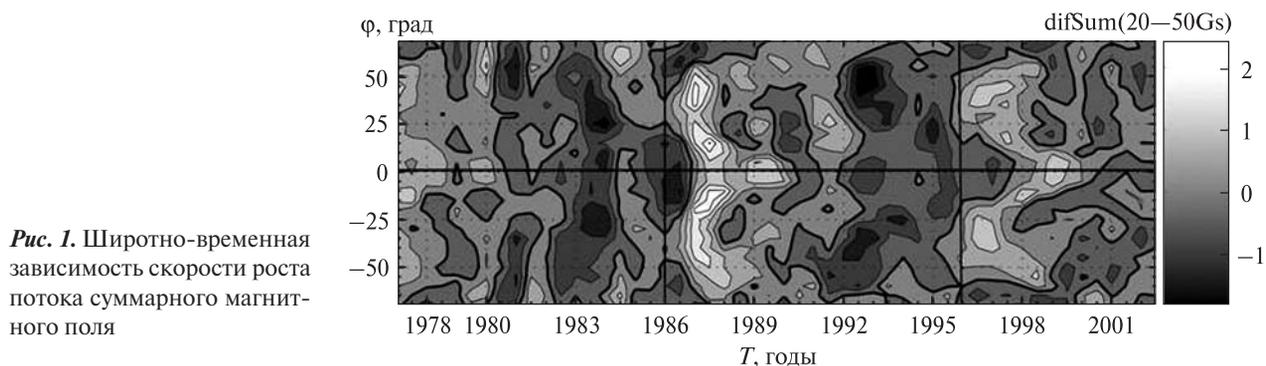


Рис. 1. Широтно-временная зависимость скорости роста потока суммарного магнитного поля

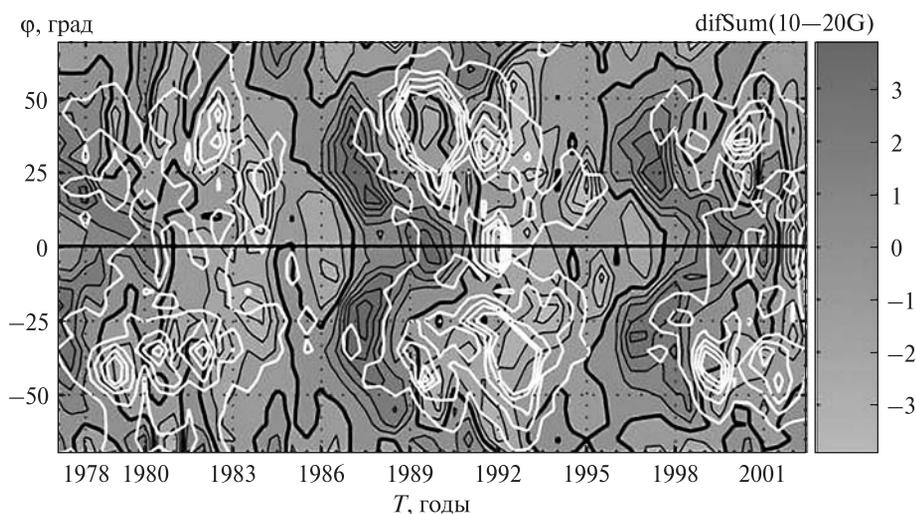


Рис. 2. Связь эволюции скорости роста потока суммарного магнитного поля со значимым вращением структур потока

вующими нижней P_{LO} и верхней P_{UP} границами по найденной зависимости (4) вычисляется так называемая суммарная мощность процесса (1)

$$S1_Sum(H, t, \varphi) = \sum_{P_{LO}}^{P_{UP}} PSD_Sum(H, t, \varphi, P) \quad (5)$$

для каждой широтной зоны во всех интервалах напряженности магнитного поля из диапазона [0; 20] мТл. $S1_Sum(H, t, \varphi)$ характеризует вращение структур потока суммарного магнитного поля с таким достоверным периодом из (4), в окрестности $[P_{LO}; P_{UP}]$ которого она вычисляется.

Для установления картины эволюции структур потока суммарного магнитного поля, обладающих значимыми периодами вращения, были построены широтно-временные зависимости суммарной мощности $S1_Sum(H, t, \varphi)$, вычисленной в соответствии с (5). В виде белых жирных изолиний указанные зависимости $S1_Sum(H, t, \varphi)$ были представлены на фоне аналогичных карт

широтно-временного распределения скорости роста потока суммарного магнитного поля на интервале наблюдений 26 лет, построенных на основании временных рядов (2). На рис. 2 приведен результат такого наложения для интервала напряженности магнитного поля [1; 2] мТл. Фоновое изображение представляет эволюцию областей роста потока суммарного магнитного поля, черные жирные кривые отмечают «нулевые» изолинии перемены знака скорости роста с отрицательной на положительную, а белые жирные изолинии характеризуют вращение структур потока суммарного магнитного поля с достоверным периодом $P_1 = 26.91 \pm 0.15$ сут.

Анализ зависимостей, подобных отображенным на рис. 2, во всех интервалах напряженности из диапазона [0; 20] мТл показывает, что стабильное вращение структур потока суммарного магнитного поля (максимумы в белых жирных изолиниях) имеет место в моменты времени и на широтах на-

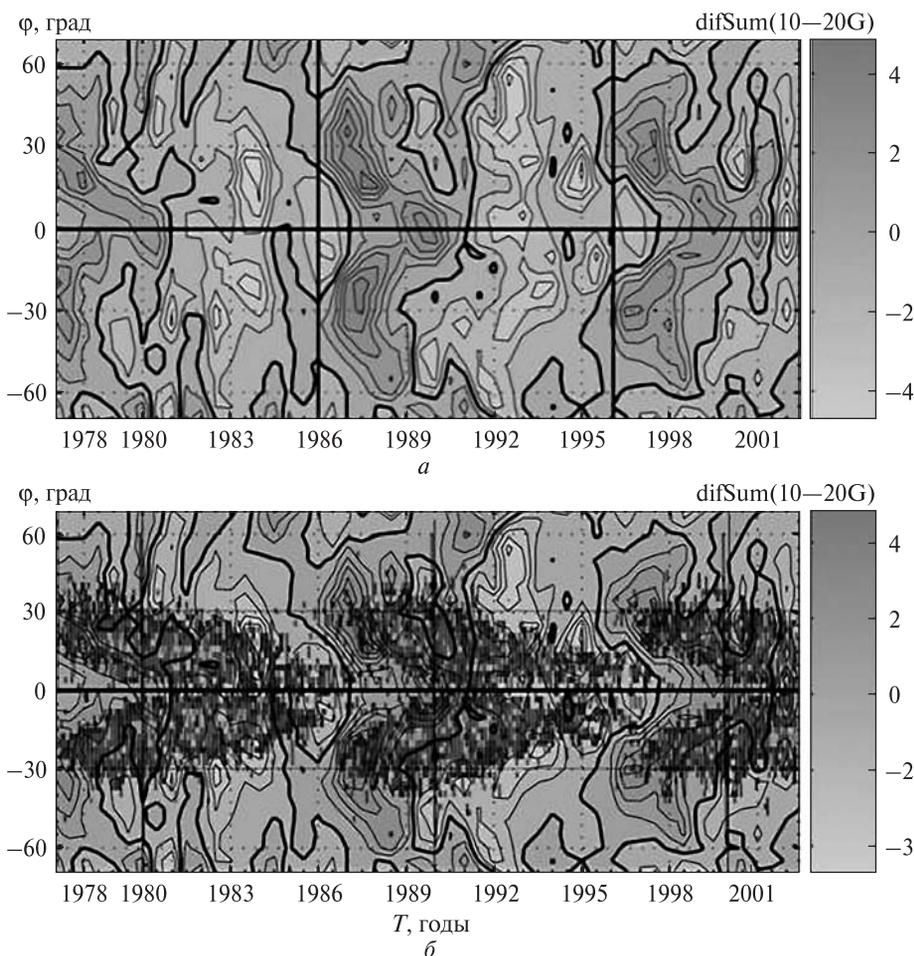


Рис. 3. Сравнение широтно-временной зависимости роста потока суммарного магнитного поля с аналогичной зависимостью площадей солнечных пятен

ибольшего убывания скорости роста этого потока (светло-серые участки в фоновом изображении).

СРАВНЕНИЕ ШИРОТНО-ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РОСТА ПОТОКА СУММАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЭВОЛЮЦИЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ТРЕХ ЦИКЛАХ

Широтно-временные зависимости роста потока суммарного магнитного поля на 26-летнем интервале наблюдений во всех интервалах напряженности магнитного поля из диапазона [0; 20] мТл были сравнены с аналогичной зависимостью площадей солнечных пятен. Результаты сравнения представлены на рис. 3. На рис. 3, *а* представлена широтно-временная зависимость скорости роста потока суммарного магнитного поля. На рис. 3, *б* на эту зависимость наложена широтно-временная зависимость площадей солнечных пя-

тен на 26-летнем интервале наблюдений, взятая из сайта <http://solarscience.msfc.nasa.gov>.

Анализ зависимостей, отображенных рис. 3, позволяет сделать следующие выводы.

- Линия перемены знаков скорости роста потока суммарного магнитного поля от «-» к «+» скорости — «нулевая» (черная) изолиния проходит в каждом из трех циклов активности в конце цикла на широтах 20—25° при значительном количестве пятен.
- Точки максимального роста (максимумы в изолиниях фонового изображения) и области значительного роста (ограниченные изолиниями высокого уровня) потока суммарного магнитного поля на всех широтах примыкают к областям появления пятен нового цикла.
- С течением времени увеличению площадей пятен соответствует спад скорости роста потока

суммарного магнитного поля, а далее — убывание (отрицательная скорость роста) потока суммарного магнитного поля слабой напряженности в диапазоне [0; 20] мТл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обработки данных наблюдений исследована эволюция в течение трех солнечных циклов крупномасштабных магнитных полей на Солнце и установлен обобщенный сценарий эволюции солнечных циклов слабых фотосферных и сильных (в активных областях) полей. Полученные результаты свидетельствуют, что наряду с существенными различиями в эволюции слабых и сильных магнитных полей на Солнце, исследованными, в частности, в цикле работ [1, 4—8, 12, 13, 21], имеет место и тесная связь их поведения в выделенных интервалах напряженности, если в качестве характеристики для сравнения рассматривать скорость роста суммарного потока поля. Проблема исследования факторов этой связи является предметом отдельного научного исследования.

1. Андреева О. А., Зельк Я. И., Степанян Н. Н. Дифференциальное вращение солнечных магнитных полей // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2008. — **104**, № 1. — С. 5—12.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. — М: Мир, 1983. — 312 с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М: Мир, 1989. — 540 с.
4. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Связь дифференциального вращения магнитных полей на Солнце со знаком и величиной напряженности поля // Пробл. управления и информатики. — 2008. — № 6. — С. 116—132.
5. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Широтно-временные изменения вращения солнечных структур в трех циклах активности Солнца // Пробл. управления и информатики. — 2008. — № 1. — С. 139—146.
6. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Корреляционные и спектральные методы оценивания широтного дрейфа солнечных магнитных полей // Управляющие системы и машины. — 2009. — № 3. — С. 30—35.
7. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Широтный дрейф дисбаланса солнечных магнитных полей // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2009. — **105**, № 1. — С. 18—32.
8. Зельк Я. И., Степанян Н. Н., Андреева О. А. Оценивание широтного дрейфа и дифференциального вращения потока дисбаланса магнитных полей на Солнце по данным наблюдений // Пробл. управления и информатики. — 2010. — № 2. — С. 144—156.
9. Северный А. Б. О природе магнитных полей на Солнце // Астрон. журн. — 1965. — 42, № 2. — С. 217—231.
10. Северный А. Б. Исследование общего магнитного поля Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1966. — **35**. — С. 97—138.
11. Северный А. Б. Магнитная асимметрия и колебания общего магнитного поля Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1968. — **38**. — С. 3—51.
12. Степанян Н. Н., Андреева О. А., Зельк Я. И. Дисбаланс магнитных полей на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2009. — **105**, № 1. — С. 5—17.
13. Andryeyeva O. A., Stepanian N. N. Background magnetic fields during last 3 cycles of solar activity // Astron. Nachr. — 2008. — **329**, N 6. — P. 579—582.
14. Babcock H. D., Babcock H. W. The Sun's magnetic fields, 1952—1954 // Astrophys. J. — 1955. — **121**. — P. 349—366.
15. Babcock H. W. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // Astrophys. J. — 1961. — **133**. — P. 572—587.
16. Severny A. Solar magnetic fields // Space Sci. Revs. — 1964. — **3**. — P. 451—486.
17. Severny A. Solar Magnetic Fields // XII General Assembly IAU. Hamburg, 26 Aug., 1964. — Hamburg, 1964. — P. 755—773.
18. Severny A. B. Is the Sun a magnetic rotator? // Nature. — 1969. — **224**, N 5214. — P. 53—54.
19. Severny A. B. Time fluctuation of the general magnetic field of the Sun // Quart. J. Roy. Astron. Soc. — 1971. — **12**, N 4. — P. 363—379.
20. Welch P. D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoustics. — 1967. — **AU-15**. — P. 70—73.
21. Zyelyk Ya. I. Correlation and Spectral Models in Stationary Estimation Problems of the Differential Rotation and the Latitudinal Drift of the Magnetic Fields on the Sun // Proceedings of the 2nd International conference on inductive modeling (ICIM 2008) (Kyiv, September 15—19, 2008). — Kyiv, 2008. — P. 267—273.

Надійшла до редакції 01.10.11

Ya. I. Zyelyk, N. N. Stepanian, O. A. Andryeyeva

GENERALIZED SCENARIO FOR THE EVOLUTION OF SOLAR CYCLES OF WEAK PHOTOSPHERIC AND STRONG MAGNETIC FIELDS

Based on observational data, the evolution of large-scale solar magnetic fields is studied over three solar cycles and the generalized scenario of the change for solar cycles of weak photospheric and strong (in active regions) fields is determined. It is found that, along with significant differences in the evolution of weak and strong magnetic fields, there is a close relation between their behaviors in the selected strength intervals, when the growth rate of the total field flux is considered as a characteristic for the comparison.

УДК 523.9

А. А. Логинов¹, О. К. Черемных¹, В. Н. Криводубский², Н. Н. Сальников¹

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Київ

² Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОРСИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЦА

На основі порівняння результатів проведеного нами чисельного моделювання глобальної течії в сонячній конвективній зоні з даними спостережень торсійних коливань Сонця обґрунтовано гідродинамічну природу цих коливань, які є тороїдальною складовою глобальної тривимірної асиметричної коливальної течії, асиметричної відносно екватора. Фізичним механізмом виникнення торсійних коливань служить втрата стійкості диференціального обертання Сонця.

ВВЕДЕНИЕ

Затянувшийся во времени 23-й цикл солнечной активности был аномальным по многим параметрам (см. <http://www.swpc.noaa.gov/Solar Cycle>), что поставило перед исследователями ряд вопросов, требующих объяснения. Важной характеристикой солнечных циклов служат торсионные (крутильные) колебания угловой скорости (дифференциального вращения), открытые Ховардом и Лабонтом [15] в результате анализа доплеровских спектроскопических измерений поверхностных скоростей всего солнечного диска. Внешне по наблюдениям торсионные колебания представляют собой зоны быстрого и медленного вращения, чередующиеся по широте и мигрирующие от высоких широт к низким по мере развития цикла (рис. 1). Позднее с помощью методов глобальной [17, 25, 26] и локальной [13] гелиосейсмологии торсионные колебания были идентифицированы в подфотосферных слоях. Есть также указания на то, что эти колебания могут простираться вглубь вплоть до дна солнечной конвективной зоны (СКЗ) [12, 29].

Актуальность изучения торсионных колебаний состоит в том, что активные магнитные области возникают преимущественно на границе

между зонами быстрого и медленного вращения поверхностных слоев [23]. Другими словами, из анализа наблюдений стало ясно, что зональные полосы торсионных колебаний связаны с широтными зонами пятнообразования, которые мигрируют от средних широт к экватору в течение 11-летнего цикла [25, 26]. В результате гелиосейсмических экспериментов установлено, что вблизи максимума 23-го цикла произошла смена режима торсионных колебаний ниже дна СКЗ в тахоклине: период колебаний 1.3 года, выявленный в начале цикла [16], после 2001 г. исчез и больше не проявлялся [19, 21]. Кроме того, согласно последним наблюдениям [20, 21] обнаружена синхронизация начала нового 24-го цикла с повышенными скоростями мигрирующих к экватору полос торсионных колебаний, что чрезвычайно важно с точки зрения прогнозирования начала новых циклов. Таким образом, изучение механизмов торсионных колебаний насущно в аспекте объяснения наблюдаемых флюктуаций солнечной активности и их прогнозов. В настоящей работе представлены результаты проведенных нами численных расчетов пространственных и временных вариаций тороидального глобального течения (торсионных колебаний) в СКЗ на основе механизма, который базируется на концепции чисто гидродинамической неустойчивости вращающейся жидкости.

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ВОЗМУЩЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ СОЛНЦА

Ранее нами был обоснован механизм генерации на Солнце глобального полоидального течения в виде вихрей Тейлора, возникающего при потере устойчивости дифференциального вращения [8]. В рамках предложенного механизма в работе [9] рассмотрена простая математическая модель для расчета пространственного вида и эволюции во времени полоидального гидродинамического течения, учитывающая гелиосейсмические данные [28] о внутреннем вращении СКЗ. Здесь мы делаем следующий шаг: рассчитываем вторую — тороидальную (азимутальную) составляющую глобального течения.

Математическая модель [9] состоит из уравнения движения вязкой жидкости

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] =$$

$$= -\nabla P - \rho \nabla U + \eta \Delta \mathbf{V} + (\xi + \eta/3) \text{grad div}(\mathbf{V}) \quad (1)$$

и уравнения неразрывности в форме неупругости

$$\text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (2)$$

где P — давление, U — гравитационный потенциал, η — коэффициент динамической вязкости жидкости, ξ — коэффициент второй вязкости, \mathbf{V} — вектор скорости течения солнечной плазмы, ρ — плотность плазмы. Вследствие предположения неупругости плотность в уравнениях (1) и (2) является функцией только пространственных координат. Уравнения (1) и (2) анализировались в сферической системе координат (R, θ, φ) , начало которой находится в центре солнечной сферы с радиусом R_0 , а полярная ось совпадает с осью вращения Солнца. Решение искалось в виде суммы стационарной скорости большой амплитуды (описывающей дифференциальное вращение) и малой добавки к ней (описывающей гидродинамические течения значительно меньшей амплитуды скорости):

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_\varphi + \mathbf{v}, \quad |\mathbf{V}_\varphi| \gg |\mathbf{v}|, \quad (3)$$

в предположении осевой симметрии течения ($\partial/\partial\varphi = 0$). Здесь: \mathbf{V}_φ — заданная стационарная азимутальная скорость вращения в СКЗ, опре-

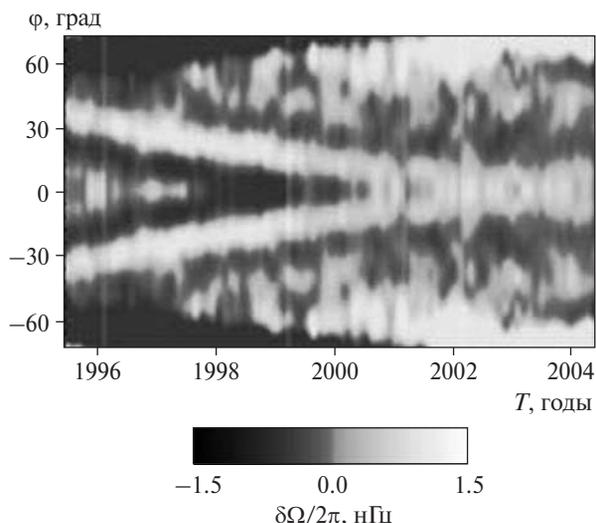


Рис. 1. Торсионные колебания: зависимость вариаций частоты вращения Солнца $\delta\Omega/2\pi$ от солнечной широты φ и времени (ось абсцисс) для относительного радиуса $r = R/R_0 = 0.99$ (R_0 — радиус Солнца). Рисунок взят из работы [18]

деленная методами гелиосейсмологии, $\mathbf{v} = \{v_R, v_\theta, v_\varphi\}$ — искомая малая поправка (v_R, v_θ, v_φ — радиальная, меридиональная (широтная) и азимутальная (тороидальная) составляющие скорости \mathbf{v}). Как показано в работе [9], скорость \mathbf{v} описывает течение малой амплитуды, возникающее вследствие потери устойчивости дифференциального вращения. Уравнения (1) и (2) дополняются граничными условиями обращения в ноль нормальной к граничным поверхностям радиальной составляющей скорости v_R на внешней границе фотосферы ($R/R_0 = 1$) и на дне СКЗ ($r = R/R_0 = 0.68$):

$$v_R|_{R/R_0=1} = 0, \quad v_R|_{R/R_0=0.68} = 0. \quad (4)$$

Следует отметить, что приведенные граничные условия (4), известные также как условия непротекания [2], являются достаточно точным приближением к строгим граничным условиям равенства тензоров напряжений на границе раздела двух сред.

После линеаризации системы уравнений (1) и (2) относительно \mathbf{v} и применения операции rot к обеим частям линеаризованного уравнения (1) получаем уравнения

$$\text{rot} \left\{ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{V}_\varphi \cdot \nabla) \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{V}_\varphi \right] \right\} = 0, \quad (5)$$

$$\text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (6)$$

где в правой части уравнения (5) мы пренебрегли силами вязкости на том основании, что они значительно меньше динамических сил. Система уравнений (5), (6) с граничными условиями (4) описывает в нашем случае глобальные течения в СКЗ, возникающие при потере устойчивости вращения сферического слоя жидкости (сферическое течение Куэтта) [6, 14]. Радиальная зависимость глобальной стационарной угловой скорости \mathbf{V}_φ в уравнении (5) соответствует ее профилю в СКЗ, полученному из расшифровки гелиосейсмических данных [28].

Общая форма решения для скорости \mathbf{v} (см. [5, 9]) имеет следующий вид:

$$\rho \mathbf{v} = \text{rot}(\mathbf{A}) + \mathbf{e}_\varphi v_\varphi, \quad (7)$$

где векторный потенциал

$$\mathbf{A} = A(R, \theta, t) \cdot \mathbf{e}_\varphi \quad (8)$$

в силу осевой симметрии ($\partial/\partial\varphi = 0$) имеет ненулевую только φ -ю составляющую (\mathbf{e}_φ — единичный азимутальный вектор).

При условии (7) уравнение (6) удовлетворяется автоматически, а для скорости \mathbf{v} солнечной среды получаем выражение

$$\mathbf{v} = \left(\frac{1}{\rho R^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (AR \sin \theta), -\frac{1}{\rho R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial R} (AR \sin \theta), v_\varphi \right). \quad (9)$$

Отсюда следует, что радиальная (v_R) и меридиональная (v_θ) составляющие полоидального течения полностью определяются значением скалярной функции $A(R, \theta, t)$.

После подстановки (9) в (5) и проведения преобразований, описанных в работе [9], приходим к двум линейным дифференциальным уравнениям в частных производных для определения скалярных функций A и v_φ

$$\frac{\partial^2 (\Delta \mathbf{A})_\varphi}{\partial t^2} - \frac{1}{R} \left\{ \ln(R^2 \sin^2 \theta) \right\}, \frac{V_\varphi}{R^3 \sin^2 \theta} \left\{ AR \sin \theta, V_\varphi R \sin \theta \right\} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + \frac{1}{\rho R^3 \sin^2 \theta} \left\{ V_\varphi R \sin \theta, AR \sin \theta \right\} = 0, \quad (11)$$

где $\Delta \mathbf{A}$ — лапласиан от функции \mathbf{A} , $\{f, g\}$ — скобки Пуассона, которые для любых двух функций f и g в сферической системе координат имеют вид:

$$\{f, g\} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial R} \frac{\partial g}{\partial \theta} - \frac{\partial f}{\partial \theta} \frac{\partial g}{\partial R} \right\}.$$

Поскольку коэффициенты уравнений (10) и (11) не зависят от времени, то решение для векторного потенциала \mathbf{A} и тороидальной скорости v_φ ищем в виде

$$A(R, \theta, t) = \tilde{A}(R, \theta) e^{\gamma t}, \quad v_\varphi(R, \theta, t) = \tilde{v}_\varphi(R, \theta) e^{\gamma t}, \quad (12)$$

где инкремент γ определяет поведение во времени векторного потенциала и скорости.

Из вида (10) и (11) следует, что для нахождения всех трех составляющих скорости \mathbf{v} (см. выражение (9)) необходимо решить однородное линейное дифференциальное уравнение (10) в частных производных относительно функций $A(R, \theta, t)$.

Заметим, что в уравнение (10) не входит плотность ρ . Она появляется только на заключительном этапе вычисления составляющих скорости \mathbf{v} по формулам (9), (11), и поэтому может быть любой функцией радиуса. В частности, распределение плотности по радиусу нами взято из стандартной модели Солнца [1].

Решение уравнения (10) с использованием указанной подстановки проводилось численно методом Галеркина и описано в работах [8, 9]. Здесь кратко представлены полученные нами результаты.

Для численного анализа гидродинамического течения мы использовали 18 базисных функций в разложении функции $\tilde{A}(R, \theta)$. В результате моделирования было получено девять антисимметричных и девять симметричных (относительно плоскости экватора Солнца) решений $\tilde{A}(R, \theta)$ со сложной пространственной структурой. Им соответствуют 18 показателей γ^2 , описывающих колебательные и нарастающие по времени решения $A(R, \theta, t)$. Ввиду линейности рассматриваемой модели можно говорить только о частотах колебаний и времени нарастания для каждой моды и зависимости только относительной ам-

плитуды скорости от полярного угла θ и относительного радиуса $r = R/R_0$ в СКЗ. Численные расчеты показали, что меридиональная составляющая антисимметричных течений обнуляется на экваторе, в то время как симметричная составляющая может иметь на экваторе отличную от нуля скорость v_0 . В результате численного моделирования получены колебательные решения: два антисимметричных с периодами колебаний около 130 и 35 лет и одно симметричное с периодом около 20 лет. Заметим, что рассчитанные периоды выявляются при интерпретации различных наблюдаемых индексов солнечной активности. Так, например, период магнитного цикла Хейла [3, 4, 10] и время миграции торсионных колебаний от полюсов к экватору [15] близки к 20 годам. Шов [27] при анализе данных Вольфа об временных изменениях относительного числа солнечных пятен обнаружил 30-летние группы «более длинных» 11-летних циклов (см. также монографии Ю. И. Витинского [3] и Б. М. Рубашева [11] и ссылки в них). Величина 130 лет близка к вековому циклу (верхний предел которого составляет около 120 лет) изменения мощности явлений пятнообразования [4].

Отметим, что поскольку уравнение (10) линейное, то сумма всех полученных решений также является решением, и следовательно, все описываемые ими течения могут одновременно наблюдаться на Солнце.

ТОРСИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЦА

Переходим к рассмотрению тороидальной составляющей гидродинамического течения малой амплитуды. Согласно условию (3) крутильные колебания можно представить в виде малых по величине периодических изменений скорости v_φ на фоне тороидальной скорости большой амплитуды V_φ . Покажем, что этот процесс можно описать с помощью тороидальной составляющей рассчитанных нами ранее колебательных мод. Анализ колебаний проведем на примере антисимметричной моды с периодом, близким к 35 годам, и симметричной — с периодом около 20 лет.

Все три составляющие скорости указанных выше мод задаются выражением (9), в которое входит азимутальная составляющая векторного

потенциала A , определяемая выражением (12). При решении уравнения (10) методом Галеркина в общем случае получаются комплексные значения γ , а также комплексные коэффициенты при базисных функциях в разложении для функции $\tilde{A}(R, \theta)$. В результате решения, соответствующие различным значениям γ , определяются формулой

$$\begin{aligned} A(R, \theta, t) &= \tilde{A}(R, \theta) e^{\gamma t} = e^{\lambda t + i\omega t} \tilde{A}(R, \theta) = \\ &= e^{\lambda t + i\omega t} (A_r(R, \theta) + iA_i(R, \theta)) = \\ &= e^{\lambda t} \{A_r(R, \theta) \cos \omega t - A_i(R, \theta) \sin \omega t + \\ &+ i[A_r(R, \theta) \sin \omega t + A_i(R, \theta) \cos \omega t]\}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\lambda = \text{Re } \gamma$, $\omega = \text{Im } \gamma$, $A_r(R, \theta) = \text{Re}(\tilde{A}(R, \theta))$, $A_i(R, \theta) = \text{Im}(\tilde{A}(R, \theta))$.

Ввиду линейности уравнения (10) мнимая и действительная части выражения (13) являются решениями (10), и следовательно, любая их линейная комбинация, в частности сумма

$$\begin{aligned} A_\Sigma(R, \theta, t) &= e^{\lambda t} \{[A_r(R, \theta) + A_i(R, \theta)] \cos \omega t + \\ &+ [A_r(R, \theta) - A_i(R, \theta)] \sin \omega t\} \end{aligned} \quad (14)$$

также является его решением. Для тороидальной скорости $v_{\Sigma\varphi}$, соответствующей выражению (14), из уравнения (11) получаем

$$\begin{aligned} v_{\Sigma\varphi}(R, \theta, t) &= e^{\lambda t} \{[(v_{r\varphi}(R, \theta) + v_{i\varphi}(R, \theta)) \cos \omega t + \\ &+ [(v_{r\varphi}(R, \theta) - v_{i\varphi}(R, \theta)) \sin \omega t]\}. \end{aligned} \quad (15)$$

На рис. 2 и 3 для значений γ^2 , равных $114710.97 + i 621.12$ и $38454.71 + i 630.77$, для антисимметричной и симметричной мод соответственно, показан вид функций, которые являются амплитудами при $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ в (14) для $A_\Sigma(R, \theta, t)$ и в (15) для $v_{\Sigma\varphi}$, а также скорости $v_{\Sigma\varphi}$ на различных глубинах СКЗ. На рис. 2, $a-g$ и рис. 3, $a-g$ по оси абсцисс и ординат отложен относительный радиус Солнца $r = R/R_0$, при этом ось абсцисс лежит в плоскости экватора, а ось ординат совпадает с осью вращения Солнца. Северный полюс находится в точке $+1$ по оси ординат. На рис. 2, $d-z$ и рис. 3, $d-z$ по оси абсцисс отложена фаза колебаний $T = \omega t$ в радианах, а по оси ординат — полярный угол θ (экватору соответствует значение угла $\theta = \pi/2$). На рис. 2 и 3 белому цвету соответствует максимальное положительное значение, а темно-серому — максимальное по модулю отрицательное значение.

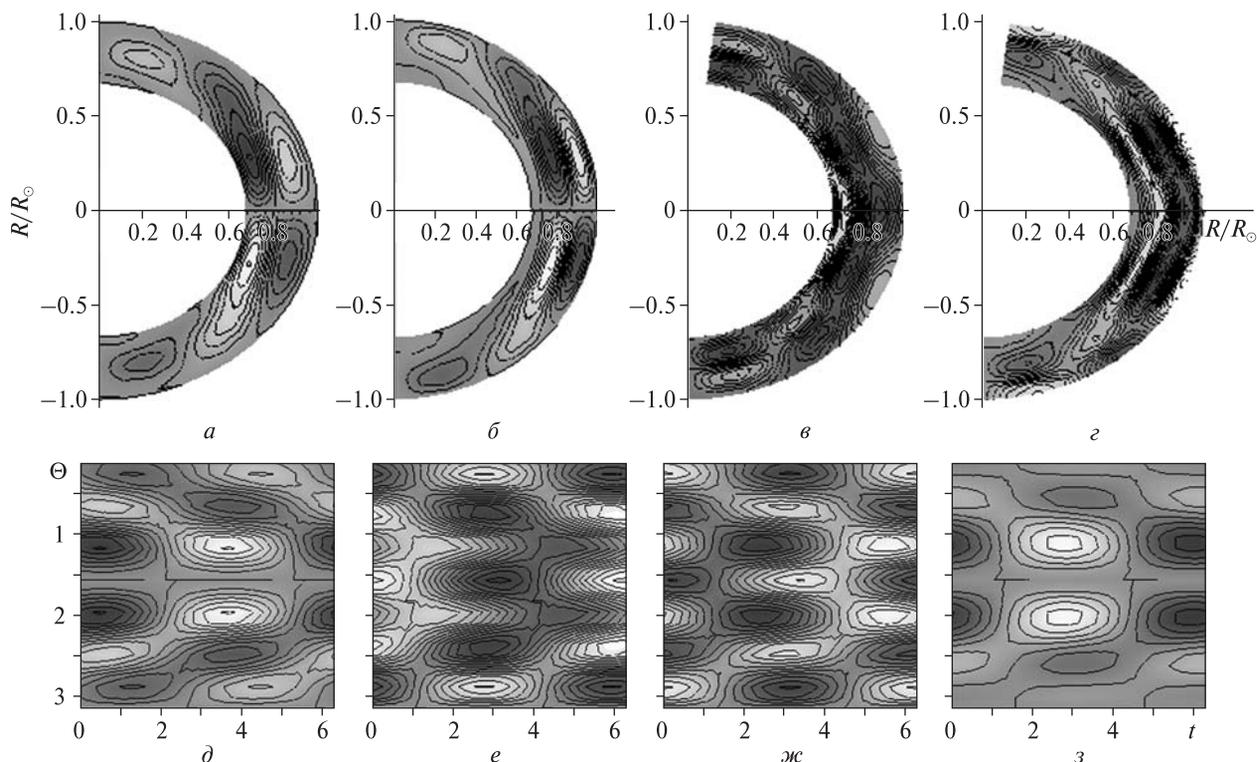


Рис. 2. Антисимметричная 35-летняя колебательная мода: *а, б* — линии уровня функции $A_r(R,\theta)+A_i(R,\theta)$ и $A_r(R,\theta)-A_i(R,\theta)$ векторного потенциала $A_\Sigma(R,\theta,t)$ (см. (12)); *в, г* — линии уровня функции $v_{r\phi}(R,\theta)+v_{i\phi}(R,\theta)$ и $v_{r\phi}(R,\theta)-v_{i\phi}(R,\theta)$ тороидальной скорости $v_{\Sigma\phi}(R,\theta,t)$ (см. (13)); *д* — линии уровня относительных значений тороидальной скорости $v_{\Sigma\phi}(R,\theta,t)$ при $R/R_0 = 1$ (цвета от темносерого до белого соответствуют значениям $-60...60$); *е* — *з* — то же для $R/R_0 = 0.89$, интервал $(-3...+3) \cdot 10^{-4}$, $R/R_0 = 0.78$, интервал $-10^{-4}...+10^{-4}$, $R/R_0 = 0.67$, интервал $(-8...+8) \cdot 10^{-5}$ соответственно

Полученные в результате решения уравнения (9) функции $A_r(R,\theta)+A_i(R,\theta)$ и $A_r(R,\theta)-A_i(R,\theta)$ векторного потенциала $A_\Sigma(R,\theta,t)$ 35-летней колебательной моды принадлежат к классу *антисимметричных* решений относительно экватора (рис. 2, *а, б*). Поэтому найденный нами векторный потенциал $A_\Sigma(R,\theta,t)$ определяет полоидальную и тороидальную скорости через (9) и (11) таким образом, что тороидальная скорость получается *симметричной* относительно экватора (рис. 2, *в-г*).

И наоборот, *симметричный* векторный потенциал 20-летней колебательной моды определяет *антисимметричную* тороидальную скорость (см. рис. 3).

Заметим, что найденные нами функции $A(R,\theta,t) = \tilde{A}(R,\theta)e^{\gamma t}$ являются частными реше-

ниями уравнения (10), обеспечивающими выполнение граничных условий (4). Они определяют форму отдельных мод решения (10) и характер их изменения со временем. Для нахождения конкретного решения, т. е. значений начальных коэффициентов, стоящих при этих функциях, необходимо задать начальные условия во всей области решения задачи, которых у нас нет. Поэтому в описании рис. 2, *а-г* и рис. 3, *а-г* отсутствуют численные значения представленных на них функций, однако изображенные на них линии уровней дают информацию о положениях особых точек, градиентах, нулях и т. д. функций во всей СКЗ.

Численные значения интервалов изменения скорости, приведенные в подписях рис. 2, *д-з* (рис. 3, *д-з*), также относительны. Они имеют

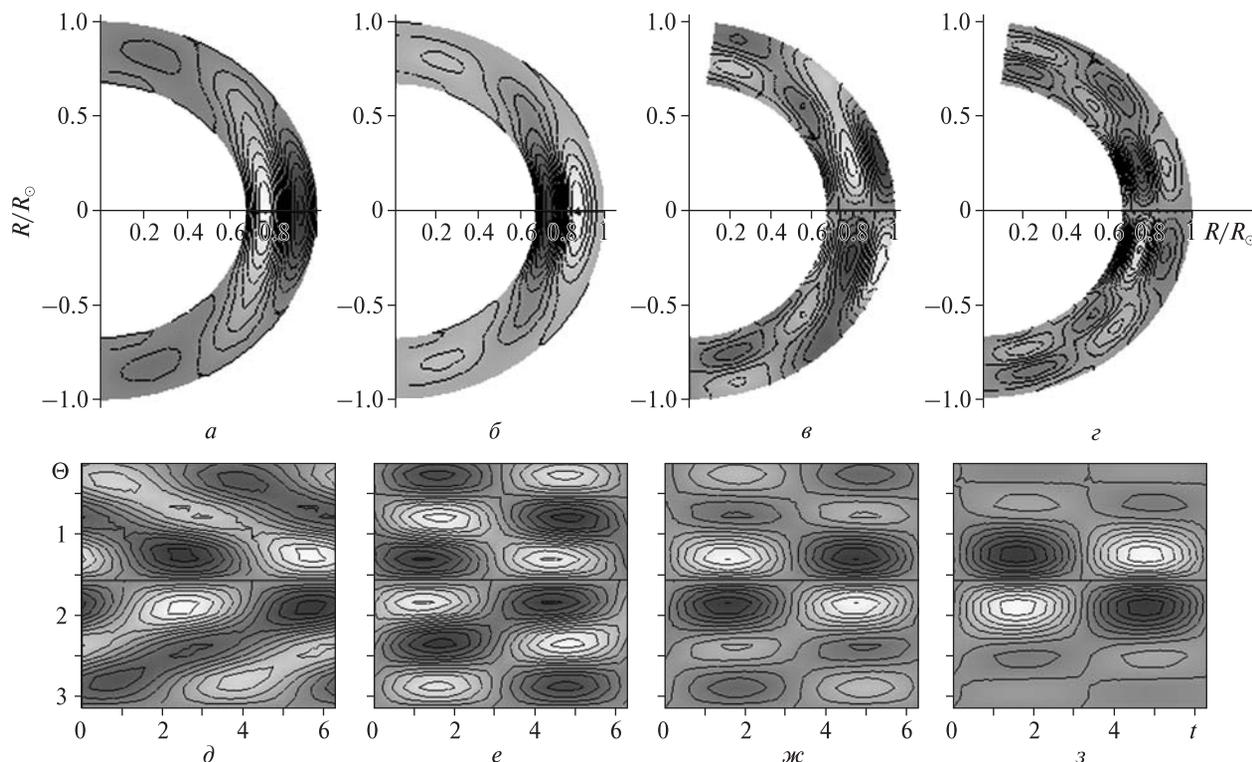


Рис. 3. Симметричная 20-летняя колебательная мода: *а, б* — линии уровня функции $A_r(R, \theta) + A_i(R, \theta)$ и $A_r(R, \theta) - A_i(R, \theta)$ векторного потенциала $A_r(R, \theta, t)$ (см. (12)); *в, г* — линии уровня функции $v_{zp}(R, \theta) + v_{ip}(R, \theta)$ и $v_{zp}(R, \theta) - v_{ip}(R, \theta)$ тороидальной скорости $v_{zp}(R, \theta, t)$ (см. (13)); *д* — линии уровня относительных значений тороидальной скорости $v_{zp}(R, \theta, t)$ при $R/R_0 = 1$ (цвета от темносерого до белого соответствуют значениям $-10 \dots +10$); *е — з* — то же для $R/R_0 = 0.89$, интервал $-10^{-4} \dots +10^{-4}$, $R/R_0 = 0.78$, интервал $(-6 \dots +6) \cdot 10^{-5}$, $R/R_0 = 0.67$, интервал $(-3 \dots +3) \cdot 10^{-5}$ соответственно

смысл только в сравнении друг с другом, что позволяет понять характер зависимости величины скорости от радиуса.

Для наглядности рис. 2, в, г и рис. 3, в, г были построены по формуле (10) при плотности $\rho = 1$. Поскольку реально плотность в области определения функций $v_{zp}(R, \theta) + v_{ip}(R, \theta)$ и $v_{zp}(R, \theta) - v_{ip}(R, \theta)$ изменяется на шесть порядков, то учет этого изменения приводил бы к существенной потере наглядности информации, отображаемой на графиках. В тоже время для понимания относительного изменения масштабов амплитуд торсионных колебаний по глубине (радиусу) при расчете линий уровня относительных значений тороидальной скорости (рис. 2, д—з и рис. 3, д—з) зависимость плотности ρ от радиуса в уравнении (10) учитывалась.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассчитанные нами распределения относительных значений тороидальной скорости по времени и широте (рис. 2, д—з и рис. 3, д—з) качественно похожи на картину торсионных колебаний, полученную путем расшифровки данных гелиосейсмических экспериментов для фиксированного относительного радиуса $r = R/R_0 = 0.99$ (рис. 1) [18]. А именно, в рамках нашей концепции чисто гидродинамической природы вариаций тороидальных течений в результате численного моделирования были выявлены зоны быстрого и медленного вращения, чередующиеся по широте и мигрирующие от высоких широт к низким в течение периода колебаний. Как и в случае полученного из гелиосейсмических данных

распределения торсионных колебаний по глубине [23], на рисунках ясно видны изменения формы колебаний по радиусу и их наличие вплоть до дна тахоклона. Уменьшение амплитуды колебаний с глубиной происходит в основном, как следует из уравнения (10), вследствие увеличения с глубиной плотности плазмы Солнца.

Полосы с одинаковыми направлениями тороидальной скорости в течение цикла смещаются от средних широт в сторону меньших широт и сходятся на экваторе (рис. 2, $d-z$), что качественно совпадает с наблюдаемой картиной торсионных колебаний. В силу этого становится ясно, что рассчитанная нами антисимметричная 35-летняя колебательная мода векторного потенциала соответствует *характерному динамическому свойству* наблюдаемых торсионных колебаний. В то же время из рис. 3, $d-z$ следует, что полосы с противоположными направлениями тороидальных скоростей симметричной 20-летней колебательной моды векторного потенциала также сходятся к экватору. И это согласуется со временным свойством глобальных магнитных полей: циклом Хейла и временем миграции торсионных колебаний от полюсов к экватору.

Таким образом, первая — антисимметричная — колебательная мода векторного потенциала проявляется в динамике поведения торсионных колебаний, тогда как вторая — симметричная мода — близка ко времени смещения полос торсионных колебаний к экватору. Обе колебательные моды векторного потенциала \mathbf{A} являются решениями уравнения (10) и в зависимости от начальных условий, которых, к сожалению, у нас нет, в принципе могут реализоваться на Солнце. Согласно проведенным численным расчетам в пространственной динамике процесса предпочтительнее выглядит антисимметричная мода. Однако, на наш взгляд, в торсионных колебаниях могут быть задействованы обе моды, которые по-разному проявляются в наблюдениях. Хотя бы малая добавка симметричной моды должна приводить к тому, что *суммарное колебание* будет обладать *смешанной симметричностью* колебательных мод векторного потенциала \mathbf{A} (т. е. оно будет *асимметричным* по четности мод).

ВЫВОДЫ

Из сравнительного анализа результатов проведенного нами численного моделирования и данных о наблюдаемых торсионных колебаниях Солнца можно сделать следующие выводы:

- торсионные колебания Солнца могут иметь чисто гидродинамическую природу, физической причиной реализации которых служит потеря устойчивости дифференциального вращения Солнца;
- торсионные колебания в основном имеют антисимметричный характер (по векторному потенциалу \mathbf{A}), хотя на Солнце в ряде случаев могут реализоваться и симметричные колебания;
- торсионные колебания представляют собой азимутальную составляющую суперпозиции двух трехмерных стоячих гармонических колебаний, сдвиг фаз между которыми составляет 90° , со сложными пространственными функциями их амплитуд (вопреки кажущемуся наблюдательному впечатлению, что мы имеем дело с одномерной волной, распространяющейся от высоких широт Солнца к экватору).

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М., 1977. — 448 с.
2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкостей. — М., 1973. — 760 с.
3. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. — М., 1973. — 260 с.
4. Витинский Ю. И., Копецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. — М., 1986. — 296 с.
5. Гледзер Е. Б., Должанский Ф. В., Обухов А. М. Системы гидродинамического типа и их применение. — М., 1981. — 368 с.
6. Джозеф Д. Устойчивость движения жидкости. — М., 1981. — 638 с.
7. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. — М., 1963. — Ч. 1. — 584 с.
8. Логинов А. А., Сальников Н. Н., Черемных О. К. и др. О гидродинамическом механизме генерации глобального полоидального течения на Солнце // Кинематика и физика небес. тел. — 2011. — 27, № 5. — С. 3—11.
9. Логинов А. А., Сальников Н. Н., Черемных О. К. и др. Гидродинамическая модель генерации глобального полоидального течения Солнца // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 1. — С. 29—35.
10. Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика. — М., 1985. — 592 с.

11. Рубашев Б. М. Проблемы солнечной активности. — Москва—Ленинград, 1964. — 364 с.
12. Antia H. H., Basu S. // ESA SP-259: SOHO 14: Helio- and asteroseismology: towards a golden future. — 2004. — P. 305—308.
13. Braun D. C., Birc A. C. Prospects for the detection of the deep solar meridional circulation // *Astrophys. J. Lett.* — 2008. — **689**. — P. L161—L165.
14. Couette M. Etudes sur le frottement des liquides // *Ann. Chem. Phys.* — 1890. — **21**. — P. 433.
15. Howard R., LaBonte B. J. The Sun is observed to be a torsional oscillator with a period of 11 years // *Astrophys. J.* — 1980. — **239**. — P. L33—L36.
16. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Dynamics variations at the base of the solar convection zone // *Science*. — 2000. — **287**. — P. 2456—2460.
17. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Deeply penetrating banded zonal flow in the solar convection zone // *Astrophys. J.* — 2000. — 533. — P. L163—166.
18. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Solar convection-zone dynamics, 1995—2004 // *Astrophys. J.* — 2005. — **634**. — P. 1405—1415.
19. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Temporal variations in solar rotation at the bottom of the convection zone: The current status // *Adv. Space Res.* — 2007. — **40**, N 7. — P. 915—918.
20. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. A note on the torsional oscillation at solar minimum // *Astrophys. J. Lett.* — 2009. — **702**. — P. L87—L89.
21. Howe R., Komm R., Hill F., et al. Rotation-rate variations at tachocline: An update // *J. Phys: Conf. Ser.* — 2011. — **271**, N 1. — P. 012075.
22. Komm R., Howe R., Hill F., et al. Solar-cycle variation of zonal and meridional flow // *J. Phys: Conf. Ser.* — 2011. — **271**, N 1. — P. 012077.
23. Kosovichev A.G. Probing solar and stellar interior dynamics and dynamo // *Adv. Space Res.* — 2008. — **41**. — P. 830—837.
24. Kosovichev A. G., Schou J. Detection of zonal shear flows beneath the Sun's surface from f-mode frequency splitting // *Astrophys. J.* — 1997. — **482**. — P. L207.
25. Maunder E. W. Note on the distribution of Sun-spots in heliographic latitude, 1874 to 1902 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 1904. — **64**. — P. 747—761;
26. Maunder E. W. Distribution of sunspots in heliographic latitude, 1874—1913 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 1913. — **74**. — P. 112—116.
27. Schöve D. J. The Sunspot Cycle, 649 B.C. to A.D. 2000 // *J. Geophys. Res.* — 1955. — **60**. — P. 127—146.
28. Thompson M. J., Christensen-Dalsgaard J., Miesch M. S., Toomre J. The internal rotation of the Sun // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* — 2003. — **41**. — P. 599—643.
29. Vorontsov S. V., Christensen-Dalsgaard J., Schou J., et al. Helioseismic measurement of solar torsional oscillations // *Science*. — 2002. — **296**. — P. 101—103.

Надійшла до редакції 01.11.11

A. A. Loginov, O. K. Cheremnykh,
V. N. Krivodubskij, N. N. Salnikov

HYDRODYNAMIC MODEL OF TORSIONAL OSCILLATIONS OF THE SUN

Hydrodynamic nature of solar torsional oscillations is justified on the basis of comparison of observational results with some results of our numerical simulations of global flows in the solar convection zone. These oscillations are shown to be a toroidal component of the global three-dimensional oscillatory flow which is equator asymmetric. Physical mechanism of torsional oscillations is the loss of stability of the solar differential rotation.

АДОБОВСЬКИЙ Володимир Веніамінович — науковий співробітник Одеського філіалу Інституту біології південних морів ім. О. О. Ковалевського Національної академії наук України.

Напрямок науки — гідрологія, гідродинаміка прибережних зон моря і приморських лиманів.

АНДРЕЄВА Ольга Анатоліївна — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія».

Напрямок науки — фізика Сонця.

БЛІНСЬКИЙ Андрій Іванович — молодший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка.

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі, розробка програмного забезпечення для астрономічних спостережень.

БЛАГОДИР Ярослав Тимофійович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка.

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі, розробка та вдосконалення апаратного забезпечення для електрофотометричних спостережень ШСЗ.

БРЮХОВЕЦЬКИЙ Олександр Борисович — інженер групи Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — обчислювальні методи для астрометричних спостережень малих тіл Сонячної системи і навколоземних космічних об'єктів.

ВЛАСЕНКО Володимир Петрович — інженер групи Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — обчислювальні методи для астрометричних спостережень малих тіл Сонячної системи і навколоземних космічних об'єктів.

ВОЛЬВАЧ Олександр Євгенович — заступник директора Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, лауреат премії Національної академії наук України, Почесний працівник космічної галузі України.

Напрямок науки — астрофізика, позагалактична радіоастрономія, РНДБ, геодинаміка.

ГУБАР Георгій Онисимович — співробітник Ялтинської Морської гідрометеорологічної станції Міністерства надзвичайних ситуацій України.

Напрямок науки — гідрометеорологія.

ДЕГТЯРЬОВ Олександр Вікторович — Головний конструктор — Генеральний директор Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», академік Міжнародної академії астронавтики, Заслужений машинобудівник України, кандидат економічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ДИКОВ Євген Миколайович — провідний інженер-програміст Науково-дослідного проектно-конструкторського інституту мікрографії.

Напрямок науки — обчислювальні методи для астрометричних спостережень малих тіл Сонячної системи і навколоземних космічних об'єктів.

ДОНСЬКИХ Ганна Ігорівна — бакалавр кафедри астрономії Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова.

Напрямок науки — астрономія.

ЄПШЕВ Віталій Петрович — науковий керівник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету, старший науковий співробітник, доцент.

Напрямок науки — дослідження ближнього космосу на основі використання результатів спостережень ШСЗ.

ЖУКОВЕЦЬКИЙ Олександр Вікторович — інженер Центру прийому і обробки спеціальної інформації і контролю навігаційного поля (Дунаївці).

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі.

ЗЄЛИК Ярема Ігорович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — теорія та процеси управління, системний аналіз, оброблення сигналів, сонячно-земна фізика.

ІСАК Іван Іванович — науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрямок науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометричних спостережень ШСЗ.

КИСЛОВ Олександр Матвійович — завідувач сектору Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — математичне моделювання фізичних процесів і технічних систем, теплофізика.

КЛПМИК Володимир Улянович — науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрямок науки — математичне і програмне забезпечення досліджень геосинхронних супутників.

КОЖУХОВ Олександр Михайлович — інженер станції Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — обчислювальні методи для астрометричних спостережень малих тіл Сонячної системи і навколоземних космічних об'єктів.

КОРОБЕЙНИКОВА Олена Олександрівна — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Напрямок науки — астрономія, дослідження руху природних та штучних космічних тіл у навколоземному просторі.

КОШКІН Микола Іванович — заступник директора Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — астрономія, дослідження руху природних та штучних космічних тіл у навколоземному просторі.

КРИВОДУБСЬКИЙ Валерій Никифорович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геліофізика, сонячна активність та сонячна магнітогідродинаміка.

КУДАК Віктор Ігорович — молодший науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрямок науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометричних спостережень ШСЗ, автоматизація обробки результатів спостережень ШСЗ.

КУКЛІНА Нінель Яківна — молодший науковий співробітник Експериментального відділення Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України.

Напрямок науки — гідрофізика.

ЛОГІНОВ Олексій Олексійович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геліофізика, геофізика, математичне моделювання.

ЛОПАЧЕНКО Володимир Володимирович — начальник відділу Національного центру управління та випробування космічних засобів Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — астрономія, дослідження руху природних та штучних космічних тіл у навколоземному просторі.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — Головний конструктор-начальник конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

МАРТИНЮК-ЛОТОЦЬКИЙ Костянтин Павлович — інженер Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка.

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі, розробка апаратно-програмного забезпечення для спостережень ШСЗ.

МАТВІЄНКО Сергій Анатолійович — начальник сектору Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — космічні дослідження.

МЕЛІКЯНЦ Сєда Мнацаканівна — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Напрямок науки — астрономія, дослідження руху природних та штучних космічних тіл у навколоземному просторі.

МОТРУНИЧ Іван Іванович — старший науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрямок науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометричних спостережень ШСЗ.

НАЙБАУЕР Іван Федорович — науковий співробітник Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету.

Напрямок науки — астрофізичні дослідження на основі позиційних і фотометричних спостережень ШСЗ.

ПОКИДАЙЛО Сергій Леонідович — начальник Ялтинської Морської гідрометеорологічної станції Міністерства надзвичайних ситуацій України.

Напрямок науки — гідрометеорологія.

ПРОКОПОВ Олександр Васильович — старший науковий співробітник Національного університету цивільного захисту України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — прикладна механіка.

РИХАЛЬСЬКИЙ Володимир Віталійович — начальник групи Національного центру керування та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі.

РИЩЕНКО Сергій Вікторович — начальник станції Центру прийому і обробки спеціальної інформації і контролю навігаційного поля (Дунайці).

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі.

РОМАНЕНКО Володимир Григорович — провідний інженер-програміст Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — математичне моделювання фізичних процесів і технічних систем, теплофізика.

РОМАНЬКО Володимир Миколайович — директор наукового центру лінійних та часо-частотних вимірювань Національного наукового центру «Інститут метрології», кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — стандарти частоти та методи їхніх досліджень.

РЯБОВ Михайло Іванович — старший науковий співробітник Одеської обсерваторії УРАН-4 Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — радіовипромінювання Сонця, дослідження сонячно-земних зв'язків, прогнозування сонячної активності.

САВАНЕВИЧ Вадим Євгенович — професор кафедри ЕОМ Харківського національного університету радіоелектроніки МОНМС України.

Напрямок науки — обчислювальні методи для астрометричних спостережень малих тіл Сонячної системи і навколоземних космічних об'єктів.

САЛЬНИКОВ Микола Миколайович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — сонячно-земні зв'язки, геліофізика, математичне моделювання.

СЕРГЄЄВ Олександр Васильович — заступник директора Міжнародного центру астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — астрометрія і небесна механіка, оптичні телескопи, астрономічні прилади, цифрова обробка зображень.

СТЕПАНЯН Наталія Миколаївна — завідувач лабораторії Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика Сонця.

СТРАХОВА Світлана Леонідівна — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Напрямок науки — астрономія, дослідження руху природних та штучних космічних тіл у навколоземному просторі.

СУХАРЄВ Артем Леонідович — провідний інженер Одеської обсерваторії УРАН-4 Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України.

Напрямок науки — позагалактична астрономія, математичні методи обробки даних.

ТАРАДІЙ Володимир Кирилович — директор Міжнародного центру астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — астрометрія і небесна механіка, числові методи, обсерваторії, телескопи.

ФЕНЧЕНКО Володимир Миколайович — старший науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — математичне моделювання і оптимізація складних процесів і систем.

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинович — головний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу.

ШАБАЛІНА Ольга Аполлонівна — молодший науковий співробітник Експериментального відділення Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України.

Напрямок науки — гідрофізика.

ШАКУН Леонід Сергійович — науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Напрямок науки — астрономія, дослідження руху природних та штучних космічних тіл у навколоземному просторі.