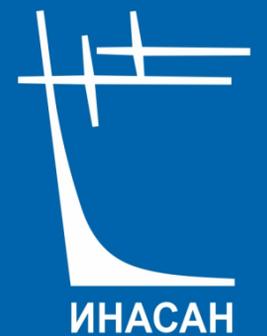


ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

INASAN
SCIENCE
REPORTS

ТОМ
5
ВЫПУСК 1



МОСКВА
2020

В ЖУРНАЛЕ «НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН» ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО РАЗЛИЧНЫМ АСПЕКТАМ АСТРОНОМИИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АСТРОФИЗИКЕ, ПЛАНЕТНОЙ АСТРОНОМИИ, ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ, ФИЗИКЕ СОЛНЦА, НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ АСТРОНОМИЧЕСКИМ МЕТОДАМ И ПРИБОРАМ, КОСМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ.



УДК 52
ББК 22.6
Н34

Н34 Научные труды Института астрономии РАН. Том 5(1). –
М.: Изд-во Янус-К, 2020, 40 с., илл.

ISSN 2658-5669

Редколлегия

Сачков М.Е. (главный редактор), Вибе Д.З. (зам. главного редактора), Бисикало Д.В.,
Барабанов С.И., Кузнецов Э.Д., Малков О.Ю., Машонкина Л.И., Фатеева А.М., Шематович
В.И., Шустов Б.М.

Секретарь редколлегии Вибе Е.Д.

В журнале "Научные труды Института астрономии РАН" публикуются статьи по различным аспектам астрономии, в том числе по теоретической и наблюдательной астрофизике, планетной астрономии, звездной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

© ИНАСАН, 2020

© Коллектив авторов, 2020

INASAN Science Reports. Vol 5(1). M.: Janus-K, 2020, 40 S

ISSN 2658-5669

Editorial Board

M.E. Sachkov (Editor-in-Chief), D.S. Wiebe (Deputy Editor-in-Chief),
D.V. Bisikalo, S.I. Barabanov, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov, L.I. Mashonkina,
A.M. Fateeva, V.I. Shematovich, B.M. Shustov

Staff Editor E.D. Wiebe

INASAN Science Reports is a peer-reviewed journal that publishes papers in various fields of astronomy, including theoretical and observational astrophysics, planetary astronomy, galactic astronomy, solar physics, celestial mechanics, astronomical methods and tools, space research and studies related to space geodesy.

© INASAN, 2020

© Author team, 2020

Автоматизированный комплекс сбора и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы

Еленин Л.В., Воропаев В.А., Молотов И.Е., Боровин Г.К.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

В статье приводится общее описание создаваемого автоматизированного программно-информационного комплекса сбора, обработки и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы. Рассматривается его общая структура, принципы работы и основные программные модули, как уже введенные в эксплуатацию, так и еще находящиеся в разработке. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Automated system for collecting and analyzing optical measurements of small bodies of the Solar System

Elenin L.V., Voropaev V.A., Molotov I.E., Borovin G.K.

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

The paper provides a general description of an automated software system for collecting, processing and analysing optical measurements of small bodies of the Solar System. Its general structure, operating principles and main software modules are briefly described. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.001

1. Введение

На протяжении 2010–2018 гг. Научной сетью оптических инструментов для проведения астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН) [1], координируемой Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша (ИПМ РАН), проводились регулярные обзоры всего неба на двух удаленных роботизированных телескопах [2]. Основной задачей обзоров был поиск малых тел Солнечной системы, включая объекты, сближающиеся с Землей, а также наблюдения оптических событий, связанных с гамма-всплесками [3]. За время работы было получено свыше одного миллиона позиционных измерений астероидов и комет, которые были отправлены в Центр малых планет (Minor Planet Center, MPC) [4]. В настоящий момент в ИПМ РАН проводятся подготовительные работы по запуску нового, перспективного обзора неба с использованием нового сверхширокоугольного зеркально-линзового телескопа 0.4-м f/1.25, оптической схемы Зонненфельда. Ввиду этого было решено создать независимый центр сбора и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы на базе ИПМ РАН. В данной статье приведено общее описание создаваемого автоматизированного программного обеспечения, которое будет развернуто на базе вычислительного кластера ИПМ РАН.

2. Общее описание и структура автоматизированного комплекса

Автоматизированный комплекс создается с помощью языка программирования C Sharp (ISO/IEC 23270) как кросс-платформенная система, которая может быть запущена на различных типах операционных систем, включая ОС Windows, MacOS и Linux (поддерживаются основные дистрибутивы, такие как Debian, Ubuntu, RHEL, CentOS, openSUSE и др.). Программный комплекс использует внутренний планировщик заданий, который позволяет периодически запускать рутинные операции, к примеру, проверку входящих измерений, при получении которых запускается дальнейший конвейер обработки и анализа полученных данных.

Структурно разрабатываемый автоматизированный комплекс сбора и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы можно разделить на следующие модули:

1. Система сбора информации
 - (a) обработка данных с сервера входящей почты;
 - (b) обработка данных с локального или сетевого хранилища;
 - (c) сбор измерений публикуемых MPC (циркуляры MPEC, MPS);
2. Модуль работы с СУБД PostgreSQL:
 - (a) загрузка и извлечение данных;
 - (b) выполнение поисковых запросов;

3. Система независимой идентификации измерений (MPCORB, внутренний каталог);
4. Система оценки точности измерений и расчета невязок;
5. Web-интерфейс работы с базой данных.

Общая схема автоматизированного комплекса приведена на рис. 1. В настоящий момент информационная система сбора, хранения и анализа информации, развернута под ОС CentOS, но является полностью кросс-платформенной. Она может быть запущена как в платформонезависимом варианте — при наличии установленной программной среды .NET Core (версии 2.0 и выше), так и скомпилирована в платформозависимом варианте — в данном случае все необходимые системные библиотеки и зависимости будут включены в единый программный пакет.

3. Система сбора и хранения измерений

Автоматическая система сбора измерений создавалась, исходя из трех основных парадигм — универсальности, устойчивости к некондиционным входным данным и максимальной автоматизации ее работы. Под универсальностью подразумевается возможность отправлять и получать данные различными способами: стандартным путем — посредством электронной почты, причем, сами измерения могут находиться как в теле письма (так же, как данная функция реализована в MPC), так и во вложении. Допускается одновременная отправка измерений обоими способами. Кроме этого, форматированный файл с измерениями можно напрямую передавать через сеть, с помощью ssh(scp), telnet, cURL, wget. Позже будет добавлена возможность загрузки измерений через web-интерфейс. При получении измерений через email особую важность представляет фильтрация входящих писем на предмет спама или ошибочно присланных писем, не содержащих измерений.

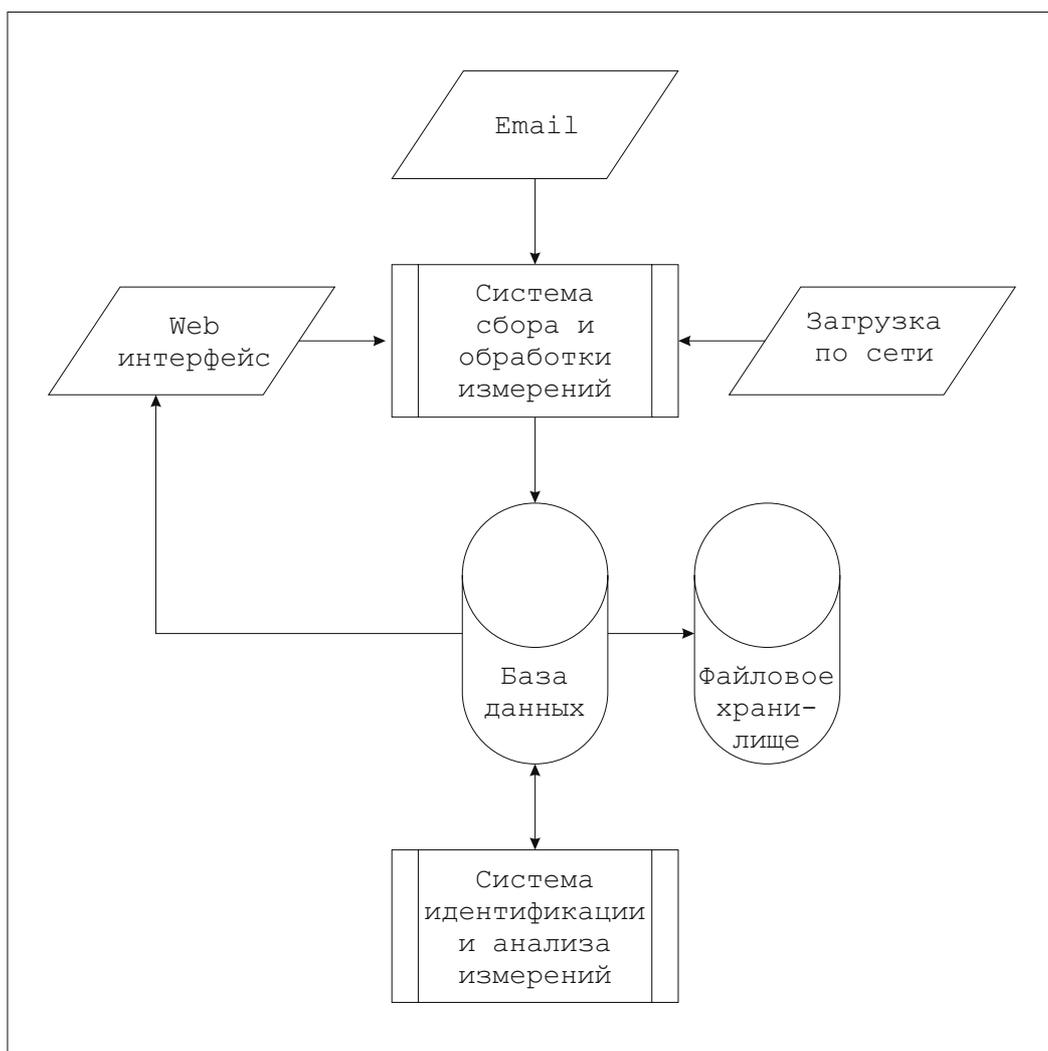


Рис. 1: Общая топологическая схема информационного комплекса.

Таблица 1: Структура таблицы хранения оптических измерений малых тел Солнечной системы.

Поле	Тип данных	Описание
number	int	Порядковый номер
designation	string	Обозначение
specialcode	char	Специальный код измерений
dateobs	timestamp	Эпоха измерений
dateobsdecimal	double	Эпоха измерений (десятичная)
dateobsjd	double	Эпоха измерений (JD)
dateobsyear	int	Год измерений
dateobsmonth	int	Месяц измерений
dateobsday	double	Десятичный день
ra	string	Прямое восхождение (H M S.ss)
radecimal	double	Прямое восхождение (H.h)
dec	string	Склонение (D M S.s)
decdecimal	double	Склонение (D.d)
magnitude	double	Блеск (звездная величина)
magnitudeband	char	Полоса фотометрической системы
iaucode	string	IAU код обсерватории (COD)
mpcstring	string	Строковая запись измерения
observer	string	Наблюдатель (OBS)
measurer	string	Измеритель (MEA)
telescope	string	Описание телескопа (TEL)
astrometriccatalog	string	Астрометрический каталог
identification	string	Идентификация измерения
entrydatetime	timestamp	Время записи измерения в БД
entrysource	string	Источник измерения
fromemail	string	Входящий адрес email
pathsource	string	Путь до оригинала измерения
guid	string	Уникальный идентификатор
comment	string	Комментарий (COM)

При семантическом разборе присланных измерений производится проверка форматирования и наличия необходимых строк заголовка. При обнаружении ошибки, если измерения были получены через электронную почту, отправителю будет выслано письмо с предупреждением об ошибке в форматировании. Если присланные измерения обработаны успешно, то будет выслано письмо-квитанция с подтверждением получения и успешной обработки присланных измерений.

В настоящий момент система работает с классическим восьмидесятисимвольным форматом измерений. Поддержка нового формата ADES (как в XML, так и в PSV представлениях) будет добавлена в будущем. Отдельный программный модуль будет собирать опубликованные в циркулярах MPC измерения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Данная задача реализуется в связи с проработкой вопроса о создании на базе вычислительного кластера ИПМ РАН службы расчета опасных сближений АСЗ с Землей. Тем самым, база данных ИПМ РАН будет обладать полнотой измерений по всем известным АСЗ, что даст возможность независимого расчета орбит и сближений.

Каждому полученному измерению присваивается уникальный идентификационный номер (UUID v.4, RFC 4122). Оригиналы полученных измерений (электронные письма, файлы) сохраняются в файловом хранилище в исходном виде. Для каждого из измерений добавленных в БД сохраняется относительный путь до файла-источника. В качестве системы хранения используется реляционная система управления базами данных PostgreSQL, которая в полной мере представляет весь необходимый функционал. Структура базы данных представлена в табл. 1.

Система анализа измерений, которая будет описана ниже, имеет свой собственный API для прямой работы с БД измерений. Позже планируется добавить функциональный web-интерфейс для обеспечения интерактивной работы с накопленными данными — выборки интересующих данных, включая полную выборку всех измерений по конкретной обсерватории, получению расширенной статистики, построения графиков, диаграмм и пр. Стоит отметить, что с 2015 г. MPC не позволяет получить выборку по всем измерениям определенной обсерватории, которые были загружены в БД Центра малых планет. Возможно получение измерений лишь по конкретному объекту или объектам. В такой ситуации обсерватория, отправившая измерения в MPC и не сохранившая их в своем архиве, не будет иметь к ним доступа в полном объеме.

4. Подсистема анализа измерений

Так как Центр малых планет настаивает на отправке измерений в обезличенном (без идентификации) виде, даже если ранее они уже были идентифицированы программным комплексом обработки кадров, то при загрузке измерений в БД ИПМ РАН необходимо выполнить (так же, как это происходит в MPC) идентификацию загруженных измерений. Данная задача запускается автоматически, после приема новых измерений. Основным каталогом для идентификации является MPCORB с ежедневными обновлениями (DOU). Идентификация выполняется как по пространственному положению объекта, так и с учетом позиционного угла и скорости движения. При наличии нескольких вариантов идентификации выбирается лучший из них.

Идентификация будет автоматически выполняться для всех измерений, полученных не из официальных циркуляров Центра малых планет.

Помимо идентификации важно знать и отслеживать астрометрические точности и невязки получаемых измерений. Заметим, что при систематической отправке в MPC позиционных измерений неудовлетворительного качества наблюдательный пункт может быть добавлен в «черный список» и его измерения не будут более приниматься. Расчет невязок будет выполняться численно, с применением метода Адамса (конечноразностного многошагового метод численного интегрирования первого порядка). Вычисления двойной точности будут производиться на графических картах с использованием программно-аппаратной архитектуры параллельных вычислений CUDA. Для расчетов могут быть использованы модели движения DE431 (JPL) [5] или EPM 2017 (ИПА РАН) [6]. Подсистема оценки точности измерений, как и подсистема их идентификации, в ежесуточном режиме обновляет каталог орбит MPCORB, поддерживая его в актуальном состоянии.

5. Заключение

В статье представлено общее описание и структура создаваемого программно-информационного комплекса сбора и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы. Основная цель данной разработки — каталогизация, архивирование и анализ будущих измерений, получаемых на новом роботизированном обзоре всего неба, который может быть запущен летом 2020 г. В его разработку был вложен весь опыт накопленный ИПМ РАН в ходе работы двух роботизированных обсерваторий сети НСОИ АФН/ISON. Программный комплекс будет открыт как для загрузки измерений, так и для использования средств идентификации и анализа измерений (по мере их эксплуатационной готовности). Помимо этого, описываемая база данных измерений может являться основой для создания на базе вычислительного кластера ИПМ РАН системы независимого определения орбит малых тел Солнечной системы, расчета эволюции их орбит, а также прогнозирования тесных сближений с нашей планетой.

Список литературы

1. I. Molotov, T. Schildknecht, R. Inasaridze, L. Elenin, et al., in *41st COSPAR Scientific Assembly*, volume 41, B0.4–12–16 (2016).
2. L. V. Elenin, Y. N. Krugly, I. E. Molotov, R. Y. Inasaridze, et al., *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, **4(3)**, 32, 2017.
3. A. Pozanenko, E. Mazaeva, A. Volnova, L. Elenin, et al., in *Eighth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium*, volume 1962, 4074 (2016).
4. L. Elenin, I. Molotov, V. Savanevych, Y. Krugly, A. Bruhovetskiy, and Y. Ivaschenko, in K. Muinonen, A. Penttilä, M. Granvik, A. Virkki, G. Fedorets, O. Wilkman, and T. Kohout, eds., *Asteroids, Comets, Meteors 2014*, 145 (2014).
5. W. Folkner, J. Williams, D. Boggs, R. Park, and P. Kuchynka, *Interplanet. Netw. Prog. Rep.*, **196**, 2014.
6. E. V. Pitjeva and N. P. Pitjev, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **119**, 237, 2014.

Фотометрия ИСЗ на ММТ-9 в течение пяти лет

Каткова Е.В.¹, Бескин Г.М.^{2,4}, Бондарь С.Ф.¹, Давыдов Д.В.⁵, Иванов Е.А.¹,
Карпов С.В.^{2,4}, Орехова Н.В.¹, Перков А.В.^{1,3}, Сасюк В.В.^{3,4}

¹ НПК СПП СОН «Архыз», Нижний Архыз, Россия

² САО РАН, Нижний Архыз, Россия

³ ООО «Параллакс», Казань, Россия

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁵ АО «АНЦ», Москва, Россия

С 2014 г. эксплуатируется 9-канальная система высокого временного разрешения Mini-MegaTORTORA (ММТ-9), принадлежащая Казанскому федеральному университету. Регулярно пополняется база данных фотометрических характеристик измеренных космических объектов (спутники, ступени ракет-носителей, фрагменты космического мусора): <http://mmt9.ru/satellites>. На данный момент в базе содержится информация более чем по 6000 космических объектов (КО). По материалам доклада на XI международной конференции «Околосемная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Photometry of artificial satellites on MMT-9 during last five years

Katkova E.V.¹, Beskin G.M.^{2,4}, Bondar S.F.¹, Davydov D.V.⁵, Ivanov E.A.¹, Karpov S.V.^{2,4}, Orekhova N.V.¹,
Perkov A.V.^{1,3}, Sasyuk V.V.^{3,4}

¹ OJS RPC PSI, OOS “Arkhyz”, Nizhnij Arkhyz, Russia

² SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia

³ “Parallax” Enterprise, Kazan, Russia

⁴ Kazan Federal University, Kazan, Russia

⁵ JSC “ASC”, Moscow, Russia

Since 2014 we operate 9-channel Mini-MegaTORTORA (MMT-9) wide-field monitoring system with high temporal resolution, belonging to Kazan Federal University, and populate the database of photometric characteristics of artificial satellites it detected. The database is publicly available at <http://mmt9.ru/satellites> and contains the information on more than 6000 satellites. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.002

1. Введение

Многоканальный мониторинговый телескоп ММТ-9, состоящий из девяти каналов, создан для мониторинга зон обзора космических телескопов Fermi и Swift в целях оптического наблюдения гамма-транзиентов. Побочным результатом функционирования этой системы является обнаружение и измерение объектов, движущихся по околоземным орбитам и имеющих блеск до 10.5^m [1]. В течение ночи ММТ-9 измеряет угловые координаты и блеск 200–500 КО. Кривые блеска измеренных объектов пополняют базу данных фотометрии искусственных спутников Земли (ИСЗ), доступную по адресу <http://mmt9.ru/satellites>. Часть базы данных является публичной. В непубличную часть БД входят все российские объекты. Каждый год база данных фотометрии увеличивается на 40 000 проводок и 500 новых объектов, среди которых присутствуют как недавно запущенные объекты, так и вновь обнаруженные фрагменты старых запусков. После 5 лет работы ММТ-9 в базе данных содержится информация по более чем 6000 объектам в 200 000 проводках. Основную часть базы данных составляют низкоорбитальные объекты (73%), высокоэллиптические объекты (24%) и объекты геостационарной области (3%).

2. Спутниковая система координат

Для анализа особенностей фотометрического поведения некоторых космических объектов используется нормаль к отражающей поверхности, представленная в спутниковой системе координат RSW [2]. Ось Z направлена по местной вертикали (см. рис. 1), ось X близка к вектору скорости (1). Нормаль к отражающей поверхности вычисляется как биссектриса угла между направлениями со спутника на Солнце и на наблюдателя (2). Матрица перехода позволяет перейти из экваториальной системы координат к спутниковой (3).

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}, \mathbf{X} = \mathbf{v} - (\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}) * \mathbf{r}, \mathbf{X} = \frac{\mathbf{X}}{|\mathbf{X}|}, \mathbf{Y} = \mathbf{Z} \times \mathbf{X}, \mathbf{Y} = \frac{\mathbf{Y}}{|\mathbf{Y}|} \quad (1)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{s} - \mathbf{r}}{|\mathbf{s} - \mathbf{r}|} + \frac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|} \quad (2)$$

$$\mathbf{n}' = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{pmatrix} * \mathbf{n} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} A = \frac{n'_2}{n'_1}, \operatorname{tg} B = \frac{n'_3}{\sqrt{n'^2_1 + n'^2_2}} \quad (4)$$

где \mathbf{r} — вектор положения ИСЗ, \mathbf{v} — вектор скорости ИСЗ, \mathbf{s} — радиус-вектор Солнца от центра Земли, \mathbf{R} — вектор положения наблюдателя. Вектор нормали к отражающей поверхности в спутниковой системе координат можно разложить на два угла — аналоги азимута и высоты (4), назовем эти углы азимутальным A и горизонтальным B .

3. Вспышки КА серии COSMO-Skymed и NOSS-3

Согласно данным итальянского космического агентства [3], активные космические аппараты (КА) серии COSMO-Skymed имеют плоскую антенную панель размером 5.7×1.4 м, которая в определенных условиях наблюдения дает вспышки (кратковременное увеличение блеска космического объекта, обусловленное квазизеркальным отражением солнечного света от определенного элемента конструкции спутника). Известно, что панель ориентирована под углом 56 градусов к местному горизонту и ведет съемку с правой стороны от трассы спутника. В 2016–2018 гг. для четырех КА COSMO-Skymed на ММТ-9 было зафиксировано 19 вспышек, и для каждой наблюдавшейся вспышки мы вычислили углы нормали к отражающей поверхности в спутниковой системе координат. Вспышки соответствуют азимутальному углу $A = 270.2^\circ \pm 4.2^\circ$ и горизонтальному углу $B = -55.4^\circ \pm 3.1^\circ$, что соответствует известному из априорных данных положению антенной панели. Если бы наблюдатель находился в центре отраженного «солнечного зайчика», а не на некотором удалении от него, результат был бы точнее.

В отличие от КА COSMO-Skymed, конструкция американских военных КА серии NOSS-3 неизвестна, известны только орбитальные данные, полученные независимыми наблюдателями [4]. Спутники NOSS-3 движутся парами в одной орбитальной плоскости, расстояние между КА в паре составляет $40\text{--}60$ км. При некоторых условиях для спутников NOSS-3 наблюдаются вспышки длительностью $15\text{--}30$ с, причем блеск КА в процессе вспышки может повыситься на 4^m .

Нормали вспышек КА NOSS-3 преимущественно имеют азимутальный угол, кратный 90° (см. рис. 2). Это позволяет предположить наличие симметричных отражающих деталей в конструкции аппарата. Максимальные вспышки наблюдаются при $A = 89.9^\circ$ и $B = -46.5^\circ$.

4. Условия видимости вращающихся элементов

В базе данных ММТ-9 присутствуют 22 КА, у которых наблюдается фотометрическая периодичность, обусловленная наличием на борту спутника вращающейся антенны. У некоторых аппаратов вращение антенны можно наблюдать при любом ракурсе, у других — только при некоторых условиях. Группой объектов, у

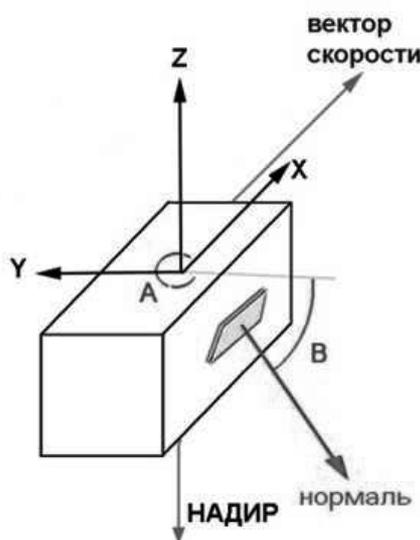


Рис. 1: Спутниковая система координат RSW.

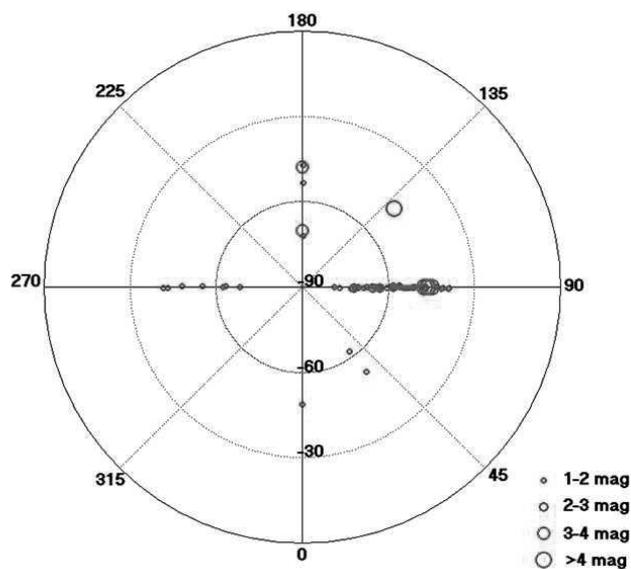


Рис. 2: Углы А и В нормали вспышек КА серии NOSS-3.

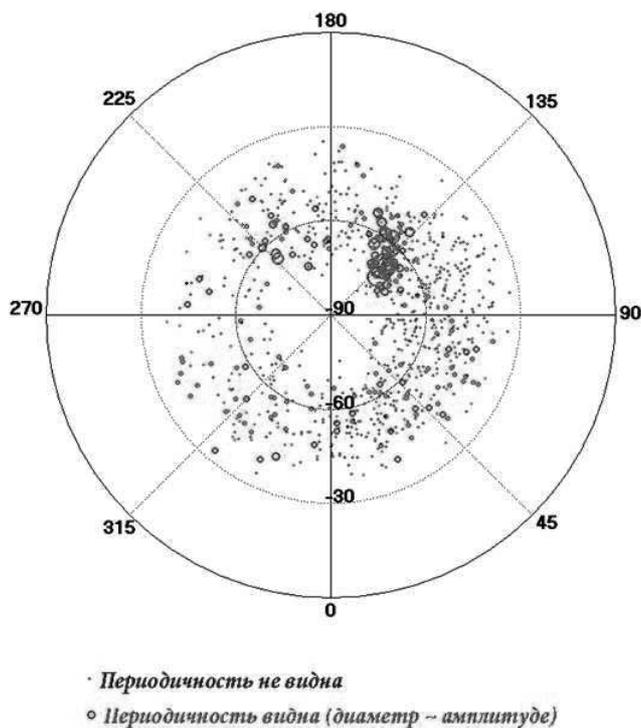


Рис. 3: Углы А и В нормали видимости антенн КА серии NOSS-3.

которых вращение антенны видно не всегда, являются спутники серии NOSS-3, работающие парами, причем периодичность наблюдается только у «закрывающего» КА (т.е. КА, движущегося позади вдоль общей трассы пары). У всех шести активных замыкающих КА NOSS-3 регулярно наблюдается периодическое изменение блеска с шагом по времени 2.1 с и с амплитудой от 0.05^m до 1^m , но чаще всего периодичности в проводках нет.

У всех активных замыкающих NOSS-3 есть общий диапазон видимости антенны в спутниковой системе координат соответствующий азимутальному углу около 135° (см. рис. 3). Подобная информация позволяет выбирать для наблюдений определенную часть траектории КА NOSS-3, чтобы проверять функционирование бортовой аппаратуры спутника.

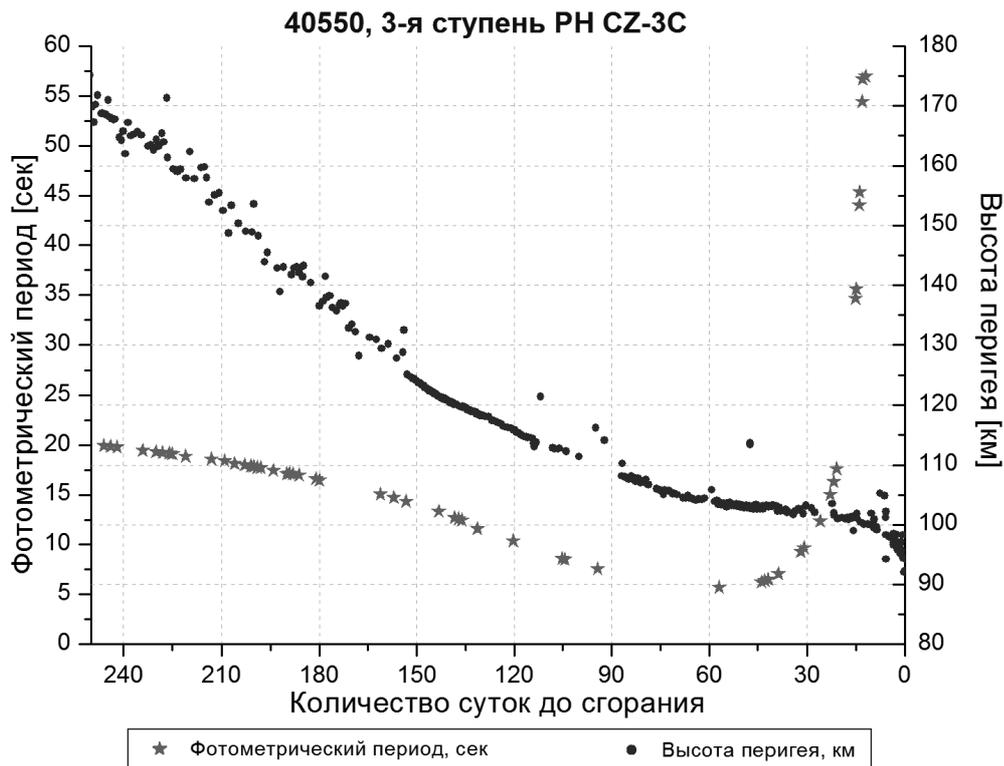


Рис. 4: Изменение периода вращения перед сгоранием в атмосфере.

5. Сгоревшие объекты в БД

За 5 лет наблюдений в БД накопились данные по 300 объектам, прекратившим свое баллистическое существование вследствие сгорания в атмосфере. Найти в БД сгоревшие объекты можно поиском по комментарию, задав в поле комментария ключевое слово *decau*. Кривые изменения периода вращения для таких объектов показывают, что после преодоления некоторой граничной высоты перигея характер вращения КО изменяется кардинально. В большинстве случаев влияние атмосферы тормозит вращение объекта (период изменения блеска увеличивается), но встречаются и случаи раскрутки, и случаи хаотичного изменения скорости вращения. Анализ эволюции периодов вращения сгоревших объектов показывает, что единой граничной высоты перигея, ниже которой на вращение влияет атмосфера, не существует. Вращение может начать меняться и на высоте 100 км, и на высоте 200 км.

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН в части «Проведение фундаментальных исследований», а также Федеральной программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) Федерального университета.

Список литературы

1. S. Karpov, E. Katkova, G. Beskin, A. Biryukov, et al., in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, volume 48, 112–113 (2016).
2. D. A. Vallado, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications* (2007).
3. *COSMO-SkyMed System Description and User Guide* (2007).
4. *NOSS Double and Triple Satellite Formations* (2018).

Быстрая фотометрия КО на Цейсс-600

Каткова Е.В., Плахута А.С., Бондарь С.Ф., Орехова Н.В., Граужанина А.О., Иванов Е.А.

НПК СПП СОН «Архыз», Нижний Архыз, Россия

В 2019 г. на телескопе Цейсс-600 СОН «Архыз» была реализована возможность быстрой фотометрии высокоорбитальных объектов, имеющих блеск до 15^m . Фотометрирование производится параллельно с получением угловых координат. Временное разрешение 0.128 с позволяет выявлять кратковременные изменения блеска у космических объектов (КО). По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Fast photometry of artificial satellites on Zeiss-600

Katkova E.V., Plakhuta A.S., Bondar S.F., Orekhova N.V., Grauzhanina A.O., Ivanov E.A.

OJS RPC PSI, OOS "Arkhyz", Nizhnij Arkhyz, Russia

In 2019, a possibility to perform the fast photometry of objects with visible magnitudes up to 15^m traveling in High Earth Orbit, have been introduced using Zeiss-600 instrument belonging to Arkhyz Optical Observation Station. The photometric measurements of the target are carried out in parallel with its angular coordinates' acquisition. The temporal resolution of 0.128 seconds allows to capture short duration variations in the visible magnitude of the target space object. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.003

1. Введение

Одним из инструментов станции оптических наблюдений «Архыз» является телескоп «Цейсс-600», на котором уже не одно десятилетие выполняются траекторные измерения объектов геостационарной области. За прошедшие годы аппаратная часть телескопа и его программное обеспечение неоднократно модернизировались. На данный момент светоприемник телескопа состоит из объектива переброса, электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и ПЗС-камеры производства «СпецТелеТехника». Минимальное время рабочей экспозиции составляет 0.128 с. В течение всей ночи с телескопа поступает видеопоток с частотой 7.5 кадров в секунду, который обрабатывается в режиме реального времени.

При экспозиции 0.128 с на кадре визуально обнаруживаются объекты с блеском до 15^m . В целях повышения проницания реализован метод накопления со сдвигом [1], что позволяет обнаруживать объекты с блеском до 18^m и измерять их угловые координаты. При использовании этого метода обрабатывается не каждый кадр по отдельности, а кинофильм длиной в 40 кадров, при этом угловые измерения измерительная программа выдает один раз в 5 с. Таким образом, повысив проницание, мы потеряли временное разрешение. Очевидно, что угловые измерения с шагом в 0.13 с являются избыточными, но оценки блеска наблюдаемых космических объектов (КО) с таким временным шагом могут иметь ценность. В 2019 г. измерительная программа телескопа «Цейсс-600» была усовершенствована и теперь параллельно с измерением координат КО производится и быстрая фотометрия всех детектированных объектов. Подобные фотометрические измерения в нашем случае имеют смысл только для объектов ярче 15^m с достаточным отношением сигнала к шуму. Помимо собственного шума камеры и шума неба в нашем случае дополнительный шум вносит ЭОП. Среднеквадратичное отклонение шума фотометрии составляет в среднем 0.2^m .

2. Аварийный Intelsat

В апреле 2019 г. компания Intelsat сообщила об аварии геостационарного КА Intelsat-29E [2] и возникла необходимость контроля состояния этого спутника. В течение 4 месяцев аппарат находился в зоне видимости пункта «Архыз» и являлся тестовым объектом для отработки процесса фотометрирования на телескопе «Цейсс-600». В результате наблюдений было выявлено периодическое изменение блеска космического аппарата, предположительно обусловленное его вращением. К июлю объект перестал раскручиваться и приобрел постоянную скорость вращения (см. рис. 1).

3. Геостационарные КА, стабилизированные вращением

Как известно, трехосно стабилизированный спутник не имеет периодических изменений блеска, но помимо трехосной стабилизации существует еще и стабилизация вращением. В некоторых случаях подтверждение стабилизации вращением может дать информацию о функциональном состоянии космического аппарата (КА). В целях проверки возможности наблюдения стабилизации вращением на телескопе «Цейсс-600» была проведена фотометрия геостационарного КА серии Meteosat. По данным эксплуатирующей организации

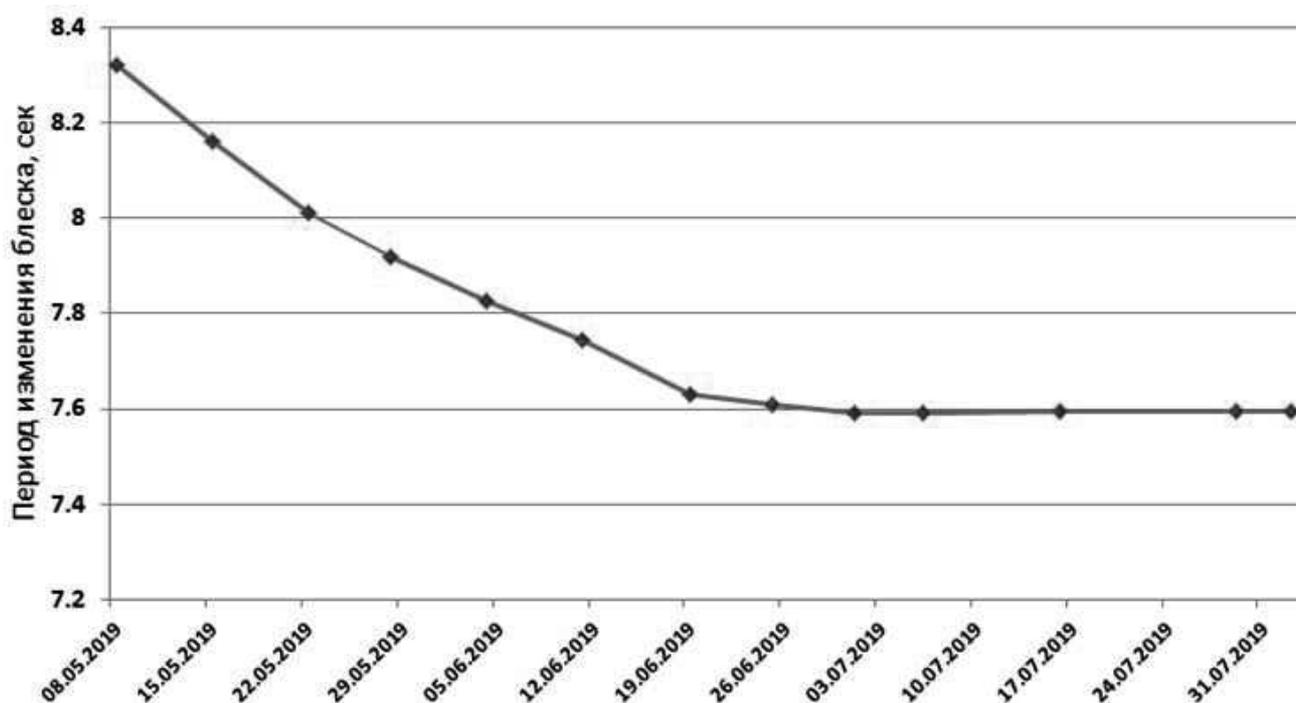


Рис. 1: Изменение периода вращения КА Intelsat-29E.

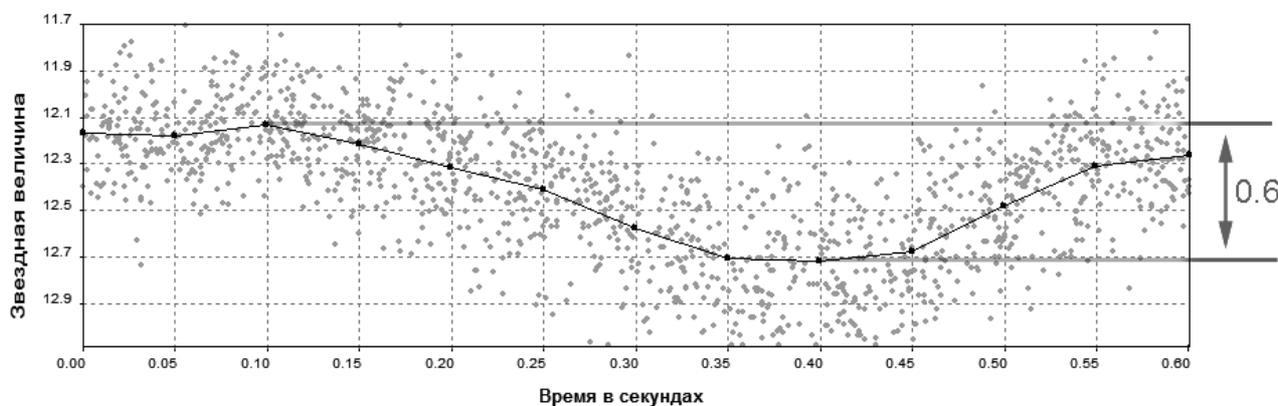


Рис. 2: Паттерн КА Meteosat-8 (Norad 27509), период 0.601 с.

EUMETSAT КА серии Meteosat представляют собой цилиндр, за 1 минуту совершающий 100 оборотов [3]. Периодограмма фотометрического ряда КА Meteosat-8 показала присутствие гармоник на частоте 1.66 Гц, что соответствует ожидаемому периоду 0.6 с. На рис. 2 показан паттерн (изменение блеска за один оборот) КА Meteosat-8, полученный методом минимизации фазовой дисперсии [4]. Диапазон изменения блеска составляет 0.6^m , что превышает шум фотометрии.

К геостационарным аппаратам, стабилизированным вращением, мы можем отнести и спутники серии DSP [5], принадлежащие Министерству обороны США. На рис. 3 показан паттерн активного КА серии DSP (USA-130), демонстрирующий период 9.967 с, то есть КА делает 6 оборотов в минуту. Необходимо отметить, что ни у одного из наблюдавшихся активных КА DSP диапазон изменения блеска не превышал 0.2^m .

4. Неактивные КА серии DSP и Canyon

При потере спутником стабилизации амплитуда изменения блеска увеличивается в разы и для уже упомянутых КА серии DSP может достигать до 5^m . Разнообразие паттернов неактивных КА может дать информацию о форме и внешнем виде аппаратов в том случае, если данные о конструкции не опубликованы. В геостационарной области находятся шесть неактивных аппаратов серии Canyon, предположительно предназначавшихся

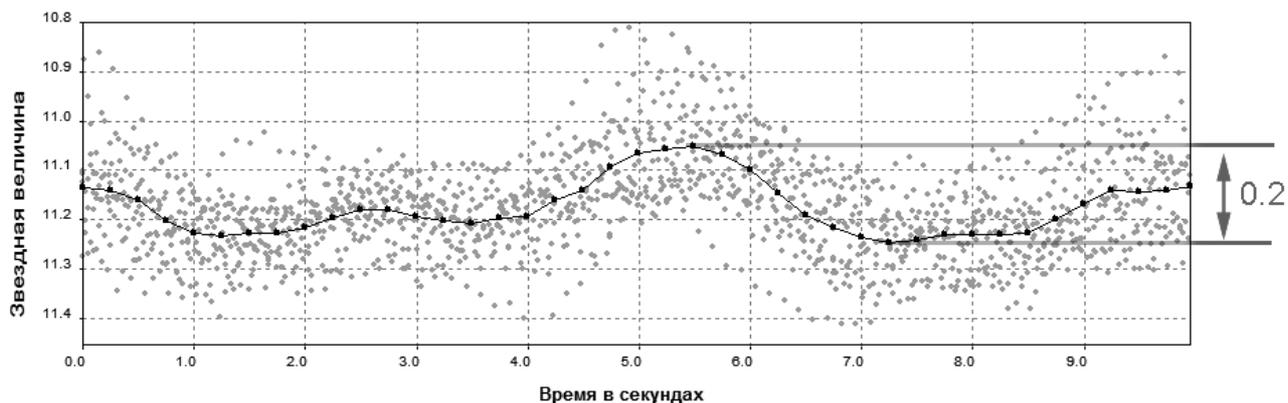


Рис. 3: Паттерн КА USA-130 (Norad 24737), период 9.967 с.

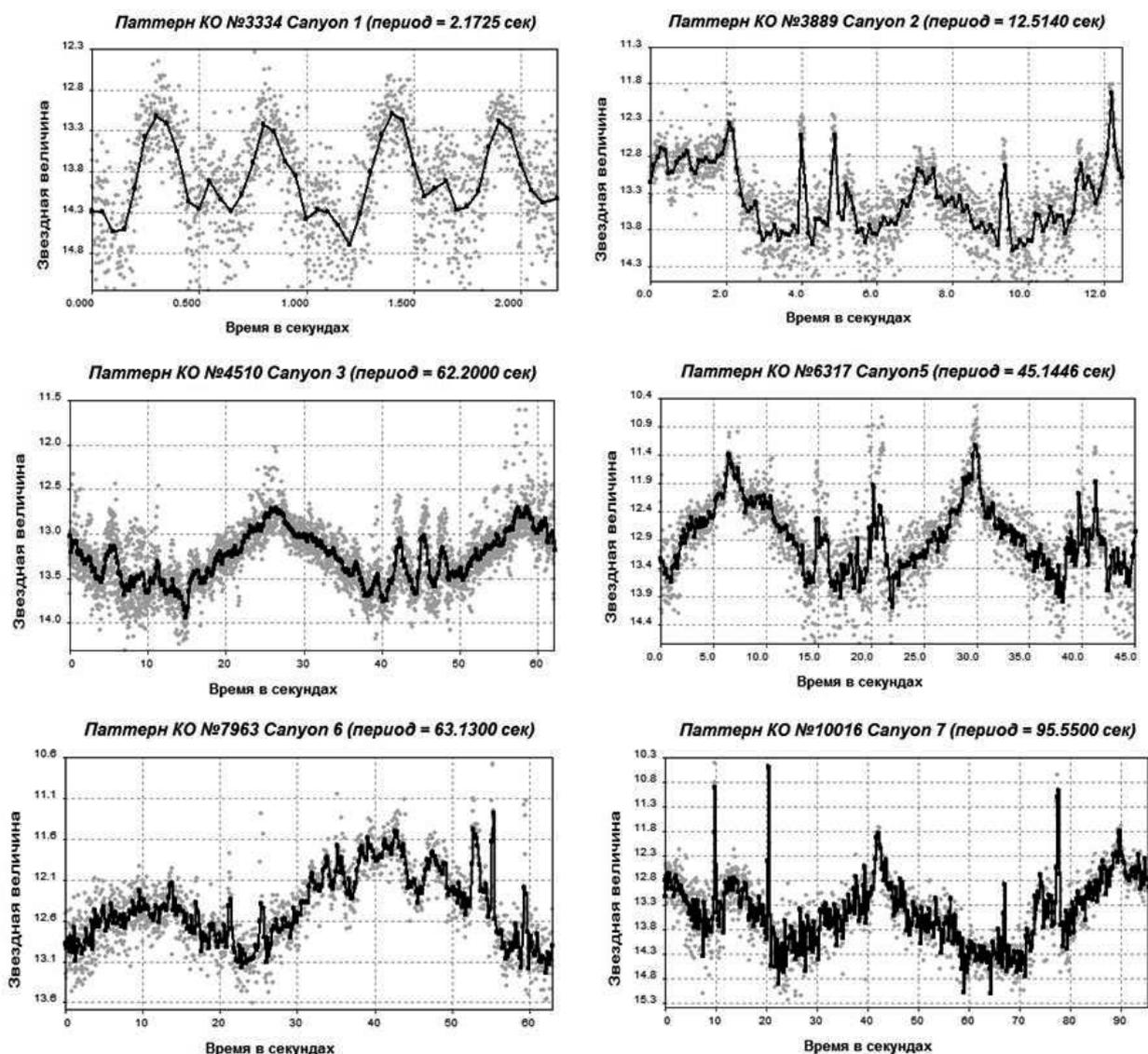


Рис. 4: Паттерны неактивных КА серии Сапуон.

ся для ведения радиоэлектронной разведки [6]. Форма КА серии Сапуон неизвестна. Сравнение паттернов неактивных КА серии Сапуон и DSP позволяет сделать вывод, что спутники этих серий имеют очень схожие геометрические характеристики, и КА Сапуон имеют продолговатую форму с зеркальными деталями и четырьмя симметричными элементами, которые скорее всего являются солнечными панелями (см. рис. 4).

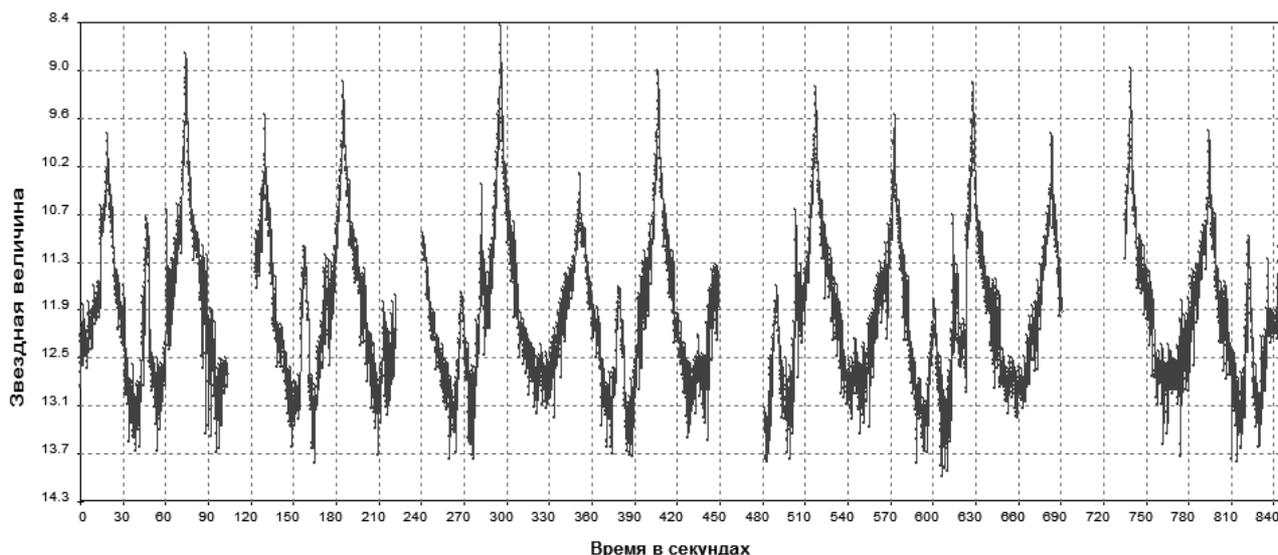


Рис. 5: Кривая блеска РБ Centaur (Norad 35816) после разрушения, начало 19.09.2019 01:07:07.71 UTC.

5. Разрушения разгонных блоков Centaur ракет-носителей Atlas 5

В течение 2018–2019 гг. произошло три орбитальных разрушения разгонных блоков Centaur ракет-носителей Atlas 5 [7]. Каждое из этих разрушений породило сотни фрагментов, движущихся по высокоэллиптическим орбитам. Самый крупный из фрагментов обычно сохраняет за собой номер родительского тела. Фотометрические наблюдения всех трех разрушившихся разгонных блоков (Norad 43209, 35816, 43652) после их разрушений показали, что только в случае объекта Norad 35816 после разрушения родительское тело несильно изменило геометрическую форму. Фотометрия этого разгонного блока существенно не отличается от типичных фотометрических кривых разгонных блоков серии Atlas 5 Centaur (см. рис. 5).

6. Заключение

Как уже было упомянуто, все объекты, измеряемые на телескопе «Цейсс-600», параллельно фотометрируются с частотой 7 Гц. «Цейсс-600» работает по фрагментам геостационарной и высокоэллиптической областей, соответственно для всех достаточно ярких фрагментов получают информативные кривые блеска, и такие данные накапливаются непрерывно. Данные о периоде вращения фрагментов могут быть использованы для прогноза движения конкретных объектов, так как многие из таких объектов имеют большое отношение площади к массе и подвергаются плохо прогнозируемому воздействию солнечного давления.

Список литературы

1. S. Bondar, E. Ivanov, A. Plakhuta, and E. Katkova, in *Kosmicheskij musor: fundamentalnye i prakticheskie aspekty ugrozy*, 70–77 (2019).
2. *Intelsat Reports Intelsat 29e Satellite Failure* (2019).
3. *Meteosat design* (2019).
4. R. Stellingwerf, *ApJ*, **224**, 953, 1978.
5. V. Agapov, *Novosti kosmonavтики*, **14**, 2004.
6. V. Agapov, *Novosti kosmonavтики*, **13**, 2003.
7. A. Lapshin, V. Agapov, and Z. Khutorovsky, in *Regional Astronomical Summer School* (2019).

Наблюдения астероидов и космического мусора в проекте НСОИ АФН

Молотов И.Е.¹, Еленин Л.В.¹, Шильдкнехт Т.², Круглый Ю.Н.³, Кокина Т.Н.⁴, Мендоса А.Д.⁴, Гунгалаг Н.⁵, Шарощенко В.С.⁶, Корниенко Г.И.⁷, Желтобрюхов М.С.⁷, Иващенко Ю.Н.⁸, Инасаридзе Р.Я.^{9,10}, Айвазян В.Р.^{9,10}, Эгамбердиев Ш.А.¹¹, Захваткин М.В.¹, Степаньянц В.А.¹, Стрельцов А.И.¹, Сальес Р.¹², Иванов А.Л.¹³, Иванов В.А.¹³, Левшунов А.С.¹⁴, Харевич В.И.¹⁴, Новичонок А.О.^{1,15}, Кудак В.И.¹⁶, Периг В.М.¹⁶, Выхристенко А.М.¹⁷

¹ *Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

² *Институт астрономии Университета Берна, Берн, Швейцария*

³ *Институт астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина*

⁴ *Центр астрономии Автономного университета Синалоа, Кулиакан, Мексика*

⁵ *Институт астрономии и геофизики АН Монголии, Улан-Батор, Монголия*

⁶ *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

⁷ *Институт прикладной астрономии РАН, С.-Петербург, Россия*

⁸ *Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев, Украина*

⁹ *Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.К. Харадзе, Государственный университет Илы, Тбилиси, Грузия*

¹⁰ *Самцхе-Джавахетский Государственный Университет, Ахалцихе, Грузия*

¹¹ *Астрономический институт им. Улугбека, УАН, Ташкент, Узбекистан*

¹² *Национальная астрономическая обсерватория, Автономный университет Хуана Мисаэля Сарачо, Тариха, Боливия*

¹³ *Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия*

¹⁴ *Лесосибирский педагогический институт — филиал Сибирского федерального университета, Лесосибирск, Россия*

¹⁵ *Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*

¹⁶ *Ужгородский национальный университет, Ужгород, Украина*

¹⁷ *Приднестровский государственный университет имени Т.Г. Шевченко, Тирасполь, Приднестровье*

Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН) является открытым международным проектом, специализирующимся на наблюдениях и изучении околоземных космических объектов. 28 обсерваторий 15 стран мира с 50 телескопами, сотрудничающие с НСОИ АФН, обеспечивают возможность перекрывать наблюдениями все долготы земного шара и успешно совмещать исследования космического мусора и астероидов, сближающихся с Землей. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Observations of asteroids and space debris in the ISON project

Molotov I.E.¹, Elenin L.V.¹, Schildknecht T.², Krugly Yu.N.³, Kokina T.N.⁴, Mendoza A.D.⁵, Tungalag N.⁵, Sharoshchenko V.S.⁶, Kornienko G.I.⁷, Zheltobryukhov M.S.⁷, Ivashchenko Yu.N.⁸, Inasaridze R.Ya.^{9,10}, Ayvazian V.R.^{9,10}, Ehgamberdiev Sh.A.¹¹, Zakhvatkin M.V.¹, Stepanyants V.A.¹, Streltsov A.I.¹, Zalles R.¹², Ivanov A.L.¹³, Ivanov V.A.¹³, Levshunov A.S.¹⁴, Kharevich V.I.¹⁴, Novichonok A.O.^{1,15}, Kudak V.I.¹⁶, Perig V.M.¹⁶, Vykhristenko A.M.¹⁷

¹ *Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS, Moscow, Russia*

² *Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland*

³ *Institute of Astronomy, Karazin National university, Kharkov, Ukraine*

⁴ *Centre of Astronomy, Autonomous University of Sinaloa, Culiacan, Mexico*

⁵ *Research Centre of Astronomy and Geophysics of Academy of Science, Ulaanbaatar, Mongolia*

⁶ *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

⁷ *Institute of Applied Astronomy of the RAS, St-Petersburg, Russia*

⁸ *Main Astronomical Observatory of the NASU, Kiev, Ukraine*

⁹ *Kharadze Abastumani Astrophysical Observatory, Ilya State University, Tbilisi, Georgia*

¹⁰ *Samtskhe-Javakheti State University, Akhaltsikhe, Georgia*

¹¹ *Ulugh Beg Astronomical Institute, Tashkent, Uzbekistan*

¹² *Universidad Autonoma Juan Misael Saracho, Observatorio Astronomico Nacional, Tarija, Bolivia*

¹³ *Kuban State University, Krasnodar, Russia*

¹⁴ *Lesosibirskiy Pedagogical Institute — branch of Siberian Federal University, Lesosibirsk, Russia*

¹⁵ *Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia*

¹⁶ *Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine*

¹⁷ *Taras Shevchenko Transnistria State University, Tiraspol, Transnistria*

The international scientific optical network (ISON) is an open international project specializing in tracking of near-Earth space objects. 28 observatories in 15 countries with 50 telescopes, cooperating with the ISON, provided an opportunity to cover all the longitudes of the globe with observations and successfully combine studies of space debris and asteroids approaching the Earth. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.004

1. Введение

Освоение и исследования околоземного космического пространства (ОКП) привело к осознанию т.н. космических угроз — астероидной опасности и проблем, связанных с техногенной засоренностью т.н. «космическим мусором» (КМ). Задачи обнаружения и каталогизации АСЗ, исследования эволюции их орбит и изучения их физико-минералогических свойств представляются чрезвычайно важными. Задачи изучения, моделирования и предотвращения техногенных угроз осуществлению космической деятельности также являются сейчас как никогда актуальными. Обе эти задачи объединяет подход к их изучению — для их исследования нужен научный инструмент в форме географически разнесенной сети оптических телескопов, перекрывающий все долготы земного шара. Попыткой создать подобный инструмент стал инициативный проект Научной сети оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН).

2. Текущий состав НСОИ АФН

Проект НСОИ АФН [1] был начат в 2004 г. на средства российских и зарубежных грантов. Для оснащения сети были разработаны несколько серий специализированных обзорных телескопов апертурой от 12 см до 65 см с большими полями зрения [1], типовой набор программного обеспечения для управления оборудованием и обработки ПЗС-кадров [2], отлажены новые наблюдательные методики, проведены переговоры с рядом отечественных и зарубежных обсерваторий, организованы новые пункты наблюдений. Это позволило в 2007 г. впервые в отечественной практике перекрыть наблюдениями всю геостационарную орбиту (ГСО). Проект НСОИ АФН стал инкубатором инновационных решений в области мониторинга ОКП, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса [1] и телескопов организаций промышленности. На пике развития проект НСОИ АФН включал в себя до 100 телескопов. После выделения средств Роскосмоса и кооперации ПАО «МАК «Вымпел»» в отдельные подсистемы, основу НСОИ АФН составляют телескопы ООО МИП «ИПМ Баллистика-Сервис» (30 телескопов, установленных в 18 пунктах) и 12 инструментов 9 обсерваторий-партнеров, заключивших договоры о научно-техническом сотрудничестве с ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, НИИ астрономии ХНУ им. В.Н. Каразина и ООО МИП «ИПМ Баллистика-Сервис». Кроме того, наблюдательные программы НСОИ АФН реализуются еще на 10 более крупных телескопах 8 обсерваторий, на которых наблюдательное время получается по научным заявкам. Географическое расположение и названия 27 обсерваторий, участвующих в проекте НСОИ АФН показано на рис. 1.

НСОИ АФН до сих пор остается российским лидером по количеству телескопов и обсерваторий. С 2020 г. поддержка наблюдений НСОИ АФН снова осуществляется за счет российских и зарубежных грантов. Для организации сбора международных заявок на установку телескопов НСОИ АФН в интересах развития проекта было подписано соглашение с ООН.

3. Наблюдения космического мусора

В рамках НСОИ АФН была создана обзорно-поисковая сеть, реализующая с использованием 20–25 см телескопов принцип т.н. «сплошных» обзоров в широкой полосе 18° [3], с помощью которой впервые была решена задача обнаружения и сопровождения всех ГСО-объектов с блеском не слабее 15.5^m с целью самостоятельного ведения каталога. До сих пор она продолжает вносить важнейший вклад в мониторинг ярких (до 15.5^m) ГСО-объектов [3] и обеспечивает полное перекрытие ГСО. Регулярно получают измерения по 90% ярких КО, обеспечивая поддержание точных орбит у 98% популяции (см. рис. 2), что является необходимым условием для прогнозов опасных сближений [4].

На телескопах апертурой 40–80 см были отработаны методы обнаружения и сопровождения слабых ГСО-объектов. Эти работы позволили впервые в России открыть малоразмерные фрагменты космического мусора на высоких орбитах [5] и подтвердить наличие облаков фрагментов на ГСО [6] и высокоэллиптических орбитах (ВЭО) [7], порожденных разрушением спутников и ступеней ракет.

Впервые в мире было отработано сопровождение объектов с большим отношением площади к массе на длительных интервалах времени, что позволило реконструировать их орбиты [8], проанализировать баллистическую эволюцию и определить источники образования [9]. По нашим оценкам, объекты с отношением площади к массе больше $1 \text{ м}^3/\text{кг}$ составляют не менее половины популяции фрагментов космического мусора на высоких орбитах. Данные с 80-сантиметрового телескопа на пике Терскол используются для калибровки модели ненаблюдаемой (малоразмерной) фракции КМ [10], развиваемой в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

4. Направления астероидных исследований

Астероидные исследования проводятся по двум основным направлениям — отработка технологии астероидных обзоров, т.н. «второй волны» (на малых телескопах с большим полем зрения), в интересах обнаружения астероидов и комет, а также поиск и изучение двойных астероидов и исследование влияния негравитационных эффектов на динамику астероидов.

На 40-сантиметровых телескопах с полем зрения порядка $2^\circ \times 2^\circ$ в течение 7 лет были открыты 8 новых комет, 15 АСЗ и порядка 1500 астероидов главного пояса [11]. Дальнейшие планы связаны с новым 40-сантиметровым телескопом САНТЕЛ-400/500 с полем зрения $4^\circ \times 5.5^\circ$. В разработке находится модель вероятности обнаружения АСЗ на различных участках неба, что существенно увеличит эффективность работы астероидного обзора.

На телескопах апертурой 0.6–2.6 м в течение 9 лет регулярно проводились фотометрические наблюдения вновь открытых АСЗ, двойных АСЗ, а также малых астероидов главного пояса и их кластеров для изучения влияния эффекта Ярковского-О’Киффе-Радзиевского-Поддака (ЯОРП). Раскручивание малых астероидов под действием эффекта до предела их разрушения приводит к формированию двойных и кратных систем, дальнейшая эволюция которых также определяется ЯОРП. Получение на протяжении нескольких оппозиций большого массива кривых блеска избранных АСЗ позволило принять участие в целом ряде пионерских теоретических и наблюдательных работ [12], в результате которых ЯОРП эффект был детектирован у 6 астероидов, была открыта двойственность у пяти астероидов [12, 11], кроме того определено 9 кандидатов с признаками двойственности [13]. В целом, были определены или уточнены периоды вращения у 67 АСЗ. В конце 2019 г. впервые в мире было получено экспериментальное подтверждение влияния би-ЯОРП-эффекта на параметры систем двойных астероидов (66391) 1999 KW4 и (88710) 2001 SL9 [14].

Результаты работы основаны, в том числе, на наблюдательных данных, полученных на 1-метровом телескопе ЦКП ИНАСАН в Симеизе.

Список литературы

1. I. E. Molotov, V. A. Voropaev, A. N. Yudin, D. E. Ivanov, E. A. Aistov, and G. K. Borovin, *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, **4(2)**, 110, 2017.
2. V. Kouprianov and I. Molotov, in T. Flohrer and F. Schmitz, eds., *Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany*, volume 7, id. 475 (2017).
3. I. E. Molotov, L. V. Elenin, I. V. Usovik, A. N. Krylov, A. G. Grib, M. A. Sibitchenkova, and M. A. Kapralov, *Keldysh Institute Preprints*, **274**, 14, 2018.
4. A. I. Streltsov, M. V. Zakhvatkin, V. A. Voropaev, I. E. Molotov, E. A. Pavlova, V. A. Stepanyants, and I. V. Usovik, *Keldysh Institute Preprints*, **3**, 30, 2019.
5. A. E. Volvach, V. V. Rumjantsev, I. E. Molotov, A. S. Sochilina, et al., *Space Science and Technology*, **12(5–6)**, 50, 2006.

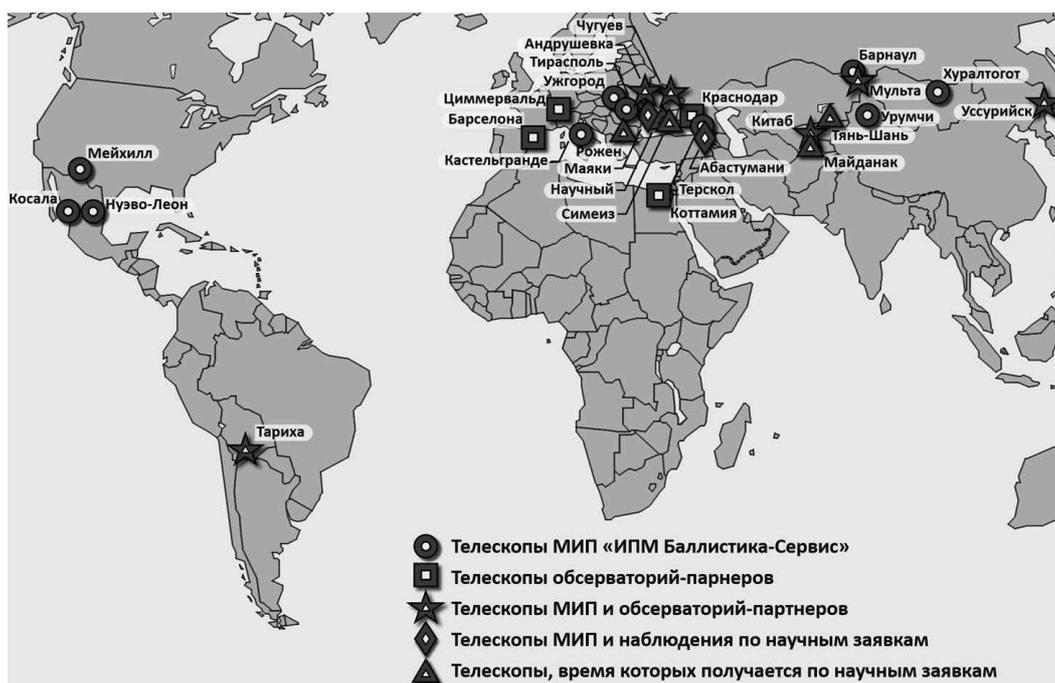


Рис. 1: Географическое расположение обсерваторий, вовлеченных в проект НСОИ АФН.

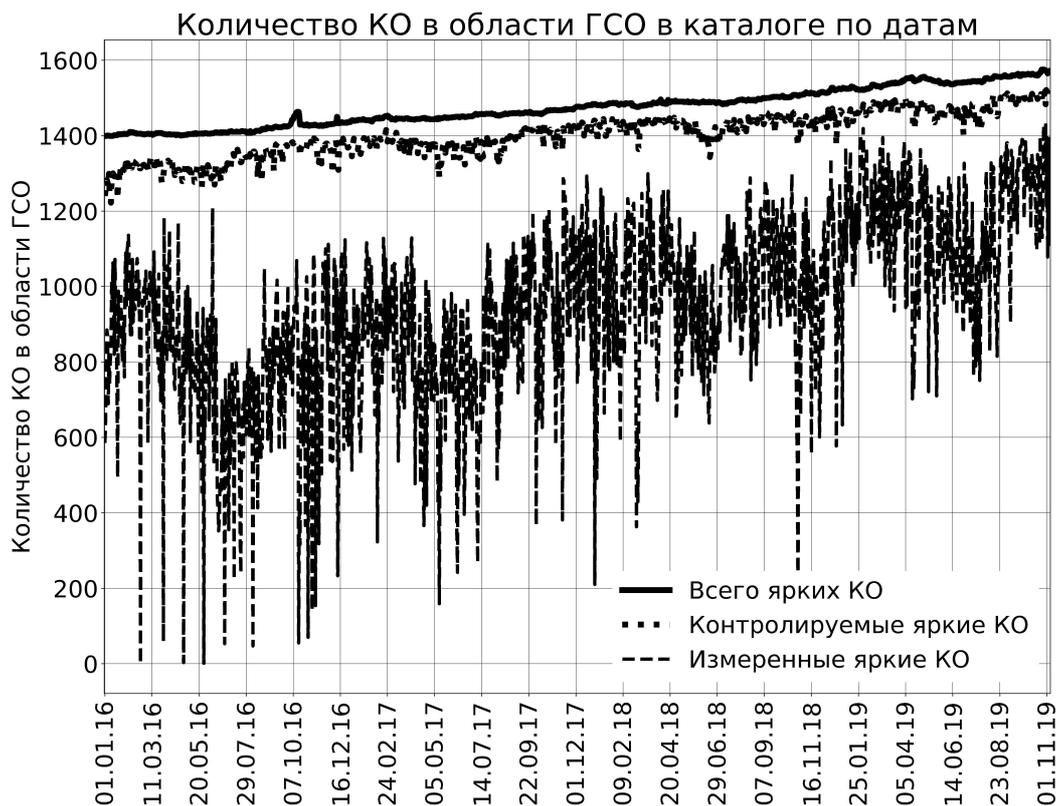


Рис. 2: Состояние каталога ярких ГСО-объектов в базе данных ИПИМ им. М.В. Келдыша РАН в 2016–2019 гг.

6. E. L. Akim, V. M. Agapov, I. E. Molotov, and V. A. Stepanyants, *Coll. papers "Practical steps to reduce technogenic contamination of near-Earth space"*. Moscow, Roscosmos Publ., 16–21, 2010.
7. I. E. Molotov, R. Y. Sun, C. Zang, U. Barres de Almeida, et al., in *Space Debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat. Proceedings, Series "Mechanics, management and Informatics"*, 95–102 (2019).
8. A. A. Bazey, N. V. Bazey, G. K. Borovin, V. E. Zolotov, V. I. Kashuba, S. G. Kashuba, V. V. Kupriyanov, and I. E. Molotov, *Mathematical Modeling and Computational Methods*, **1(5)**, 83, 2015.
9. V. M. Agapov, I. E. Molotov, G. K. Borovin, and A. I. Streltsov, *Engineering Journal: Science and Innovation*, **2(98)**, 1, 2020.
10. G. K. Borovin, M. V. Zakhvatkin, V. A. Stepanyants, and I. V. Usovik, *Keldysh Institute Preprints*, **85**, 2018.
11. L. V. Elenin, Y. N. Krugly, I. E. Molotov, R. Y. Inasaridze, et al., *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, **4(3)**, 32, 2017.
12. P. Pravec, P. Fatka, D. Vokrouhlický, P. Scheirich, et al., *Icarus*, **333**, 429, 2019.
13. Y. Krugly, V. Ayvazyan, R. Inasaridze, V. Zhuzhunadze, I. Molotov, V. Voropaev, V. Rumjantsev, and A. Baransky, *Astronomy & Astrophysics (Caucasus)*, **1**, 9, 2017.
14. P. Scheirich, P. Pravec, P. Kušnirák, K. Hornoch, et al., *arXiv e-prints*, arXiv:1912.06456, 2019.

Активность звезд с планетными системами EPIC 211916756 и EPIC 211964830 из скопления Ясли

Саванов И.С.¹, Дмитриенко Е.С.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия*

Проведено исследование активности звезд с планетными системами (EPIC 211916756 и EPIC 211964830) из молодого скопления Ясли (650–800 млн. лет) на основе доступного материала из архива космического телескопа “Kepler”. Найдены величины периодов вращения звезд, по оценкам амплитуд переменности блеска объектов получены значения относительного и абсолютного параметров запятненности. Наши новые результаты подтверждают сделанный ранее вывод о сопоставимой величине магнитной активности звезд с экзопланетами и звезд без планетных систем.

Activity of the Praesepe cluster stars with planetary systems EPIC 211916756 and EPIC 211964830

Savanov I.S.¹, Dmitrienko E.S.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

We performed a study of the activity of two stars with planetary systems (EPIC 211916756 and EPIC 211964830) from a young cluster Praesepe (650–800 billion years) based on available material from the Kepler space telescope archive MAST. Periods of rotation of the stars and the relative and absolute parameters of spottedness were obtained from the light curves of the objects. Our new results confirm the earlier conclusion about a comparable level of the magnetic activity of stars with exoplanets and stars without planetary systems.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.005

1. Введение

Продолжение космической миссии “Kepler” — K2 — предоставило широкие дополнительные возможности к исследованию кривых блеска молодых звезд. Полученные данные высокой фотометрической точности являются основой для проведения исследования эволюции вращения и активности звезд в молодых скоплениях, в том числе звезд, обладающих планетными системами (см. подробнее, например, в [1]). В предыдущем исследовании мы уделили особое внимание анализу данных для скопления Ясли (возраст 650–800 млн. лет) [2]. Нами были выполнены оценки параметра запятненности S (доли видимой поверхности звезды, занимаемой пятнами), характеризующего активность 674 звезд скопления Ясли, и изучены его изменения с периодом вращения, числами Россби Ro и другими характеристиками объектов.

Авторы [3] сообщили об открытии планет у еще двух маломассивных карликов спектрального класса M из скопления Ясли. Согласно этому исследованию у звезды JS 183 (HSHJ 163, EPIC 211916756) вероятно присутствие планеты типа Нептун с периодом обращения 10.1 суток. Параметры звезды JS 183 приводятся в [3], ее температура составляет 3325 K, а масса — 0.44 массы Солнца. Блеск звезды в фильтре V равен 17^m.27.

K2-264 (EPIC 211964830) обладает системой из двух планет типа горячий суб-Нептун [4]. Периоды обращения планет и их радиусы составляют 5.8 и 19.7 суток, а радиусы — 2.2 ± 0.2 и 2.7 радиусов Земли, соответственно. Температура звезды равна 3660 K, а масса — 0.496 массы Солнца. Блеск звезды $V = 16^m.41$. Мы провели исследование активности EPIC 211916756 и EPIC 211964830 на основе доступного материала из архива космического телескопа “Kepler”.

2. Наблюдательные данные и их анализ

Анализ фотометрических данных был проведен с помощью модифицированной программы activity [5]. Результаты анализа проиллюстрированы на диаграммах на рис. 1. Кривые блеска объектов приведены на левой части рис. 1. Обработка данных была аналогичной выполненной нами ранее для карликов поздних спектральных классов. Рассчитанные спектры мощности переменности блеска объектов (рис. 1, средняя часть) указали на наличие пиков, соответствующих величинам периода $P = 21.2$ суток для EPIC 211964830 и $P = 23.9$ суток для EPIC 211916756. Найденные нами величины P находятся в очень хорошем согласии с результатами из статей [3] и [4]. Фазовые диаграммы переменности блеска объектов представлены на правой части рис. 1. Хорошо заметна переменность кривых блеска на временах, сопоставимых с периодами вращения звезд, что свидетельствует о быстрой эволюции пятен на их поверхности. Горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска R_{var} объектов. Используя упрощенную методику

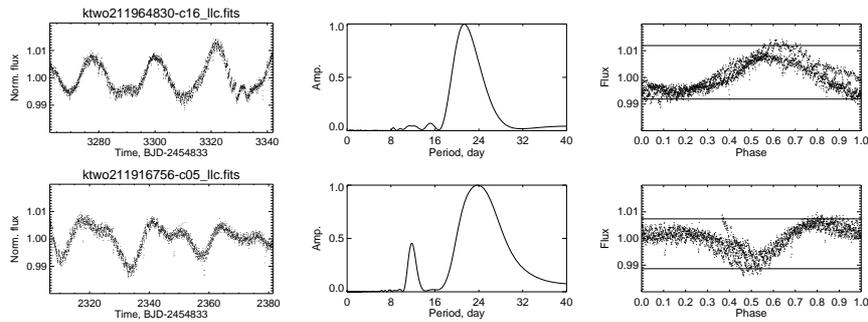


Рис. 1: Слева — кривые блеска для EPIC 211964830 и EPIC 211916756, в центре — спектры мощности переменности блеска объектов, справа — фазовые диаграммы переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска R_{var} объектов). Верхний ряд — данные для EPIC 211964830, нижний — для EPIC 211916756.

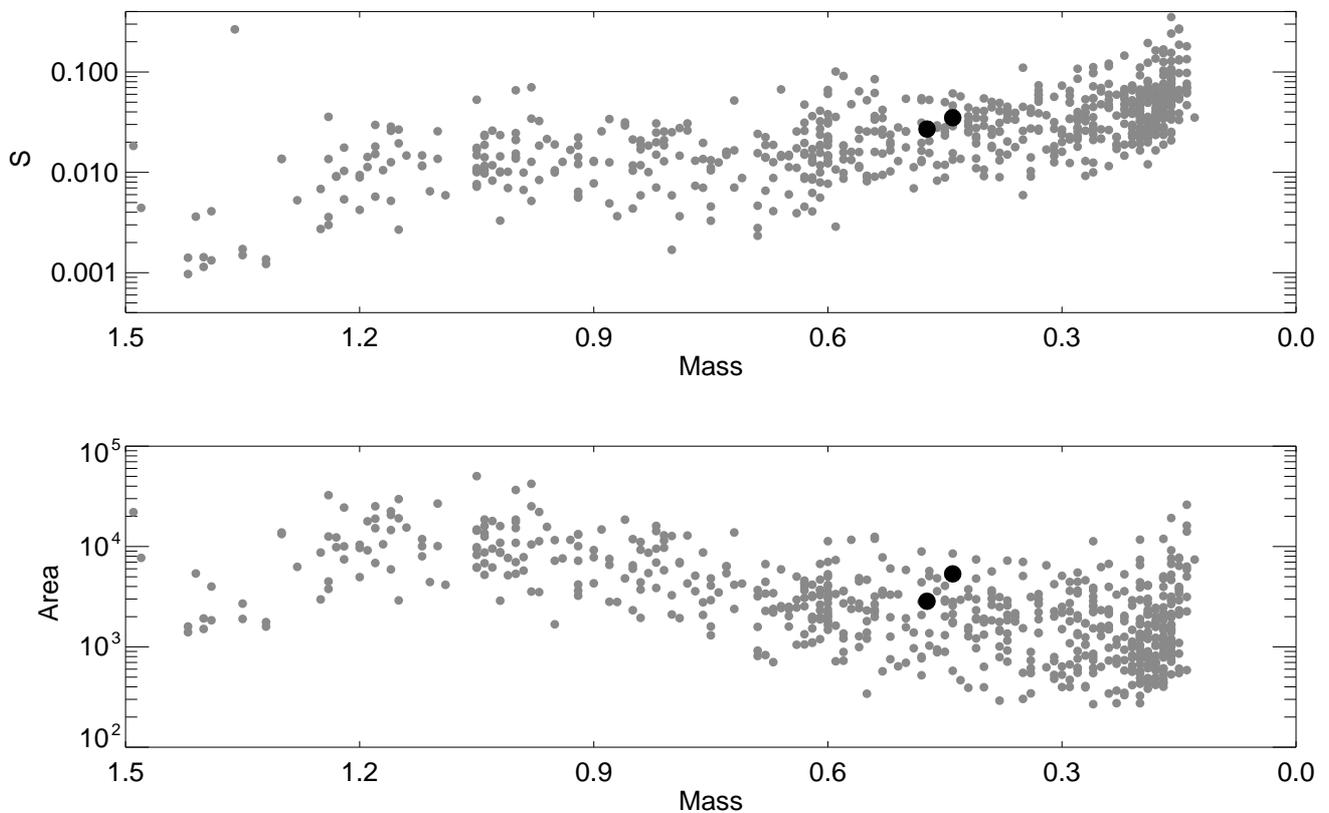


Рис. 2: Изменение относительного S (вверху) и абсолютного A (в м.д.п.) (внизу) параметров запятненности звезд скопления Ясли в зависимости от их массы. Темные кружки — данные для EPIC 211964830 и EPIC 211916756.

(см., например, [6]), на основе полученных величин R_{var} и характеристик объектов из архива данных MAST телескопа “Kepler” мы получили оценки параметра запятненности S для EPIC 211964830 и EPIC 211916756, которые составили 0.035 и 0.027, соответственно. Погрешность определения S составляет по нашей оценке 0.002–0.003.

3. Запятненность звезд

Ранее в [2] мы представили результаты анализа активности 674 звезд из скопления Ясли. Для этой цели были использованы данные, содержащие информацию как о фотометрической переменности указанных звезд, так и о параметрах их атмосфер, массах, радиусах и периодах вращения. Другие необходимые для наших вычислений данные были взяты из базы данных архива космического телескопа “Kepler”. На верхней части рис. 2 приведен график зависимости запятненности S (доли поверхности звезды, покрытой пятнами, индикатора магнитной активности звезды) от массы изученных 674 объектов из [2]. Величина параметра S

изменяется в пределах от нескольких десятых для холодных карликов до сотых — для звезд солнечного типа. При наличии информации в каталоге MAST¹ о радиусах объектов R , параметр запятненности A (оценку площади поверхности звезд, покрытой холодными пятнами) можно определить в абсолютных величинах. Как и в случае солнечных исследований, мы будем выражать площадь пятна в долях видимой полусферы Солнца (миллионных долях, м.д.п.). На Солнце средние по размерам пятна имеют площадь 10–200 м.д.п. (см. детали в [7]). Площадь большой группы пятен может составлять 1–2 тысячи м.д.п. Величины параметра запятненности A для EPIC 211964830 и EPIC 211916756 равны 5340 м.д.п. и 2850 м.д.п., соответственно.

На рис. 2 (нижняя диаграмма) приведена зависимость параметра запятненности A от массы звезд скопления Ясли. На основе данных, представленных на рис. 2, можно сделать заключение о том, что полученные результаты о запятненности двух рассматриваемых нами звезд с планетными системами в целом соответствуют общему ходу изменений параметров S и A для объектов скопления. Однако при детальном рассмотрении объектов со сходными эффективными температурами (например, диапазона T_{eff} от 4000 К до 3400 К) можно заметить, что по сравнению с аналогичными объектами скопления, две звезды с планетными системами имеют несколько более высокие значения параметров, чем средние величины S и A для остальных объектов этого температурного интервала, которые составляют 0.027 ± 0.002 и 2593 ± 290 м.д.п., соответственно, но находятся в рамках погрешностей определений этих величин. Это не противоречит сделанному нами ранее в [8] выводу об отсутствии указаний на то, что магнитная активность звезд с экзопланетами не имеет выраженных особенностей, отличающих ее от активности звезд более обширной выборки.

4. Заключение

Проведено исследование активности звезд с планетными системами EPIC 211916756 и EPIC 211964830 на основе доступного материала из архива космического телескопа “Kepler”. Оба объекта принадлежат к молодому скоплению Ясли с возрастом 650–800 млн. лет. Найдены величины периодов вращения звезд ($P = 21.2$ суток для EPIC 211964830 и $P = 23.9$ суток EPIC 211916756). По оценкам амплитуд переменности блеска R_{var} объектов мы получили значения параметра запятненности (относительного параметра S и абсолютного — A). Две звезды с планетными системами имеют несколько более высокие значения параметра запятненности, чем средние величины S и A для остальных объектов с сопоставимыми температурами, но находятся в рамках погрешностей определений этих величин, подтверждая вывод об одинаковой магнитной активности звезд с экзопланетами и звезд без планетных систем.

Исследование выполнено в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение № 075-15-2019-1875).

Список литературы

1. A. C. Rizzuto, A. Vanderburg, A. W. Mann, A. L. Kraus, C. D. Dressing, M. A. Agüeros, S. T. Douglas, and D. M. Krolkowski, *AJ*, **156**, 195, 2018.
2. I. S. Savanov, E. S. Kalinicheva, and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports*, **62**, 352, 2018.
3. J. Pepper, E. Gillen, H. Parviainen, L. A. Hillenbrand, et al., *AJ*, **153**, 177, 2017.
4. J. H. Livingston, F. Dai, T. Hirano, D. Gandolfi, et al., *MNRAS*, **484**, 8, 2019.
5. I. S. Savanov, *Astronomy Reports*, **62**, 814, 2018.
6. E. S. Dmitrienko and I. S. Savanov, *Astronomy Reports*, **61**, 122, 2017.
7. Y. A. Nagovitsyn and A. A. Pevtsov, *ApJ*, **833**, 94, 2016.
8. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin*, **70**, 83, 2015.

¹<http://archive.stsci.edu>

Активность γ Gem по фотометрическим наблюдениям TESS

Саванов И.С.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS изучена фотометрическая переменность звезды спектрального класса A0IV γ Gem. Получена оценка периода вращения звезды $P = 8.7$ суток. Найдены оценки площади пятен на поверхности γ Gem — величин относительного и абсолютного параметров запятнненности. Рассмотрены аргументы в пользу гипотезы о магнитной природе пятен на поверхности γ Gem.

Activity of γ Gem from TESS mission photometry

Savanov I.S.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

On the base of high-precision data from the TESS space mission archive the photometric variability of the A0IV star γ Gem was studied. We obtained the rotational period of the star $P = 8.7$ days. Estimates of the area of spots on the surface of γ Gem (values of the relative and absolute spottedness parameters) were found. The arguments in favour of the hypothesis of the magnetic nature of spots on the surface of γ Gem are considered.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.006

1. Новые исследования химически-пекулярных звезд

Высокоточные фотометрические наблюдения, полученные с космическим телескопом “Kepler” и телескопами миссии TESS, впервые указали на то, что переменность блеска многих звезд ранних спектральных классов подобна переменности блеска более холодных звезд спектральных классов G-M, обладающих пятнами и локальными магнитными полями на поверхности. Данное обстоятельство может привести к кардинальным изменениям во взглядах на природу аномалий химически пекулярных звезд верхней части главной последовательности [1].

На протяжении многих лет мы проводили изучение металлических (Am) звезд (см., например, в [2]). Эти звезды образуют одну из групп химически-пекулярных звезд верхней части главной последовательности, к их числу принято относить объекты спектральных классов A и ранних F с ослабленной линией Ca II K и усиленными линиями металлов. В атмосферах Am звезд имеется дефицит Ca и (или) Sc, сравнительно небольшой избыток элементов группы железа и более тяжелых элементов, который, в среднем, растет с увеличением атомного веса. По сравнению с Ap (магнитными звездами) у них отсутствуют значительные магнитные поля регулярной структуры. Аномалии химического состава Ap звезд более выражены по сравнению с Am звездами. Объяснение существования аномалий химического состава Am и Ap звезд принято связывать с процессами диффузии элементов в их атмосферах. Как было отмечено, новые наблюдения с космическим телескопом “Kepler” и миссией TESS привели к революционным изменениям взглядов на свойства Am звезд (см. [1] и ссылки в этой статье). Было показано, что эти звезды обладают вращательной модуляцией блеска и, возможно, вспышками.

В дополнение к этому, благодаря результатам проведения и анализа высокоточных спектрополяриметрических наблюдений Веги и трех Am звезд (включая Сириус), у звезд спектрального класса A были обнаружены слабые и ультра-слабые магнитные поля, в том числе сложной структуры.

Особого внимания заслуживает исследование [3], основанное на высокоточных спектрополяриметрических наблюдениях γ Gem. γ Gem является яркой звездой спектрального класса A0IV $T_{\text{eff}} = 9150 \pm 310$ K и $\log(g) = 3.60 \pm 0.20$. Основные характеристики звезды можно найти в [3]. Авторы [3] выполнили оценку магнитного поля на поверхности γ Gem несколькими методами, а также провели зееман-доплеровское картирование (ZDI) поверхности звезды. По переменности профилей линий был установлен период вращения звезды $P = 8.975$ суток, а при проведении ZDI картирования получены оценки $P_{\text{eq}} = 8.915 \pm 0.015$ суток и $\Delta\Omega = 0.0073 \pm 0.0023$ рад./сут. К числу наиболее интересных выводов, сделанных в [3], следует отнести предположение о том, что изменения установленных авторами LSD профилей могут быть связаны с температурными неоднородностями поверхности звезды, а не с пятнами химического состава.

2. Анализ фотометрических наблюдений γ Gem

В архиве MAST доступны результаты фотометрических наблюдений γ Gem с телескопами космической миссии TESS. Эти данные были проанализированы с помощью модифицированной версии разработанного нами пакета программ *activity* [2] для автоматизированной редукиции и обработки данных архива космического телескопа “Kepler”. Комплекс программ позволяет проводить редукицию оригинальных данных, снятие

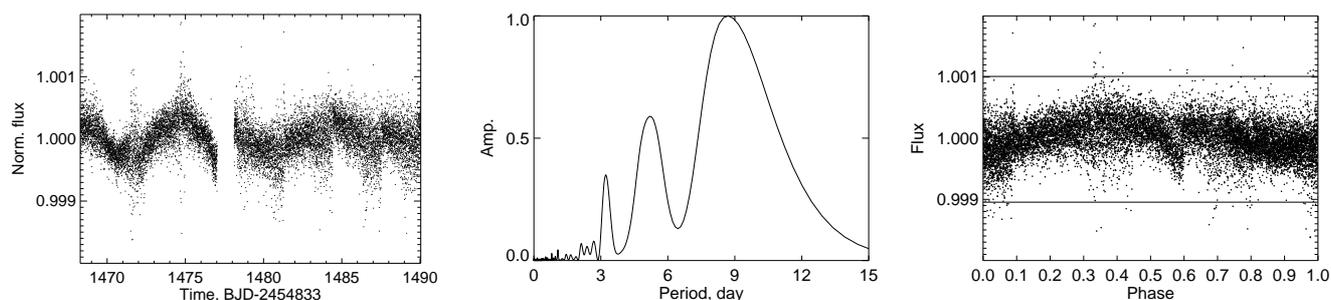


Рис. 1: Слева — кривая блеска для γ Gem, в центре — спектр мощности переменности блеска γ Gem, справа — фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска R_{var}).

трендов, устранение дефектов, нормировку и т.п., поиск периодов вращения (программа LNP-TEST из библиотек IDL), определение амплитуды переменности и проч. Для дальнейшего анализа нами было отобрано в совокупности 14830 единичных измерений блеска γ Gem за период наблюдений в 22 суток.

Результаты анализа представлены на рис. 1. На левой части этого рисунка приведена кривая блеска γ Gem. Рассчитанный спектр мощности переменности блеска объекта (рис. 1, средняя часть) указал на наличие трех пиков, соответствующих величинам периода $P = 8.7, 5.2$ и 3.2 суток (в порядке убывания их амплитуды). Отметим, что величина периода, соответствующая пику с максимальной амплитудой $P = 8.7$ суток, находится в хорошем согласии с результатами из статьи [3].

3. Запятненность поверхности γ Gem

Качество и продолжительность кривой блеска не дает возможности сделать заключения о стабильности найденных периодов, возможно, часть из них (особенно с меньшими величинами амплитуд) являются артефактами. Изменения формы кривой от одного периода вращения к другому могут быть интерпретированы, как указания на нестабильность пятен на поверхности звезды. Можно предположить, что в этом случае более естественное объяснение природы пятен можно найти в рамках гипотезы о их магнитной природе, а не при предположении о пятнах химического состава. Отметим, что аналогичное заключение было высказано в [3] при анализе переменности профилей линий.

Фазовая диаграмма переменности блеска γ Gem представлена на правой части рис. 1. Горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска R_{var} . Амплитуда переменности блеска составляет величину порядка десятой доли процента. Используя упрощенную методику (см., например, [4]), на основе полученной величины R_{var} и характеристик объекта (см. в [3]) мы можем высказать предположение о том, что площадь пятен на поверхности γ Gem составляет величину 0.4% от видимой поверхности звезды. Погрешность определения S составляет менее 0.1%.

При оценке радиуса $R = 4.03$ радиуса Солнца (см. в [3]), мы получили оценку параметра запятненности A для γ Gem в абсолютных величинах (в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.). Величины параметра запятненности A для γ Gem равна 32800 м.д.п., что существенно выше площади пятен когда-либо наблюдавшихся на поверхности Солнца.

4. Заключение

На основе высокоточного материала из архива космической миссии TESS проведено исследование фотометрической переменности горячей звезды спектрального класса A0IV γ Gem. Найдена оценка периода вращения звезды ($P = 8.7$ суток). По величине амплитуды переменности блеска R_{var} мы получили оценки значения относительного и абсолютного параметров запятненности γ Gem. Как и при анализе переменности профилей линий в [3], в ходе исследования переменности блеска γ Gem нами высказаны аргументы в пользу гипотезы о магнитной природе пятен на поверхности γ Gem.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00423).

Список литературы

1. L. A. Balona, *MNRAS*, **490**, 2112, 2019.
2. I. S. Savanov, *Astronomy Reports*, **62**, 814, 2018.
3. A. Blazère, P. Petit, C. Neiner, C. Folsom, O. Kochukhov, S. Mathis, M. Deal, and J. Landstreet, *MNRAS*, **492**, 5794, 2020.
4. E. S. Dmitrienko and I. S. Savanov, *Astronomy Reports*, **61**, 122, 2017.

Об опасности мелкого космического мусора

Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Якубовский С.В., Убоженко Д.Ю., Кононенко Н.Ф.

НИИЦ ЦНИИ ВВКО МО РФ

Рассмотрена история прогрессивного засорения околоземного космического пространства (ОКП) крупным и мелким космическим мусором (КМ), исследуются причины и последствия этого явления для космической деятельности и экологии Земли и ОКП. Показано, что рост количества и массы мелкого (не каталогизированного Системами контроля космического пространства, размером менее 10 см) КМ происходит стремительнее, чем крупного. Анализируются различные аспекты опасности мелкого КМ (в отличие от крупного) на основе анализа известных реальных событий, доступных данных наблюдений и моделирования. Обсуждаются возможные методы противодействия процессу техногенного засорения ОКП. Отмечается существенный недостаток средств мониторинга мелкого КМ и отсутствие его контроля во многих орбитальных областях. Обосновывается актуальность интенсификации изучения мелкой фракции КМ и разработки способов противодействия процессу ее образования, особенно с учетом явной недооценки ее опасности и дефицита соответствующих измерений. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

On the hazards of small space debris

Aksenov O.Yu., Veniaminov S.S., Yakubovsky S.V., Ubozhenko D.Yu., Kononenko N.Ph.

Scientific Research and Test Center of Central Research Air-Space Defense Institute of Ministry of Defense, Moscow, Russia

The history of progressive near-Earth space (NES) contamination with large and small space debris (SD) is analyzed as well as the causes and consequences of this phenomenon for space activity and ecology of the Earth and NES. The amount, mass, and dynamics of the small orbital debris population in low Earth orbits (LEO) are estimated as well as the consequences of multi-satellite communication space systems deployment being planned now. The latter makes the study of this area particularly relevant. Various aspects of the consequences of technogenic contamination of NES are considered, as well as the danger of small space debris for space activities and the ecology of the Earth and near-Earth space in comparison with the danger of large debris. A significant lack of complete and reliable information about small SD due to a shortage of sensors that can observe it is substantiated, which is one of the main reasons for the paucity of our knowledge about this population of SD. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.007

Общей проблемой техногенного засорения ОКП первые космические державы начали всерьез заниматься лишь с начала 1980-х гг. Однако интерес специалистов тогда был сосредоточен только на крупном КМ, который каталогизировался Системами контроля космического пространства (ККП) России и США. Мелкий КМ в первые годы освоения космоса всерьез не воспринимался по следующим причинам:

- количество его в ОКП было незначительным,
- он не успел еще натворить ничего плохого,
- из-за недостатка опыта трудно было оценить его реальную потенциальную опасность,
- репутацию ему подпортил эпитет «мелкий»,
- отсутствовали средства его мониторинга, недостаток которых ощущается и сейчас,
- наконец, свою роль сыграл и недостаток проницательности специалистов того времени.

Однако со временем ситуация изменилась. Стали повреждаться чувствительные поверхности бортовых инструментов, еще в 1990-е гг. астрономы-наблюдатели начали замечать снижение прозрачности ОКП из-за потоков мелкого мусора, что создавало помехи астрономическим наблюдениям [1, 2], обследования поверхностей КА показали, что они испещрены следами от ударов мелкого КМ [1, 3], наконец, ряд столкновений даже с микрочастицами привел к выходу из строя и даже гибели КА [4, 5, 6]. Вместе с тем, совершенствовались средства наблюдения КО и на КА стали устанавливаться бортовые детекторы ударов КМ (технология in-situ).

Поскольку крупный КМ контролируется многочисленными средствами наблюдения и притом весьма тщательно, то достоверно известно, что количество его единиц и масса растут в среднем быстрее, чем линейно (см. рис. 1, 2, кривые 1, 2, 3, 4, 5 [7]). Информация же о мелком КМ доступна нам лишь фрагментарно и далеко не во всех орбитальных областях (в основной массе — до высот 600 км). Но даже эти данные говорят об экспоненциальном росте массы и количества мелкого КМ (см. рис. 1, кривые 6, 7 и рис. 2, кривая 6). Эти последние кривые построены по доступным данным многолетних наблюдений, результатам анализа поверхностей возвращенных из космоса КО, лабораторных исследований, экспериментов и моделирования [6, 7, 8].

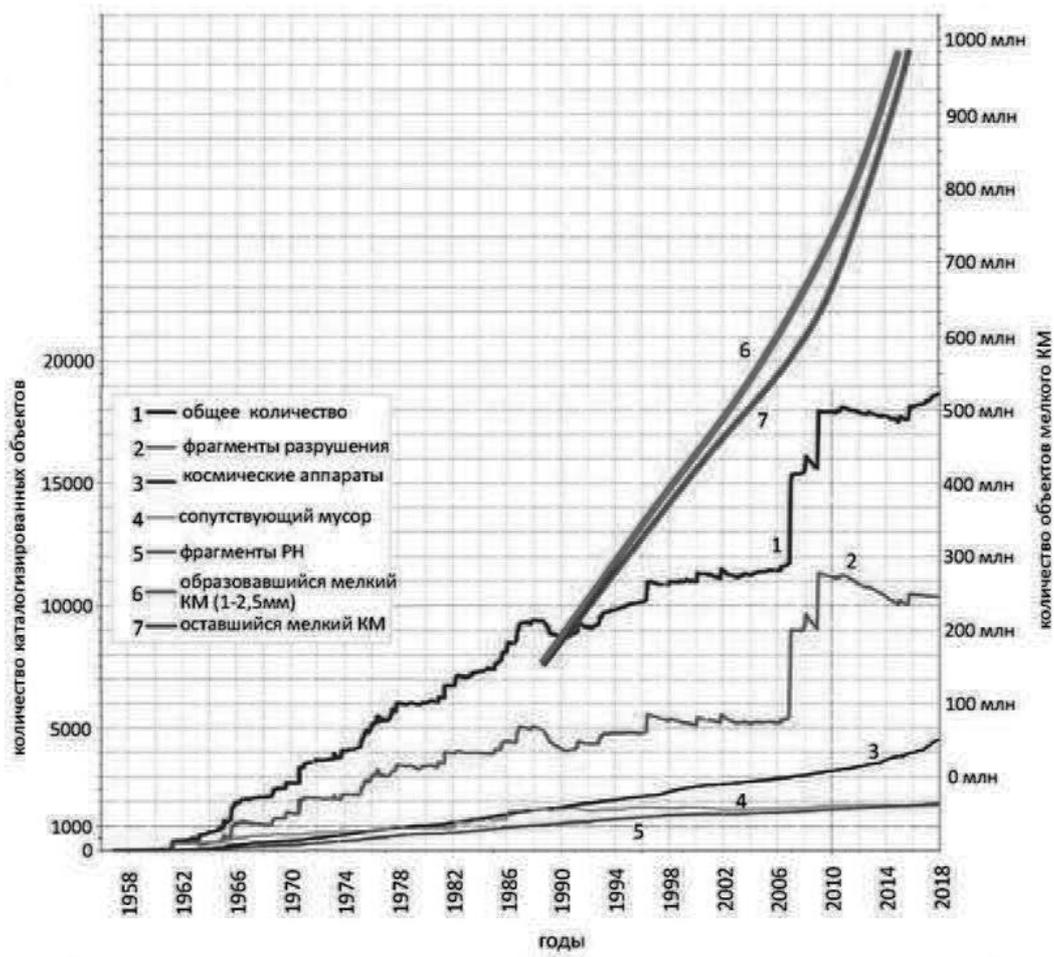


Рис. 1: Прогрессирующее засорение ОКП с 1957 г. крупным и мелким КМ.

Некоторые спады в кривых роста количества крупных КО и колебания разности кривых 6 и 7 для мелкого КМ объясняются 11-летними циклами вариаций солнечной активности, периодически «вспучивающими» атмосферу.

Оценить нарастание массы мелкого КМ в ОКП на фоне роста массы крупных КО (рост массы крупных КО приводится из [7]) можно следующим образом. Спектральный анализ кратеров и царпин на поверхности КА от столкновений с КМ показывает, что состав КМ включает чуть ли не всю таблицу Менделеева. Однако в основном КМ состоит из алюминия. Значительно меньше в нем кальция, магния, титана, железа, меди, олова, свинца, никеля, хрома, серебра, золота, прочих металлов, кремния, композитных материалов и пластмасс [8]. Исходя из известных оценок их пропорции и полагая условную среднюю плотность частиц КМ равной 3 г/см^3 (у алюминия она равна 2.7 г/см^3), получим для фракции КМ размером 1–2.5 мм только в низкоорбитальной области (для высот от 400 до 2000 км) кривую изменения суммарной массы, представленную на рис. 2 (кривая 6).

Как видно из графиков на обоих рисунках, нарастание количества и массы мелкого КМ происходит стремительнее, чем крупного (в обоих случаях в среднем экспоненциально). Если в 1994 г. масса мелкого КМ данного размера составляла менее 0.5% от общей массы КМ, то к 2018 г. их соотношение достигло 1.4%, т.е. за 24 года оно возросло почти в 3 раза. За этот же период количественное соотношение мелкого КМ (только в низкоорбитальной области, где мы располагаем определенным количеством данных для построения таких оценок) и каталогизированных КО (во всех орбитальных областях) возросло также почти в 3 раза. В абсолютном же выражении количество мелкого КМ выросло со 172 млн. до 1.25 млрд., то есть более, чем в 7 раз. В том же соотношении возросла и его суммарная масса. И это только в низкоорбитальной области, где она в 2018 г. заметно превысила 100 т. С увеличением размеров КМ все эти соотношения постепенно «смягчаются».

Но это все расчетные данные. Специально для скептиков приведем наглядное и показательное сравнение прироста мелкого КМ (размером от 1 мм до 10 см) за 3 года в одной из наиболее «заселенных» орбитальных областей (на высотах от 800 до 900 км). По данным реальных наблюдений радарными Хэйстек и ХЭКС в 2006 и 2009 гг. этот прирост составляет в среднем 20–30% (см. рис. 3) [9].

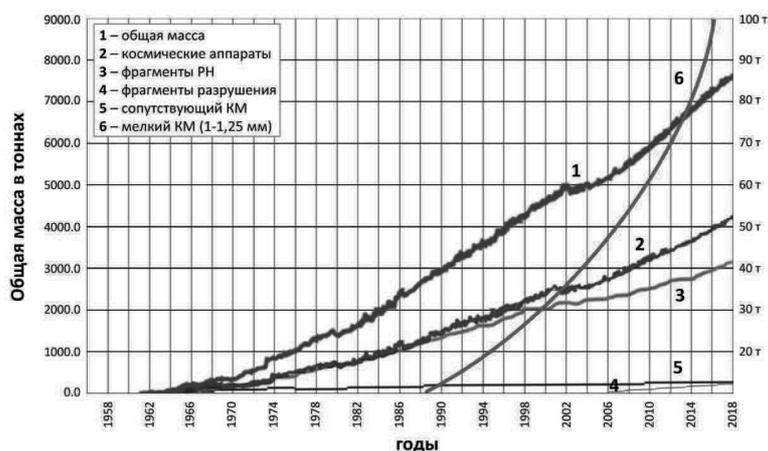


Рис. 2: Рост суммарной массы крупного и мелкого КМ.

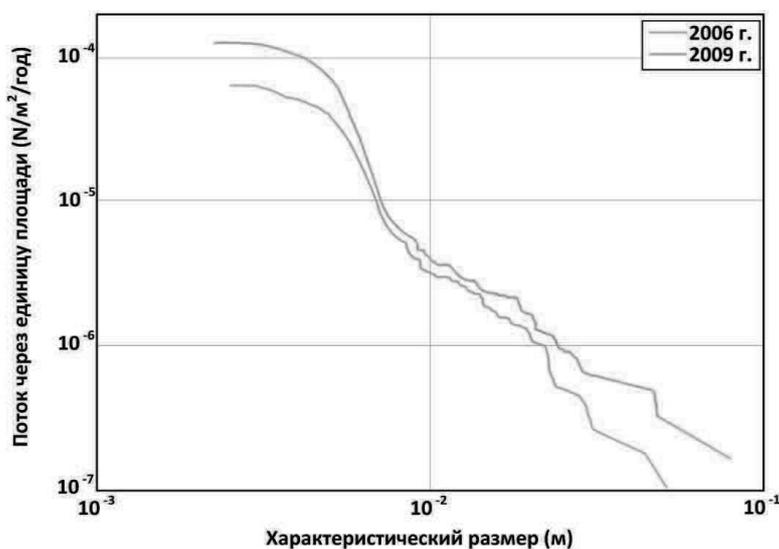


Рис. 3: Сравнение потоков мелкого КМ через единицу площади на высотах 800–900 км в зависимости от размеров КМ по данным наблюдений радаром Хэйстек и ХЭКС в 2006 и 2009 гг.

К сожалению, для составления более полной и достоверной картины не хватает достаточной информационной базы по этой категории КМ. К настоящему времени доступны измерения потоков мелкого КМ в основном на высотах до 600 км. В то же время, по фрагментарным данным бортовых детекторов и измерениям радаров Хэйстек и ХАКС, реально существуют более мощные его потоки на больших высотах — в частности, от 700 до 1000 км. Кроме того, измерения бортовых детекторов ударов КМ еще в 2001 г. показали, что в области геостационарного пояса потоки мелкого техногенного КМ количественно превышают естественные метеороидные потоки, по крайней мере, в 5 раз [10].

При рассмотрении перспектив засорения ОКП следует учитывать и планируемое рядом коммерческих компаний в ближайшем будущем размещение в низкоорбитальной области (ниже 2000 км) трех телекоммуникационных космических систем (КС), состоящих из нескольких тысяч КА класса 100–300 кг. В случае реализации этого проекта ситуация с техногенным насыщением в этой важной оперативной области существенно осложнится. Это приведет не только к скачкообразному росту количества действующих КА в ОКП, но и повлечет более прогрессивное засорение ОКП как крупным, так и мелким КМ, сопутствующим процессу вывода и функционирования КС. Это грозит ростом вероятности столкновений КО в данной области, которая приблизительно пропорциональна квадрату их общего количества.

На рис. 4 представлены кривые роста количества катастрофических столкновений (крупных КО) для случаев ухода с орбит 90, 95 и 99% отработавших КА [11]. (Для сравнения приводится также прогноз процесса засорения ОКП без предполагаемого запуска КС). Напомним, что катастрофические столкновения, приводящие к полному разрушению КО, происходят при отношении энергии кинетического удара к массе цели, равном 40 Дж/г (общепринятая норма).

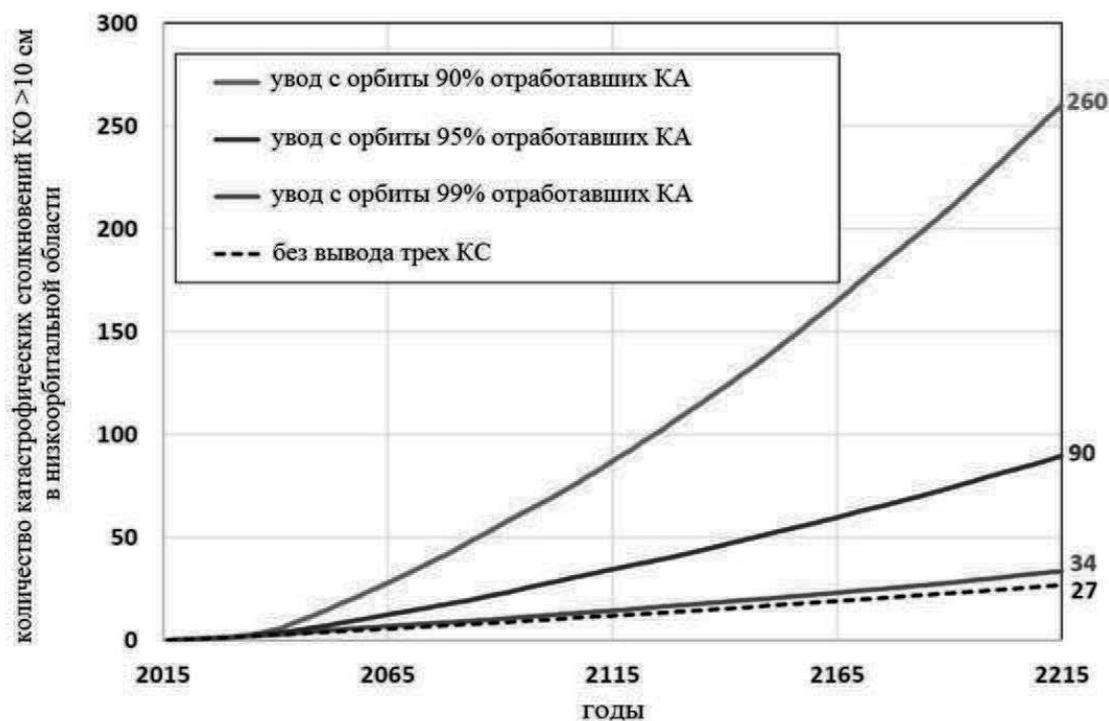


Рис. 4: Рост числа катастрофических столкновений после запуска коммуникационных КС.

По статистике, основная масса катастрофических столкновений происходит в диапазоне высот от 600 до 1000 км [12].

К сожалению, пока нет аналогичных глобальных оценок, показывающих, насколько усложнит эту картину учет мелкого КМ. Однако наблюдаемая корреляция между ростом крупного и мелкого КМ (см. хотя бы рис. 1, 2) указывает на то, что с развертыванием упомянутых КС следует ожидать также существенного увеличения прироста и мелкого КМ.

На научных форумах опасность крупного КМ обсуждалась неоднократно. Здесь мы подробнее остановимся на отличиях опасности для космической деятельности популяции мелкого КМ от опасности популяции крупного, которые состоят в следующем:

1. мелкий КМ не каталогизирован, следовательно, нет достаточно точных данных о векторах состояния мелких КО (как правило, нет вообще таких данных), и, таким образом, столкновения с ними непредсказуемы и нет возможности рассчитать и осуществить маневр уклонения от них для действующих КА;
2. количество мелких КО, по крайней мере, на несколько порядков больше количества крупных, и этот разрыв прогрессивно увеличивается (см. рис. 1, 2);
3. распределение скоплений мелкого КМ в ОКП и кинетические параметры его элементов изменяются быстрее, чем распределение и параметры движения крупных КО (ввиду большего отношения площади поверхности их частиц к массе);
4. опасностью мелкого КМ (даже в субмиллиметровом диапазоне) для действующих КА пренебрегать нельзя, и она, как уже показал опыт, довольно серьезна;
5. характер и степень опасности мелкого КМ сильно варьируют и значительно (более, чем крупного) зависят от параметров столкновения (угла вектора скорости частицы КМ к поверхности КА, уязвимости места удара и т.д.);
6. ввиду значительных трудностей наблюдения мелкого КМ нам доступно очень мало данных о количестве, составе, распределении этой популяции в ОКП и ее динамике, особенно это касается высоких орбитальных областей.

В [4, 13], например, показано, что при столкновении КО образуется значительно больше мелкого КМ, чем при взрыве (это подтверждено и многочисленными лабораторными испытаниями и моделированием), а столкновения происходят намного чаще, чем взрывы, причем столкновения мелких КО — на несколько порядков чаще, чем крупных (см. табл. 1).

Таблица 1: Среднее число столкновений N_{cp} в год КМ разных размеров [6].

Размер, см	0.1	0.2	0.5	1	5	10	20
N_{cp}	220	325	5.2	0.854	0.123	0.052	0.038

Эта таблица показывает, что вероятность столкновений сильно зависит от размеров элементов КМ. Например, при уменьшении размеров от 10 см до 1 мм (на 2 порядка) число взаимных столкновений увеличивается почти на 4 порядка, а вероятность столкновения малой частицы с крупным КО (например, с КА) также возрастает на несколько порядков (по сравнению с вероятностью столкновений каталогизированных КО). Частицы размером 1 мм сталкиваются чаще, чем 200 раз в год, а каталогизированные объекты — 1 раз в 27 лет (см. табл. 1). Здесь стоит напомнить, что поверхности возвращаемых на Землю из космоса объектов оказываются испещренными следами ударов мелкого КМ (не катастрофические столкновения). Это тоже напоминание для скептиков.

С учетом этих и ряда других обстоятельств, легко доказать, что **основной источник образования мелкого КМ — взаимные столкновения некаталогизированных (сравнительно мелких) КО** [1, 6, 13, 14]. Например, вклад последних в образование КМ размером от 1 до 10 мм, по крайней мере, на два порядка больше вклада взаимных столкновений каталогизированных КО. По расчетам отечественных и зарубежных специалистов, от столкновений КО ежегодно образуется свыше 30 млн. фрагментов размером от 1 до 2.5 мм, и лишь 10% из них сгорает в результате атмосферного торможения [6]. История накопления мелкого КМ (на фоне накопления крупного) вплоть до 2018 г. представлена на рис. 1.

Таким образом, интегральный риск поражения КА от каталогизированного КМ исчезающе мал по сравнению с риском столкновения с мелким КМ. Поэтому крайне важно измерять концентрацию КМ для оценки рисков столкновений его с КА прежде всего в низкоорбитальной области, где функционирует наибольшее количество КА и сами столкновения наиболее опасны (ввиду большой относительной скорости столкновений в этой области).

Далее несколько слов об измерении опасности засоренности ОКП для космической деятельности. В качестве такой меры для любого конкретного состояния техногенной засоренности ОКП теоретически можно принять суммарную кинетическую энергию всех техногенных объектов в ОКП или пропорциональную ей величину:

$$D = \sum_{k=1}^K m_k v_k^2.$$

Понятно, что все три параметра здесь зависят от времени, а суммирование ведется по всем КО в ОКП без исключения. Разумеется, эта мера очень общая, относительная и абстрактная. Однако более конкретную и вычислимую придумать трудно. Для приближения ее к реальности можно ее разбить на несколько слагаемых по размеру КМ, например:

$$\begin{aligned} D &= D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = \\ &= w_1 \sum_{i \in P_1} m_i v_i^2 + w_2 \sum_{i \in P_2} m_i v_i^2 + w_3 \sum_{i \in P_3} m_i v_i^2 + w_4 \sum_{i \in P_4} m_i v_i^2, \end{aligned}$$

где P_1 — популяция КО размером > 10 см, P_2 — популяция КО размером от 1 см до 10 см, P_3 — популяция КО размером от 1 мм до 1 см, P_4 — популяция КО размером < 1 мм.

Такое разбиение, конечно, условно, но каждое из этих слагаемых отражает свой характер опасности для космической деятельности и экологии Земли и ОКП и должно учитываться со своим весом w_i .

P_1 — это каталогизированные объекты. Столкновение с ними действующих КА катастрофично. Однако высокая точность известных векторов состояния каталогизированных КО позволяет заблаговременно предвидеть их опасные сближения и успешно совершить маневры уклонения, хотя это обременяет миссию. Коль скоро риск столкновения каталогизированных КО с действующими КА ничтожен, главная опасность P_1 — в возможности столкновений некооперируемых КО между собой и с КМ популяции P_2 . В результате таких столкновений образуется большое количество фрагментов разрушения, повышающих вероятность возникновения каскадного эффекта (синдрома Кесслера). Популяция P_2 опасна прежде всего отсутствием сведений об их векторах состояния с точностью, достаточной для расчета маневра уклонения от столкновения с ними, которое, если случится, скорее всего будет катастрофичным.

Опасность популяций P_3 и P_4 усугубляется их многочисленностью и прогрессирующим количественным ростом, что делает все ощутимее их воздействие на сложившуюся и относительно стабилизировавшуюся в течение многих миллионов (если не миллиардов) лет экологию Земли и геосфер, в частности, теплообмен между ними и внешней средой.

Типичный для действующих КА ущерб от популяции P_4 — повреждение иллюминаторов, оптики и чувствительных элементов выносных бортовых приборов (телескопов, солнечных панелей, уголковых отражателей, датчиков излучений, детекторов столкновений с КМ и т.п.) [1, 15]. На некоторых КА солнечные панели уже через 3 месяца полета оказывались негодными, а еще к 1995 г. после 70 полетов шаттла было заменено 60 иллюминаторов из-за повреждений от ударов КМ размерами с просыпанное зернышко [1]. Но известны и катастрофические последствия столкновений с этой «мелочью». Российский спутник «Блиц» был разрушен на высоте 825 км при столкновении с микрочастицей массой ~ 0.035 г размером ~ 3 мм при относительной скорости столкновения ~ 12.3 км/с [4, 5, 6, 16]. Американский спутник Sentinel-1A столкнулся с частицей миллиметрового размера массой около 0.2 г и получил вмятину диаметром 40 см (зафиксировала бортовая камера), изменил орбиту, поменял ориентацию, снизилась также мощность его солнечных батарей¹. Еще один американский спутник Telescom-1A был выведен из строя микрометеороидом — на этот раз естественным, но все равно мелким мусором. Вот уже 3 только четко зарегистрированных катастрофы. Есть и множество других подозрительных случаев.

Нельзя, наконец, упускать из вида возможных военно-политических последствий неконтролируемого столкновения с мелким КМ военных КА, если последние получают при этом заметное повреждение. Такой «необъяснимый» выход из строя КА военного назначения (кстати, происходивший неоднократно) может спровоцировать политический или даже вооруженный конфликт между космическими державами.

В заключение добавим, что методы борьбы с мелким КМ заметно отличаются от способов противодействия крупному. Например, в отличие от мелкого КМ, многие отработавшие КА и РН уводятся с рабочих орбит в плотные слои атмосферы и затем сгорают, либо передислоцируются на орбиты захоронения, чего принципиально невозможно сделать с мелким КМ, особенно на сравнительно высоких орбитах.

В публикациях предлагаются многочисленные способы удаления КМ, в том числе и мелкого. Однако большинство из них представляется скорее фантастическим, чем реальным, либо еще больше засоряют ОКП. Более или менее эффективным для удаления мелкого КМ может оказаться размещение на пути его потоков пенных шаров, резко снижающих их скорость. Однако следует весьма тщательно рассчитать баланс между позитивным и негативным вкладом этого метода, поскольку вывод шаров тоже засоряет ОКП.

Если принять во внимание специфику КМ как КО и учесть все, что он уже натворил, а также необходимость борьбы с ним, напрашивается следующий тревожный вывод. С одной стороны, КМ с военной точки зрения представляет собой мощную независимую неуправляемую опасную космическую группировку (то есть оружие!). Она не принадлежит никому, поскольку не имеет своего оператора (кроме Ньютона и Кеплера, точнее, их законов). С другой стороны, человечество под этим (причем прогрессивно нарастающим) гнетом КМ стало разрабатывать способы борьбы с ним. Однако принципиально эти способы могут применяться не только к КМ, но и к действующим КА. В отличие от КМ, они являются активными и имеют своих конкретных операторов, представляющих конкретные государства, и, при определенных намерениях своих операторов, тоже могут рассматриваться как космическое оружие [17].

Список литературы

1. S. Veniaminov, *Space Debris – a Threat to Mankind* (2013).
2. Interagency Report on Orbital Debris, in *White House, Library of Congress Catalog Card Number 95-72164* (1995).
3. NASA CP 3275, Parts 1, 2, 3, in *LDEF 69 Months in Space, 3d Post-Retrieval Symposium* (1993).
4. Small Satellite Possibly Hit by Even Smaller Object, *Orbital Debris Quarterly News*, **17(2)**, 1, 2013.
5. V. Adushkin, O. Aksenov, S. Veniaminov, and S. Kozlov, *Aerospace Sphere Journal*, **1(94)**, 54, 2018.
6. A. Nazarenko, *Space debris modeling* (2013).
7. *Orbital Debris Quarterly News*, **22(1)**, 10, 2018.
8. R. Bernhard and et al., in *LDEF 69 Months in Space, 3d Post-Retrieval Symposium* (1993).
9. J. Hamilton, *Orbital Debris Quarterly News*, **17(4)**, 4, 2013.
10. G. Drolshagen and T. Nehls, in *Proceedings of the Fifth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC* (2009).
11. J.-C. Liou, M. Matney, A. Vavrin, and et al., *Orbital Debris Quarterly News*, **22(3)**, 4, 2018.
12. D. Vavrin and A. Manis, *Orbital Debris Quarterly News*, **22(1)**, 6, 2018.
13. A. Potter, in *Proceedings of the First European Conference on Space Debris, ESA/ESOC* (1993).
14. J.-C. Liou, *Orbital Debris Quarterly News*, **13(3)**, 5, 2009.
15. C. Herbst and et al., in *Proceedings of the Fifth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC* (2009).
16. V. Adushkin, O. Aksenov, S. Veniaminov, and S. Kozlov, *Advances in Astrophysics*, **3(2)**, 83, 2018.
17. V. Adushkin, O. Aksenov, S. Veniaminov, and et al., in *Proceedings of the “Space Debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat”* (2019).

¹http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Copernicus_Sentinel-1A_satellite_hit_by_space_particle

Определение времени падения КА Tiangong-1 с использованием различных моделей атмосферы и методов прогнозирования

Юрасов В.С., Назаренко А.И.

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

Приводятся сравнительные результаты долгосрочного прогнозирования времени существования космического аппарата (КА) Tiangong-1, полученные с использованием различных методов прогнозирования и моделей атмосферы. В качестве источника орбитальной информации для расчетов использовались TLE данные. Расчеты по КА Tiangong-1 проводились, начиная с пятимесячного интервала до его падения, в режиме времени близком к реальному. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Reentry time evaluation for Tiangong-1 spacecraft using different atmosphere models and prediction methods

Yurasov V.S., Nazarenko A.I.

Stock Company Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Moscow, Russia

The results of the long-term reentry prediction for Tiangong-1 spacecraft are presented in this paper. These results were obtained using different atmosphere models and satellite prediction methods. TLE were used as the source of orbital data. Reentry predictions for Tiangong-1 spacecraft were executed in the near real-time mode starting with five-month interval before its decay. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.008

1. Введение

В течение нескольких последних десятилетий точность прогнозирования времени падения КА остается неизменной — ошибки расчета оставшегося времени существования достигают 20%. Основными факторами, влияющими на точность определения времени и места падения неуправляемых КА являются:

- погрешности используемых моделей расчета плотности атмосферы;
- погрешности используемых методов прогнозирования движения КА;
- изменчивость аэродинамических характеристик КА;
- погрешности определения орбит и баллистических коэффициентов.

В данной работе сравниваются результаты долгосрочного прогнозирования времени существования КА Tiangong-1, полученные с использованием различных методов прогнозирования и моделей атмосферы. Для прогнозирования движения использовались численный метод (ЧМ) Эверхарта с автоматическим выбором шага интегрирования [1] и универсальный численно-аналитический метод (УЧАМ) [2]. Для оценки влияния моделей плотности атмосферы на результаты расчетов при численном интегрировании уравнений движения КА Tiangong-1 использовались три динамические модели: ГОСТ 25645.115-84 (далее ГОСТ-84), ГОСТ Р 25645.166-2004 (далее ГОСТ-2004) и NRLMSIS-00. В численно-аналитическом методе для расчета плотности реализована модель атмосферы ГОСТ-84.

2. Технология решения задачи и гелиогеофизическая обстановка

Особенность большинства опасных падений — это отсутствие связи со спутниками и возможности управления ими. В этих условиях основным источником исходных орбитальных данных для решения задачи являются результаты работы Российской и Американской систем контроля космического пространства. В своей работе мы использовали публичные американские орбитальные данные, доступные на сайте www.space-track.org. Эти данные предоставляются в форме так называемых двухстрочных элементов (TLE).

Применяемая нами технология работ по определению времени прекращения существования КА, описанная в [3], предполагает:

- использование с сайта www.celestrak.com текущих и прогнозируемых индексов солнечной активности F10.7 и геомагнитной возмущенности Kp (Ap) при расчете модельной плотности атмосферы;
- построение сглаженных орбит и соответствующих согласующих баллистических коэффициентов с использованием в качестве измерений TLE данных;
- расчет времени и места падения КА по сглаженным данным в режиме времени близком к реальному, по мере получения TLE данных.

Данные о геомагнитной возмущенности и солнечной активности, полученные до текущей даты, использовались для расчета сглаженных орбит и согласующих баллистических коэффициентов. Для оценки прогнозируемого времени падения использовались прогнозные значения индексов геомагнитной возмущенности и солнечной активности. На рис. 1 приведены данные о солнечной активности для интервала расчетов падения КА Tiangong-1 — с ноября 2017 г. по начало апреля 2018 г. Уровень солнечной активности на интервале расчетов можно характеризовать как минимальный для текущего 11-летнего цикла с незначительными вариациями. Геомагнитная обстановка в рассматриваемый период была умеренно возмущенной.

3. Результаты прогнозирования времени падения

На рис. 2 представлены результаты прогнозирования времени падения КА Tiangong-1, полученные с использованием в качестве начальных условий результатов расчетов сглаженных орбит и согласующих баллистических коэффициентов на интервале с 8 ноября 2017 г. по 2 апреля 2018 г. Всего на этом интервале было получено 70 оценок. Видно, что прогнозируемые времена падения КА, полученные при использовании различных моделей атмосферы и методов интегрирования уравнений движения КА, в целом согласуются друг с другом.

Рассмотрим в качестве критерия точности прогнозирования времени падения относительную ошибку ε в процентах

$$\varepsilon = \frac{t_{\text{true}} - t_{\text{pred}}}{t_{\text{true}} - t_{\text{orb}}} \cdot 100\%,$$

где t_{true} — фактическое время падения, t_{pred} — прогнозируемое время падения по орбите, полученной на эпоху t_{orb} .

В качестве фактического времени падения для КА Tiangong-1 были приняты данные сайта www.space-track.org (02.04.2018 00:16 UTC), опубликованные уже после падения КА. Они были получены с использованием дополнительных источников информации и, по-видимому, являются наиболее достоверной оценкой времени падения.

На рис. 3 для всех вариантов расчетов приведены графики зависимости относительных ошибок ε определения времени падения КА Tiangong-1. Значения ε варьируются в достаточно широком диапазоне от -16% до $+30\%$. Стоит отметить, что оценки, полученные для одних и тех же моментов времени различными способами, отличаются незначительно по сравнению с вариациями самих оценок во времени. Это подтверждают данные таб. 1, где представлены статистические данные, характеризующие различие относительных ошибок трех вариантов расчетов от четвертого варианта, полученного численным интегрированием с использованием модели атмосферы NRLMSIS-00. Стандартные отклонения разностей относительных ошибок не превышают 3.5% , систематические смещения оценок незначительны.

На интервале с ноября 2017 г. до середины февраля 2018 г. для всех вариантов расчетов прослеживается четкая закономерность постепенного удаления расчетного времени падения КА. Если в начале этого интервала расчетное время падения составляло 7–11 марта 2018 г., то к концу интервала оно сместилось до 7–9 апреля, то есть за 3 месяца прогнозное время орбитального существования КА Tiangong-1 увеличилось на один месяц. Это свидетельствует о том, что на этом интервале КА Tiangong-1 испытывал меньшее торможение в атмосфере, чем предсказывалось при расчете времени его падения.

Были рассмотрены три гипотезы, которые могли бы объяснить причины наблюдаемой закономерности:

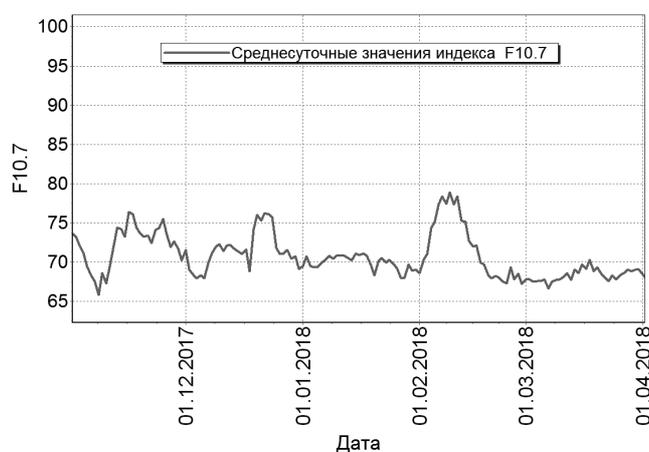


Рис. 1: Характеристика солнечной активности.

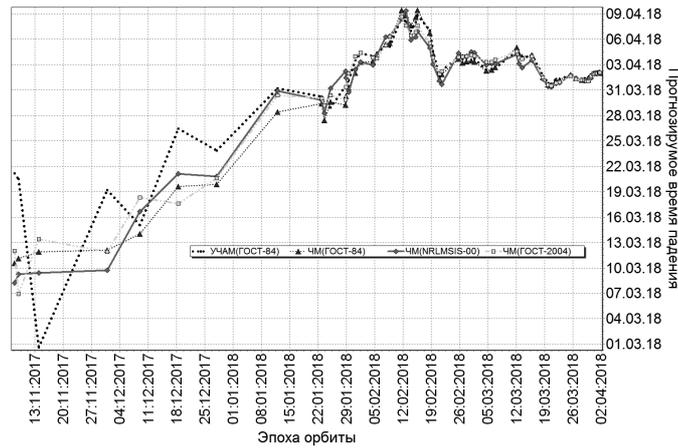


Рис. 2: Результаты расчета времени падения.

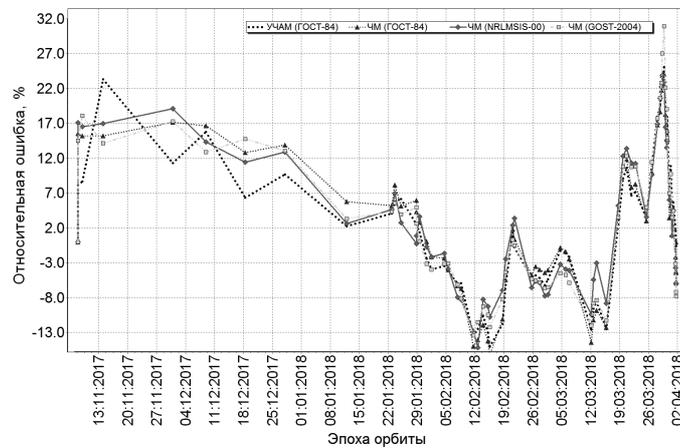


Рис. 3: Относительные ошибки определения времени падения.

1. *Ошибки прогнозных значений индексов солнечной активности и геомагнитной возмущенности.* Апостериорный анализ показал несостоятельность данной гипотезы, поскольку сколь-нибудь долговременных и интенсивных вариаций солнечной активности и геомагнитной возмущенности в указанный период не было.
2. *Управление или пассивное изменение ориентации КА Tiangong-1,* которое могло уменьшить его аэродинамическое торможение. Для проверки данной гипотезы были проведены оценки времени падения индийского разгонного блока GSLV R/B (номер NORAD — 40881, международный номер — 2015-041B), который неуправляемо падал приблизительно в то же время, что КА Tiangong-1. Как и в случае с КА Tiangong-1 на анализируемом интервале время существования GSLV R/B увеличилось почти на один месяц. В связи с этим можно полагать, что причиной данного явления скорее всего является не изменение аэродинамических характеристик падающих объектов, которое имеет индивидуальный характер для каждого КА.

Таблица 1: Различие относительных ошибок трех вариантов расчетов от полученного численным интегрированием.

Характеристика	Различие оценок от результатов ЧМ (NRLMSIS-00), %		
	УЧАМ ГОСТ-84	ЧМ ГОСТ-84	ЧМ ГОСТ-2004
Математическое ожидание	0.0	-0.2	0.1
Стандартное отклонение	3.5	2.5	2.4

3. Методические ошибки расчета плотности используемых моделей атмосферы на высотах полета КА *Tiangong-1* в рассматриваемом периоде времени, характеризующимся низкой солнечной активностью. Эта версия наиболее правдоподобна, поскольку этот фактор носит не индивидуальный характер, а проявляется в торможении всех КА. Подтверждение этой гипотезы возможно на основе построения вариаций плотности на анализируемом интервале по группировке низкоорбитальных КА [3].

4. Заключение

Результаты долгосрочного прогнозирования времени падения КА *Tiangong-1* с ноября 2017 г. по апрель 2018 г. с использованием различных моделей атмосферы ГОСТ-84, ГОСТ-2004 и NRLMSIS-00 и методов прогнозирования (численных и численно-аналитических) свидетельствуют об их согласованности.

На анализируемом пятимесячном интервале ошибки определения времени падения КА относительно оставшегося времени существования варьировались в широком диапазоне, от -16% до $+30\%$.

На интервале с ноября 2017 г. до середины февраля 2018 г. для всех вариантов расчетов выявлен тренд постепенного удаления расчетного времени падения КА *Tiangong-1*. За три месяца расчетов время его падения сместилось почти на месяц. Причиной данного явления могут быть погрешности используемых моделей атмосферы на высотах орбитального полета КА *Tiangong-1*, проявившиеся в период низкой солнечной активности.

Список литературы

1. E. Everhart, *Celestial Mechanics*, **10**, 35, 1974.
2. V. S. Yurasov, in *U.S.-Russian workshop; 2nd, Space surveillance; 1996; Poznan; Poland*, 198–211 (1996).
3. V. S. Yurasov, A. I. Nazarenko, K. T. Alfriend, and P. J. Cefola, *Journal of Guidance Control Dynamics*, **31**, 282, 2008.

Каталог малых планет на сайте ИПА РАН

Аксим Д.А., Безруков И.А., Бондаренко Ю.С., Водолагина А.Г., Железнов Н.Б., Кочетова О.М., Кузнецов В.Б.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

На сайте ИПА РАН создан Каталог малых планет (КМП), представляющий собой источник сведений о динамике малых планет и опирающийся на оригинальные исследования и программы, разработанные в ИПА РАН (URL: <http://iaaras.ru/dept/lbss/mpc/>). Приводится сравнение данных КМП с данными каталогов Международного Планетного центра (США), Лаборатории реактивного движения (США) и Пизанского университета (Италия). Показано, что орбитальные данные астероидов, сведения по обстоятельствам их сближений с большими планетами, размещенные на сайтах ИПА РАН и приведенных выше организациях, практически совпадают. В настоящее время КМП содержит сведения о 542163 малых планетах, занумерованных по состоянию на декабрь 2019 г. Предполагается расширение КМП за счет нумерованных малых планет, имеющих на интервале наблюдений несколько наблюдаемых оппозиций. По материалам доклада на XI международной конференции «Околосемная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Minor Planets Catalogue on the IAA RAS Website

Aksim D.A., Bezrukov I.A., Bondarenko Yu.S., Vodolagina A.G., Zheleznov N.B., Kochetova O.M., Kuznetsov V.B.

Institute of Applied Astronomy of the RAS, S.-Petersburg, Russia

The Catalogue of Minor Planets on the IAA RAS website is the source of information on the dynamics of small planets (URL: <http://iaaras.ru/en/dept/lbss/mpc/>). The Catalogue has been created using mainly original research and programs developed at the IAA RAS. The data of the Catalogue are compared with the data of other research centers, such as the International Planet Center (USA), the Jet Propulsion Laboratories (USA) and the University of Pisa (Italy). It is shown that the asteroid orbital data and the information about the circumstances of the approaches with large planets published on the sites of the IAA RAS and mentioned above research centers mostly are the same. At present, the Catalogue contains information about 542163 minor planets numbered for December 2019. In the Catalogue will be added unnumbered minor planets having several observed oppositions. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.009

1. Введение

Создан Каталог малых планет (КМП) на сайте ИПА РАН, являющийся русскоязычным источником сведений о динамике малых планет и опирающийся на оригинальные исследования и программы, разработанные в ИПА РАН¹.

При присвоении малой планете номера или имени на сайте ИПА РАН появляется информация об истории открытия и наименования малой планеты, параметры орбиты и ее визуализация, обстоятельства сближений с возмущающими планетами, включенными в модель движения, и другие полезные сведения.

Подробное описание КМП изложено в работе [1]. В данной статье мы приводим сравнение наших данных с данными других научных центров, таких как: Международный Планетный центр (МПЦ, MPC), США; Лаборатория реактивного движения (ЛРД, JPL), США; Пизанский университет (Динамика астероидов, ДА), Италия. Процедуры определения орбит в этих организациях несколько разнятся — в ЛРД уточняется кометная система элементов орбит, в Пизанском университете — экваториальная, а в МПЦ используется астероидная система.

Кроме того, в качестве дополнительной информации для сравнения приведенных в Каталоге данных используются результаты работы комплекса «Прогноз» (ИПА РАН²), а также данные с сайта Пизанского университета для объектов, сближающихся с Землей (NEODyS-2).

Сравнение орбитальных данных и обстоятельств сближений с большими планетами проводилось на примере планет (2702) Vatnikov (Главный пояс астероидов), (363599) 2004 FG₁₁ (потенциально опасный астероид типа «Аполлон») и (469420) 2001 XP₂₅₄ (транснептуновский объект).

2. Сравнение орбитальных данных

В настоящее время в Каталоге на сайте ИПА РАН³ размещены орбитальные данные для 542163 малых планет, занумерованных на декабрь 2019 г. Вычисление оскулирующих элементов было выполнено численным

¹<http://iaaras.ru/dept/lbss/mpc/>

²<https://prognoz.s3.iaaras.ru/approach.pdf>

³<http://iaaras.ru/dept/lbss/mpc/>

Таблица 1: Элементы орбит малых планет (2702) Vatnikov, (363599) 2004 FG₁₁ и (469420) 2001 XP₂₅₄ на начальную эпоху JD = 2458800.5.

Элементы орбиты	ИПА РАН (Россия)		ДА (Италия)	
(2702) Vatnikov	$\sigma_0 = 0''.39, 1971-2018$		$\sigma_0 = 0''.46, 1971-2019$	
M (°)	319.112596	$\pm 9.2e-6$	319.113	$\pm 2.398e-05$
ω (°)	323.76192	$\pm 8.8e-5$	323.762	± 0.0001574
Ω (°)	243.19058	$\pm 8.7e-5$	243.19	± 0.0001556
i (°)	1.616082	$\pm 3.1e-6$	1.616	$\pm 4.239e-06$
e	0.10021701	$\pm 3.6e-8$	0.100217	$\pm 4.294e-08$
a (a.e.)	3.40802827	$\pm 6.6e-8$	3.40803	$\pm 2.546e-08$
(363599) 2004 FG ₁₁	$\sigma_0 = 0''.43, 2004-2018$		$\sigma_0 = 0''.62, 2004-2018$	
M (°)	262.15626	$\pm 2.2e-5$	262.156	$\pm 2.371e-06$
ω (°)	228.3153	$\pm 8.7e-4$	228.315	± 0.0001902
Ω (°)	83.9191	$\pm 8.5e-4$	83.92	± 0.0001923
i (°)	3.12312	$\pm 1.2e-5$	3.123	$\pm 5.508e-06$
e	0.7238308	$\pm 5.2e-7$	0.723831	$\pm 6.306e-08$
a (a.e.)	1.5873126	$\pm 6.7e-7$	1.58731	$\pm 1.75e-09$
(469420) 2001 XP ₂₅₄	$\sigma_0 = 0''.21, 2001-2015$		$\sigma_0 = 0''.44, 2001-2015$	
M (°)	6.222	$\pm 1.8e-3$	6.221	± 0.003484
ω (°)	181.462	$\pm 2.5e-3$	181.465	± 0.006164
Ω (°)	304.9760	$\pm 2.6e-4$	304.975	± 0.0003689
i (°)	2.61739	$\pm 4.3e-5$	2.617	± 0.001238
e	0.21315	$\pm 2.9e-5$	0.213107	$\pm 7.225e-05$
a (a.e.)	41.987	$\pm 1.9e-3$	41.9837	± 0.00471

Таблица 2: Обстоятельства сближения (2702) Vatnikov с большими планетами.

Возмущ. планета	ИПА РАН $\sigma_0 = 0''.39$	МПЦ $\sigma_0 = 0''.41$	ЛРД $\sigma_0 = 0''.46$	ДА $\sigma_0 = 0''.46$
Минимальное расстояние между орбитами, а.е. (MOID)				
Меркурий	2.62707 \pm 8.6e-7	2.62865		
Венера	2.34607 \pm 2.8e-6	2.34732		
Земля	2.06401 \pm 3.0e-6	2.06377	2.06195	2.064
Марс	1.44333 \pm 6.1e-6	1.44418		
Юпитер	1.21651 \pm 3.2e-5	1.21148	1.2236	-
Сатурн	5.47527 \pm 7.9e-6	5.47383		
Уран	15.1302 \pm 2.9e-6	15.0566		
Нептун	26.1484 \pm 8.4e-6	26.1136		
Минимальное расстояние между телами на ближайшие 20 лет				
Земля	2020 03 25 2.09596 (a.e.)	-	-	-
Юпитер	2024 03 17 1.27812 (a.e.)	-	2024 03 17 1.27812 (a.e.)	-
Критерий (параметр) Тиссерана				
Земля	3.967	-	-	-
Юпитер	3.135	3.1	3.137	-
Соизмеримость средних движений				
Земля	1:6	-	-	-
Юпитер	2:1	-	-	-

интегрированием релятивистских уравнений движения в прямоугольных координатах с учетом возмущений от Меркурия до Нептуна и от Плутона, Цереры, Паллады и Весты. Возмущения от Земли и Луны рассматривались отдельно.

В табл. 1 приведено сравнение элементов орбит малых планет (2702), (363599) и (469420), опубликованных на сайтах ИПА РАН и Пизанского университета, Италия (на других сайтах эпоха оскуляции отличалась от 2458800.5). Как видно из представленных результатов, параметры орбит на этих двух сайтах практически совпадают (число знаков указаны в соответствии с данными на сайтах на дату 17 декабря 2019 г.).

Таблица 3: Обстоятельства сближения (363599) 2004 FG₁₁ с большими планетами.

Возмущ. планета	ИПА РАН (КМП/«Прогноз») $\sigma_0 = 0''43/0''51$	МПЦ (MPC) $\sigma_0 = 0''52$	ЛРД (JPL) $\sigma_0 = 0''39$	ДА (ASTDyS2/ NEODyS2) $\sigma_0 = 0''62/0''58$
Минимальное расстояние между орбитами, а.е. (<i>MOID</i>)				
Меркурий	$0.03724 \pm 5.9e-4$	0.03728		
Венера	$0.00165 \pm 2.2e-2$	0.00164		
Земля	$0.02075 \pm 1.5e-3/$ 0.0207545	0.02077	0.0206515	0.02075/ 0.02075
Марс	$0.02549 \pm 6.7e-4$	0.0255	–	–
Юпитер	$2.57052 \pm 2.0e-5$	2.56992	2.58175	–
Сатурн	$6.45008 \pm 4.4e-5$	6.44747	–	–
Уран	$15.6870 \pm 6.2e-5$	15.6599	–	–
Нептун	$27.5421 \pm 8.6e-6$	27.4727	–	–
Минимальное расстояние между телами на ближайшие 20 лет				
Земля	2020 04 12 0.04933 (а.е.)/ 2020 04 11.750177 0.04920 (а.е.)	–	2020 04 11 0.04920 (а.е.)	–/ 2020 04 11.75019 0.04920 (а.е.)
Луна	2020 04 12 0.04918 (а.е.)/ 2020 04 11.634527 0.04892 (а.е.)	–	–	–
Юпитер	2027 06 28 2.88491 (а.е.)	–	–	–
Критерий (параметр) Тиссерана				
Земля	2.366	–	–	–
Юпитер	4.040	4.0	4.039	–
Соизмеримость средних движений				
Земля	1:2	–	–	–
Юпитер	6:1	–	–	–

Таблица 4: Обстоятельства сближения (469420) 2001 XR₂₅₄ с большими планетами.

Возмущ. планета	ИПА РАН $\sigma_0 = 0''21$	МПЦ $\sigma_0 = 0''20$	ЛРД $\sigma_0 = 0''47$	ДА $\sigma_0 = 0''44$
Минимальное расстояние между орбитами, а.е. (<i>MOID</i>)				
Меркурий	$32.7094 \pm 4.4e-3$	32.7114		
Венера	$32.3195 \pm 4.4e-3$	32.3217		
Земля	$32.0517 \pm 3.5e-3$	32.055	32.0548	32.0527
Марс	$31.3921 \pm 4.6e-3$	31.394	–	–
Юпитер	$27.7390 \pm 5.1e-3$	27.7409	27.7326	–
Сатурн	$23.8578 \pm 6.8e-3$	23.862	–	–
Уран	$14.4644 \pm 1.0e-2$	14.4901	–	–
Нептун	$2.76498 \pm 5.6e-2$	2.83782	–	–
Минимальное расстояние между телами на ближайшие 20 лет				
Земля	2020 02 07 32.1449 (а.е.)	–	–	–
Юпитер	2027 06 20 28.2567 (а.е.)	–	–	–
Критерий (параметр) Тиссерана				
Земля	12.68	–	–	–
Юпитер	5.662	5.7	5.671	–
Соизмеримость средних движений				
Юпитер	1:5	–	–	–

3. Обстоятельства сближений с большими планетами

В табл. 2–4 представлены данные по сближениям малых планет (2702), (363599), (469420) с большими планетами, вычисленные в ИПА РАН, МПЦ, ЛРД и ДА. Как видно из таблиц, близость общих значений параметров упомянутых каталогов не вызывает сомнений.

4. Заключение

На сайте ИПА РАН создан Каталог малых планет, опирающийся на оригинальные исследования и программы, разработанные в ИПА РАН⁴.

Для удобства сравнения данных каталога с данными других центров, в Каталоге приводятся активные ссылки на сайты Международного Планетного центра (США), Лаборатории реактивного движения (США) и Пизанского университета (Италия).

Показано на примерах, что сведения об орбитальных данных астероидов и обстоятельств их сближения с большими планетами на сайте ИПА РАН и в указанных выше научных центрах практически совпадают.

В настоящее время в Каталоге размещены орбитальные данные для 542163 малых планет, занумерованных на декабрь 2019 г.

В будущем в Каталог предполагается добавить информацию о физических параметрах астероидов, а также включить данные о нумерованных периодических кометах. Предполагается также расширение Каталога за счет нумерованных малых планет, имеющих несколько оппозиций на интервале наблюдений.

Список литературы

1. D. A. Aksim, I. A. Bezrukov, Y. S. Bondarenko, A. G. Vodolagina, N. B. Zheleznov, O. M. Kochetova, and V. B. Kuznetsov, *Trudy IPA RAN*, **51**, 3, 2019.

⁴<http://iaaras.ru/dept/lbss/mpc/>

Интегрированный комплекс автономного обнаружения-распознавания космических объектов на базе широкопольного «быстрого» обзорного телескопа трехметрового класса

Алешин В.П., Гришин Е.А., Коршунов В.С., Пименов И.Л., Шаргородский В.Д.

Акционерное общество Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

Предлагаемый широкопольный обзорный телескоп трехметрового класса позволит обеспечить высокоэффективное наблюдение за микроспутниками и космическим мусором во всем диапазоне высот, в том числе в геосинхронной области и в зонах среднеорбитальных навигационных и высокоэллиптических связных космических аппаратов (КА) (до 23^м для трехметрового варианта). Существенно увеличиваются возможности оперативного обнаружения факта и результатов столкновений с космическим «мусором». «Быстрый» телескоп сможет проводить несколько обзоров небесной сферы за ночь. Телескоп позволяет осуществлять автономное обнаружение малоразмерных объектов в космическом пространстве, не занесенных в каталоги. Телескоп предлагается реализовать на Алтайском оптико-лазерном центре (АОЛЦ), что позволит создать уникальный интегрированный комплекс автономного обнаружения-распознавания космических объектов (КО) и оценки космической обстановки с использованием длиннофокусного телескопа, входящего в состав Наземной оптико-лазерной системы (НОЛС) с Телескопом информационным (ТИ 3.12), апертура 3.12 м. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Integrated complex autonomous detection-recognition of space objects based on the three meter wide-field “fast” survey telescope

Aleshin V.P., Grishin E.A., Korshunov V.S., Pimenov I.L., Shargorodsky V.D.

Stock Company Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Moscow, Russia

The proposed wide-field telescope of the three-meter class will provide highly efficient observation of microsatellites and space debris in the whole range of altitudes, including in the geosynchronous region and in the zones of mid-orbit navigation and high-elliptical communications spacecraft (up to 23^m for the three-meter version). Significantly increases the possibility of rapid detection of the fact and the results of collisions with space debris. The “fast” telescope will be able to conduct several surveys of the celestial sphere overnight. The telescope allows autonomous detection of small-sized objects in outer space that are not listed in the catalogs. The telescope is proposed to be implemented at the Altai Optical Laser Center, which will allow a unique integrated set of autonomous detection-recognition and assessment of the space situation using the TI 3.12 long-focus telescope. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.1.010

1. Введение

АОЛЦ в существующей конфигурации изображен на рис. 1 [1]. После реализации обзорного широкопольного телескопа АОЛЦ сможет проводить весь цикл обработки оптической информации «под одной крышей», начиная от автономного обнаружения целей и формирования угловых замеров и заканчивая фотометрической информацией и изображениями. При этом доступен большой набор диапазонов (от видимого до среднего инфракрасного (ИК) (5 мкм)). Дополнительные возможности предоставляет подсветка КО и дальнометрия. Синхронное комбинирование различных видов информации наряду с адаптивным управлением собственными инструментами АОЛЦ дает, недоступные ранее, характеристики оценки космической обстановки. Широкопольный телескоп АОЛЦ позволит реализовать интегрированный комплекс автономного обнаружения – распознавания совместно с ТИ 3.12, решающий следующие задачи:

1. Высокоэффективное наблюдение за микроспутниками и космическим мусором во всем диапазоне высот, в том числе в геосинхронной области, в зонах среднеорбитальных, навигационных и высокоэллиптических связных КА (до 24 зв. вел. для трехметрового варианта). «Быстрый» телескоп будет иметь возможность проводить несколько обзоров небесной сферы за ночь. Телескоп позволяет проводить автономное обнаружение малоразмерных объектов в космическом пространстве, не занесенных в каталоги.
2. Обнаруживать и сопровождать небольшие объекты в космосе, которые находятся в непосредственной близости от других спутников и могут угрожать их постоянной функциональности (в том числе микроспутники в непосредственной близости от КА на геосинхронных орбитах на дальности 36 000 км и среднеорбитальных и высокоэллиптических орбитах на дальностях 19 400 км и выше).

3. Вести каталог космических объектов с недоступной до сих пор полнотой.
4. Оперативное получение координатной и некоординатной информации по КО с видимой звездной величиной не слабее 22^m .
5. Реализовать дополнительные функции поддержки международной и российской программ противодействия космическим угрозам (астероидно-кометная опасность, космическая погода).
6. Участие в фундаментальных, научно-прикладных, инновационных проектах по развитию отечественных технологий (разработка новой приемной аппаратуры и методов обработки астрономической информации, создание учебного специализированного центра по оптико-электронным системам).

Проект расположения обзорного телескопа на АОЛЦ приведен на рис. 2.

2. Основные технические характеристики обзорного телескопа

Для реализации заявленных функций обзорный телескоп должен обладать следующими характеристиками:

- проникающей способностью не хуже 22^m ;
- скоростью обзора порядка 5000 кв. грд./час;
- погрешностями измерения углов (азимута и угла места) не хуже $0.5''$;
- погрешностями измерения угловых скоростей (по азимуту и углу места) не хуже $0.005''/с$;
- погрешностью измерения фотометрической информации не хуже 0.2^m ;
- предельным разрешением (при наблюдении в одной сцене двух объектов — тусклого вблизи яркого) не хуже 0.2^m по яркости и не хуже $0.5''$ по углу;
- конструктивная зона действия по азимуту — $0 \dots 360^\circ$;
- конструктивная зона действия по углу места — $20 \dots 160^\circ$;
- поле зрения $2^\circ \times 3^\circ$.

Местоположение АОЛЦ: Алтайский край, Змеиногорский район, село Саввушка. Среднегодовое количество ясных ночей: 178. Местоположение АОЛЦ является одним из лучших в России по количеству ясного времени.

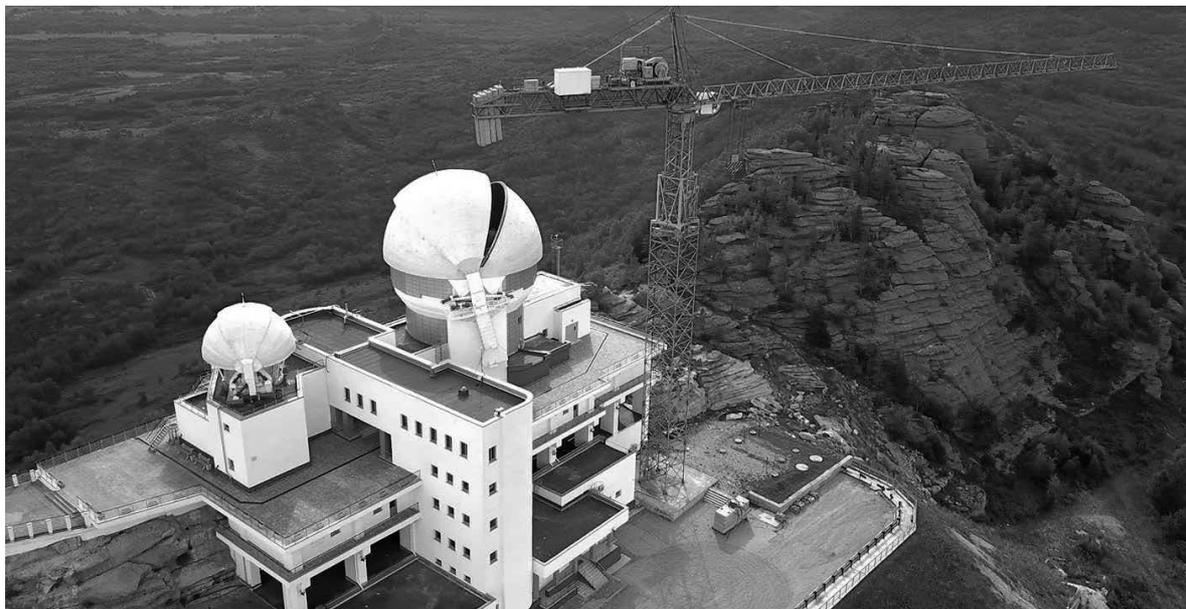


Рис. 1: Алтайский оптико-лазерный центр (АОЛЦ), телескоп ТИ-3.12.

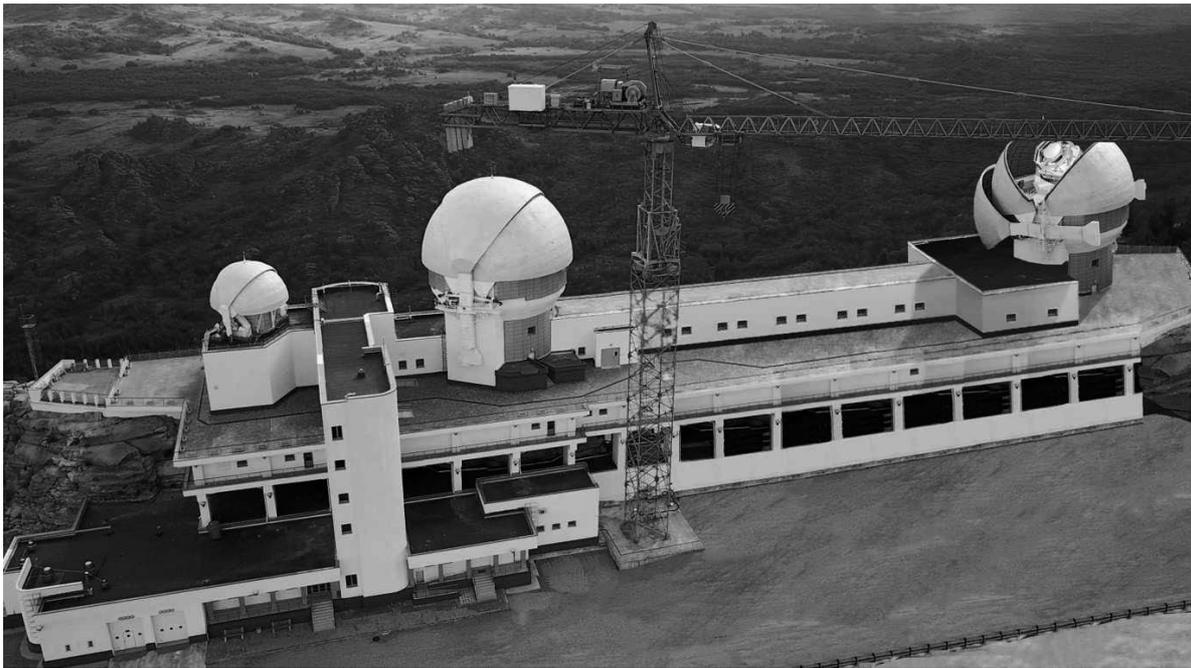


Рис. 2: Интегрированный комплекс автономного обнаружения-распознавания КО (проект).

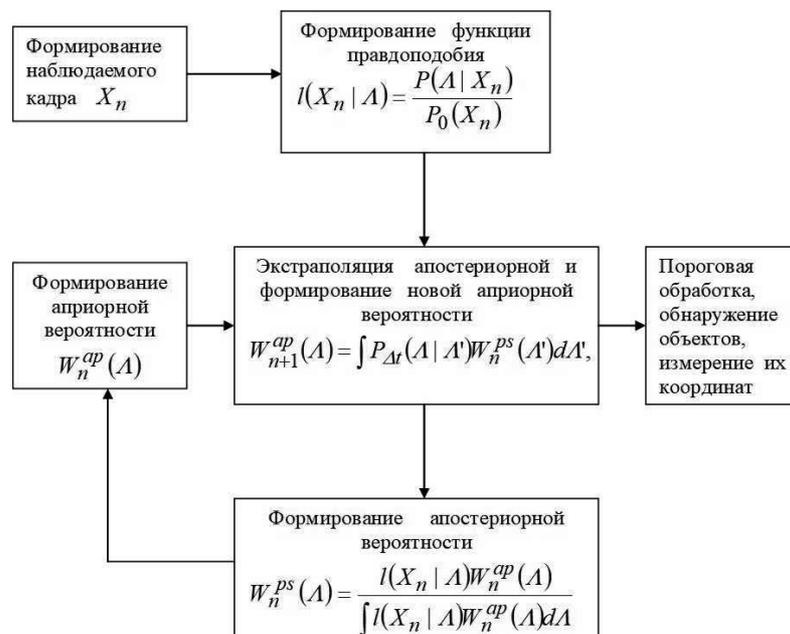


Рис. 3: Блок-схема оптимального алгоритма обнаружения объектов и измерения их координат.

3. Оптимальный алгоритм обнаружения объектов и измерения их координат

На основе теории статистических решений синтезируется оптимальный алгоритм обнаружения космических объектов для решения задач пассивной оптической локации (см. [2], рис. 3). Подробный комментарий приведен в [2]. Алгоритм основан на формировании апостериорной плотности распределения неизвестных фазовых параметров (скоростей и координат) в предположении Пуассоновой статистики появления новых целей (см. [3]). Предлагаемый итеративный алгоритм обнаружения-сопровождения успешно используется в больших радиолокационных комплексах (Бакут П.А., Жулина Ю.В., Иванчук Н. А., «Обнаружение движущихся целей» [3]).

Таблица 1: Возможности интегрированного комплекса автономного обнаружения-распознавания малоразмерных высокоорбитальных объектов (ВОКО).

	Космические объекты		Точность / разрешение
Детальные изображения по отраженному солнечному излучению и с лазерным подсветом	АОС	6 ^m (3.5 м на 1000 км)	ВД 0.05'' (0.35 м на 1000 км)
	СИ	8 ^m (1.5 м на 1000 км)	ИК 0.2'' (1 м на 1000 км)
Фотометрия	ВД	19 ^m	0.2 ^m
	ИК	9 ^m	0.3 ^m
Угловые координаты по ЦУ	ГСКО	20 ^m (8 см) 22.5^m (2.5 см)*	0.2'' 0.2''*
	ВОКО	17 ^m (20 см) 22^m (5 см)*	0.5'' 0.4''*
	НОКО	13 ^m (20 см)	2''
	ГСКО*	20^m (3.5 см)*	0.3''*
Обнаружение без ЦУ	ВЭКО*	22^m (3.5 см)*	0.3''*
	ВОКО*	18.5^m (10 см)*	0.5''*
	НОКО	13 ^m (20 см)	–
Дальнометрия без угловых отражателей		4000 км	0.5 размера КА

4. Заключение

1. Оптимальным широкопольным телескопом по совокупности характеристик — чувствительность — скорость обзора — цена является однозеркальный телескоп с апертурой около 3 метров и линзовым корректором (см. [4, 5]). Возможности АОЛЦ с обзорным телескопом иллюстрируются в табл. 1.
2. Телескоп использует конструктивные элементы ТИ 3.12:
 - укрытие;
 - опорно-поворотное устройство;
 - труба;
 - первичное зеркало с системой разгрузки;
3. фотоприемное устройство делается на основе составной CCD матрицы в 72 мегапикселя (широкоформатная 72 мегапиксельная матрица оптикоэлектронного комплекса (ОЭК) 14Ш33).
4. Цена разработки и реализации телескопа приблизительно в 4–5 раз меньше цены Телескопа Контроля Космоса (SST, Западная Австралия) при тех же функциональных характеристиках.
5. АОЛЦ, укомплектованный широкопольным телескопом, обладает уникальными характеристиками по оценке космической обстановки, не реализованными в мировой практике.

Список литературы

1. V. P. Aleshin, E. A. Grishin, O. A. Ivlev, D. D. Novgorodtsev, and V. D. Shargorodsky, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **32**, 256, 2016.
2. P. A. Bakut, V. A. Vygon, Y. P. Shumilov, , and V. D. Shargorodsky, *Radio Electronics*, **54**, 974, 2009.
3. P. A. Bakut, U. V. Gulina, and N. A. Ivanchuk, *Moving object detection* (1980).
4. V. Y. Terebizh, *Astronomy Letters*, **30**, 200, 2004.
5. M. Accerman, S. Tang, R. Simcoe, S. Laycock, E. Los, D. Mink, A. Doane, and G. Champine, *AMOS Technical conf.*, **1**, 1, 2013.

Содержание

<i>Еленин Л.В., Воропаев В.А., Молотов И.Е., Боровин Г.К.</i> Автоматизированный комплекс сбора и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы	1
<i>Каткова Е.В., Бескин Г.М., Бондарь С.Ф., Давыдов Д.В. и др.</i> Фотометрия ИСЗ на ММТ-9 в течение пяти лет	5
<i>Каткова Е.В., Плахута А.С., Бондарь С.Ф., Орехова Н.В., Граужанина А.О., Иванов Е.А.</i> Быстрая фотометрия КО на Цейсс-600	9
<i>Молотов И.Е., Еленин Л.В., Шильдкнехт Т., Круглый Ю.Н. и др.</i> Наблюдения астероидов и космического мусора в проекте НСОИ АФН	13
<i>Саванов И.С., Дмитриенко Е.С.</i> Активность звезд с планетными системами EPIC 211916756 и EPIC 211964830 из скопления Ясли	17
<i>Саванов И.С.</i> Активность γ Gem по фотометрическим наблюдениям TESS	20
<i>Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Якубовский С.В., Убоженко Д.Ю., Кононенко Н.Ф.</i> Об опасности мелкого космического мусора	22
<i>Юрасов В.С., Назаренко А.И.</i> Определение времени падения КА Tiangong-1 с использованием различных моделей атмосферы и методов прогнозирования	28
<i>Аксим Д.А., Безруков И.А., Бондаренко Ю.С., Водолагина А.Г., Железнов Н.Б., Кочетова О.М., Кузнецов В.Б.</i> Каталог малых планет на сайте ИПА РАН	32
<i>Алешин В.П., Гришин Е.А., Коршунов В.С., Пименов И.Л., Шаргородский В.Д.</i> Интегрированный комплекс автономного обнаружения — распознавания космических объектов на базе широкопольного «быстрого» обзорного телескопа трехметрового класса	36

Contents

<i>Elenin L.V., Voropaev V.A., Molotov I.E., Borovin G.K.</i> Automated system for collecting and analyzing optical measurements of Small Bodies of the Solar System	1
<i>Katkova E.V., Beskin G.M., Bondar S.F., Davydov D.V.</i> Photometry of artificial satellites on MMT-9 during last five years	5
<i>Katkova E.V., Plakhuta A.S., Bondar S.F., Orekhova N.V., Grauzhanina A.O., Ivanov E.A.</i> Fast photometry of artificial satellites on Zeiss-600s	9
<i>Molotov I.E., Elenin L.V., Schildknecht T., Krugly Yu.N. et al.</i> Observations of asteroids and space debris in the ISON project	13
<i>Savanov I.S., Dmitrienko E.S.</i> Activity of the Praesepe cluster stars with planetary systems EPIC 211916756 and EPIC 211964830	17
<i>Savanov I.S.</i> Activity of γ Gem from TESS mission photometry	20
<i>Aksenov O.Yu., Veniaminov S.S., Yakubovsky S.V., Ubozhenko D.Yu., Kononenko N.Ph.</i> On the hazards of small space debris	22
<i>Yurasov V.S., Nazarenko A.I.</i> Reentry time evaluation for Tiangong-1 spacecraft using different atmosphere models and prediction methods	28
<i>Aksim D.A., Bezrukov I.A., Bondarenko Yu.S., Vodolagina A.G., Zheleznov N.B., Kochetova O.M., Kuznetsov V.B.</i> Minor Planets Catalogue on the IAA RAS Website	32
<i>Aleshin V.P., Grishin E.A., Korshunov V.S., Pimenov I.L., Shargorodsky V.D.</i> Integrated complex autonomous detection — recognition of space objects based on the three meter wide-field “fast” survey telescope	36

Научное издание

**Научные труды
Института астрономии РАН.
Том 5 (1)**

Сдано в набор 03.04.2020. Подписано в печать 18.04.2020
Формат 60x90/16. Бумага офсетная
Уч.-изд. п.л. 5,0. Физ. п.л. 5,0. Тираж 100. Заказ №6455

Издательство «Янус-К»
127411, Москва, Учинская ул., д. 1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ»
119034, Москва, Еропкинский пер., д. 16

