
ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА СРЕДНЕВЫСОТНЫХ ОРБИТАХ

PHOTOMETRICAL OBSERVATIONS AND SHAPE MODELING OF SPACE DEBRIS IN MEDIUM EARTH ORBITS

И.В. Коробцев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, korobtsev@iszf.irk.ru*

М.Н. Мишина

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mmish@iszf.irk.ru*

Ю.С. Караваяев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, y-kar@bk.ru*

М.В. Еселевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mesel@iszf.irk.ru*

В.Е. Горяшин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vgor@iszf.irk.ru*

I.V. Korobtsev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, korobtsev@iszf.irk.ru*

M.N. Mishina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mmish@iszf.irk.ru*

Yu.S. Karavaev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, y-kar@bk.ru*

M.V. Eselevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mesel@iszf.irk.ru*

V.E. Goryashin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vgor@iszf.irk.ru*

Аннотация. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS, Бэйдоу, Галилео используют круговые средневысотные околоземные орбиты с периодом около полусуток в диапазоне наклонений от 50° до 70°. Орбиты ГНСС являются важной эксплуатируемой областью околоземного космического пространства. Информация о присутствующем в этой области космическом мусоре (КМ) и его характеристиках крайне важна для оценок рисков и принятия мер по их предотвращению. В работе приводятся результаты фотометрических наблюдений объектов КМ в окрестностях орбит ГНСС с помощью 1.6-метрового телескопа АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН за период 2018–2023 гг. Показано распределение объектов КМ по плоскостям орбит ГНСС. Получены временные и фазовые зависимости видимого блеска всех измеренных объектов КМ. Построены средние кривые блеска КМ, определены периоды вращения объектов и их динамика. Приведены результаты моделирования кривой блеска, характерной для нескольких объектов КМ из области орбит ГНСС. Предложены форма космического объекта и параметры собственного вращения, которые соответствуют наблюдаемой кривой блеска.

Ключевые слова: космический мусор, фотометрические наблюдения, кривая блеска, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Количество объектов космического мусора (КМ) в околоземном космическом пространстве неуклонно растет. По данным ежегодного отчета европейского космического агентства [https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf]

Abstract. The circular medium Earth orbits with a period of about half a day in the inclination range from 50° to 70° are used by various global navigation satellite systems (GNSS), such as GLONASS, GPS, Beidou, Galileo. GNSS operating orbits are one of the important areas in near-Earth space. The information about the space debris (SD) existing in this region and its characteristics is important for risk assessments and mitigation. We report the results of photometrical observations of SD objects in the vicinity of GNSS orbits obtained with the 1.6-meter AZT-33IK telescope of ISTP SB RAS Sayan Solar Observatory in 2018–2023. We show how SD objects existing in this region are distributed relative to GNSS objects. We derive time and phase dependences of the apparent brightness of all measured SD objects. Folded light curves are constructed, rotation periods and their dynamics are determined. The results of modeling the light curve inherent for several SD objects from the GNSS orbital are presented. We suggest a possible space object shape and parameters of proper rotation, which correspond to the observed light curve.

Keywords: space debris, photometrical observations, light curve, modeling.

в последние годы наблюдается значительный рост числа как запущенных космических аппаратов (КА), так и каталогизированного КМ. Согласно последним оценкам (11 августа 2023 г.) на основе статистических моделей [https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers], в космосе находится 36500 объектов КМ размером более 10 см.

В случае столкновения объекты такого размера представляют серьезную угрозу для функционирующих КА. Современные оптические средства могут обеспечивать сопровождение и каталогизацию объектов КМ размерами от 10 см в области высоких орбит, при этом точность орбитальных параметров малоразмерных объектов, как правило, невысока из-за отсутствия регулярных наблюдений и значительного влияния немоделируемых возмущений. Фотометрические наблюдения служат дополнительным источником информации о параметрах собственного движения объектов КМ, которые необходимы для точного учета возмущающих сил и планирования миссий по удалению космического мусора. Ряд проектов, ориентированных на создание баз данных фотометрических кривых блеска КМ, успешно реализуется и находится в открытом доступе [De Pontieu, 1997; Karov, 2016; Šilha et al., 2020]. В Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН на протяжении многих лет выполняются наблюдения, связанные с контролем околоземного космического пространства. Цель наблюдений состоит в получении траекторной информации для определения и уточнения параметров орбит космических объектов, а также в получении фотометрической информации для определения других характеристик (параметров собственного вращения, возможных формы и размера). Основными видами наблюдательной фотометрической информации являются временные и фазовые зависимости видимого блеска. На величину видимого блеска космического объекта влияют его размер, форма, материал поверхности, ориентация, расстояние до наблюдателя и т. д. Моделирование кривых блеска КМ и сравнение их с экспериментальными данными позволяют получить информацию о возможных характеристиках отражающих поверхностей и параметрах вращения объектов вокруг центра масс.

В данной работе представлены фотометрические наблюдения объектов КМ в окрестностях орбит глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS, Галилео и Бэйдоу. Рассматриваемые группировки спутников находятся на полусуточных околокруговых орбитах в диапазоне высот 18 000–25 000 км с наклонениями 50–70°. В настоящее время информация о характеристиках объектов КМ, не связанных с запусками КА, в области этих орбит практически отсутствует. Приводятся кривые блеска и фазовые зависимости блеска КМ, а также результаты моделирования формы космического объекта и параметров собственного вращения, которые соответствуют форме кривой блеска, характерной для нескольких наблюдаемых объектов КМ.

1. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

1.1. Объекты наблюдения

Данные о параметрах орбит действующих и прекративших функционирование КА, средств их выведения на орбиту и объектов, связанных с запусками, регулярно обновляются в открытом каталоге коман-

дования воздушно-космической обороны Северной Америки (NORAD) [<https://www.space-track.org>]. В то же время данные о параметрах орбит КМ в этом каталоге присутствуют ограниченно, например, в нем содержатся орбитальные данные всего одного крупного объекта КМ № 43381 (международный № 2008-020C) в окрестности ГНСС. ПАО «МАК «Вымпел» публикует материалы, которые содержат значительный объем информации о параметрах орбит высокоорбитальных объектов КМ [<http://spacedata.vimpel.ru/ru>]. В этом источнике представлены данные о 29 объектах КМ в области орбит ГНСС: 16 объектов находятся в окрестности орбит ГЛОНАСС, 3 — в окрестности Галилео, 10 — в окрестностях систем Бэйдоу и GPS. В целом вместе с КМ в области орбит ГНСС каталогизировано 411 объектов: 281 — действующие и выведенные из эксплуатации КА, 101 — разгонные блоки (РБ) и различные операционные элементы КА. На рис. 1 представлено распределение всех объектов по плоскостям орбит.

Отношение средней площади миделевого сечения к массе (ОПМ) для половины объектов КМ находится в диапазоне значений 0.1–1 м²/кг, у остальных — 1–10 м²/кг, что существенно больше характерного значения для КА и разгонных блоков, которое, как правило, не превышает 0.03 м²/кг. Это означает, что на орбитальную динамику этих объектов существенное влияние оказывает давление солнечного излучения, действие которого плохо учитывается при моделировании [Bakhtigaraev et al., 2016]. Средний каталожный блеск основной части объектов составляет от 16 до 20 звездной величины. На рис. 2 показаны распределения объектов КМ по ОПМ и среднему каталожному блеску.

1.2. Оборудование и методика наблюдений

Все наблюдательные данные, приведенные в этой работе, были получены на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН в 2018–2023 гг. Телескоп АЗТ-33ИК имеет оптическую систему Ричи—Кретьена с фокальным редуктором ($F=7$ м). Поле зрения с КМОП-камерой Andor Neo 5.5 (2160×2560 пикселей) составляет ~7×8 угл. мин, угловой размер пикселя — 0.185 угл. сек. Основные измерения проводятся в режиме бинирования 4×4 с результирующим масштабом 0.74 угл. сек/пиксель. Фотометрические наблюдения ведутся как с использованием широкополосных фильтров BVRI системы Джонсона—Казинса, так и в интегральном свете без фильтра.

Фотометрические измерения кривых блеска КМ выполнялись в режиме наблюдений без фильтра сериями продолжительностью от 20 мин. Время экспозиции и продолжительность серии подбирались в зависимости от блеска объекта и предполагаемого периода его изменения. Наблюдения планировались так, чтобы охватить как можно больший диапазон фазовых углов для построения фазовых зависимостей блеска. Все фотометрические наблюдения сопровождались получением калибровочных изображений: кадров плоского поля при сумеречном небе и кадров темного тока для каждой рабочей экспо-

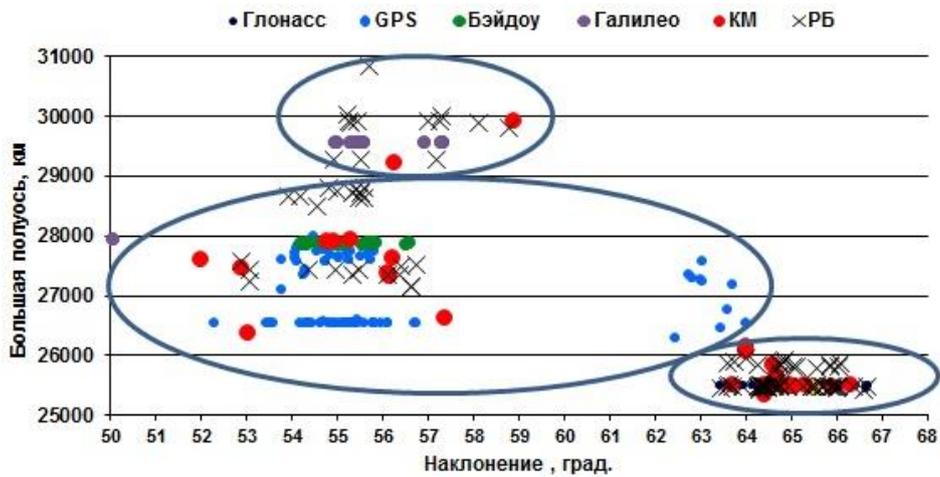


Рис. 1. Распределение каталогизированных КО в окрестностях действующих ГНСС

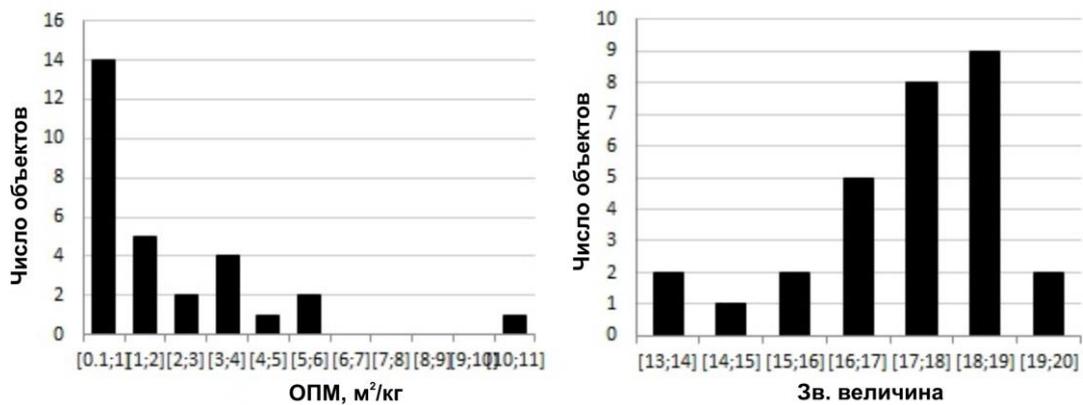


Рис. 2. Распределение каталогизированных объектов КМ по ОПМ (слева) и блеску (справа)

зиции. Первичная редукция данных астрономических наблюдений (вычитание усредненного темного кадра, деление на нормализованное усредненное плоское поле) проводилась по стандартной процедуре с помощью программного пакета «Апекс-II» [Девяткин, 2010]; для их дальнейшей астрометрической и фотометрической обработки наряду с «Апекс-II» использовались собственные программы автоматической обработки наблюдательных данных.

Кривые блеска объектов представляют собой графики видимой звездной величины по оси ординат и времени от начала наблюдений по оси абсцисс. Каждая кривая блеска проверяется на присутствие периодического сигнала методами частотного анализа. Для первоначального анализа периодической компоненты применяется быстрое преобразование Фурье [Deeming, 1975]. Полученный период проверяется с помощью метода наложенных эпох Лафлера—Кинмана [Lafler, Kinman, 1965], и строится средняя кривая блеска за период вращения. Примеры кривой блеска объекта № 67505 и соответствующей ей средней кривой блеска приведены на рис. 3.

1.3. Результаты анализа кривых блеска

Достаточный объем измерений позволил получить фотометрические характеристики объектов — средний блеск и амплитуду его изменений, харак-

терные особенности изменения блеска, период вращения и его динамику, фазовую зависимость блеска.

Характеристики всех объектов, для которых проводились измерения, представлены в таблице. В столбцах таблицы указаны:

- номер объекта в бюллетене ПАО «МАК «Вымпел»;
- значение периода собственного вращения (в виде диапазона, поскольку период может изменяться со временем);
- средний блеск, приведенный к нулевому фазовому углу и расстоянию 20000 км;
- максимальная амплитуда изменения блеска;
- среднее значение эффективного отношения площади к массе (ОПМ);
- оценка размера по модели диффузно-отражающей сферы с коэффициентом отражения 0.15.

Все двенадцать объектов КМ, наблюдавшихся в окрестности ГЛОНАСС, показывают периодические изменения блеска, свидетельствующие о вращении. По скорости вращения объекты условно разделены на медленно вращающиеся, с периодами вращения от нескольких десятков до нескольких сотен секунд, и быстро вращающиеся, с периодами несколько секунд (периоды этих объектов достоверно не определены из-за недостаточного временного разрешения).

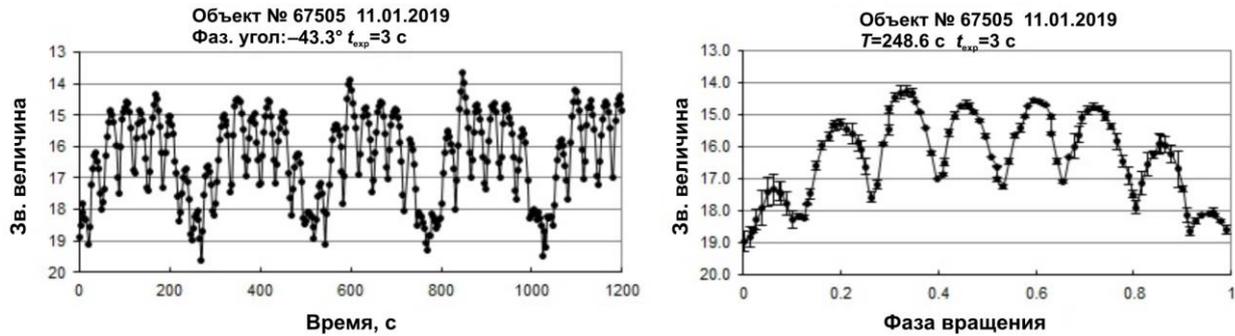


Рис. 3. Кривая блеска объекта КМ № 67505 (слева) и средняя кривая блеска за период вращения (справа)

Характеристики объектов КМ в окрестности орбит ГНСС

№ объекта	Период, с	Средний блеск, приведенный к фазовому углу 0°, зв. вел.	Амплитуда, зв. вел.	ОПМ, м ² /кг	Оценка размера, см
медленновращающиеся в окрестности ГЛОНАСС					
67403	472–437	17.5	4.0	0.39	17
67506	315–340	16.5	4.5	0.38	25
67505	242–291	16.5	5.0	0.44	25
67513	73–109	17	4.0	0.45	20
67410	66	17.5	3	0.34	17
67408	52–39	16.5	3.5	0.31	25
67517	234–219	16	3.5	0.55	35
68908	83	17.5	3.5	1.9	17
68207	26.8	13	4.0	0.13	140
быстровращающиеся в окрестности ГЛОНАСС					
67515	–	16.5	1.5	0.77	25
67516	–	17	1.5	1	20
67508	–	12.5	1.0	0.08	175
в окрестностях Бэйдоу и GPS					
76113	–	18	2.0	0.31	15
75118	26.8	18	2.5	0.05	15
74920	–	17.5	2	0.23	17
72011	–	18.5	1	3.2	12
в окрестности Галилео					
85800	120–170	13	4.5	2.9	140
82700	3.2	14	2.0	5.7	100

Семь медленновращающихся объектов в окрестности ГЛОНАСС (выделены цветом в таблице) имеют близкие характеристики: ОПМ ~ 0.4 м²/кг, средний блеск ~ 17 зв. величина, отсутствие явной фазовой зависимости блеска. Кривые блеска всех этих объектов имеют характерную форму с несколькими пиками на период (от пяти до четырнадцати) и глубокими минимумами между периодами, что указывает на сложную форму объектов и сложный характер вращения. На рис. 4 показаны средние кривые блеска для семи объектов с близкими характеристиками.

Еще два объекта с относительно медленным вращением (№ 68908, № 68207) находятся в стороне от основной группировки ГЛОНАСС, в области орбит, где расположены разгонные блоки. Оба объекта вращаются с периодами несколько десятков секунд. Значения среднего блеска и формы средних кривых блеска этих объектов существенно различаются. Объект № 68908 — один из самых слабых, его блеск в минимумах достигает 19-й звездной величины, имеет зеркально симметричную среднюю кривую

блеска относительно середины фазы вращения. Объект № 68207 показывает яркие вспышки, которые в максимуме достигают 11-й звездной величины. Размер объекта № 68908 составляет 17 см; размер объекта № 68207 — 140 см (оценка проведена по среднему блеску с использованием модели диффузно-отражающей сферы с коэффициентом отражения 0.15). Средние кривые блеска объектов № 68908 и № 68207 приведены на рис. 5.

В окрестностях близко расположенных ГНСС GPS и Бэйдоу наблюдались четыре объекта КМ, а в окрестности Галилео — два объекта. Объекты в окрестностях группировок GPS и Бэйдоу самые малоразмерные из наблюдавшихся — 12–17 см, в то время как объекты в окрестности Галилео достаточно крупные — 100 и 140 см. Определить периоды вращения и построить средние кривые блеска удалось только для двух объектов — № 75118 и № 85800 (рис. 6).

Остальные объекты, период вращения которых не удалось определить из-за недостаточного времен-

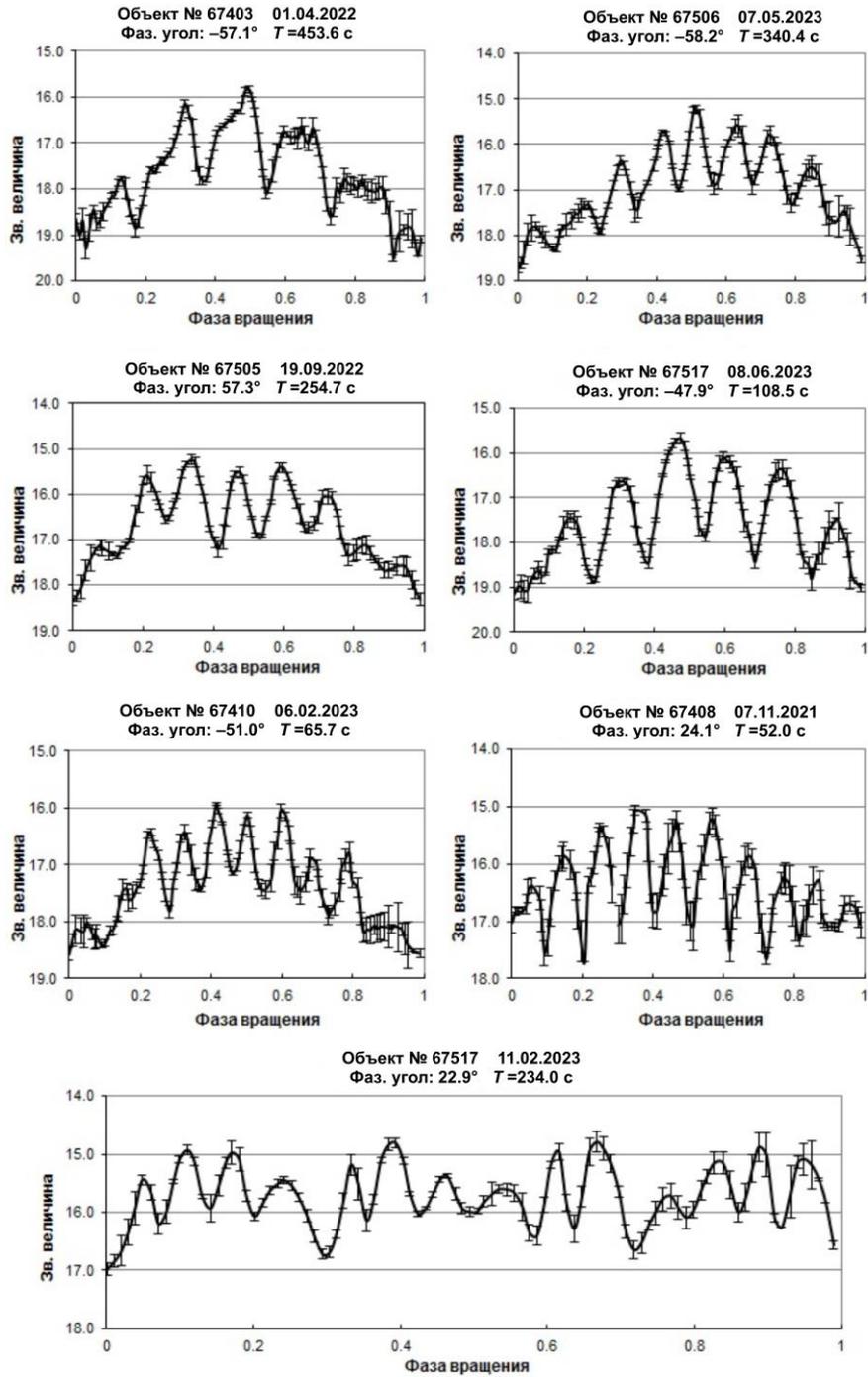


Рис. 4. Средние кривые блеска объектов с близкими фотометрическими характеристиками в окрестности ГЛОНАСС

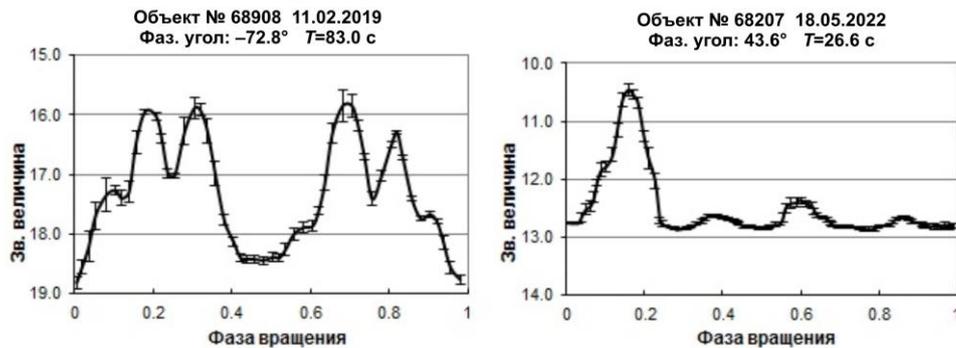


Рис. 5. Средние кривые блеска объектов, находящихся в стороне от основной группировки ГЛОНАСС

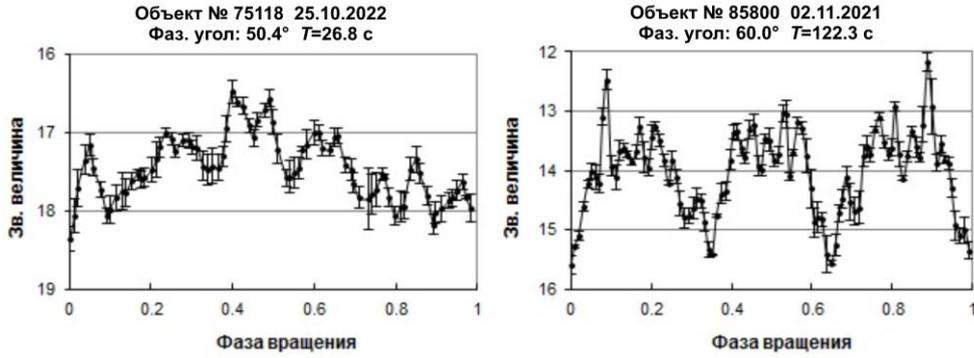


Рис. 6. Средние кривые блеска объектов в окрестностях GPS (слева) и Галилео (справа)

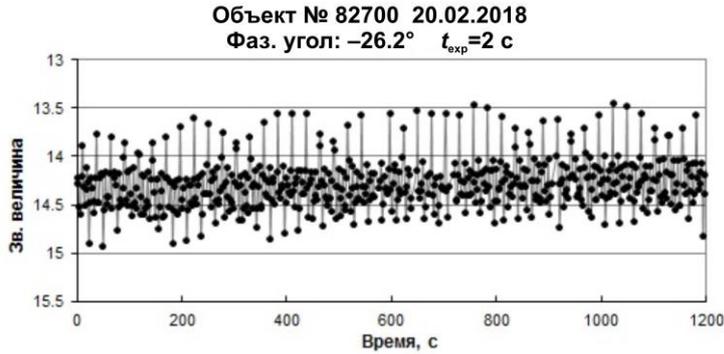


Рис. 7. Средняя кривая блеска объекта № 82 700 с эффектом наложения частот

ного разрешения, показывают быстрые изменения блеска. Для наблюдения таких объектов требуется время накопления в доли секунды, при котором не будет достигнуто приемлемое соотношение между сигналом и шумом. В кривых блеска этих объектов часто наблюдается эффект наложения частот, который возникает в случае близости шага дискретизации по времени к периоду изменения блеска. Кривая блеска быстровращающегося объекта с эффектом наложения частот показана на рис. 7.

1.4. Результаты анализа фазовых зависимостей

Для объектов, наблюдения которых охватывают большой диапазон фазовых углов, строились фазовые зависимости блеска, приведенного к расстоянию 20000 км. Примеры фазовых зависимостей блеска показаны на рис. 8 и 9. У большинства объектов, показывающих медленное вращение, нет четко выраженной фазовой зависимости блеска: средний блеск объектов остается почти постоянным при всех фазовых углах, что соответствует объектам, у которых преобладает зеркальное отражение. В ряде случаев (см. объект № 67513 на рис. 8) средний блеск возрастает с увеличением фазового угла. Быстровращающиеся объекты в основном имеют фазовую зависимость, характерную для объектов с диффузным отражением, с возрастанием среднего блеска при малых фазовых углах (см. рис. 9).

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ КМ

В этом разделе представлены результаты моделирования излучения, отраженного от свободно враща-

ющихся объектов КМ, у которых наблюдаются кривые блеска аналогичной формы (см. рис. 4) — с несколькими пиками на период и глубокими минимумами между периодами. Моделирование свободного вращения объекта проводилось в математическом пакете Matlab [<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>]. Была выбрана инерциальная система отсчета XYZ с началом в центре вращающегося тела. Источник света находится на бесконечности и излучает вдоль оси Z. Плоскость XZ содержит вектор, направленный к наблюдателю. Вторая система, $x_1x_2x_3$, с началом координат в центре масс вращающегося тела, связана с вращающимся телом, а оси x_1, x_2, x_3 совпадают с главными моментами инерции I_1, I_2, I_3 соответственно. Ориентация тела относительно XYZ описывается углами Эйлера φ, ψ и θ . Численное интегрирование уравнений Эйлера (1), (2) в отсутствие внешних моментов дает положение объекта в инерциальной системе отсчета XYZ [Ландау, Лифшиц, 2004]:

$$\begin{cases} I_1 \frac{d\omega_1}{dt} + (I_3 - I_2)\omega_2\omega_3 = 0, \\ I_2 \frac{d\omega_2}{dt} + (I_1 - I_3)\omega_1\omega_3 = 0, \\ I_3 \frac{d\omega_3}{dt} + (I_2 - I_1)\omega_2\omega_1 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\omega_1 \sin \psi + \omega_2 \cos \psi}{\sin \theta}, \\ \frac{d\psi}{dt} = \omega_3 - \frac{\cos \theta (\omega_1 \sin \psi + \omega_2 \cos \psi)}{\sin \theta}, \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_1 \cos \psi - \omega_2 \sin \psi, \end{cases} \quad (2)$$

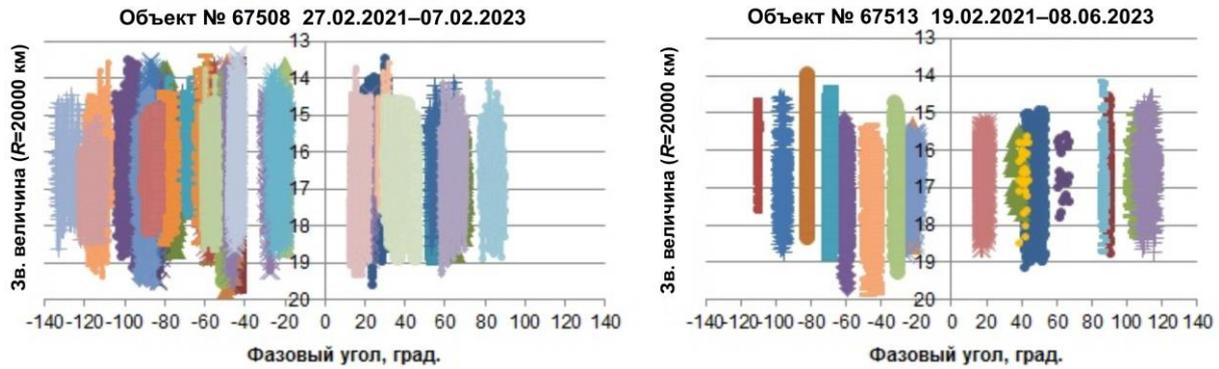


Рис. 8. Фазовые зависимости медленновращающихся объектов КМ

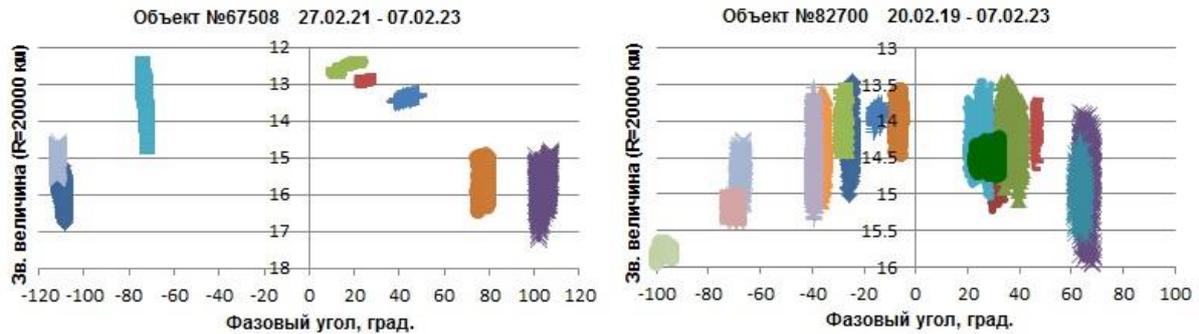


Рис. 9. Фазовые зависимости быстро вращающихся объектов КМ

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ — проекции угловых скоростей в инерциальной системе отсчета.

Для свободно вращающегося твердого тела должны сохраняться сумма моментов импульса и энергия вращения, определяемые соотношениями (3) и (4):

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 + I_3\omega_3 = const, \tag{3}$$

$$\frac{I_1\omega_1^2}{2} + \frac{I_2\omega_2^2}{2} + \frac{I_3\omega_3^2}{2} = const. \tag{4}$$

В случае $I_1 > I_2 > I_3$ вращение тела вокруг оси, параллельной промежуточному моменту инерции I_2 , будет неустойчивым. Если в начальный момент угловая скорость немного отклоняется по направлению от оси, угол отклонения будет стремительно нарастать и вместо простого равномерного вращения вокруг неизменного направления тело начнет совершать беспорядочное на вид кувыркание, при котором вектор мгновенной угловой скорости все время меняет направление. Это неустойчивое вращение еще называют эффектом Джанибекова [Mukakami et al., 2016].

Для моделирования был выбран объект с главными осями инерции, удовлетворяющими условию $I_1 > I_2 > I_3$, вращающийся вокруг оси, параллельной I_2 . Начальное положение и форма моделируемого объекта КМ показаны на рис. 10. Объект массой $m=0.45$ кг имеет форму параллелепипеда длиной $L=0.45$ м, шириной $W=0.40$ м, высотой $B=0.20$ м.

Одним из условий выбора таких параметров было примерное равенство ОПМ моделируемого объекта и ОПМ наблюдаемых объектов. Главные моменты инерции для данной модели определены в соответствии с системой уравнений (5):

$$\begin{cases} I_1 = \frac{m(W^2 + B^2)}{12}, \\ I_2 = \frac{m(L^2 + B^2)}{12}, \\ I_3 = \frac{m(W^2 + L^2)}{12}. \end{cases} \tag{5}$$

Начальная угловая скорость [рад/с] задавалась вектором $\omega_0 = [0.05, 0.2, 0]$, где $[\omega_1, \omega_2, \omega_3]$ — проекции ω_0 . Начальная ориентация тела в инерциальной системе отсчета соответствует углам Эйлера $[0, 0, 0]$. Фазовый угол Солнце–объект–наблюдатель составлял 30° . Рассматривалось диффузное отражение света от граней вращающегося объекта светло-серого цвета (0.8). Фон вокруг объекта черный.

Из графиков на рис. 11 видно, что компоненты угловой скорости ω_2, ω_3 периодически меняют знак в инерциальной системе отсчета, тогда как полный момент импульса и энергия вращения остаются постоянными, что подтверждает правильность полученных решений.

Далее создавалась анимация движения моделируемого объекта. Результаты анимации записывались в видеофайл, раскадровка видеофайла проводилась с помощью свободно распространяемой утилиты VirtualDub [<https://www.virtualdub.org>]. В каждом полученном кадре выполнялось суммирование значений яркости всех пикселей, результаты представлялись в формате звездных величин и записывались в текстовый файл. Затем строилась модельная кривая блеска, пример которой представлен на рис. 12 (слева).

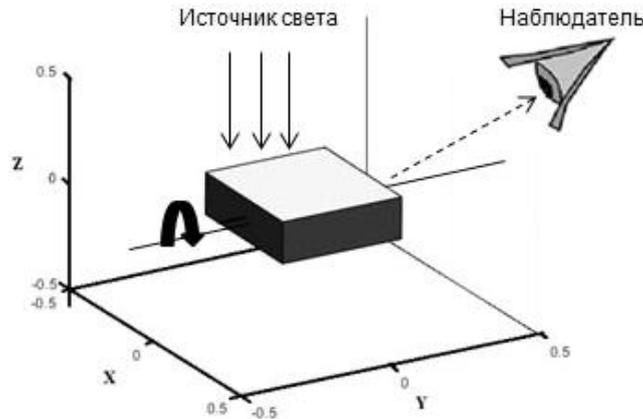


Рис. 10. Форма и начальное положение моделируемого объекта КМ

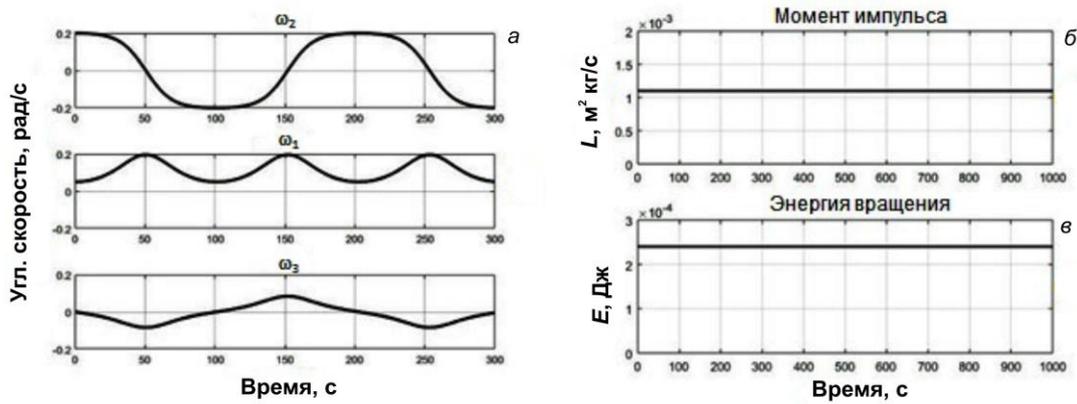


Рис. 11. Временная динамика компонент угловой скорости (а), момента импульса (б) и энергии вращения (в) моделируемого объекта

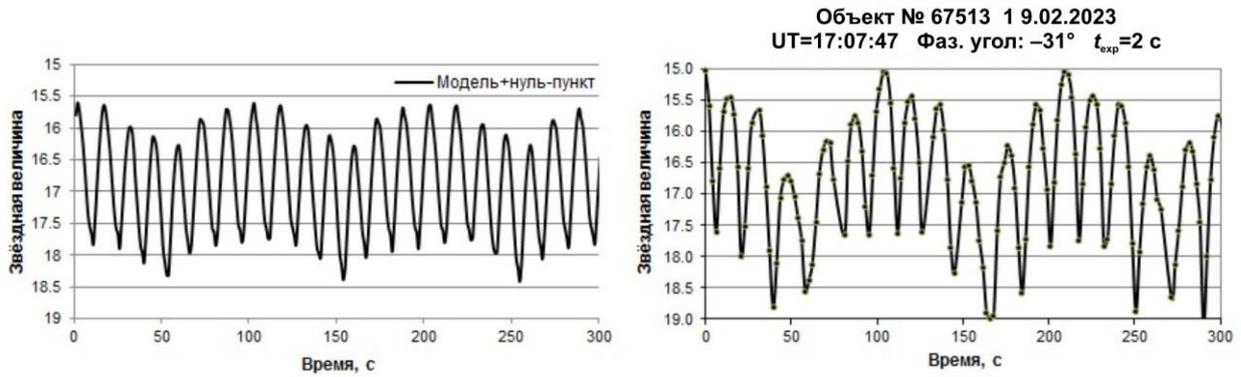


Рис. 12. Кривая блеска моделируемого объекта КМ (слева) и кривая блеска объекта № 67513 (справа)

Видно, что в результате моделирования удалось получить кривую блеска, близкую по форме к наблюдаемым кривым блеска объектов КМ. Такую форму кривой блеска можно объяснить различными размерами граней. Минимумы с периодом около 100 с соответствуют моментам изменения знака угловой скорости. В эти моменты основной вклад в отраженное излучение дает видимая грань, которая имеет минимальную площадь. Поскольку отсутствует какая-либо априорная информация об объектах наблюдения, в данной работе мы не ставили целью точный учет величины видимого блеска моделируемого объекта, а только моделировали геометрическую

форму объекта и характер его движения вокруг центра масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космический мусор представляет серьезную угрозу при эксплуатации околоземного космического пространства. В рамках данной работы были получены и проанализированы фотометрические наблюдения КМ в окрестностях орбит ГНСС. Определены фотометрические характеристики 18 объектов КМ, получены оценки их размеров на основе модели диффузно-отражающей сферы и измеренных значе-

ний среднего блеска. В окрестности орбит ГЛОНАСС выделено семь объектов, имеющих близкие фотометрические характеристики и, соответственно, кривые блеска аналогичной формы. Выполнено моделирование формы и режима собственного вращения объекта КМ, соответствующих кривой блеска, характерной для этих семи объектов. Многопиковая структура кривой блеска с глубокими минимумами указывает на сложный нестационарный характер вращения объектов, при котором компоненты угловой скорости периодически меняют знак в инерциальной системе отсчета (кувыркание объекта). Комбинация фотометрических наблюдений и результатов моделирования позволяет получить новую информацию о предполагаемой форме и размере объекта КМ, а также о параметрах собственного вращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «Апекс-I» и «Апекс-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений. *Астрономический вестник*. 2010. Т. 50, № 1. С. 74–87.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. I: Механика. М.: Наука, 2004. 224 с.

Bakhtigaraev N.S., Levkina P.A., Chazov V.V. Empirical model of motion of space debris in the geostationary region. *Solar System Res.* 2016. Vol. 50, iss. 2. P. 130–135. DOI: [10.1134/S0038094616020027](https://doi.org/10.1134/S0038094616020027).

Deeming T.J. Fourier analysis with unequally-spaced data. *Astrophys. Space Sci.* 1975. Vol. 36, iss. 1. P. 137–158. DOI: [10.1007/BF00681947](https://doi.org/10.1007/BF00681947).

De Pontieu B. Database of photometric periods of artificial satellites. *Adv. Space Res.* 1997. Vol. 19, iss. 2. P. 229–232. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00005-7).

Karpov S., Katkova E., Beskin G., et al. Massive photometry of low-altitude artificial satellites on MINIMEGA-TORTORA. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*. 2016. Vol. 48. P. 112–113.

Lafler J., Kinman T.D. An RR Lyrae star survey with the Lick 20-inch astrograph II. The calculation of RR Lyrae periods by electronic computer. *Astrophys. J. Supplement*. 1965. Vol. 11. P. 216–222. DOI: [10.1086/190116](https://doi.org/10.1086/190116).

Murakami H., Rios O., Impelluso T.J. A theoretical and numerical study of the Dzhanibekov and tennis racket phenomena. *Journal Applied Mechanics*. 2016. Vol. 83, iss. 11. 111006. 10 p. DOI: [10.1115/1.4034318](https://doi.org/10.1115/1.4034318).

Šilha J., Krajčovič S., Zigo M., et al. Space debris observations with the Slovak AGO70 telescope: Astrometry and light curves. *Adv. Space Res.* 2020. Vol. 65, iss. 8. P. 2018–2035. DOI: [10.1016/j.asr.2020.01.038](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.038).

URL: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf (дата обращения 20 августа 2023 г.).

URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers (дата обращения 11 августа 2023 г.).

URL: <https://www.space-track.org> (дата обращения 20 августа 2023 г.).

URL: <http://spacedata.vimpel.ru/ru> (дата обращения 7 августа 2023 г.).

URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения 12 января 2022 г.).

URL: <https://www.virtualdub.org> (дата обращения 12 января 2022 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 12 марта 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Коробцев И.В., Мишина М.Н., Караваев Ю.С., Еселевич М.В., Горяшин В.Е. Фотометрические наблюдения и моделирование формы космического мусора на средневисотных орбитах. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 1. С. 74–82. DOI: [10.12737/szf-101202410](https://doi.org/10.12737/szf-101202410).