

УДК 520.823

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ФАЗОВЫХ УГЛОВ

Коробцев И. В., Мишина М. Н.

INVESTIGATION OF PHOTOMETRICAL PARAMETERS FEATURES OF SPACE
OBJECTS OVER A WIDE RANGE OF PHASE ANGLES

Korobtsev I. V., Mishina M. N.

Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia
e-mail: korobtsev@yandex.ru

Abstract. Observations of space objects over a wide range of phase angles allow to find out the brightness of space object changes under various conditions of the illumination and to investigate surfaces of space object inaccessible to the observer on small phase angles. Results of photometrical observations of spacecrafts and space debris in the range of phase angles from 0 to 140 degrees are presented. Observations were obtained with the 1.6-meter telescope AZT-33IK of Sayan observatory of ISTP SB RAS during 2015-2017. An analysis of magnitude dependence on phase angle reveals an increase in the brightness at phase angles above approximately 90 degrees which is characteristic of the operating spacecrafts in various types of orbit. A model of the brightness variation of spacecrafts at large phase angles was considered. We also give some examples of the brightness variations features of the non-operating spacecrafts under various illumination conditions and the brightness dependence on phase angle of space debris. The analysis of light curves of the rotating objects revealed the dependence of brightness changes of the space objects from conditions of illumination. These changes are identified in a form and amplitude of light curves.

Keywords: space debris, phase dependence, GLONASS.

Введение

Одним из важных инструментов контроля технического состояния космических аппаратов является анализ фотометрической информации, получаемой с помощью наземных астрономических средств. Оптические телескопы, оснащенные фотометрической и спектральной аппаратурой, имеют возможность получать некоординатную информацию об околоземных космических объектах в виде кривых блеска, показателей цвета, спектров низкого разрешения, изображений и фазовых зависимостей блеска. Наблюдения, проводимые в расширенном диапазоне фазовых углов, позволяют проследить характер изменения блеска космических аппаратов (КА) при различных условиях освещенности и исследовать поверхности КА недоступные наблюдателю на малых фазовых углах. В статье приводятся результаты фотометрических измерений, полученных на 1,6-метровом телескопе АЗТ-33ИК Саян-

ской обсерватории ИСЗФ СО РАН по ряду активных космических аппаратов и модельное представление изменения их блеска на больших фазовых углах. Представлены некоторые особенности фазовых зависимостей, наблюдавшиеся для вращающихся объектов и космического мусора.

1. Фазовые зависимости блеска активных космических аппаратов

Видимый блеск активных космических аппаратов на коротких временных интервалах остается постоянным. При долговременных измерениях наблюдатель видит постепенное увеличение или уменьшение блеска, связанное с изменением геометрии наблюдений при движении КА по орбите, определяемое фазовым углом φ — углом между центром Солнца, спутником и наблюдателем. Поскольку у стабилизированных КА нормаль к плоскости солнечных батарей всегда направлена на Солнце, при фазовых углах меньших 90°

Коробцев Иван Владимирович, научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН; e-mail: korobtsev@yandex.ru

Мишина Марина Николаевна, ведущий инженер-программист Института солнечно-земной физики СО РАН; e-mail: mmish@iszf.irk.ru

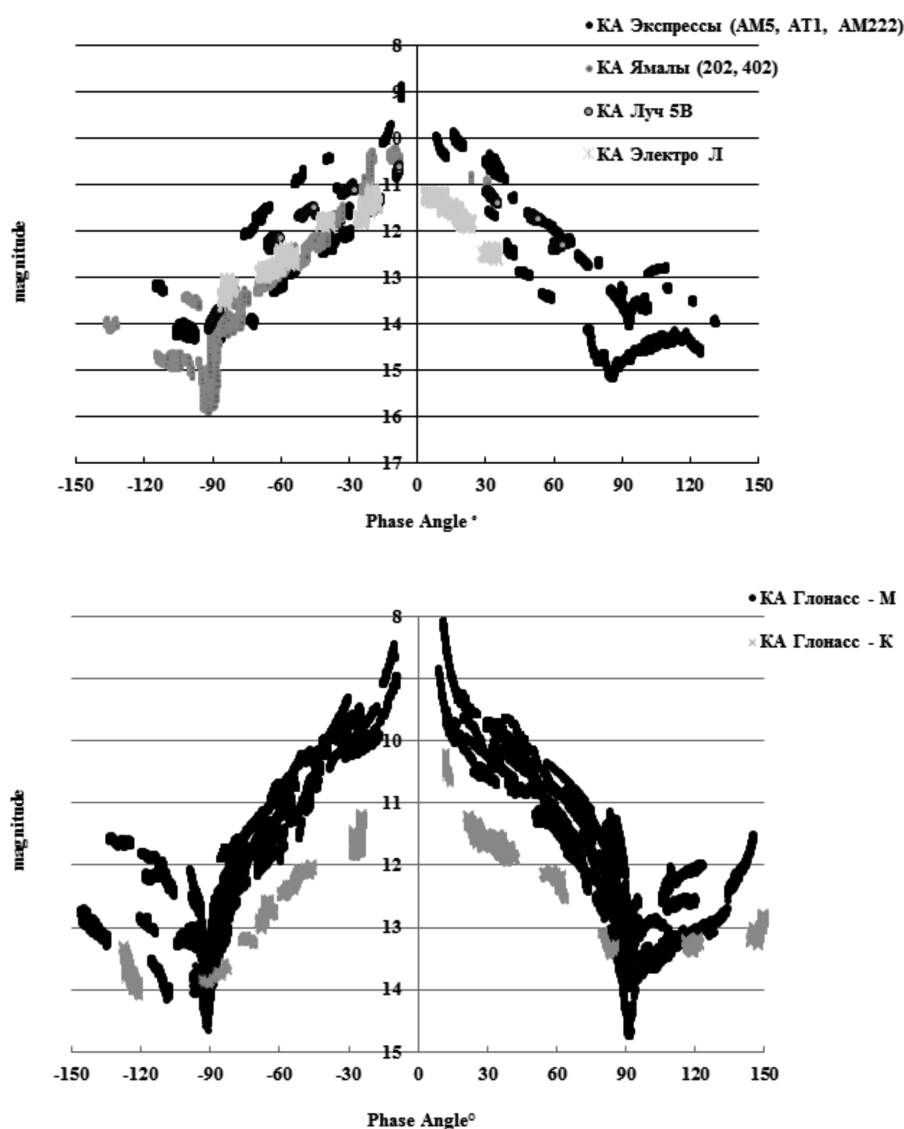


Рис. 1. Фазовые зависимости активных КА в широком диапазоне фазовых углов: сверху — геостационарных КА, снизу — КА типа «ГЛОНАСС»

наблюдатель видит поток солнечного излучения, отраженный от корпуса спутника и передней стороны панелей солнечных батарей. При $\varphi = 90^\circ$ наблюдатель видит ребро панели солнечных батарей и площадь поверхности, отражающей солнечное излучение, в этот момент минимальна. Наконец, при $\varphi > 90^\circ$ к наблюдателю обращена поверхность КА, не освещенная Солнцем. Однако, как показывают наблюдения, блеск некоторых КА после прохождения фазового угла равного 90° начинает возрастать. Этот эффект наблюдался у аппаратов различных типов на геостационарных и средневысотных орбитах. Примеры фазовых зависимостей блеска различных КА

в широком диапазоне фазовых углов представлены на рис. 1. Определение координат космических объектов относительно звезд и оценки блеска в инструментальной системе проводятся пакетом обработки изображений АРЕХ II [1].

Характер фазовой зависимости блеска у геостационарных КА и КА «ГЛОНАСС» (рис. 1) примерно одинаков: до 90° наблюдается монотонный спад блеска, после прохождения фазового угла 90° блеск начинает расти.

Эффект возрастания, или «выравнивания» блеска космических аппаратов на фазовых углах больших 90° описан в ряде ра-

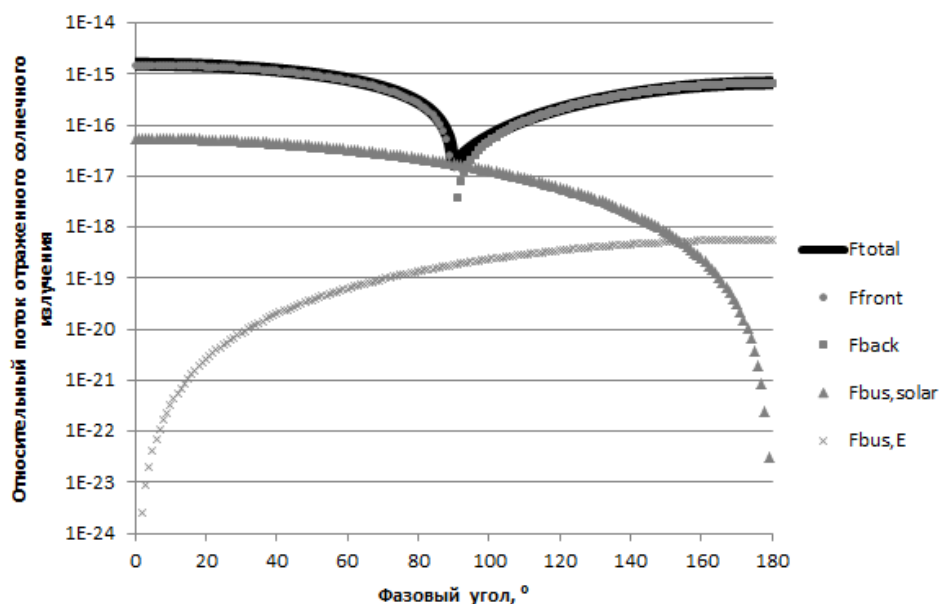


Рис. 2. Фазовая зависимость потока отраженного излучения для модели КА «ГЛОНАСС-М». F_{total} — суммарный поток, F_{front} — отраженный солнечный поток от передней стороны солнечных батарей, F_{back} — пепельный свет от обратной стороны солнечных батарей, $F_{bus,solar}$ — отраженный солнечный поток от корпуса КА, $F_{bus,E}$ — пепельный свет от корпуса КА

бот [2–5]. Все наблюдения, представленные в этих работах, относятся к активным геостационарным спутникам. По мнению исследователей [3], основной вклад в поток излучения на больших фазовых углах вносит отраженное от спутника солнечное излучение, рассеянное Землей (так называемый «пепельный» свет). В работе [3] предложена простая фотометрическая модель геостационарного КА, учитывающая ориентацию солнечных батарей и корпуса спутника, а также вклад пепельного света. В нашей работе мы применили данную модель для КА на средневысотных орбитах. На рис. 2 показана оценка вклада отдельных составляющих в общий поток отраженного излучения КА «ГЛОНАСС-М» согласно модели [3]. Земля рассматривается в качестве диффузно-отражающей сферы, освещенной Солнцем. Модели КА соответствует сферический корпус с плоскими солнечными панелями, следящими за Солнцем. Панели и корпус считаются Ламбертовскими отражателями.

На фазовых углах меньше 90° в отраженном от спутника потоке излучения доминирует солнечный свет, отраженный от передней стороны панелей солнечных батарей. По мере приближения к фазовому углу 90° эта составляющая потока падает до нуля, а основной вклад даёт солнечный поток, отраженный от корпуса. При фазовых углах больше 90°

преобладает пепельный свет от обратной стороны солнечных батарей.

Параметры модели КА «ГЛОНАСС-М» приведены в табл. 1. Основные геометрические параметры спутника A , R_{bus} приняты в соответствии с конструкцией аппаратов данного типа. Варьировались только значения альбедо при которых модельная кривая наилучшим образом согласуется с измеренными значениями блеска. Альбедо передней (поглощающей) стороны солнечных батарей предполагается довольно низким — 0,05, в то время как обратная сторона считается эффективным отражателем с высоким альбедо.

На рис. 3 представлена модельная фазовая зависимость КА «ГЛОНАСС-М» наложенная на экспериментальные данные, полученные по нескольким КА в широком диапазоне фазовых углов. Видно, что с помощью простой фотометрической модели удалось достаточно хорошо описать проведение блеска однотипных КА на больших фазовых углах.

2. Фазовые зависимости блеска вращающихся космических аппаратов и космического мусора

После прекращения активной стадии существования космические аппараты теряют стабилизацию и начинают вращаться относительно центра масс. Кривые блеска таких

Таблица 1. Параметры модели КА «ГЛОНАСС-М»

Параметр	Описание	Значение
ae	Альbedo Земли	0.30
aback	Альbedo обратной стороны солнечных батарей	1.00
afront	Альbedo передней стороны солнечных батарей	0.05
abus	Альbedo корпуса КА	0.02
A	Площадь солнечных батарей, кв.м.	35
Re	Радиус Земли, м	6371000
Rbus	Радиус диффузной сферы, эквивалентной размерам корпуса КА, м	1.50
R	Расстояние от наблюдателя до КА, м	19140000

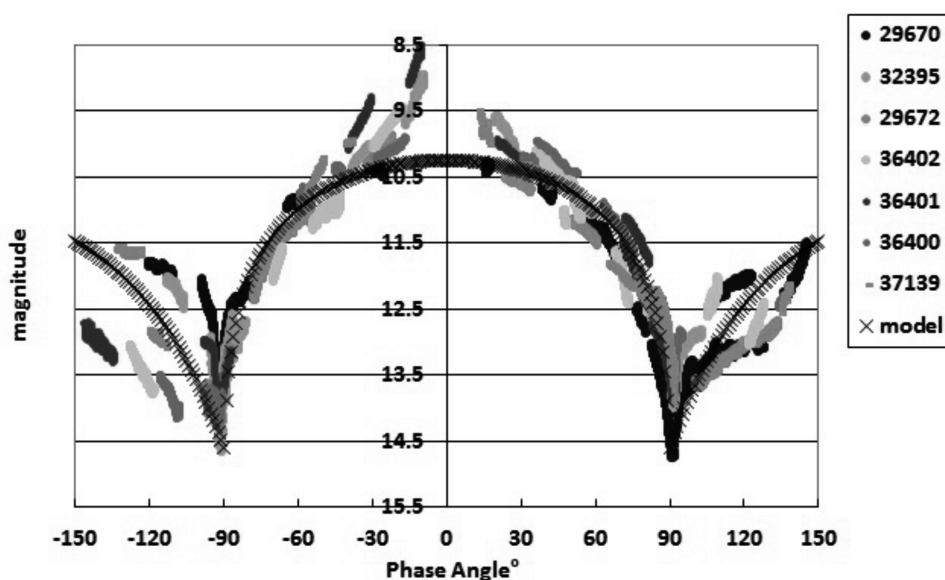


Рис. 3. Фазовая зависимость нескольких КА «ГЛОНАСС-М» и её модельное представление (крестиками)

аппаратов приобретают периодический характер. Исследование кривых блеска вращающихся КА представляет особый интерес, т.к. дает возможность фиксировать появление в поле зрения наблюдателя отдельных фрагментов поверхности спутника, освещенных Солнцем. Наблюдения в расширенном диапазоне фазовых углов позволяют проследить характер изменения блеска при разных условиях освещенности.

Как показывают наблюдения, вид кривых блеска вращающихся аппаратов претерпевает существенные изменения по мере изменения фазового угла. Эти изменения проявляются как в форме, так и в амплитуде кривых блеска. На рис.4 представлена фазовая зависимость блеска КА «Инсат 3С» (международный номер 2002-002А) и КА «ГЛОНАСС» (международный номер 2005-050А), показы-

вающая увеличение амплитуды изменений блеска с ростом фазового угла.

На рис. 5 показаны кривые блеска вращающегося геостационарного КА «Инсат 3С» (международный номер 2002-002А), которые наблюдали на разных фазовых углах. При периоде вращения КА около 200 сек. на кривых блеска, измеренных на больших фазовых углах, существенно увеличивается амплитуда колебаний блеска и изменяется форма, что может свидетельствовать о проявлении крупногабаритных элементов спутника.

Таким образом, при наблюдениях вращающихся объектов на больших фазовых углах может стать доступной информация, которая скрыта на малых фазовых углах из-за ориентации объекта.

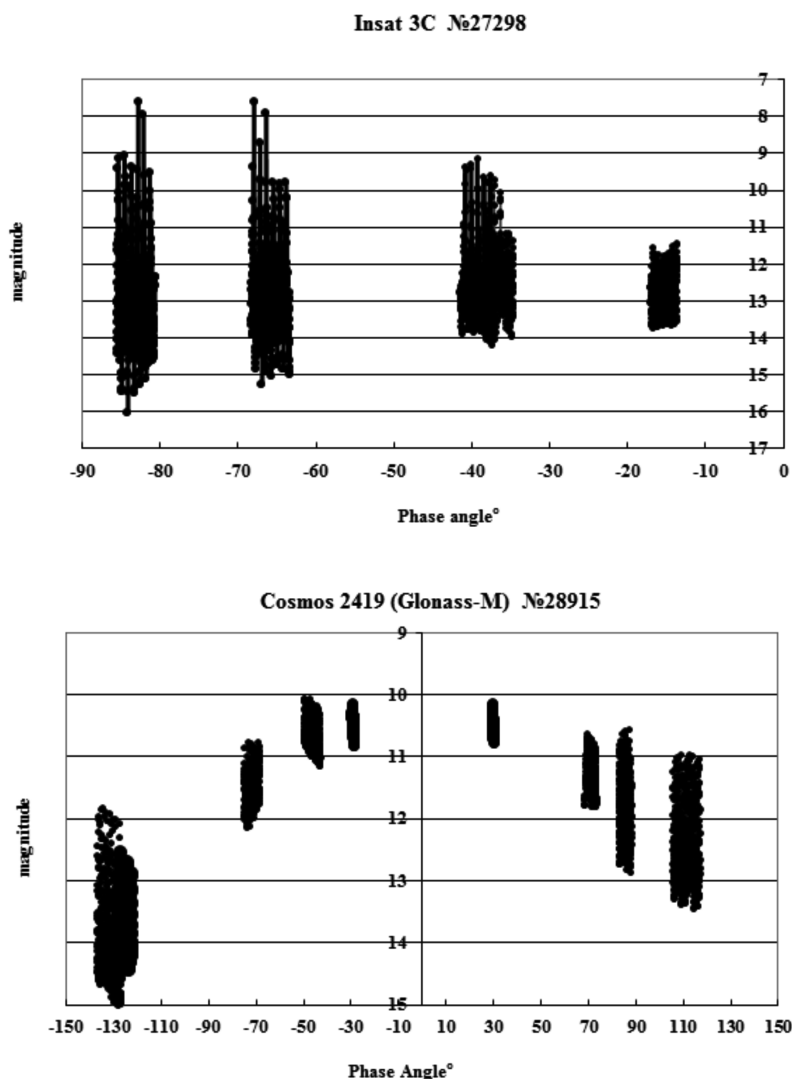


Рис. 4. Фазовые зависимости вращающихся КА: сверху — геостационарный КА «Инсат 3С», снизу — КА «Космос 2419»

Ещё одна особенность, которая наблюдалась у объектов космического мусора (КМ), показана на рис. 6.

Некоторые объекты КМ показывают обратную фазовую зависимость, т.е. довольно слабый объект может иметь максимальный блеск не во время прохождения противосолнечной точки, а на фазовом угле около 90° , что может существенно затруднить его обнаружение и сопровождение в отсутствие информации о характере фазовой зависимости.

Заключение

Выявлены особенности фазовых зависимостей действующих КА в широком диапазоне фазовых углов. Рассмотрена модель измене-

ния блеска КА «Глонасс-М» на больших фазовых углах, учитывающая подсветку спутника отраженным солнечным светом от Земли. Простая фотометрическая модель хорошо описывает характер фазовой зависимости на больших фазовых углах, позволяет оценить вклад крупных составляющих КА в отраженный поток и даёт представление об источниках подсветки КА.

Получены экспериментальные данные, содержащие особенности фазовых зависимостей блеска вращающихся КА и КМ в широком диапазоне фазовых углов. В некоторых случаях, учёт характера фазовой зависимости позволяет правильно спланировать наблюдения и получить данные о форме и вращении космического объекта.

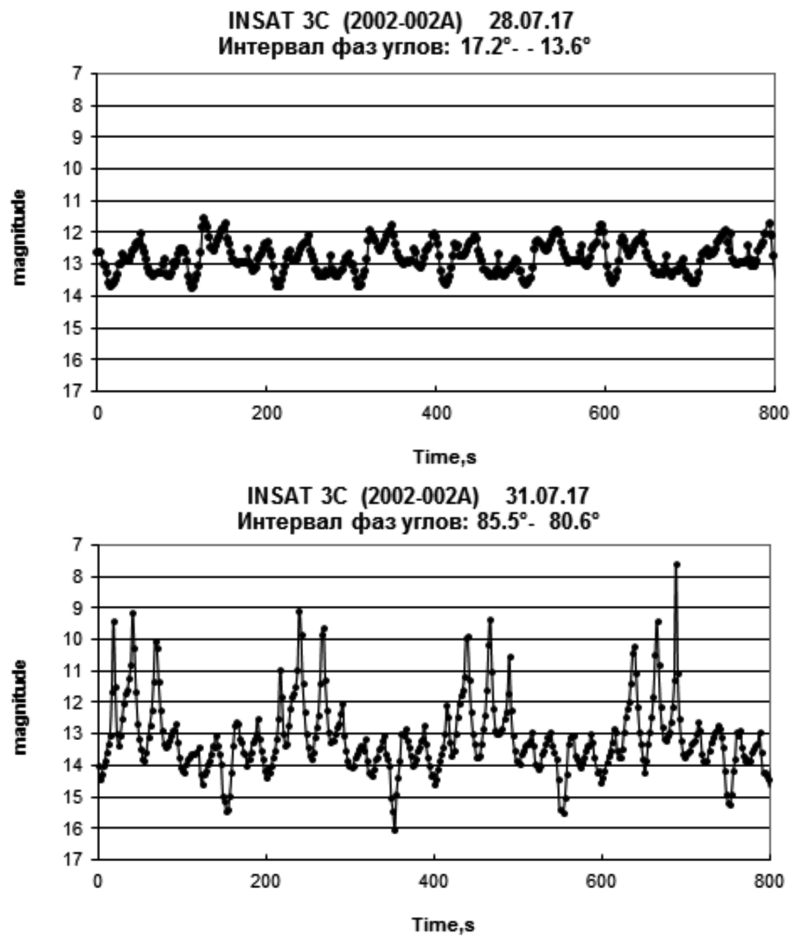


Рис. 5. Кривые блеска КА «Инсат 3С» на разных фазовых углах

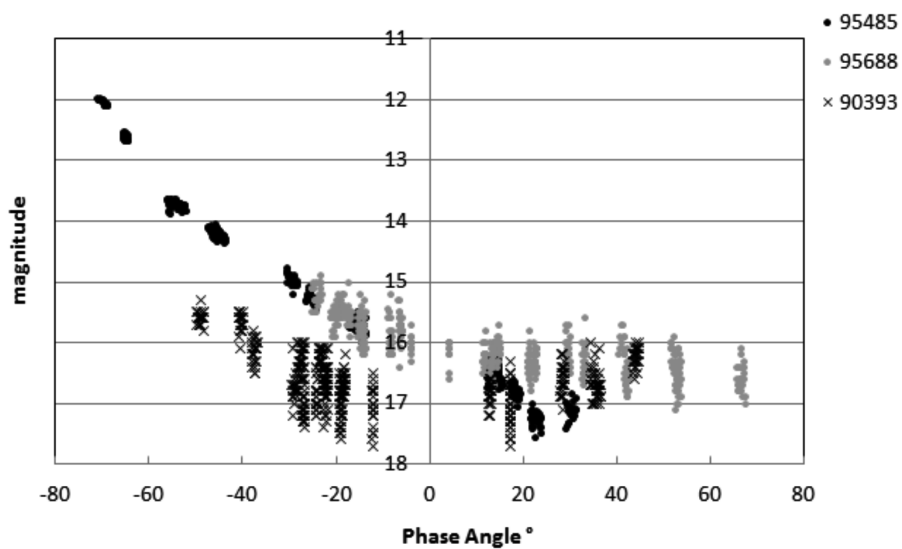


Рис. 6. Фазовые зависимости объектов космического мусора

Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара».

Литература

1. 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.
2. Cognion R.L. Large Phase Angle Observations of GEO Satellites // *Proceedings of SPIE Sensors and Systems for Space Applications VI*. 2013. Vol. 8739, 87390K. P. 1–12. DOI: 10.1117/12.2014623.
3. Cognion R.L. Observations and Modeling of GEO Satellites at Large Phase Angles // *Proceeding of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui HI, USA. 2013. Режим доступа: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/COGNION.pdf> (дата обращения 20.10.2017).
4. Hejduk M.D. Specular and Diffuse Components in Spherical Satellite Photometric Modeling // *Proceeding of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui HI, USA. 2011. Режим доступа: <https://www.amostech.com/TechnicalPapers/2011/NROC/HEJDUK.pdf> (дата обращения 20.10.2017).
5. Scott R., Wallace B. Satellite Characterization using Small Aperture Instruments at DRDC Ottawa // *Proceeding of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui HI, USA. 2008. P. 337–347.

References

1. Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kupriyanov V.V., Vereshagina I.A. Programmnye pakety “Apeks-I” i “Apeks-II” dlya obrabotki astronomicheskikh PZS-nablyudenii [“Apex-I” and “Apex-II” software packages for processing of astronomical CCD observations]. *Astronomicheskii vestnik* [Solar System Research], 2010, vol. 50, no. 1, pp. 74–87. (In Russian)
2. Cognion R.L. Large Phase Angle Observations of GEO Satellites. *Proc. of SPIE Sensors and Systems for Space Applications VI*, 2013, vol. 8739, 87390K, pp. 1–12. doi: 10.1117/12.2014623.
3. Cognion R.L. Observations and Modeling of GEO Satellites at Large Phase Angles. *Proc. of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui HI, USA, 2013. Available at: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/COGNION.pdf> (accessed 20.10.2017).
4. Hejduk M.D. Specular and Diffuse Components in Spherical Satellite Photometric Modeling. *Proc. of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui HI, USA, 2011. Available at: <https://www.amostech.com/TechnicalPapers/2011/NROC/HEJDUK.pdf> (accessed 20.10.2017).
5. Scott R., Wallace B. Satellite Characterization using Small Aperture Instruments at DRDC Ottawa. *Proc. of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui HI, USA, 2008, pp. 337–347.