

УДК 520.224.7, 521.322

НАБЛЮДЕНИЯ НЕКАТАЛОГИЗИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА ТЕЛЕСКОПЕ АЗТ-33ВМ

Еселевич М. В., Горяшин В. Е., Коробцев И. В., Цуккер Т. Г.

OBSERVATIONS OF THE UNCORRELATED SPACE DEBRIS OBJECTS ON THE AZT-33VM TELESCOPE

Eselevich M. V., Goriyashin V. E., Korobtsev I. V., Tsukker T. G.

Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia
e-mail: mesel@iszf.irk.ru

Abstract. Observational sessions to search space debris objects with unknown orbital parameters were carried out on the new 1.6-meter AZT-33VM telescope at the Sayan observatory of ISTP SB RAS in 2016-2017. Observations were conducted in the survey mode in the region of the geostationary orbit. Statistical parameters of the space debris population were studied during the first observational session. In the second session the objects were tracked after discoveries and further coordinate measurements were done to more precise determination of the orbital parameters. 55 uncorrelated objects were detected during that session. Additional measurements on the interval no less than three nights were obtained for 29 objects. For these objects orbital elements and area-to-mass ratios were determined. Results and analysis of the photometric and trajectory characteristics of the discovered objects are given in the study.

Keywords: space debris, geostationary orbit, survey observations, optical telescope.

Введение

Контроль космического мусора (КМ) в околоземном космическом пространстве — это важная задача для всех стран, осуществляющих космическую деятельность. В последнее время эта задача стоит довольно остро, поскольку многочисленные, подчас неконтролируемые и непродуманные запуски космических аппаратов (КА), привели к тому, что на околоземных орбитах скопилось большое количество нефункционирующих КА, верхних ступеней ракет и разгонных блоков, различных элементов связанных с запуском КА и их размещением на орбите. Отдельную большую проблему представляют собой фрагменты разрушений космических объектов, возникающих при их взрывах и столкновениях. Все вместе эти неуправляемые космические объекты и образуют космический мусор.

Основой контроля КМ является регулярное измерение и уточнение траекторных параметров всех каталогизированных космических объектов и каталогизация новых объектов. Каталогизация мелкоразмерного космического мусора — достаточно сложная, пока не решенная задача. Если КМ крупного размера (> 30 см в области геостационарной орбиты (ГСО)) контролируется достаточно хорошо с помощью многочисленных оптических телескопов небольшого размера, то мелкоразмерные объекты КМ изучены плохо. Чтобы получить наблюдательную информацию о таких объектах, требуются специализированные телескопы с размером апертуры 1 м и более, обладающих достаточно широким полем зрения, чтобы проводить измерения в режиме обзора. Регулярные наблюдения мелкоразмерного КМ проводятся Европейским агентством (ESA) на 1-метровом телескопе на о. Тенерифе, Канарские острова [1], отдель-

Еселевич Максим Викторович, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Института солнечно-земной физики СО РАН; e-mail: mesel@iszf.irk.ru

Горяшин Владимир Егорович, инженер-программист Института солнечно-земной физики СО РАН; e-mail: vgor@iszf.irk.ru

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

Цуккер Татьяна Гарриевна, ведущий инженер-программист Института солнечно-земной физики СО РАН; e-mail: tania@iszf.irk.ru

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 31. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара».

ные наблюдательные программы проводятся на 1,8-метровом телескопе Pan-STARRS на Гавайских островах (США) [2]. В последнее время для исследования мелких объектов привлекаются и более крупные инструменты, в частности 6,5-метровый Магелланов телескоп «Вальтер Бааде» в обсерватории Лас-Кампанас, Чили [3].

Задача каталогизации космических объектов требует достаточно регулярных наблюдений. Это связано с тем, что космические объекты, двигающиеся вокруг Земли, испытывают различного рода возмущения, в результате чего становится невозможно точно прогнозировать их орбиты на продолжительный интервал времени. Для мелких объектов это проявляется еще сильнее, поскольку для них существенным оказывается действие солнечного давления, учесть которое достаточно сложно. В России до последнего времени отсутствовали специализированные наблюдательные средства для измерений траекторных параметров мелкоразмерного КМ. В 2016 году в Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН заработал новый оптический телескоп АЗТ-33ВМ, одной из наблюдательных задач которого является обзорные наблюдения в области ГСО с целью обнаружения и траекторных измерений объектов КМ малого размера. В течение 2016–2017 гг. на этом телескопе были проведены сессии таких наблюдений, результаты которых приводятся в этой работе.

1. Телескоп АЗТ-33ВМ

Широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ представляет собой светосильный инструмент для поиска и обнаружения слабых объектов в широком поле, разработан и изготовлен АО «ЛОМО» [4]. Телескоп построен по схеме «квази Ричи–Кретьена», с предфокальным линзовым корректором поля, имеет диаметр главного зеркала 1,6 метра, фокусное расстояние 5,6 метра, поле зрения $2,8^\circ$. В основе разработки данного телескопа использован положительный опыт изготовления светосильного главного зеркала диаметром 1,6 метра и экваториальной вилочной монтировки для телескопа АЗТ-33ИК [5]. Главные оптические детали телескопа АЗТ-33ВМ (главное и вторичное зеркала) изготовлены ОАО «ЛЗОС», при этом большой опыт предприятия по изготовлению крупногабаритных астрономических зеркал, позволил успешно изготовить зеркала

телескопа АЗТ-33ВМ, имеющих достаточно сложную форму с высокими коэффициентами асферичности поверхности. Оптические детали линзового корректора, все механические узлы телескопа, а так же окончательная сборка произведена АО «ЛОМО».

Характеристики качества изображения АЗТ-33ВМ в видимом диапазоне соответствуют типичным известным в настоящее время телескопам подобного класса. Для уменьшения диаметра линз корректора в телескопе АЗТ-33ВМ применено внутреннее расположение фокуса. Одновременно, такое решение существенно снижает параметр центрального экранирования. Расчетное поле зрения телескопа составляет $2,8^\circ$ при линейном размере 277 мм. Однако пока телескоп не оборудован фотоприемником соответствующего размера. На телескопе установлена ПЗС камера с размером приемника 50×50 мм. Соответствующее угловое поле зрения с этой камерой составляет $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ при масштабе $0,88''/\text{пиксель}$.

Телескоп был установлен в Саянской обсерватории в конце 2015 г. и с 2016 г. на нем проводятся наблюдения. Тестовые измерения показали, что телескоп обеспечивает высокую чувствительность измерений и при хороших погодных условиях позволяет измерять слабые космические объекты до 22 зв. величины за 60 с экспозиции (для отношения сигнал/шум = 5).

2. Первая сессия наблюдений. Статистические исследования

Начальной при проведении наблюдений КМ в области ГСО ставилась задача получения статистических параметров популяции объектов: количество, распределение по блеску, по скоростям и т.д. Наблюдались только отдельные, произвольно выбранные участки вблизи ГСО, поскольку рабочее поле зрения телескопа не достаточно велико ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$).

Сессия измерений производилась в интервале дат 24.08.2016 г. – 08.09.2016 г. Для измерений в основном выбирались ночи вблизи новолуния (± 1 неделя). Всего измерения заняли 9 ночей с общей продолжительностью около 20 часов.

2.1. Методика наблюдений

Исходя из имеющихся возможностей, была выбрана следующая методика, которая с

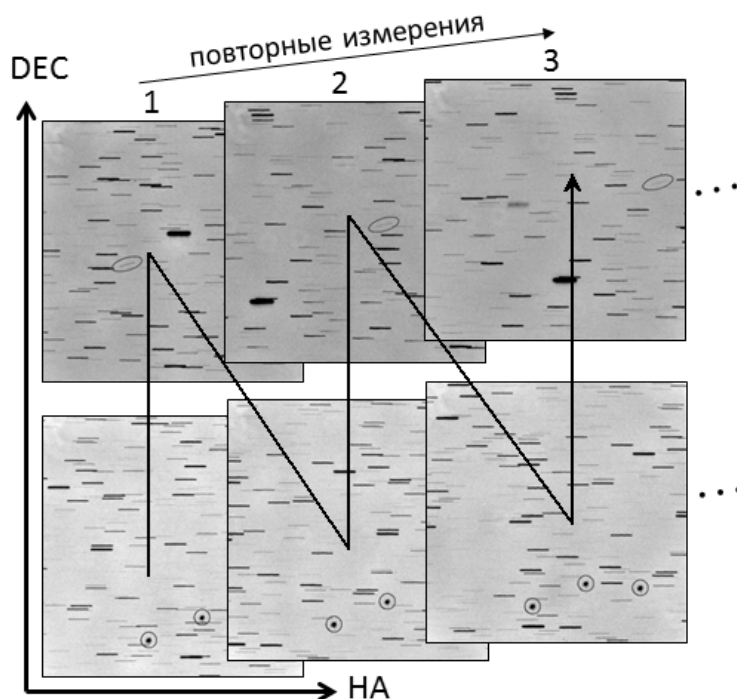


Рис. 1. Схема обзорных наблюдений; горизонтальные штрихи на кадрах — следы звезд, овалами и кружками отмечены обнаруженные космические объекты

небольшими вариациями применяется в различных обзорных наблюдениях ГСО [1, 6]:

1) Измерения производились с постоянной экспозицией 10 секунд без сопровождения телескопом, т.е. при постоянном часовом угле НА;

2) Измерялась область ГСО вблизи противосолнечной точки и вне тени Земли для получения максимального блеска объектов вблизи нулевого фазового угла;

3) Выбирались произвольные области вблизи земного экватора (для широты обсерватории соответствует углу склонения DEC $\approx -7,5^\circ$);

4) Измерения производились в автоматическом режиме, обработка полученных кадров производилась либо параллельно, без прерывания измерений, либо после окончания измерений.

Общая схема обзорных наблюдений показана на рис. 1.

На фиксированном часовом угле НА измерялась полоса из двух соседних по склонению DEC полей зрения. Всего производилось 7 повторных измерений этих двух полей, после чего телескоп сдвигался по часовому углу на размер поля и цикл измерений повторялся

для следующего фиксированного значения НА.

Таким образом, сканировалась область ГСО размером в 1° по углу склонения DEC. Повторные измерения необходимы для того, чтобы получить серию измерений объекта в одном поле и получить небольшую дугу для идентификации объекта. Для интервала 30–60 с между измерениями одного и того же поля в среднем удавалось получить измерения отдельного объекта на временной дуге около 5 минут. Количество полученных измерений варьировалось для разных объектов, с наиболее частым значением равным числу повторений, т.е. 7 (рис. 2).

Для отдельных объектов, скорость и направление движения которых была близка к направлению и скорости сканирования, число измерений могло быть больше 7 (см. рис. 2). Общая скорость обзора, при выбранных параметрах ($t_{\text{эксп}} = 10$ с, 2 полосы по DEC, 7 повторов), составила ≈ 8 кв. град/час.

2.2. Результаты наблюдений

Всего за сессию обзорных наблюдений было зарегистрировано 158 космических объектов, из которых 44 отсутствовали в ката-

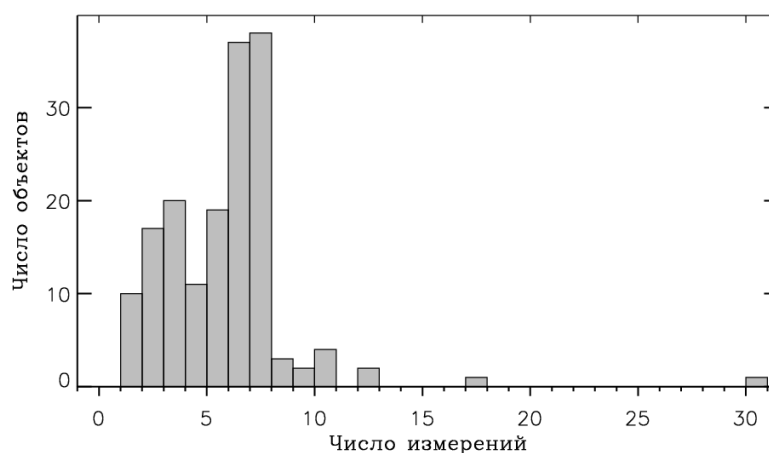


Рис. 2. Распределение числа полученных измерений по всем объектам

логе космических объектов. Идентификация обнаруженных высокоорбитальных объектов производилась по данным каталога орбит космического мусора, поддерживаемого ПАО «МАК «Вымпел» и Институтом прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН [7].

Из обнаруженных объектов 21 объект имел блеск слабее 18 зв. величины, что на расстоянии до геостационарной орбиты соответствует размеру < 20 см (для отражения от диффузной сферы с альбедо 0,15). Общее распределение зарегистрированных объектов по блеску показано на рис. 3. В целом, хотя общее количество зарегистрированных объектов не очень велико, это распределение подтверждает полученные ранее распределения [1, 2]. Виден максимум количества объектов с блеском 11–12 зв. величины и снижение числа объектов с блеском 14–15 зв. величины.

Обнаруживается значительное количество объектов КМ с блеском слабее 17–18 зв. величины, при этом большинство из них не каталогизированы. Спад числа обнаруженных объектов с блеском слабее 19–20 зв. величины обусловлен пределом чувствительности при измерениях. Сравнивая с результатами, полученными в [1] следует отметить, что за последние 10 лет каталогизированы практически все объекты ярче 15 зв. величины.

Неуправляемые космические объекты, сошедшие с геостационарной орбиты, при наблюдениях с неподвижным телескопом обнаруживают видимое движение. На рис. 4 показано, какие скорости регистрировались у наблюдавшихся космических объектов в зависимости от их блеска. На рисунке сразу

выделяется большая группа объектов с яркостью 11–12 зв. величины, имеющих скорости менее $0,1$ "/с. Это объекты с орбитами близкими к геостационарной, среди которых много функционирующих КА.

В то же время из рисунка видно, что наблюдавшиеся некаталогизированные мелко-размерные объекты со слабым блеском в большинстве своем имеют скорости в диапазоне 1–10 "/с. Очевидно, это связано с тем, что орбиты таких объектов никак не контролируются и имеют сильные отклонения от геостационарной орбиты. Большая скорость движения слабых объектов создает дополнительные трудности при их обнаружении, поскольку сигнал от объекта оказывается «размазан» на несколько пикселей ПЗС приемника, что при наблюдении сигнала сравнимого с фоном неба существенно снижает чувствительность измерений.

3. Вторая сессия наблюдений. Определение орбит объектов КМ

Вторая сессия наблюдений проводилась с декабря 2016 г. по март 2017 г. и в течение, примерно, 40 ночей. В этом случае ставилась задача по определению орбит обнаруженных объектов КМ, что невозможно сделать по короткой временной дуге, поэтому методика наблюдений была несколько изменена.

Как и в первой сессии наблюдений проводился обзор в области геостационарной орбиты, но по укороченной программе (2–3 повтора). Обнаруженный в процессе обзора объект при помощи специальной программы помечался на кадре, и осуществлялась его быстрая

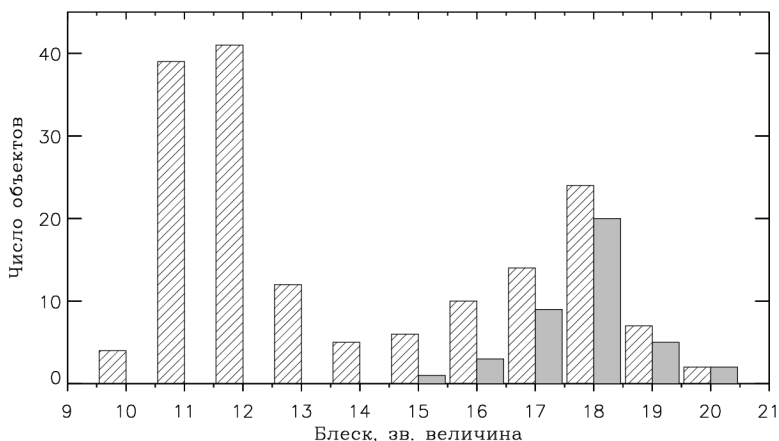


Рис. 3. Распределение всех зарегистрированных объектов по блеску; наклонной штриховкой показаны все объекты, серым цветом — некаталогизированные

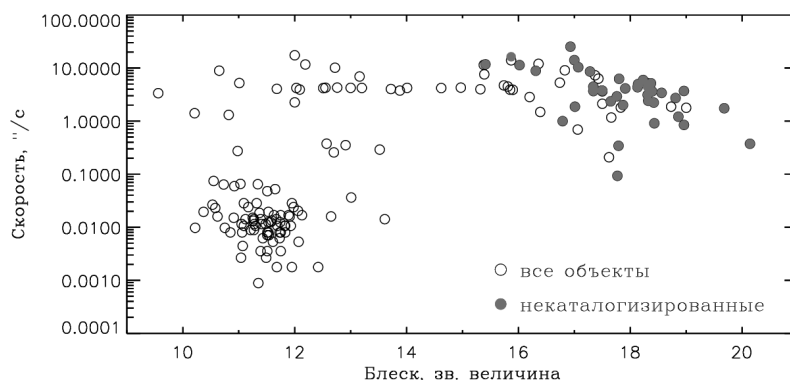


Рис. 4. Скорость космических объектов в зависимости от блеска

идентификация (сравнение с каталогом). В случае подозрения на обнаружение некаталогизированного объекта этот объект брался на сопровождение телескопом, для чего необходимо, минимально, 2 измерения. Далее объект измерялся на сопровождении, в процессе измерений (особенно в начальный период) скорость сопровождения корректировалась. Полученные измерения обрабатывались и рассчитывались эфемериды для последующих измерений. Для уточнения орбиты измерения объекта проводились в ту же и в последующие ночи.

3.1. Результаты определения орбит

Всего за вторую сессию наблюдений было обнаружено 55 некаталогизированных объектов, для которых определены их первичные орбиты, что позволило планировать последу-

ющие наблюдения. Некоторые из этих объектов были потеряны после их обнаружения. Для 29 объектов удалось определить достаточно достоверные орбиты по измерениям не менее 3-х ночей.

Результаты определения орбит для 29 некаталогизированных объектов приведены на рис. 5.

Всего было обнаружено 18 объектов на геосинхронных орбитах ($e < 0,25$, $a > 36\,000$ км, $i < 25^\circ$) и 11 объектов на высокоэллиптических орбитах.

Для всех объектов было определено отношение площади к массе (ОПМ). Полученные результаты показаны на рис. 6.

Величины ОПМ находятся в широком диапазоне значений вплоть до 40 м²/кг. Значительное число объектов (18 из 29) характеризуются высокими показателями ОПМ

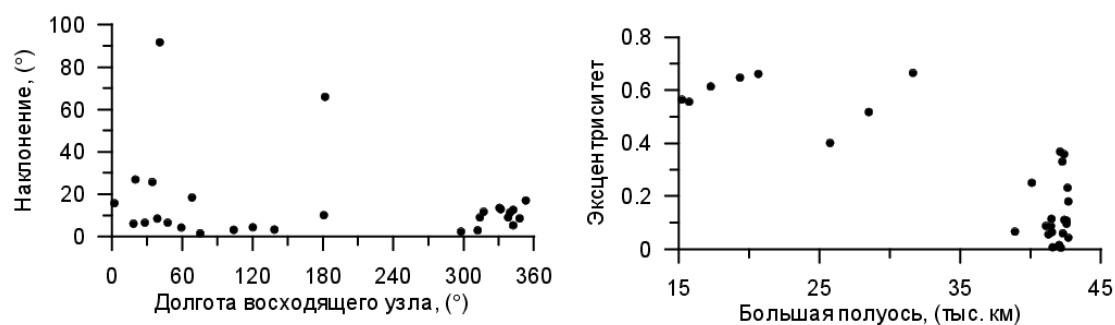


Рис. 5. Результаты определения орбит для 29 обнаруженных объектов; слева — в координатах «наклонение – долгота восходящего узла», справа — в координатах «большая полуось – эксцентриситет»

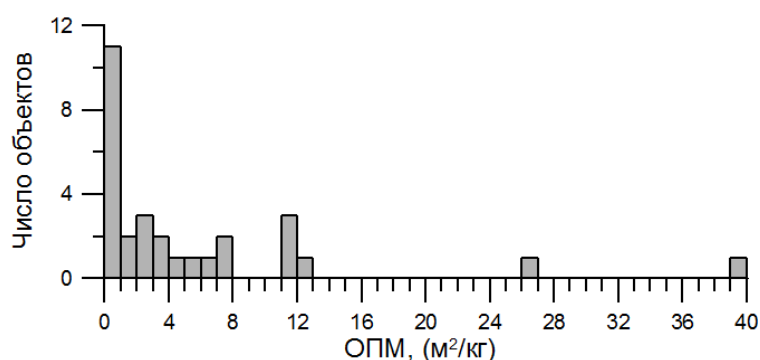


Рис. 6. Отношение площади к массе, определенное для обнаруженных объектов

($> 1,0 \text{ м}^2/\text{кг}$) и представляют особый интерес с точки зрения эволюции параметров движения, обусловленной световым давлением. Практически все (за исключением одного) обнаруженные объекты имеют ОПМ $> 0,03 \text{ м}^2/\text{кг}$, значение, которое принято считать максимальным для функционирующих КА [8].

3.2. Фотометрические параметры объектов

Блеск обнаруженных объектов варьировался в диапазоне от 16 до 21 зв. величины, однако измерения объектов в различные даты производились при различных фазовых углах, поэтому в общем изменении блеска может проявляться фазовая зависимость. Полученные при измерениях объектов кривые блеска длительностью до 20 минут показывают, что некоторые объекты демонстрируют достаточно стабильный блеск с переменностью не более 0,1–0,2 зв. величины. В то же время у других объектов наблюдаются значительные изменения блеска с амплитудой до 5 зв. величин, при этом у некоторых объектов имеется явно выраженная периодичность.

В качестве примера на рис. 7 приводятся измерения блеска для объекта 70023 (внутренний номер). Это довольно необычный объект и его орбита существенно отличается от других, он движется по средневысотной орбите с большим эксцентриситетом и наклоном. Параметры орбиты, определенные для этого объекта: $a = 25\,762 \text{ км}$, $e = 0,4$, $i = 91,8^\circ$. Кроме того для него был определен самый большой ОПМ = 40 среди обнаруженных объектов.

На верхней панели рис. 7 показана фазовая кривая блеска для объекта 70023, которая была в разные даты измерена в диапазоне фазовых углов от 40° до 90° . Объект показывает сильную переменность блеска, при этом вид кривых блеска меняется для различных фазовых углов (нижняя панель рис. 7). Очевидно, это связано с измерением ракурса, под которым виден вращающийся объект.

Следует отметить, что максимальный блеск объекта (приведенный к фиксированной дальности) в широком диапазоне фазовых углов от 40° до 90° не испытывает существенных изменений (верхняя панель рис. 7).

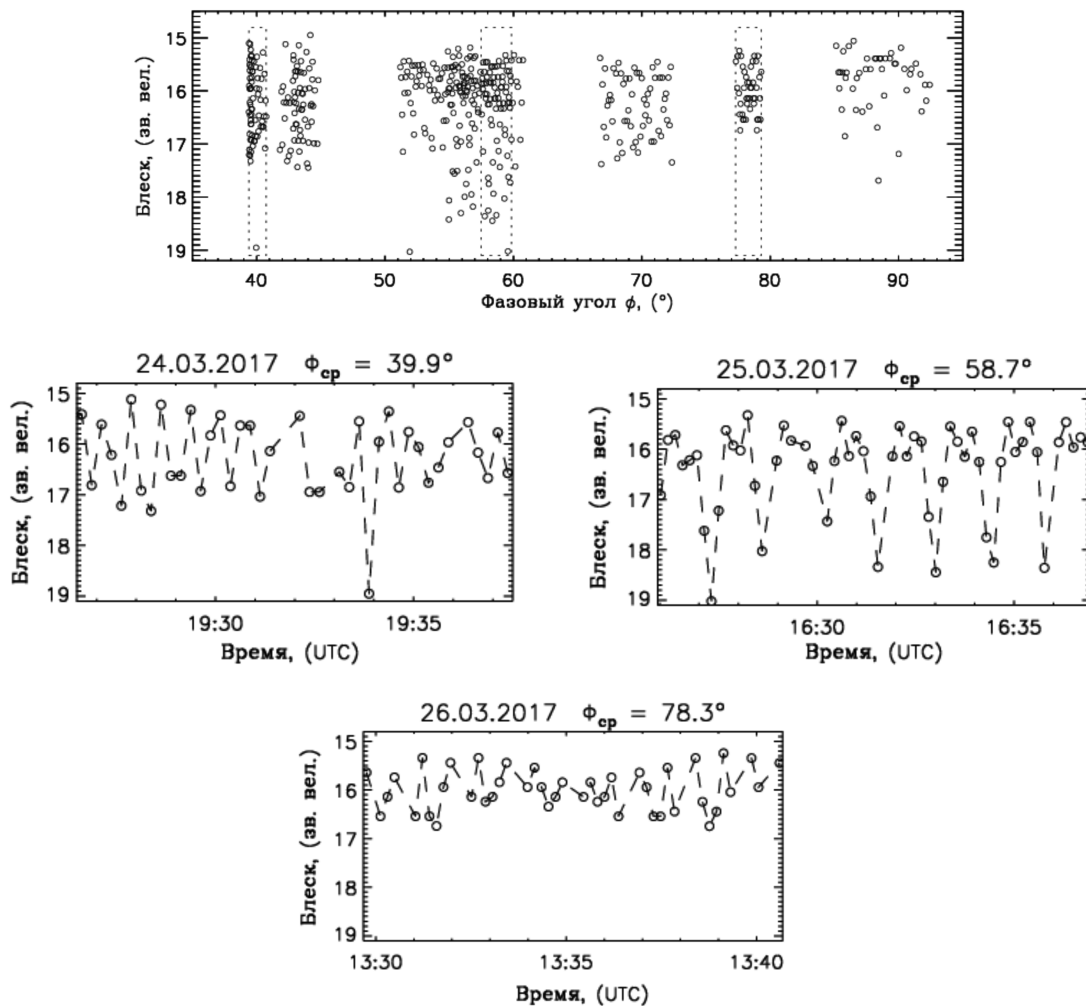


Рис. 7. Измерения блеска для объекта 70023 (внутренний номер): верхняя панель — блеск в зависимости от фазового угла; нижняя панель — кривые блеска длительностью 11 минут при различных фазовых углах, для участков, отмеченных на верхней панели пунктирными прямоугольниками. Блеск приведен к дальности 20 000 км

В пределах ошибки измерений блеска 0,1–0,2 зв. величины можно оценить максимальный блеск $\approx 15,2$ зв. величины. В этом случае, для оценки размеров объекта использовать приближение диффузной сферы не представляется обоснованным, поскольку в этом случае должна наблюдаться значительная зависимость от фазового угла [9]. Самым простым вариантом является представление объекта вращающейся плоскостью, которая при различных фазовых углах поворачивается к наблюдателю таким образом, чтобы дать максимальное отражение солнечного света. И хотя при диффузном отражении для плоскости тоже есть зависимость, дающая уменьшение максимального блеска с углом фазы, это уменьшение значительно меньше, чем для

сферы и им можно пренебречь. В приближении диффузной плоскости, если принять коэффициент отражения 0,2, оценка площади объекта по максимальному блеску составит, примерно, $0,1 \text{ м}^2$.

3.3. Сравнение с известными разрушениями КА

Известно, что в результате разрушений КА, обычно образуется группа космических объектов с близкими параметрами орбит. Полученные орбиты для 29 обнаруженных объектов были сравнены с известными орбитами разрушенных КА в области ГСО. Как оказалось среди измеренных объектов один объект (внутренний номер № 70010), имеет параметры близкие к орбите родительского тела КА

Таблица 1. Параметры орбит фрагментов разрушения КА «Экран-2»

Фрагменты разрушения «Экран-2»	№ объекта NORAD	ДВУ, °	i , °	a , км	e	Период, мин.	Средний блеск, зв. вел.
Родительское тело	10365	317.8	11.9	42158	0.00306	1435.6	12.6
	11581	317.5	11.8	42159	0.00147	1435.7	13.3
	12996	317.9	11.9	42227	0.00152	1439.1	14.3
	29014	317.5	11.8	42211	0.00180	1438.4	14.1
Обнаруженный объект (внутренний номер 70010)		317.8	11.9	42149	0.00586	1435.0	18.4

«Экран-2» (№ 10365 в каталоге NORAD), который подвергся разрушению в июне 1978 г. В табл. 1 приведены параметры орбит и величины блеска известных фрагментов разрушения «Экран-2» и вновь обнаруженного объекта.

Следует отметить, что долгота восходящего узла, а так же наклонение орбиты обнаруженного фрагмента, очень хорошо совпадают с соответствующими параметрами родительского тела «Экран-2». Параметр ОПМ для нового фрагмента составил $0,25 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Заключение

На новом телескопе АЗТ-33ВМ были начаты обзорные наблюдения области геостационарной орбиты с целью обнаружения мелко-размерных объектов космического мусора. В 2016–2017 гг. были проведены две сессии наблюдений, в ходе которых было обнаружено значительное число некаталогизированных космических объектов. Существенная часть из этих объектов имеют блеск слабее 18 зв. величины и для их надежного обнаружения требуются наблюдения оптическими телескопами, имеющими апертуру ~ 1 м и больше. Основная масса обнаруживаемых малоразмерных объектов имеет скорости движения более $1''/\text{с}$, что дополнительно снижает чувствительность измерений при их обнаружении.

Для 29 обнаруженных некаталогизированных объектов КМ были определены параметры орбит, из них 18 объектов находятся на геосинхронных орбитах, а 11 — на высокоэллиптических. Полученные для всех объектов значения отношения площади к массе имеют величину $> 0,03 \text{ м}^2/\text{кг}$, предельную для функционирующих КА, а для большинства объектов превышает значение $1,0 \text{ м}^2/\text{кг}$,

т.е. световой давление может оказывать существенное значение на эволюции параметров их движения. Фотометрические характеристики разных объектов демонстрируют большое разнообразие — имеются объекты с относительно стабильным блеском, в то время как другие показывают большую переменность блеска с амплитудой до 5 зв. величин. Один из обнаруженных объектов с большой вероятностью можно отнести к фрагментам, образовавшимся в результате разрушения КА «Экран-2».

Литература

1. *Schildknecht T.* Optical surveys for space debris // *Astronomy and Astrophysics Review*. 2007. Vol. 14. P. 41–111.
2. *Bolden M., Sydney P., Kervin P.* Pan-STARRS status and Geo Observation Results. 2011. AMOS Technical Conference.
3. *Seitzer P., Barker E., Buckalew B., Burkhardt A., Cowardin H., Frith J., Kaleida C., Lederer S.M., Lee C.H.* The small size debris population at GEO from optical observations // *Proc. 7th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Germany, 18–21 April 2017.
4. *Денисенко С.А., Камус С.Ф., Пименов Ю.Д., Тергоев В.И., Папушев П.Г.* Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // *Оптический журнал*. 2009. Т. 79. № 9. С. 48–51.
5. *Камус С.Ф., Тергоев В.И., Папушев П.Г., Дружинин С.А., Караваев Ю.С., Палачев Ю.М., Денисенко С.А., Липин Н.А.* Широкодиапазонный астрономический телескоп // *Оптический журнал*. 2002. Т. 69, № 9. С. 84–87.
6. *Seitzer P., Smith, R., Africano, J., Jorgensen, K., Stansbery, E., Monet, D.* MODEST observations of space debris at geosynchronous orbit // *Advances in Space Research*. 2004. Vol. 34. Iss. 5. P. 1139–1142.
7. Параметры орбит новых обнаруженных высокоорбитальных объектов космического мусора // ПАО «МАК "Вымпел"» — ин-

- формационный портал. Режим доступа: <http://spacedata.vimpel.ru> (дата обращения 15.10.2017).
8. Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Чазов В.В. Эмпирическая модель движения фрагмента космического мусора в геостационарной области // *Астрономический вестник*. 2016. Т. 50. № 2. С. 141–146.
 9. Krag W.E. Visible magnitude of typical satellites in synchronous orbits // *Technical Note 1974-23*. 1974.
 10. 3ЗВМ]. *Opticheskii zhurnal* [Optical Journal], 2009, vol. 79, no. 9, pp. 48–51. (In Russian)
 5. Kamus S.F., Tergoev V.I., Pampushev S.A., Druzhinin S.A., Karavaev Yu.S., Palachev Yu.M., Denisenko S.A., Lipin N.A. Shirokodiapazonnii astronomicheskii teleskop [Wide-range optical telescope] *Opticheskii zhurnal*, 2002, vol. 69, no. 9, pp. 84–87. (In Russian)
 6. Seitzer P., Smith R., Africano J., Jorgensen K., Stansbery E., Monet D. MODEST observations of space debris at geosynchronous orbit, *Advances in Space Research*, 2004, vol. 34, iss. 5, pp. 1139–1142.
 7. Parametry orbit novykh obnaruzhennykh vysokoorbital'nykh ob"ektov kosmicheskogo musura [Orbit parameters of newly detected HEO space debris objects]. PAO «МАК "Vimpel"» — *informatсионny portal* [JSC Vimpel – data portal]. Available at: <http://spacedata.vimpel.ru> (accessed 15.10.2017). (In Russian)
 8. Bahtigaraev N.S., Levkina P.A., Chazov V.V. Empericheskaia model' dvizheniia fragmenta kosmicheskogo musora v geostacionarnoi oblasti [Empirical movement model of a space debris fragment at the geostationary region], *Astronomicheskii vestnik* [Astronomical Bull.], 2016, vol. 50, no. 2, pp. 141–146. (In Russian)
 9. Krag W.E. *Visible magnitude of typical satellites in synchronous orbits. Technical Note 1974-23*, 1974.
 1. Schildknecht T. Optical surveys for space debris. *Astronomy and Astrophysics Review*, 2007, vol. 14, pp. 41–111.
 2. Bolden M., Sydney P., Kervin P. Pan-STARRS status and Geo Observation Results, *AMOS Technical Conference*, 2011.
 3. Seitzer P., Barker E., Buckalew B., Burkhardt A., Cowardin H., Frith J., Kaleida C., Lederer S.M., Lee C.H. The small size debris population at GEO from optical observations. *Proc. 7th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Germany, 18–21 April 2017.
 4. Denisenko S.A., Kamus S.F., Pimenov Yu.D., Tergoev V.I., Pampushev P.G. Svetosil'nii shirokougol'nii teleskop [Fast wide-angle telescope AZT-

References