

## Исследование популяции объектов космического мусора с большим отношением площади к массе на высоких околоземных орбитах

© В.М. Агапов<sup>1</sup>, И.Е. Молотов<sup>1</sup>, Г.К. Боровин<sup>1,2</sup>, А.И. Стрельцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Проанализированы данные по 498 объектам космического мусора с большим отношением площади к массе (БОПМ), обнаруженным в 2016–2017 гг., с целью идентификации возможных кандидатов на роль «родительских объектов». В результате было определено происхождение нескольких БОПМ-фрагментов, которые отделились от трех различных крупных объектов, находящихся в области геостационарной орбиты (ГСО), включая два функционирующих космических аппарата и одну ступень ракеты-носителя. Наблюдения показали, что никаких заметных перепадов в их кривых блеска не произошло, следовательно, отсутствовали существенные изменения геометрической формы, отражательные характеристики и параметры движения относительно центра масс. Таким образом, оба космических аппарата (КА) продолжали выполнять маневры удержания в своих позициях на ГСО, а в орбитальном движении и в кривой блеска ступени не было выявлено никаких непрогнозируемых изменений. Поэтому образование вновь обнаруженных фрагментов не может быть связано с катастрофическим разрушением «родительских объектов».*

**Ключевые слова:** космический мусор, оптические измерения, база данных, разрушения космических объектов, БОПМ-фрагменты

**Введение.** Освоение околоземного космического пространства (ОКП) привело к появлению новых проблем, связанных с техногенной засоренностью так называемым космическим мусором (КМ), представленным широким классом космических объектов (КО) искусственного происхождения, находящихся на околоземных орбитах. При этом количество выработавших ресурс спутников, различных ступеней ракет и фрагментов, сопровождающих каждый запуск, а также образующихся в результате орбитальных разрушений, достигло предела, когда оно начинает создавать серьезную угрозу не только для пилотируемых орбитальных станций и функционирующих космических аппаратов (КА), но и экологии Земли и ОКП. Дальнейшее освоение ОКП невозможно без знания текущей обстановки, анализа источников и закономерностей эволюции КМ. Результаты исследований могут быть использованы не только для создания математической модели эволюции популяции КМ и разработки мер, снижающих засоренность ОКП, но и для совершенствования теории орбитального движения, развития теории влияния светового давления

на движение орбитальных КО, исследования магнитного поля и вариаций плотности верхней атмосферы Земли.

Исследования объектов искусственного происхождения на околоземных орбитах проводятся в Российской академии наук (РАН) с момента запуска первого спутника [1]. Слежение за первыми КО на геостационарной орбите (ГСО) осуществлялось с помощью сети оптических астрономических средств [2], координируемых Астросоветом (в настоящее время ИНАСАН) Академии наук СССР. Но систематических исследований по проблеме мониторинга ОКП не проводилось, получаемые измерения по космическим объектам не накапливались организациями Академии наук и не анализировались в их совокупности.

Состояние исследований кардинально изменилось после того, как Президиум РАН поручил Институту прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ) заняться проблемой мониторинга ОКП. Был организован Центр РАН по сбору, обработке и анализу научной информации по объектам техногенного происхождения (ЦСИТО) [3], а при нем — сегмент мониторинга опасных ситуаций в области геостационарных, высокоэллиптических и средневысоких орбит автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) [4]. Была поставлена задача — наполнение базы данных ЦСИТО РАН регулярно обновляемой измерительной информацией о космических объектах. Для этого в ИПМ были развернуты работы по созданию сети оптических обсерваторий, что привело к созданию международного проекта «Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических измерений» (НСОИ АФН) [5], послужившего основой для создания отечественной межведомственной сети мониторинга ОКП. В связи с началом работы системы АСПОС ОКП Госкорпорации «Роскосмос» на базе задела ИПМ были разработаны две серии специализированных обсерваторий Роскосмоса ЭОП-1/2 [6] и начато развертывание сети университетских телескопов ПАО «МАК «Вымпел» [7]. В итоге это привело к формированию существующей глобальной межведомственной системы мониторинга ОКП. За 15 лет общими усилиями была создана кооперация в составе 85 оптических телескопов, которая контролирует всю ГСО и позволила обнаружить и сопровождать около 9000 КО на высоких орбитах — ГСО, высокоэллиптических (ВЭО) и средневысоких (СВО), среди которых оказалось несколько тысяч объектов с большим отношением площади к массе. В рамках настоящей работы выполнен анализ, направленный на идентификацию возможных кандидатов на роль «родительских объектов» для высокоорбитальных объектов подобного типа, открытых в 2016–2017 гг.

Цель настоящей работы — обобщить накопленную информацию по объектам с большим значением отношения площади к массе.

**Рост популяции объектов космического мусора на высоких орбитах.** В динамическом архиве ИПМ в ЦСИТО РАН [8] в настоящее время собрано более 100 миллионов измерений, полученных оптическими телескопами российской межведомственной сети мониторинга ОКП, более 9000 высокоорбитальных космических объектов (рис. 1).

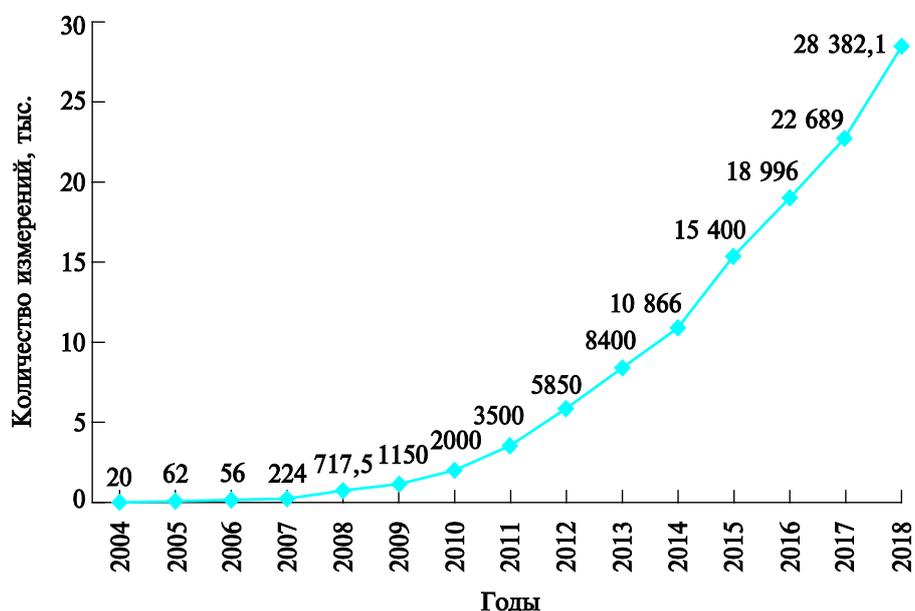


Рис. 1. Рост количества получаемых измерений ЦСИТО РАН по годам

На основании проведенных измерений построен архив орбитальной информации и событий (маневров, разрушений и т. п.), определены физические характеристики объектов (блеск, отношение площади к массе). Он используется в качестве основы для формирования уточненной математической модели распределения и эволюции космического мусора в области высокоэллиптических орбит [9]. Подтверждено существование облаков фрагментов на ГСО (например, порожденных разрушением ракетных ступеней типа «Транстейдж» (Transtage) [10]) и ВЭО (например, порожденных разрушением ступеней типа «Центавр» [3]).

Количество обнаруженных фрагментов космического мусора на высоких орбитах непрерывно увеличивается, что является достаточно неожиданным фактом с учетом того, что обзоры области ГСО и ВЭО проводятся межведомственной системой мониторинга ОКП уже много лет подряд. Каждый месяц открывается до нескольких десятков новых объектов (рис. 2).

Многие из этих новых объектов пересекают защищаемую область на ГСО или остаются там постоянно, увеличивая таким образом опасность для работающих спутников.

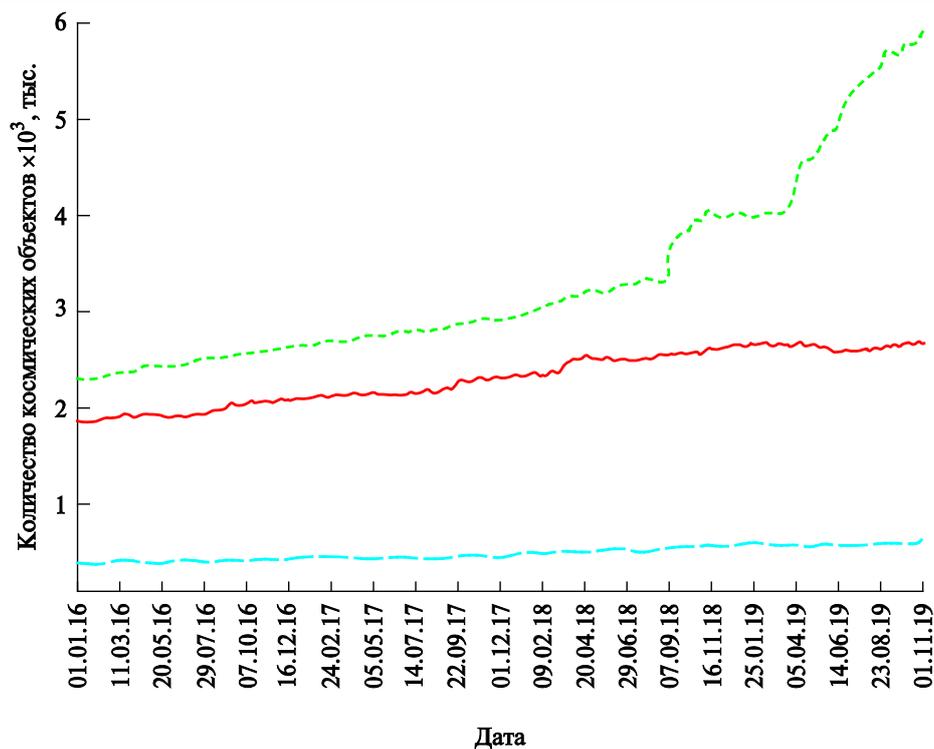


Рис. 2. Изменение количества (тыс.) высокоорбитальных КО в базе данных ЦСИТО РАН по годам

Было получено независимое подтверждение существования нового класса объектов с таким большим отношением площади поперечного сечения к массе (БОПМ), что влияние светового давления приводит к существенной эволюции эксцентриситета и наклона их орбит [11]. Впервые по БОПМ-объектам получено значительное количество данных на длительных интервалах времени, которое позволило выявить и проанализировать их наблюдательные и орбитальные особенности. Среди фрагментов с БОПМ открыт подкласс объектов, орбиты которых со временем пересекают траектории высокоэллиптических и низкоорбитальных КА. Также было обнаружено несколько БОПМ-объектов, демонстрирующих периодическое невероятное увеличение видимого блеска до 10 звездных величин, что делает их сравнимыми по яркости с самыми большими известными КА на ГСО. Вариации БОПМ вследствие их непрогнозируемого движения относительно центра масс приводят к большим ошибкам прогноза их положения (орбит) даже на коротких интервалах времени. При этом баллистическая эволюция БОПМ-объектов очень критична к наличию теневых участков, что в сочетании с переменностью значения отношения площади к массе приводит к дополнительным ошибкам в определении их движения в ОКП.

Авторы статьи [12] исследовали долговременную орбитальную эволюцию КО с БОПМ в окрестности геосинхронных орбит. Для того чтобы понять, в какой степени основные орбитальные параметры объектов сохраняются с увеличением значения отношения площади к массе, а также для расчета времени существования орбит скопленных КО с большим отношением площади к массе, авторы [12] расширили анализ на КО с отношением площади к массе до  $40 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Для известной большой полуоси орбиты КО, отражающей способности и значения отношения площади КО к его массе  $A/m$ , угол направления действия давления солнечного света на КО, обозначаемый  $\Lambda$ , определяют по формуле

$$\text{tg}(\Lambda) = \frac{3(1+\rho)(A/m)P_C}{2} \sqrt{\frac{a_{\text{КО}}}{\mu_3\mu_C a_3(1-e_3^2)}},$$

где  $\rho$  — коэффициент отражающей способности;  $A/m$  — отношение площади КО к его массе;  $P_C$  — постоянная солнечной радиации;  $a_{\text{КО}}$  — большая полуось орбиты КО;  $\mu_3$  — гравитационная постоянная Земли;  $\mu_C$  — гравитационная постоянная Солнца;  $a_3$  — большая полуось гелиоцентрической орбиты Земли;  $e_3$  — эксцентриситет гелиоцентрической орбиты Земли.

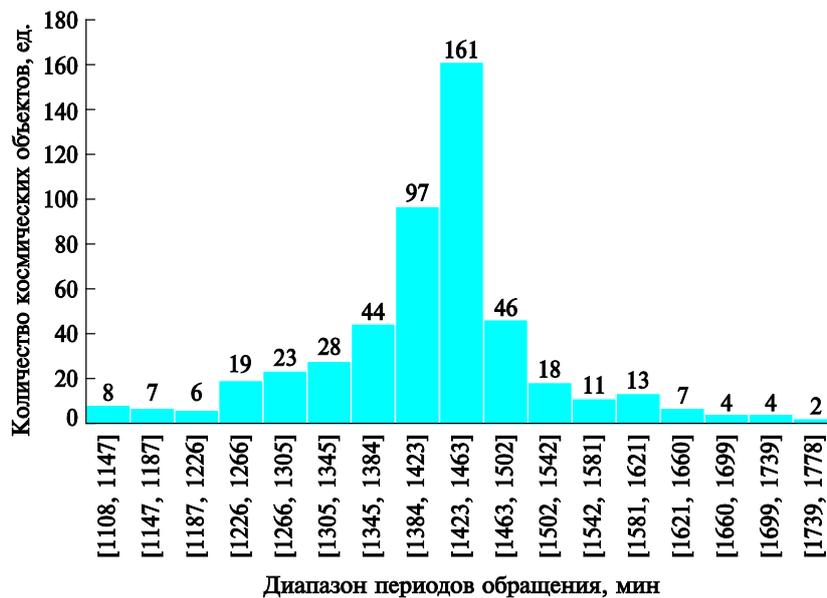
Возмущение КО от направления действия давления солнечного света становится максимальным при  $\Lambda \rightarrow \pi/2$  и достигает минимума при  $\Lambda \rightarrow 0$ . Поскольку  $\Lambda$  объединяет орбитальные и негравитационные параметры в единую величину, которая полностью определяет долгосрочное прогнозирование с учетом только давления солнечного света, и строго характеризует связанные с этим эффектом возмущения, целесообразно использовать его в качестве фундаментальной определяющей характеристики объектов с большим значением отношения площади КО к его массе.

Количество подобных объектов оказалось столь велико, что требуется пересмотр существующих математических моделей динамического распределения космического мусора в околоземном пространстве и оценок опасности для функционирующих КА. По оценкам авторов настоящей статьи, объекты с большим значением (больше  $1 \text{ км}^2/\text{кг}$ ) отношения площади к массе составляют не менее половины популяции фрагментов космического мусора на высоких орбитах. В связи с этим необходимо с высокой степенью достоверности установить, образуются БОПМ-фрагменты только при взрывах крупных КО либо в результате каких-то иных событий, не связанных с катастрофическим разрушением космических объектов.

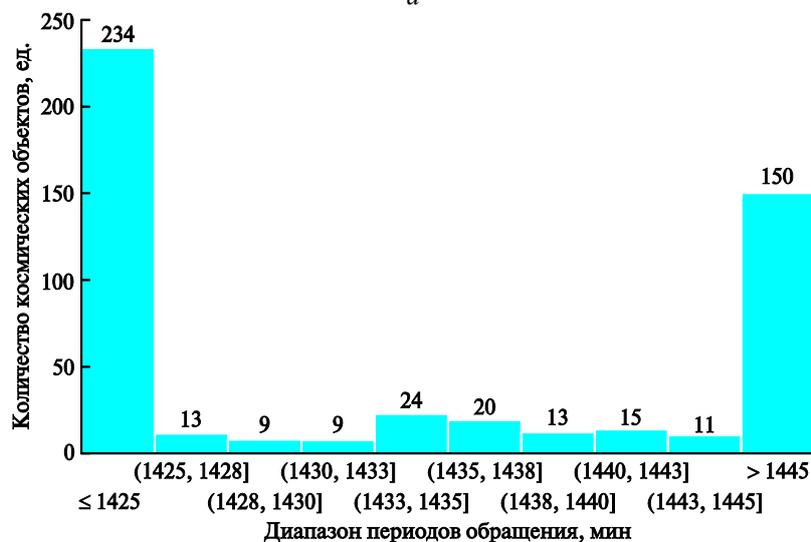
**Распределение положения каталогизированных БОПМ-объектов в космическом пространстве и их физические свойства.**

В период 2016–2017 гг. с помощью средств российской межведомственной сети были проведены наблюдения:

- за 498 БОПМ-фрагментами в области ГСО (период обращения в диапазоне 1100...1800 мин, наклонение менее  $25^\circ$ , эксцентриситет орбиты не более 0,25) (рис. 3–5);



a



б

**Рис. 3.** Распределение каталогизированных по периоду обращения БОПМ-фрагментов в области ГСО (a) и в области рабочих орбит КА на ГСО (б)

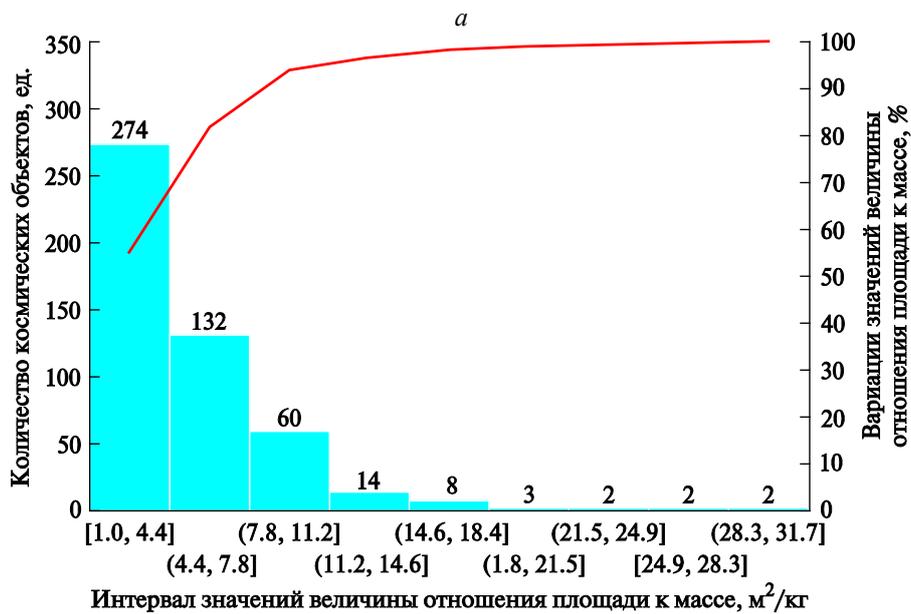
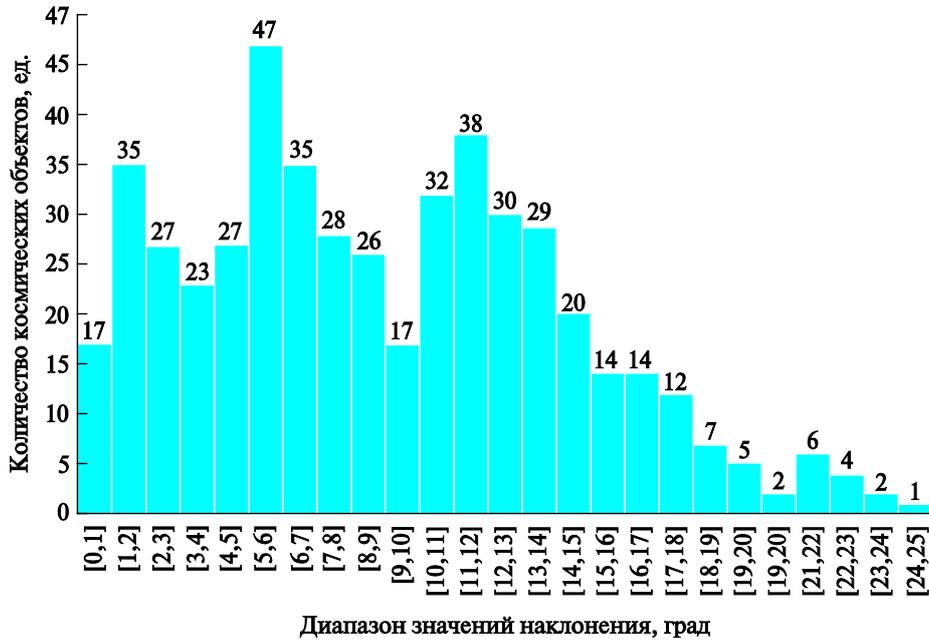


Рис. 4 (начало). Распределение каталогизированных БОПМ-фрагментов в области ГСО по наклонению плоскости орбиты (а) и по значению отношения площади к массе (б)

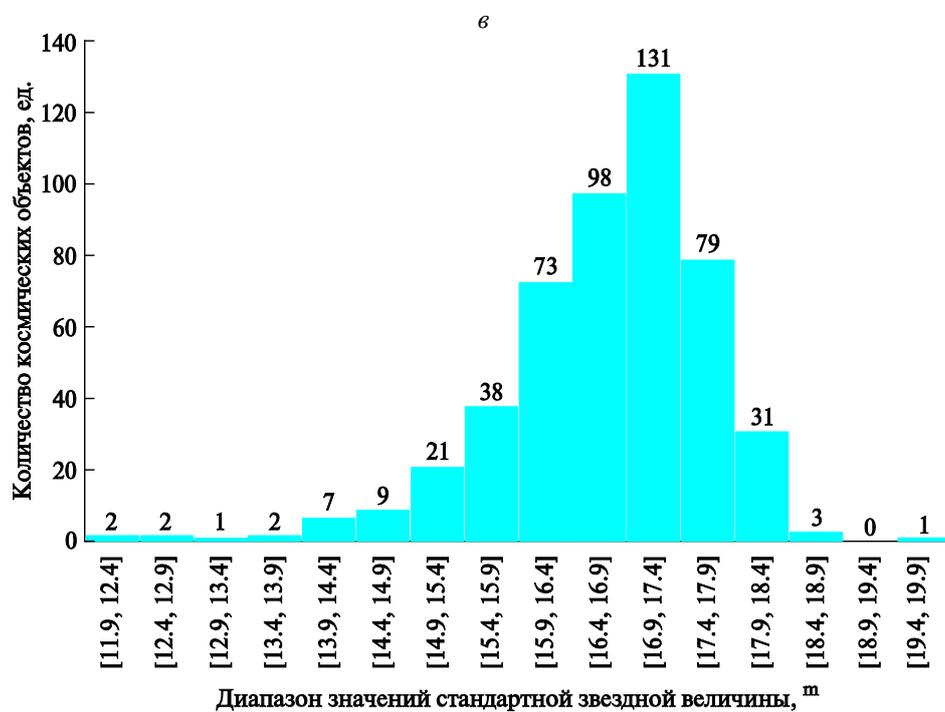
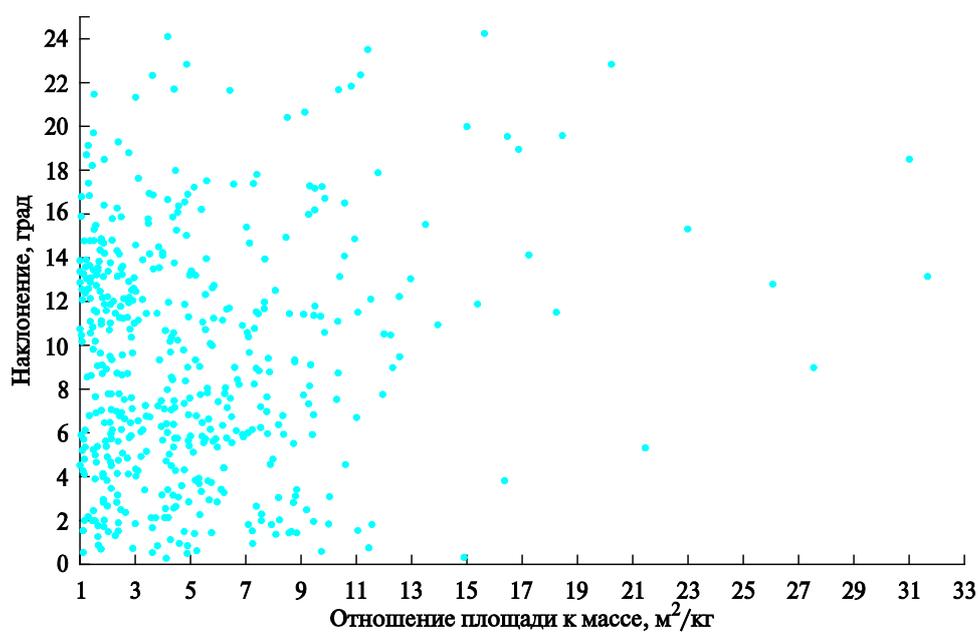


Рис. 4 (окончание). Распределение каталогизированных БОПМ-фрагментов в области ГСО по наклонению плоскости орбиты в зависимости от значения отношения площади к массе ( $\epsilon$ ) и по значению стандартной звездной величины,  $m$  ( $z$ )

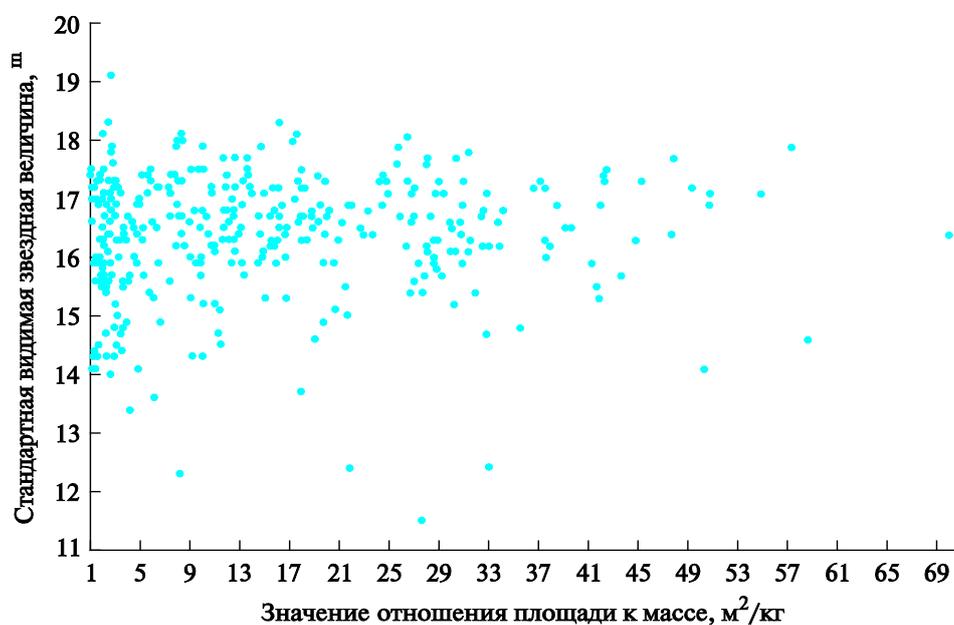
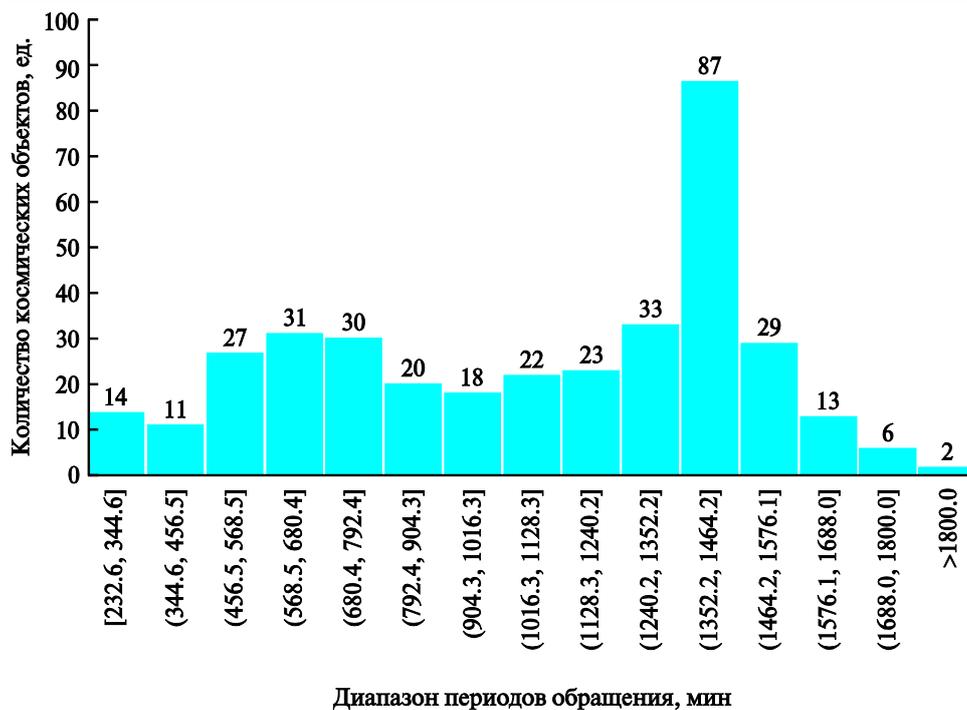


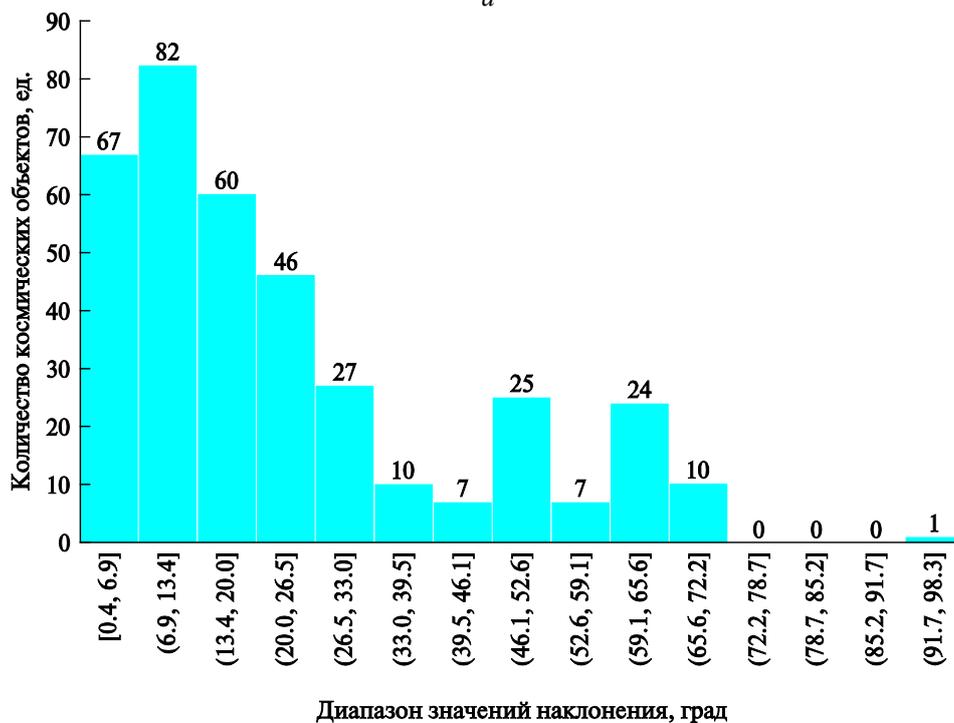
Рис. 5. Распределение стандартной звездной величины каталогизированных БОПМ-фрагментов в области ГСО в зависимости от значения отношения площади к массе

- 366 БОПМ-фрагментами на высокоэллиптических (ВЭО) (период обращения не менее 225 мин, эксцентриситет более 0,25) и средне-высоких околокруговых орбитах (СВО) (период обращения в диапазоне 225...1100 мин, эксцентриситет не более 0,25) (рис. 6–9).

Значение отношения эффективной площади КО к его массе для этих фрагментов оценивалось в процессе одновременного уточнения параметров движения их центра масс и величины ускорения, обусловленного световым давлением или сопротивлением атмосферы (в зависимости от параметров орбиты объекта). Значения отношения эффективной площади КО к его массе (ОПМ), использованные далее при построении гистограмм, являются средними для всего множества полученных оценок ОПМ каждого отдельного фрагмента.

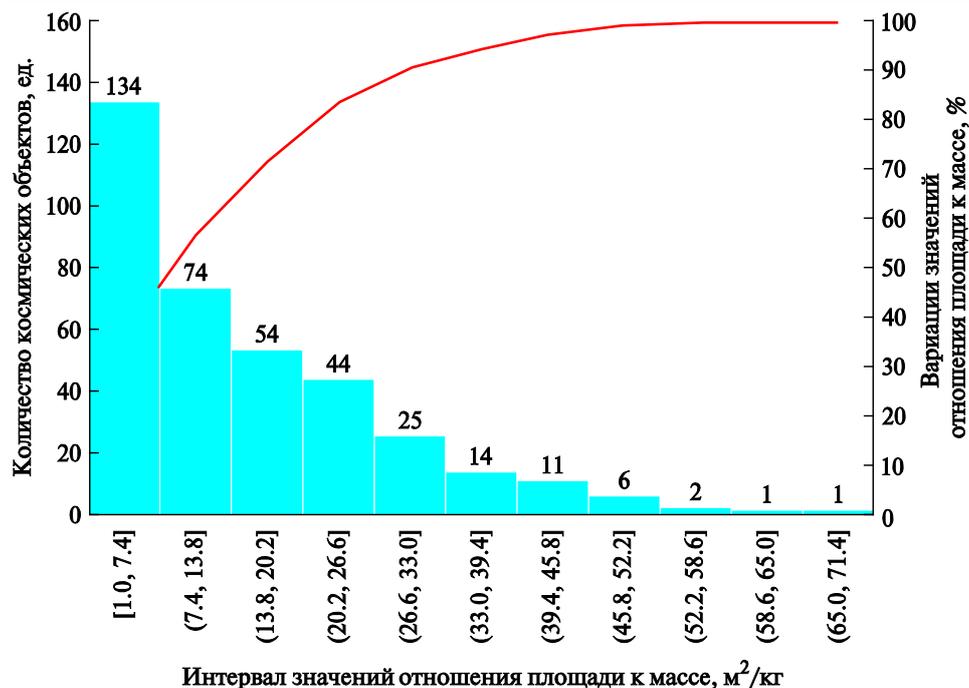


а



б

Рис. 6 (начало). Распределение каталогизированных БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО по периоду обращения (а) и по наклону плоскости орбиты (б)



6

Рис. 6 (окончание). Распределение каталогизированных БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО по значению отношения площади к массе (6)

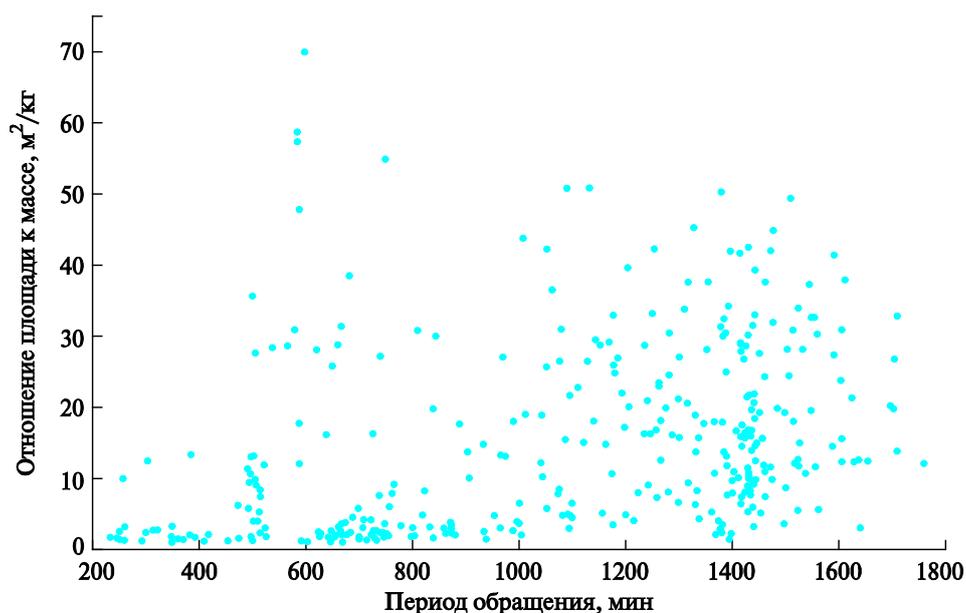


Рис. 7. Распределение периодов обращения и значений отношения площади к массе каталогизированных БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО

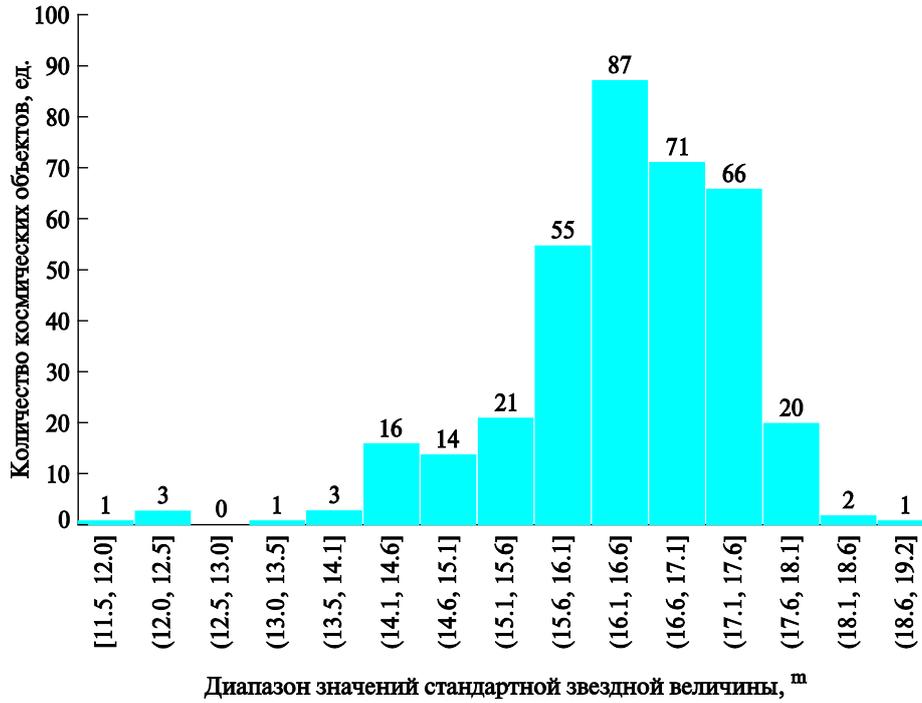


Рис. 8. Распределение каталогизированных БОИМ-фрагментов на орбитах ВЗО и СВО по значению стандартной звездной величины, <sup>m</sup>

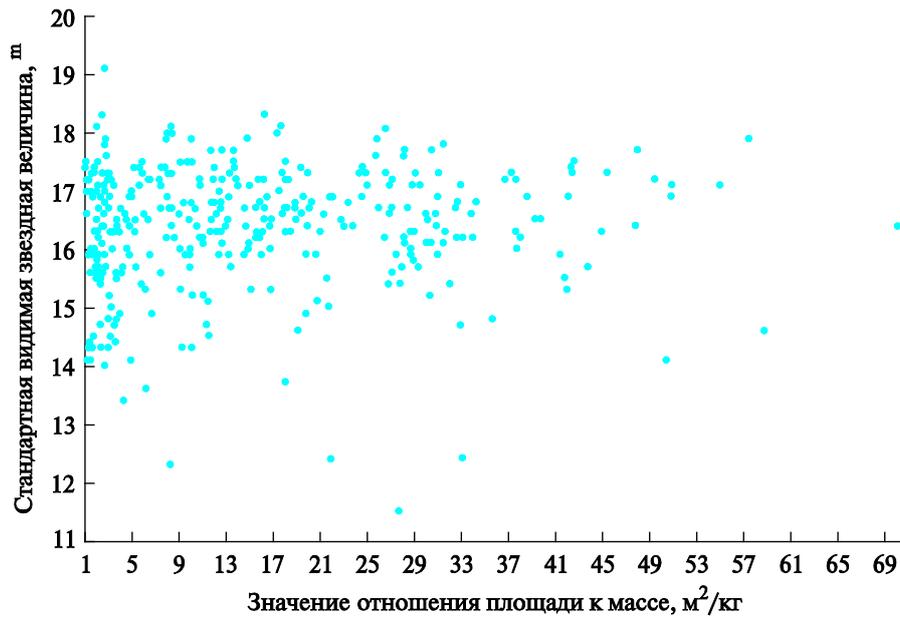


Рис. 9. Распределение стандартной звездной величины каталогизированных БОИМ-фрагментов на орбитах ВЗО и СВО в зависимости от значения отношения площади к массе

### **БОПМ-фрагменты в области геостационарной орбиты.**

**Распределение по параметрам орбитального движения.** Каталогизированные в ЦСИТО РАН БОПМ-фрагменты в области ГСО распределены в широком диапазоне значений параметров их орбит. Период обращения большей части этих фрагментов находится в диапазоне 1345...1502 мин (см. рис. 3, *a*). При этом значительное количество фрагментов (23 %) сосредоточено на орбитах с теми же периодами обращения (1425...1445 мин), на которых находятся функционирующие КА на ГСО (см. рис. 3, *b*), включая рабочие орбиты с периодом около 1436 мин и орбиты, используемые, в том числе, при перемещении геостационарных КА между различными орбитальными позициями. Следует обратить внимание на тот факт, что более 30 % каталогизированных БОПМ-фрагментов в области ГСО находятся на орбитах с периодом более 1445 мин.

Образование таких фрагментов вполне возможно в результате взрывов крупных объектов, при которых скорости разлета продуктов разрушения были довольно значительны (от десятков до сотен метров в секунду). Однако если рассматривать такое объяснение в качестве единственно возможного, то можно предположить, что в области ГСО имели место многочисленные взрывы объектов, находящихся на орбитах с самыми различными периодами обращения, что не подтверждается имеющимися данными многолетних наблюдений.

Распределение БОПМ-фрагментов в области ГСО по наклонению плоскости орбиты является гораздо более равномерным по сравнению с распределением периодов обращения, особенно в диапазоне от 0 до 15° (рис. 4, *a*).

Данный вид распределения согласуется с общим характером текущего распределения всех каталогизированных не функционирующих объектов в области ГСО по наклонению плоскости орбиты. Тем не менее следует подчеркнуть, что приведенное распределение для БОПМ-фрагментов отражает лишь мгновенную картину, поскольку эксцентриситет и наклонение плоскости их орбиты претерпевают значительные изменения в ходе эволюции вследствие воздействия светового давления, причем, как правило, тем более существенные, чем большее значение имеет ОПМ соответствующего фрагмента.

### **Физические свойства БОПМ-фрагментов в области ГСО.**

Около 60 % каталогизированных БОПМ-фрагментов в области ГСО имеют значение ОПМ в диапазоне 1,0...4,4 м<sup>2</sup>/кг (см. рис. 4, *b*). Однако объекты с такими значениями ОПМ действительно составляют большинство всей популяции БОПМ-фрагментов в области ГСО.

Как показывает накопленный опыт [13], абсолютное большинство БОПМ-фрагментов имеют значительные непрогнозируемые вариации ОПМ (иногда до 30...40 %). В результате при прогнозе

движения центра масс этих объектов погрешности прогнозируемого положения КО на небесной сфере быстро растут по мере увеличения интервала прогноза их движения и достаточно быстро достигают величин, которые превышают (в угловой мере) размер области небесной сферы, накрываемый полем зрения имеющихся оптических средств наблюдения. Следовательно, многие из объектов со значительным и сильно переменным значением ОПМ не обнаруживаются при повторных наблюдениях, что в итоге приводит к переводу этих объектов в категорию потерянных и исключению из статистики.

На рис. 4, в показано распределение каталогизированных БОПМ-фрагментов в области ГСО со значениями ОПМ в диапазоне  $1 \dots 10 \text{ м}^2/\text{кг}$ , которые наблюдаются на орбитах с наклонениями, находящимися преимущественно в диапазоне  $0 \dots 18^\circ$ . Орбиты фрагментов, имеющих ОПМ больше  $10 \text{ м}^2/\text{кг}$ , эволюционируют настолько быстро, что рассматривать распределение значений их наклонения (а также эксцентриситета, аргумента перигея и, в некоторых случаях, большой полуоси) можно лишь исключительно в привязке к конкретным моментам времени.

Распределение количества БОПМ-фрагментов в области ГСО по значению стандартной видимой звездной величины приведено на рис. 4, г. Для сравнения отражательных характеристик наблюдаемых БОПМ-фрагментов все накопленные измерения видимой звездной величины пересчитаны к выбранным стандартным условиям (дальность  $40\,000 \text{ км}$ , фазовый угол  $0^\circ$ ) в модели диффузно-отражающей сферы. Следует обратить внимание на тот факт, что в множестве наблюдаемых БОПМ-фрагментов в области ГСО имеется несколько десятков объектов со стандартной звездной величиной ярче  $15^m$ , что при значении альбедо  $0,15$  в модели диффузно-отражающей сферы соответствует линейному размеру (диаметру) более  $1 \text{ м}$ .

На рис. 5 показано распределение стандартной звездной величины наблюдаемых БОПМ-фрагментов в области ГСО в зависимости от среднего значения ОПМ.

Согласно рис. 4, г, все фрагменты с большим значением ОПМ являются достаточно слабыми, что дополнительно осложняет процесс их регулярного наблюдения.

**Распределение БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО по параметрам орбитального движения.** Распределение периодов обращения каталогизированных в ЦСИТО РАН БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО, показанное на рис. 6, а, является достаточно равномерным.

Исключение из общей картины распределения составляет диапазон значений периода обращения  $1350 \dots 1470 \text{ мин}$ . Вероятно, что появление фрагментов с периодом обращения в этом диапазоне связано с разрушением объектов в области ГСО.

Значение эксцентриситета орбиты этих фрагментов либо в момент их образования, либо в результате эволюции под действием светового давления превысило значение величины 0,25, используемой в качестве условной границы в определениях объектов в области ГСО и на орбитах ВЭО и СВО. Как следствие, при формировании статистики данные фрагменты были отнесены к категории объектов на ВЭО и СВО.

Каталогизированные в ЦСИТО РАН БОПМ-фрагменты на орбитах ВЭО и СВО по наклонению плоскости орбиты распределены неравномерно (см. рис. 6, б). Более 77 % из них находятся на орбитах с наклонением менее  $33^\circ$  и, тем самым, в зависимости от периода обращения могут быть связаны по своему происхождению как с объектами в области ГСО, так и с объектами на геопереходных эллиптических орбитах, используемых при запусках геостационарных КА с космодромов Байконур (Казахстан), Куру (Франц. Гвиана), Мыс Канаверал (США), Сичан (Китай), Танегасима (Япония) и Шрихарикота (Индия).

**Физические свойства БОПМ-фрагментов на высокоэллиптических и средневысоких околокруговых орбитах.** Количество фрагментов, имеющих большие значения ОПМ (более  $7 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), на орбитах ВЭО и СВО составляет более 60 % от общего числа каталогизированных БОПМ-фрагментов на этих орбитах (см. рис. 6, в).

Основной вклад в популяцию фрагментов с ОПМ больше  $7 \text{ м}^2/\text{кг}$  вносят БОПМ-фрагменты, образовавшиеся в результате разрушений объектов в области ГСО. Их распределение на орбитах ВЭО и СВО по периоду обращения и значению ОПМ представлено на рис. 7.

На рис. 7 видно, что большинство объектов с периодом в диапазоне 1350...1470 мин имеет среднее значение ОПМ более  $5 \text{ м}^2/\text{кг}$ , достаточное для того, чтобы в процессе эволюции орбиты эксцентриситет периодически возрастал до значений более 0,25.

Следует учитывать, что на орбитах ВЭО и СВО по сравнению с областью ГСО наблюдается гораздо больше объектов с ОПМ более  $30 \text{ м}^2/\text{кг}$ , при этом ОПМ нескольких объектов превышает  $50 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Как и в случае с БОПМ-фрагментами в области ГСО, все накопленные измерения видимой звездной величины БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО пересчитаны к стандартным условиям (дальность 40 000 км, фазовый угол  $0^\circ$ ) в модели диффузно-отражающей сферы. Полученное распределение количества БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО по значению стандартной видимой звездной величины приведено на рис. 8.

Распределение стандартной звездной величины наблюдаемых БОПМ-фрагментов на орбитах ВЭО и СВО в зависимости от среднего значения ОПМ показано на рис. 9.

Как и в случае с фрагментами в области ГСО, подавляющее большинство фрагментов на орбитах ВЭО и СВО имеют слабый стандартный блеск. Однако с учетом того, что расстояние до этих объектов от пункта наблюдения существенно изменяется с течением времени (уменьшается, что приводит к росту яркости КО), такие объекты в среднем более доступны для наблюдения с точки зрения проникающей способности используемых оптических инструментов.

Кроме того, объекты на орбитах ВЭО и СВО доступны для наблюдения большему количеству наземных оптических пунктов. Как следствие, интервалы наблюдаемости этих объектов длиннее, чем у аналогичных объектов в области ГСО. В совокупности эти факторы способствуют более устойчивому наблюдению даже тех фрагментов, которые имеют очень большое значение ОПМ.

**Выбор БОПМ-фрагментов для идентификации источников их образования.** Задача установления наиболее вероятного источника образования БОПМ-фрагментов, очевидно, является нетривиальной. В подавляющем большинстве случаев достаточно сложно, если вообще возможно, установить происхождение вновь открываемых БОПМ-фрагментов из-за их предположительно длительного присутствия на орбите и непрогнозируемых вариаций значений отношения площади к массе, обусловленных сложным неизвестным движением объектов относительно центра масс в совокупности с возможной неоднородностью отражательных характеристик разных частей поверхности, а также других физических свойств объектов. Существенное влияние возмущений, обусловленных световым давлением, на орбитальное движение БОПМ-фрагментов при неизвестном законе вариаций значений отношения площади к массе приводит к возникновению значительных погрешностей прогнозирования движения центра масс этих фрагментов на больших интервалах времени, в том числе при анализе движения фрагментов в прошлом.

С учетом перечисленных обстоятельств наиболее перспективными, с точки зрения возможности установления вероятного источника образования, выглядят те из БОПМ-фрагментов, которые в момент образования отделились от «родительских» объектов (крупных КА или ступеней РН (РБ)) с достаточно малой относительной скоростью. В случае обнаружения таких фрагментов вскоре после образования они будут все еще находиться на орбитах, близких по параметрам к орбитам «родительских» объектов, и на относительно небольшом угловом расстоянии от этих «родительских» объектов. Кроме того, исходя из анализа эволюции БОПМ-фрагментов с относительно небольшим значением ОПМ можно ожидать, что в течение достаточно длительного срока такие фрагменты будут оставаться в орбитальной плоскости, близкой по параметрам (с учетом эволюции) к плоскости той орбиты, на которой находился «родительский» объект в момент отделения фрагментов.

Учитывая изложенный материал, был проведен анализ архива орбитальных данных, накопленных в ЦСИТО РАН.

**Результаты анализа архива орбитальных данных.**

**Фрагменты ступени ракетоносителя «Дельта-4» (международное обозначение 2009-001В), США.** В 2016–2017 гг. в ходе проведения обзоров области ГСО была обнаружена группа из шести БОПМ-фрагментов со схожими параметрами орбиты (табл. 1):

- период обращения около 1500 мин;
- наклонение 4,8...5,0°;
- долгота восходящего узла (ДВУ) 32,3...34,9°.

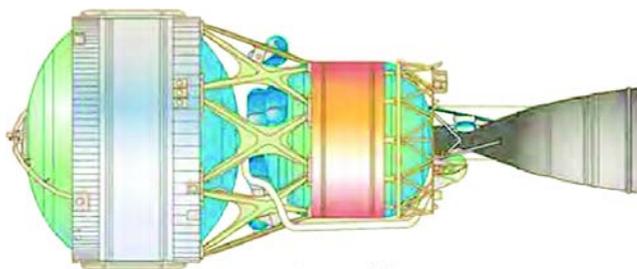
Таблица 1

**Основные данные для группы БОПМ-фрагментов на орбитах**

| Номер фрагмента | Дата обнаружения | Период, мин | Наклонение, град. | Долгота восходящего узла, град. | Отношение площади объекта к его массе, м <sup>2</sup> /кг |
|-----------------|------------------|-------------|-------------------|---------------------------------|---|
| 91274           | 03.08.16         | 1499,4      | 4,89              | 33,30                           | 5,20  |
| 91293           | 08.04.16         | 1498,8      | 4,85              | 34,20                           | 4,67  |
| 91315           | 10.04.16         | 1497,9      | 5,02              | 34,93                           | 4,81  |
| 91681           | 02.03.17         | 1498,8      | 4,83              | 32,31                           | 6,27  |
| 91682           | 03.03.17         | 1498,6      | 4,92              | 32,48                           | 2,95  |
| 91683           | 03.03.17         | 1499,6      | 4,82              | 34,43                           | 7,33  |

Анализ орбит всех прочих объектов в базе данных ЦСИТО РАН показал, что в той же орбитальной плоскости, в которой находятся обнаруженные фрагменты, имеется всего один крупный объект — вторая ступень РН «Дельта-4» (международное обозначение 2009-001В [14]). Данная ступень, относящаяся к типу DCSS-5 (рис. 10 [15]) находится на орбите со следующими параметрами:

- период обращения 1499,1 мин;
- наклонение 5,13°;
- ДВУ 33,15°.



**Рис. 10.** Общий внешний вид второй ступени РН «Дельта-4»

Анализ архива орбитальной информации для ступени не выявил никаких изменений в эволюции элементов орбиты, которые бы не могли быть описаны математической моделью, учитывающей только естественные возмущающие факторы (гравитационное влияние Земли, Луны и Солнца и влияние светового давления). С учетом уникальности комбинации параметров плоскости орбиты и периода обращения ступени 2009-001В можно с высокой вероятностью утверждать, что обнаруженные фрагменты на орбитах с аналогичными параметрами отделились от данной ступени с малыми относительными скоростями. Момент отделения достоверно установить не представляется возможным.

**Фрагмент космического аппарата USA-171 (международное обозначение 2003-041A), США.** В ходе проведения обзора области ГСО 31 марта 2016 г. в окрестности  $68^\circ$  в.д. был обнаружен объект с блеском  $17^m$ , медленно дрейфовавший в западном направлении. Оптические измерения, полученные в последующие ночи, позволили с высокой точностью оценить параметры орбитального движения нового объекта, получившего условный номер 91118, и значение ОПМ ( $2,6 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). Наклонение  $8,46^\circ$  и ДВУ  $72,22^\circ$  плоскости орбиты объекта оказались в точности совпадающими со значениями тех же параметров для орбиты геостационарного КА USA-171 (международное обозначение 2003-041A [14]), который был расположен в  $68^\circ$  в.д.

Анализ орбитального движения двух объектов показал, что 20 марта 2016 г. расстояние между ними было минимальным и составляло менее 1 км (изменение относительного расстояния показано на рис. 11), что по величине сопоставимо с прогнозируемыми погрешностями положения вновь обнаруженного фрагмента.

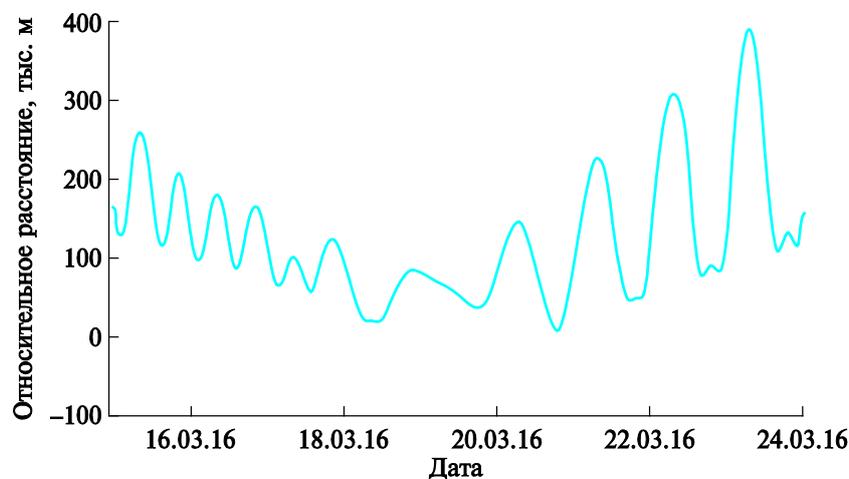


Рис. 11. Изменение относительного расстояния между КА 2003-041A и фрагментом 91118

Таким образом, с большой вероятностью можно утверждать, что обнаруженный фрагмент 91118 отделился с малой относительной скоростью (менее 3 м/с) от КА 2003-041А.

При этом в орбитальном движении самого КА никаких аномалий не было выявлено, а дальнейшие наблюдения показали, что КА продолжает функционирование, периодически выполняя маневры с целью удержаться в орбитальной позиции на ГСО.

**Фрагмент космического аппарата 1999-071А GALAXY 11 (США).** При проведении наблюдений области ГСО 1 сентября 2016 г. в окрестности 60° в.д. был обнаружен фрагмент с блеском 17<sup>m</sup>. В последующие несколько ночей объект наблюдался несколькими различными телескопами. Яркость объекта, получившего условный номер 91453, сильно варьировалась, иногда ослабевая до 18,3<sup>m</sup>. Обработка полученных измерений показала, что значение ОПМ для объекта составляет в среднем около 5,6 м<sup>2</sup>/кг и испытывает значительные вариации. Однако наклонение плоскости орбиты объекта составляло всего 0,01°. На основании этого факта была выдвинута и проверена гипотеза о недавнем образовании данного фрагмента в результате отделения от одного из функционирующих КА на ГСО.

На ГСО в окрестности 60° в.д. на момент обнаружения фрагмента 91453 находились четыре функционирующих КА на орбитах с наклоном около 0° (табл. 2).

*Таблица 2*

**Краткие сведения о космических аппаратах, находившихся на ГСО в окрестности 60° в.д.**

| Международное обозначение | Наименование | Долгота подспутниковой точки, град. в.д. | Долгота восходящего узла, ° |
|---------------------------|--------------|--|-----------------------------|
| 1999-071А                 | Galaxy 11    | 60,1                                     | 296,7                       |
| 2001-025А                 | Astra 2С     | 60,3                                     | 278,5                       |
| 2002-007А                 | Intelsat 904 | 60,0                                     | 154,1                       |
| 2009-017А                 | USA 204      | 60,2                                     | 145,5                       |

Анализ расчетов взаимного положения каждого из четырех КА и фрагмента 91453 показал, что вследствие значительной неопределенности, создаваемой не прогнозируемыми вариациями ОПМ, точность орбиты фрагмента недостаточна для того, чтобы сделать однозначный вывод о том, от какого из КА с наибольшей вероятностью отделился фрагмент. Дополнительный анализ эволюции параметров плоскости орбиты всех пяти объектов показал, что наиболее близкой к плоскости орбиты фрагмента является плоскость орбиты КА 1999-071А Galaxy 11. При этом минимальное расстояние между

91453 и Galaxy 11 было достигнуто 31 августа 2016 г. Относительная скорость при минимальном сближении составила менее 10 м/с.

Последующий анализ орбитального движения четырех КА в окрестности 60° в.д. показал, что все четыре КА продолжают удерживать свое положение на ГСО путем проведения коррекций орбиты.

Таким образом, фрагмент 91453 образовался в результате неустановленного события, приведшего к отделению этого фрагмента от одного из КА в окрестности 60° в.д.

**Обсуждение полученных результатов.** В результате проведенных исследований получены первые прямые доказательства того, что образование БОПМ-фрагментов не обязательно связано со взрывами объектов на орбите и может быть обусловлено другими процессами, приводящими, по всей видимости, к деградации и разрушению материалов внешней поверхности элементов конструкции КА и ступеней РН (РБ). При этом объекты, являющиеся предполагаемыми источниками образования БОПМ-фрагментов, не демонстрируют каких-либо явных изменений физических, орбитальных и функциональных характеристик.

Важным выводом является то, что БОПМ-фрагменты могут образовываться непосредственно в области размещения функционирующих КА на ГСО и источником таких фрагментов являются сами функционирующие КА. В данной работе также подтверждено, что фрагментообразование происходит и в области орбиты захоронения, находящейся выше ГСО.

Во всех трех рассмотренных случаях образовавшиеся фрагменты были не сразу обнаружены оптическими средствами наблюдения, в том числе по причине слабого блеска фрагментов в сочетании с оптической близостью к гораздо более яркому «родительскому» объекту. В одном из трех случаев сочетание значительной эволюции орбиты под воздействием светового давления, не прогнозируемых вариаций ОПМ БОПМ-фрагмента и недостатка измерительной информации не позволило однозначно установить источник образования этого фрагмента.

Вместе с тем накопленный значительный статистический материал позволяет рассчитывать на выявление новых источников образования БОПМ-фрагментов как в области ГСО, так и на орбитах типа ВЭО и СВО.

**Заключение.** В работе проанализирована выборка из 864 БОПМ-фрагментов на высоких орбитах, обнаруженных в 2016–2017 гг., построены распределения по орбитальным параметрам, значению ОПМ и видимому блеску. Для шести БОПМ-объектов проведен анализ их характеристик и условий образования, что позволило с высокой степенью вероятности привязать их к «родительским объектам», от которых они предположительно отделились. Полученные результаты

являются новым вкладом в решение задачи повышения осведомленности о ситуации в околоземном космическом пространстве и обеспечения безопасности космических операций. Было определено происхождение БОПМ-фрагментов, отделившихся от трех различных крупных объектов, находящихся в области ГСО, включая два функционирующих космических аппарата и одну ступень ракеты-носителя на орбите захоронения. Наблюдения этих трех объектов показали, что никаких заметных перепадов в их кривых блеска не произошло. Это свидетельствует об отсутствии существенных изменений геометрической формы, отражательных характеристик и параметров движения относительно центра масс, свидетельствующих об их разрушении. Оба КА продолжали выполнять маневры удержания в своих позициях на ГСО, а в орбитальном движении и в кривой блеска ступени не было выявлено никаких непрогнозируемых изменений. Поэтому образование вновь обнаруженных фрагментов не может быть связано с катастрофическим разрушением «родительских объектов». Таким образом, образование БОПМ-фрагментов может быть обусловлено, по всей видимости, деградацией и разрушением материалов внешней поверхности элементов конструкции КА и ступеней РН (РБ).

Кроме того, на конкретных примерах продемонстрирована необходимость улучшения моделей движения центра масс объектов с большим и переменным ОПМ в целях повышения достоверности результатов проводимого анализа событий в ОКП. Исследования закономерностей образования и эволюции подобных уникальных объектов будут продолжены, в том числе и для области средневысоких орбит.

Авторы выражают благодарность профессору Захарии Наумовичу Хуторовскому за неоценимый вклад в области создания и развития алгоритмов траекторного обнаружения космических объектов по информации оптических измерений и многолетний труд по обработке измерительной информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шустов Б.М., Длужневская О.Б., Рыхлова Л.В., Тутуков А.В. Лидеры отечественной астрономии: проф. А.Г. Масевич. *Сборник трудов конференции «Звезды и спутники», посвященной 100-летию со дня рождения А.Г. Масевич*, Москва, Янус-К, 2018, с. 3–12.
- [2] Анисимов В.Д., Батырь Г.С., Меньшиков А.В., Шилин В.Д. Система контроля космического пространства. *Корпорация «Вымпел». Системы ракетно-космической обороны*. Москва, Издательский дом «Оружие и технологии», 2004, 242 с.
- [3] Молотов И.Е., Сун Р.Ю., Занг Ч., Баррес У. де Алмейда, Захваткин М.В., Титенко В.В., Стрельцов А.И., Мохнаткин А.В., Кокина Т.Н., Еленин Л.В. Российско-китайские наблюдения фрагментов разрушения ракетной ступени «Центавр» — первый шаг к сети обсерваторий БРИКС. *Всероссий-*

- ская научная конференция «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы»: Сборник трудов под редакцией Л.М. Зеленого, Б.М. Шустова, Серия «Механика, управление и информатика», Москва, ИКИ РАН, 2019, с. 95–102.
- [4] Шилин В.Д., Лукьянов А.П., Молотов И.Е., Агапов В.М., Колесса А.Е. Проблемы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве. Планы и возможности. Роль оптических наблюдений. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2013, т. 10, № 4, часть 2, с. 171–175.
- [5] Молотов И.Е., Агапов В.М., Куприянов В.В., Титенко В.В., Хуторовский З.Н., Гусева И.С. [и др.]. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений. *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове*. 2009, т. 219, вып. 1, с. 233–248.
- [6] Молотов И.Е., Воропаев В.А., Юдин А.Н., Иванов Д.Е., Аистов Е.А., Боровин Г.К. Комплексы электронно-оптических средств для мониторинга околоземного космического пространства. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2018, т. 14, № 4, часть 2, с. 110–116.
- [7] Лукьянов А.П., Лагуткин В.Н., Мальцев А.В. Колесса А.Е., Ким А.К., Равдин С.С., Пругло А.В., Молотов И.Е., Выхристенко А.М., Андрианов Н.Г. Регулярные оптические наблюдения низкоорбитальных спутников в Тирасполе, Кисловодске и Москве в 2012–2013 гг. Первые результаты и перспективы. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2013, т. 14, № 4, часть 3, с. 101–105.
- [8] Voropaev V., Molotov I., Zakhvatkin M., Khutorovsky Z., Streltsov A., Stepanyants V., Borovin G., Pavlova E. Recent developments of the KIAM Space Debris database for space situation awareness and conjunction analysis. *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, 1–5 October 2018*. Bremen, Curran Associates, Inc., 2018, Paper Number: IAC-A6,7,5,x48262, pp. 1–7.
- [9] Боровин Г.К., Захваткин М.В., Степаньянц В.А., Усовик И.В. Статистическая модель распределения космических объектов в пространстве орбитальных параметров. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2018, препринт № 85, 16 с.
- [10] Аким Э.Л., Агапов В.М., Молотов И.Е., Степаньянц В.А. Исследования космического мусора на высоких околоземных орбитах, проводимые Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. *Сб. статей «Практические шаги по снижению техногенного засорения околоземного космического пространства»*, Москва, Роскосмос, 2010, с. 16–21.
- [11] Базей А.А., Базей Н.В., Боровин Г.К., Золотов В.Е., Кашуба В.И., Кашуба С.Г., Куприянов В.В., Молотов И.Е. Эволюция орбиты пассивного фрагмента с большой площадью поверхности на высокой околоземной орбите. *Математическое моделирование и численные методы*, 2015, № 1, с. 83–93.
- [12] Rosengren A., Scheeres D. Long-term Dynamics of HAMR Objects in HEO. *Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Minneapolis, Minnesota, 13–16 August 2012*. Minneapolis, Curran Associates, Inc., 2012, pp. 2012–4745.
- [13] Agapov V., Khutorovsky Z., Molotov I. Comparison of physical properties of GEO and HEO objects tracking by ISON derived from multiyear observation statistics. *Proceedings of the 63rd International Astronautical Congress, Naples*,

- Italy*. 1–5 October 2012. Naples, Curran Associates, Inc., 2012, Paper Number IAC-12,A6,1,4,x16001, pp. 1–6.
- [14] Lemmens S. Classification of Geosynchronous Objects. *ESA Space Debris Office*, 2017, iss. 19, 178 p.
- [15] Delta IV Launch Services User's Guide. *United Launch Alliance, United Launch Services, limited liability company*, 2013, 293 p.

Статья поступила в редакцию 12.12.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Агапов В.М., Молотов И.Е., Боровин Г.К., Стрельцов А.И. Исследование популяции объектов космического мусора с большим отношением площади к массе на высоких околоземных орбитах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-2-1958>

**Агапов Владимир Михайлович** — старший научный сотрудник, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. e-mail: v.agapov@mail.ru

**Молотов Игорь Евгеньевич** — старший научный сотрудник, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. e-mail: im62@mail.ru

**Боровин Геннадий Константинович** — д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: borovin@keldysh.ru

**Стрельцов Артур Игоревич** — научный сотрудник, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. e-mail: Arthur.Streltsov@yandex.ru

## Study of a population of space debris objects with a high area-to-mass ratio in high earth orbits

© V.M. Agapov<sup>1</sup>, I.E. Molotov<sup>1</sup>, G.K. Borovin<sup>1,2</sup>, A.I. Streltsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The data on 498 space debris objects with a high area-to-mass ratio (HAMR) detected in 2016–2017 were analyzed to identify possible candidates for the role of "parent objects". As a result, the origin of several HAMR fragments was determined. These fragments separated from three different large objects in the geostationary orbit (GEO) region, including two functioning spacecraft and one rocket launcher stage. Observations of these three objects showed that there were no noticeable differences in their light curves, which indicates the absence of significant changes in the geometric shape, reflective characteristics and motion parameters relative to the center of mass. At least, both spacecraft continued to perform retention maneuvers in their positions on the GEO, and no unpredictable changes were detected in the orbital motion and in the stage light curve. Therefore, the formation of newly discovered fragments cannot be associated with the catastrophic destruction of the "parent objects".*

**Keywords:** space debris, optical measurements, database, destruction of space objects, HAMR fragments

### REFERENCES

- [1] Shustov B.M., Dluzhnevskaya O.B., Rykhlova L.V., Tutukov A.V. Lidery otechestvennoy astronomii: prof. A.G. Masevich [Leaders of Russian astronomy: prof. A.G. Masevich]. In: *Sbornik trudov konferentsii «Zvezdy i sputniki», posviashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya A.G. Masevich* [Proceedings of the conference "Stars and satellites" dedicated to the 100th anniversary of A.G. Masevich]. Moscow, Yanus-K Publ., 2018, pp. 3–12.
- [2] Anisimov V.D., Batyr G.S., Menshikov A.V., Shilin V.D. Sistema kontrolya kosmicheskogo prostranstva [Space surveillance system]. *Korporatsiya «Vympel». Sistemy raketno-kosmicheskoy oborony* [Vympel Corporation. Rocket and space defense systems]. Moscow, Oruzhie i tekhnologii Publ., 2004, 242 p.
- [3] Molotov I.E., Sun R.Yu., Zhang C., Barres de Almeida U., Zakhvatkin M.V., Titenko V.V., Streltsov A.I., Mokhnatkin A.V., Kokina T.N., Elenin L.V. Rossiysko-kitayskie nablyudeniya fragmentov razrusheniya raketnoy stupeni «Tsentavr» — pervy shag k seti observatorii BRIKS [Russian-Chinese observations of fragments of the destruction of the Centaur rocket stage are the first step to the network of BRICS observatories]. In: *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya «Kosmicheskii musor: fundamentalnye i prakticheskie aspekty ugrozy»: Sbornik trudov*. [Proceedings of the conference "Space Debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat"]. L.M. Zelenyi, B.M. Shustov, eds. Moscow, IKI RAS Publ., 2019 pp. 95–102.
- [4] Shilin V.D., Lukyanov A.P., Molotov I.E., et al. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva — Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 171–175.

- [5] Molotov I.E., Agapov V.M., Kouprianov V.V., et al. *Izvestiya Glavnoy astronomicheskoy observatorii v Pulkove (Bulletin of the Central Astronomical Observatory at Pulkovo)*, 2009, vol. 219, no. 1, pp. 233–248.
- [6] Molotov I.E., Voropaev V.A., Yudin A.N., et al. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva — Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 110–116.
- [7] Lukyanov A.P., Lagutkin V.N., Maltsev A.V., et al. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva — Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 101–105.
- [8] Voropaev V., Molotov I., Zakhvatkin M., et al. Recent developments of the KIAM Space Debris database for space situation awareness and conjunction analysis. In: *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, October 1–5, 2018*. 2018, IAC-18, A6,7,5,x48262, 7 p.
- [9] Borovin G.K., Zakhvatkin M.V., Stepanyants V.A., Usovik I.V. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha — Keldysh Institute Preprints*, 2018, no. 85, 16 p.
- [10] Akim E.L., Agapov V.M., Molotov I.E., Stepanyants V.A. Issledovaniya kosmicheskogo musora na vysokikh okolozemnykh orbitakh, provodimye Institutom prikladnoy matematiki im. M.V. Keldysha RAN [Studies of space debris in high earth orbits conducted by Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS. In: *Sbornik statey «Prakticheskie shagi po snizheniyu tekhnogennoy zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva»* [Coll. papers “Practical steps to reduce technogenic contamination of near-earth space”]. Moscow, Roscosmos Publ., 2010, pp. 16–21.
- [11] Bazey A.A., Bazey N.V., Borovin G.K., Zolotov V.E., et al. *Matematicheskoe modelirovaniye i chislennyye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2015, no. 1, pp. 83–93.
- [12] Rosengren A., Scheeres D. Long-term Dynamics of HAMR Objects in HEO. Presented at: *the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Minneapolis, Minnesota, 2012*, Paper AIAA 2012-4745.
- [13] Agapov V., Khutorovsky Z., Molotov I. Comparison of physical properties of GEO and HEO objects tracking by ISON derived from multiyear observation statistics. In: *63rd International Astronautical Congress, IAC2012 Proceedings, Naples, Italy*. 2012, Paper-Nr: IAC-12, A6,1,4,x16001, 6 p.
- [14] Lemmens S. Classification of Geosynchronous Objects. *ESA Space Debris Office*, 2017, iss. 19, 178 p.
- [15] Delta IV Launch Services User’s Guide. *United Launch Alliance, LLC/United Launch Services, LLC*, 2013, 293 p.

**Agapov V.M.**, Senior Research Fellow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences. Research interests: space flight ballistics and international space law. Author of over 150 scientific papers. 3306-6870, 11240832500, 0000-0002-0122-1628, W-1986-2017. e-mail: v.agapov@mail.ru

**Molotov I.E.**, Senior Research Fellow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences. Research interests: methods and means of observation of space objects. Author of over 400 scientific publications. 9294-0962, 7801461980, 0000-0001-8755-4804, P-8020-2018. e-mail: im62@mail.ru

**Borovin G.K.**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Chief Research Fellow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Professor, Bauman Moscow State

Technical University. Research interests: computer simulation, control systems, ballistics, computational methods, celestial mechanics, robotics, space debris. Author of over 200 scientific papers. 6604-4668, 0000-0002-7942-9613, R-1861-2018.

e-mail: borovin@keldysh.ru

**Streltsov A.I.**, Research Fellow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences. Research interests: ballistics, orbital mechanics, low thrust. Author of 15 publications. 6289-5620, 0000-0003-4326-2919. Arthur.

e-mail: Streltsov@yandex.ru