

На правах рукописи

Левкина Полина Анатольевна

**Физические и орбитальные характеристики
объектов космического мусора
по данным оптических наблюдений**

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук

- Научный руководитель: **Рыхлова Лидия Васильевна**,
д.ф.-м.н., зав. научно-исследовательской группой динамики малых тел Солнечной системы Института астрономии РАН, г. Москва
- Официальные оппоненты: **Кузнецов Эдуард Дмитриевич**,
д.ф.-м.н., зав. кафедрой астрономии и геодезии Уральского федерального университета, г. Екатеринбург
- Юрасов Василий Степанович**,
к.т.н., нач. астро-баллистического отдела АО «НПК «СПП», г. Москва
- Ведущая организация: Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
г. Томск

Защита состоится 23 сентября 2016 года в 12 час. 45 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте www.gao.spb.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Милецкий Е.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Актуальность выбранной темы связана с возросшей интенсивностью космических запусков в последние несколько десятков лет. Одним из отрицательных последствий практического освоения космоса стала проблема техногенного засорения пространства фрагментами космической техники. Космический мусор (КМ) создал серьёзную угрозу не только для космических аппаратов и орбитальных станций, но и для экологии околоземного пространства.

В настоящее время в областях движения действующих космических аппаратов происходит постоянный рост популяции малоразмерного космического мусора, и, как следствие, увеличивается вероятность столкновений с объектами КМ. Кроме того, существующие каталоги космических объектов неполны, и поддержка и пополнение каталога новыми наблюдательными данными, в том числе о ранее не наблюдавшихся объектах, является насущной необходимостью.

В околоземном космическом пространстве (ОКП) существует большое количество объектов, которые тяжело обнаруживать и сопровождать в силу их неизвестной формы и параметров вращения (например, объекты с большим отношением площади миделева сечения к массе, A/m). Эксцентриситет и наклон орбиты таких объектов испытывают быстрые изменения. Кроме того, разного рода возмущения оказывают влияние на отражательные способности, из-за чего видимый блеск таких объектов изменяется нерегулярно. Это изменение блеска не может быть полностью учтено, т.к. изначально неизвестны форма и отражательные характеристики объектов. При прогнозировании движения быстро накапливаются ошибки, при больших перерывах в наблюдениях подобные объекты теряются. Для изучения особенностей движения таких объектов необходимо получение высокоточных оптических наблюдений на больших временных интервалах.

Для изучения орбитальной эволюции объектов космического мусора с большим значением отношения площади миделева сечения к массе остро стоит необходимость точного учёта влияния различных возмущений, в том числе негравитационного характера. Открытие всё новых и новых фрагментов космического мусора, в том числе обломков разрушений, произошедших на орбите в прошлом столетии, только повышает актуальность задачи исследования долговременной эволюции объектов космического мусора в настоящее время.

Цели диссертационной работы

1. Получить высокоточные оптические наблюдения малоразмерных объектов космического мусора в геостационарной области (ГСО) на интервале нескольких лет для исследования долговременной эволюции орбит и поддержания каталога космических объектов.
2. Определить и исследовать физические характеристики и параметры орбит избранных объектов на ГСО и на высокоэллиптических орбитах, в том числе объектов с большим отношением площади миделева сечения к массе (A/m).
3. Пополнить каталог космических объектов за счёт новых малоразмерных объектов космического мусора, недоступных малоапертурным телескопам, с определением их характеристик и возможных причин их образования.
4. Исследовать поступательно-вращательное движение объектов космического мусора в области ГСО и определить закономерности изменения величины отношения A/m по данным длинного однородного ряда наблюдений.

Положения, выносимые на защиту

1. Массив физических и орбитальных характеристик малоразмерных объектов космического мусора сложной формы на высоких орбитах с последующим сопровождением и уточнением орбитальных параметров.
2. Результаты анализа впервые наблюдавшихся малоразмерных объектов космического мусора. Было обнаружено, что среди новых фрагментов есть неизвестные ранее обломки разрушений разгонного блока Transtage и спутника связи «Экран-2».
3. Результаты исследования поступательно-вращательного движения объекта космического мусора с большим отношением площади миделева сечения к массе, в рамках которого был установлен наблюдательный факт возрастания эксцентриситета орбиты объекта, обусловленный влиянием светового давления.

4. Результаты исследования вариаций величины отношения площади миделева сечения к массе для объекта сложной формы на высокой орбите, в рамках которого была уточнена используемая численно-аналитическая модель движения ИСЗ и космического мусора. Показано, что учёт изменения величины отношения площади миделева сечения к массе позволяет более точно прогнозировать параметры орбиты объекта.

Научная новизна

1. Получен уникальный наблюдательный материал на интервале времени нескольких лет для малоразмерных объектов космического мусора на ГСО и в области высокоэллиптических орбит.
2. Определён массив орбитальных параметров и физических характеристик объектов космического мусора, в том числе для ранее не наблюдавшихся объектов.
3. Обнаружены малоразмерные объекты космического мусора, недоступные небольшим телескопам, определены их характеристики и возможные причины образования нескольких объектов.
4. Изучено поступательно-вращательное движение объектов космического мусора в геостационарной области, впервые предложена модель вариаций величины отношения площади миделева сечения к массе, определён характер изменения величины эксцентриситета.

Научная и практическая значимость

Основные результаты диссертации опубликованы в авторитетных научных изданиях. Наиболее существенные результаты диссертации могут быть использованы в рамках развития теории движения объектов космического мусора при учёте влияния негравитационных эффектов на высокоорбитальные фрагменты. Научная и практическая значимость диссертации заключается в:

1. поддержании каталога известных малоразмерных космических объектов (получении новых наблюдательных данных и уточнении орбит известных объектов космического мусора);

2. пополнении каталога космических объектов в рамках проблемы космического мусора в ОКП (открытии новых объектов в геостационарной области с последующим сопровождением на большой наблюдательной дуге и определением орбит);
3. повышении точности прогноза движения малоразмерных объектов космического мусора неизвестной формы;
4. применении полученных результатов для уточнения модели движения космического мусора.

Апробация работы

По результатам исследований опубликовано 13 работ, 8 из них – в рецензируемых изданиях. Результаты, представленные в диссертации, были доложены на 13 научных конференциях:

- «Иосифьяновские чтения», Истра, Россия, 17 декабря 2009;
- Международная конференция «Околосемная астрономия», Красноярск, Россия, 5–10 сентября 2011;
- Международная студенческая конференция «Физика космоса», Коровская обсерватория УрФУ, Россия, 30 января–3 февраля 2012;
- Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково», Санкт-Петербург, Россия, 1–5 октября 2012;
- Международная студенческая конференция «Физика космоса», Коровская обсерватория УрФУ, Россия, 28 января–1 февраля 2013;
- «Sixth European Conference on Space Debris», Дармштадт, Германия, 22–25 апреля 2013;
- Международная конференция «Околосемная астрономия», Туапсе, Россия, 7–11 октября 2013;
- Всероссийская конференция «Физика – космосу», Байконур, Казахстан, 25–30 октября 2014;
- Международная студенческая конференция «Физика космоса», Коровская обсерватория УрФУ, Россия, 2–6 февраля 2015;
- V конференция молодых учёных и специалистов ЦНИИмаш, Королёв, Россия, 7–9 апреля 2015;

- Международная конференция «Околосемная астрономия», Терскол, Россия, 31 августа–6 сентября 2015;
- Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково», Санкт-Петербург, Россия, 21–25 сентября 2015;
- «Иосифьяновские чтения», Истра, Россия, 11 ноября 2015.

Результаты, представленные в диссертации, включены в отчёты по международной программе «Астрономия в Приэльбрусье», а также вошли в отчёты по результатам работ, проводившихся в рамках Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и положения, выносимые на защиту, отражают результаты, полученные соискателем.

Все наблюдательные задачи были поставлены автором. При непосредственном участии автора выполнены все фотометрические и позиционные оптические наблюдения, использованные в работе, проведена обработка полученных изображений. Вся работа по анализу наблюдений и интерпретации полученных результатов выполнена автором или при личном участии автора.

Все изложенные в публикациях по теме диссертации результаты получены автором самостоятельно или на равных правах с другими соавторами.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Число страниц в диссертации – 123, рисунков – 43, таблиц – 13. Список литературы состоит из 66 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, описываются цели, поставленные перед автором работы, предмет и методы проведённых исследований, обсуждается новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Приведены положения, выносимые на защиту, апробация результатов, список опубликованных по теме диссертации работ. Кроме того, даётся обзор последних научных работ по тематике исследования. Приводится краткий обзор содержания диссертации.

В **Главе 1** дано описание процесса оптических наблюдений объектов космического мусора, которые были использованы в настоящей работе. Дана классификация околоземных орбит по их параметрам и назначению. Приведено краткое описание современных наземных средств наблюдения объектов космического мусора – оптическими методами и методами радиолокации. Даны характеристики современных оптических телескопов, осуществляющих наблюдения космического мусора в геостационарной области.

Далее в первой главе приведены характеристики оптических телескопов наблюдательных баз ИНАСАН, с помощью которых в 2009–2015 гг. были получены измерения объектов КМ, использованные в настоящей работе. Подробно приводится процесс обработки полученных ПЗС-изображений и формат выходного sre-файла.

Входными данными являются полученные ПЗС-изображения, содержащие координаты центра поля, моменты времени экспозиций (UTC), номер объекта. Выходные файлы после обработки ПЗС-изображений содержат измеренные топоцентрические прямое восхождение и склонение объекта в стандартной небесной системе координат и оценку блеска в интегральных звёздных величинах на момент времени наблюдений.

Массив полученных sre-файлов используется для вычисления параметров орбит объектов космического мусора и определения их физических характеристик.

На Рис. 1 приведены средние квадратические отклонения (O–C) по прямому восхождению и склонению для точечного объекта в поле зрения при хорошем состоянии неба.

Здесь среднее квадратическое отклонение по прямому восхождению составляет $0.11''$, по склонению — $0.18''$, это соответствует расчётным значениям инструментальных погрешностей наших наблюдений для объектов космического мусора (в среднем около $0.15''$).

Глава 2 посвящена методике определения параметров движения и

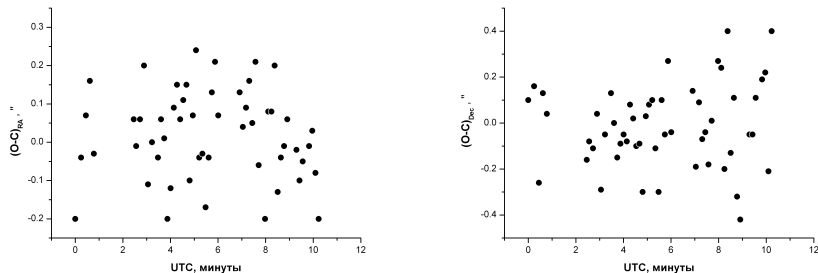


Рис. 1. Невязки по прямому восхождению (слева) и склонению (справа) на короткой серии наблюдений.

физических характеристик объектов космического мусора на ГСО.

Для определения параметров движения и физических характеристик объектов космического мусора в настоящей работе использовалась численно-аналитическая модель движения искусственных спутников Земли, разработанная профессором Е.П. Аксёновым в рамках решения обобщённой задачи двух неподвижных центров [1], расширенная и дополненная путём построения модели поступательного движения околоземных космических объектов в численно-аналитической форме [2].

В используемой модели движения при обработке орбитальных данных учитываются следующие эффекты:

- возмущения, связанные с несферичностью Земли;
- вековые изменения гармонических коэффициентов;
- возмущения от приливных деформаций центрального тела;
- возмущения от океанических приливов;
- лунно-солнечные возмущения;
- возмущения от влияния светового давления.

Оценка величины отношения площади миделева сечения к массе объекта (A/m) обусловлена определением величины коэффициента отражения C_r . Коэффициент отражения обусловлен произведением постоянной величины P_0 и функции времени, которая определяется особенностями конструкции космического объекта.

Величина $P_0 = 4.5606 \cdot 10^{-6} \text{Н/м}^2$ соответствует давлению солнечного света на среднем расстоянии Земли от Солнца (1 а. е.) (соображения, приводящие к выводам этой величины, описаны в монографии [3]). Значение коэффициента отражения определяется формулой:

$$C_r = 10^{-3} \cdot P_0 \cdot k_r \cdot \frac{A}{m}, \quad (1)$$

где

- k_r - эмпирический коэффициент отражения ($k_r = 1$ - зеркальное отражение, $k_r = 1.44$ - полное диффузное рассеивание),
 $1 < k_r < 1.5$;
- A - площадь миделева сечения объекта [м^2];
- m - масса объекта [кг].

Т.к. $C_r = 4.5606 \cdot 10^{-9} \cdot k_r \cdot \frac{A}{m}$, то, полагая $k_r \approx 1.0$, можно оценить отношение площади миделева сечения A к массе объекта m .

Также во второй главе показана область высоких орбит, охватываемая наблюдениями в обсерватории на пике Терскол, и приведена статистика наблюдений объектов космического мусора.

В Главе 3 исследованы объекты в различных областях околоземного пространства, наблюдавшиеся с целью пополнения динамического каталога объектов космического мусора. Описана проблема обнаружения некаталогизированных объектов космического мусора в области ГСО. Показана возможность наблюдения малоразмерных объектов, обладающих слабым блеском, на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН.

Исследовано орбитальное движение обнаруженного нами и на тот момент впервые наблюдавшегося на ГСО объекта 95334. На основе наблюдений в течение шести ночей после обнаружения (в октябре 2009 г.) была оценена величина A/m , полученная орбита приведена в Табл. 1.

Оценки СКО невязок по прямому восхождению и склонению от аппроксимирующей кривой в каждом сеансе наблюдений не превышают $0.5''$, что говорит о хорошей точности координатных измерений.

Орбита объекта расположена ниже высоты геостационарной орбиты. Необходимо отметить, что средним движением $1,019$ об/сут и близкими к элементам орбиты объекта 95334 значениями обладают также фрагменты разрушения ступени Transtage 3С, из чего можно предположить, что 95334 является одним из фрагментов семейства обломков этой

Таблица 1. Параметры орбиты объекта 95334.

Дата	16.10.2009
UT	$00^h 00^m 00^s$
a	41715.137 ± 0.020 км
e	$0,029916301^\circ \pm 0.00001$
i	$14.005113^\circ \pm 0.0002^\circ$
Ω	$347.868781^\circ \pm 0.0002^\circ$
ω	$163.477533^\circ \pm 0.003^\circ$
M	$307.308140^\circ \pm 0.003^\circ$
A/m	2.2206 ± 0.005 м ² /кг

ракеты-носителя [4]. Орбитальные данные фрагментов Transtage 3C для сравнения были взяты из каталога NORAD [5].

Результаты прогноза движения объекта показали, что с периодом два месяца объект появляется в поле зрения пункта наблюдений. Время доступности объекта для наблюдений составляет несколько суток.

На основании проведённых наблюдений нами был сделан прогноз эволюции элементов орбиты объекта до конца 2016 г., что показано на Рис. 2. Можно отметить значительные колебания эксцентриситета и уменьшение угла наклона орбиты. Основной период изменения этих элементов равен примерно одному году. Как видно из Рис. 2, амплитуда изменения большой полуоси составляет 5 километров, амплитуда изменения эксцентриситета орбиты превышает величину 0.024.

Эффективность выполненных исследований заключается в высокой точности измерений и в том факте, что обнаруженный объект не был потерян после его открытия. Оценка отношения средней площади к массе определена на основе измеренных положений и составляет значительную величину, равную приблизительно 2.2 м²/кг (см. Табл. 1). Это значение определяет особенности эволюции параметров движения объекта, связанные со значительными возмущениями, обусловленными силой светового давления.

Далее в третьей главе приведены результаты анализа движения объекта 95633 на ВЭО, открытого на Звенигородской обсерватории. Сеанс наблюдений на Терсколе позволил выявить быстрые изменения блеска с амплитудой около трёх звёздных величин. На Рис. 3 приведены результаты прогноза эволюции параметров орбиты объекта 95633 до марта 2018

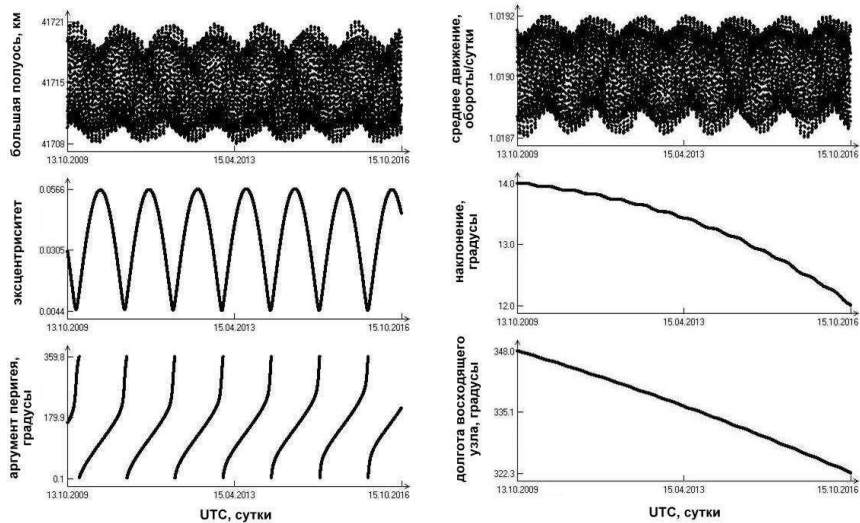


Рис. 2. Эволюция элементов орбиты объекта 95334 до 2016 года.

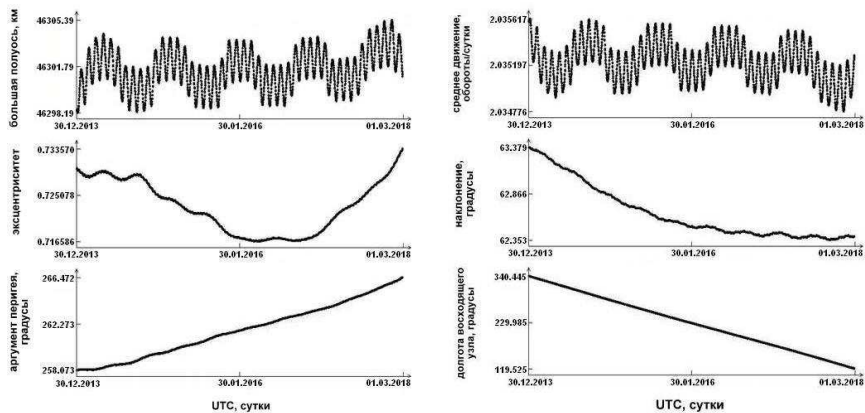


Рис. 3. Эволюция элементов орбиты объекта 95633 до 2018 года.

года. Было выявлено достижение критического значения эксцентриситета $e = 0.75$ к началу 2018 года, когда исследуемый объект в точке перигея начнёт задевать плотные слои атмосферы.

Также в третьей главе приведены результаты исследования неизвестных объектов, обнаруженных нами в 2015 году. Показано, что некоторые из новых объектов являются последствиями разрушений на ГСО разгонного блока Transtage и спутника связи «Экран-2». Орбитальные данные известных фрагментов разрушений этих аппаратов взяты из базы параметров движения NORAD.

Глава 4 посвящена исследованию влияния негравитационных возмущений на орбитальное движение и эволюцию орбит фрагментов космического мусора. Исследовано поступательно-вращательное движение малоразмерного фрагмента КМ в геостационарной области.

Объект 90073, выбранный нами для исследований, является малоразмерным фрагментом космического аппарата Fengyun 2D (международный номер 2006-053A), движется в режиме либрации вокруг точки 75° в. д. с малой амплитудой и периодом либрации 748 суток и обладает переменным значением отношения площади миделева сечения к массе с максимальным значением около $0.18 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Для анализа нами были использованы измеренные топоцентрические положения и блеск объекта 90073 за двенадцать сессий с 2009 по 2014 годы.

На основе двух специальных рядов измерений блеска, выполненных в ноябре 2014 г., была получена предварительная оценка периода собственного вращения объекта. Продолжительность каждого ряда наблюдений была равна двадцати минутам, частота измерений от пяти до восьми значений за минуту. Предварительная оценка периода вращения составила 4.0 ± 0.5 минуты. Были установлены переменность оценки величины A/m и отрицательная корреляция между этой величиной и средними значениями блеска объекта. Этот факт подтверждает достоверность полученных результатов: объект тем ярче, чем больше оценка средней площади миделева сечения.

Кроме того, значение эксцентриситета орбиты в среднем возрастает. Иллюстрация этого факта представлена на Рис. 4. График эволюции эксцентриситета орбиты включает данные NORAD (точки) и результаты обработки наших наблюдений (квадраты). Каждый квадрат, обозначающий данные наших наблюдений, содержит в себе значения эксцентриситета, полученные в течение одной сессии наблюдений, включающей в себя измерения в течение 5-12 ночей. Период вариаций эксцентриситета изменяется около величины, немного превышающей один год.

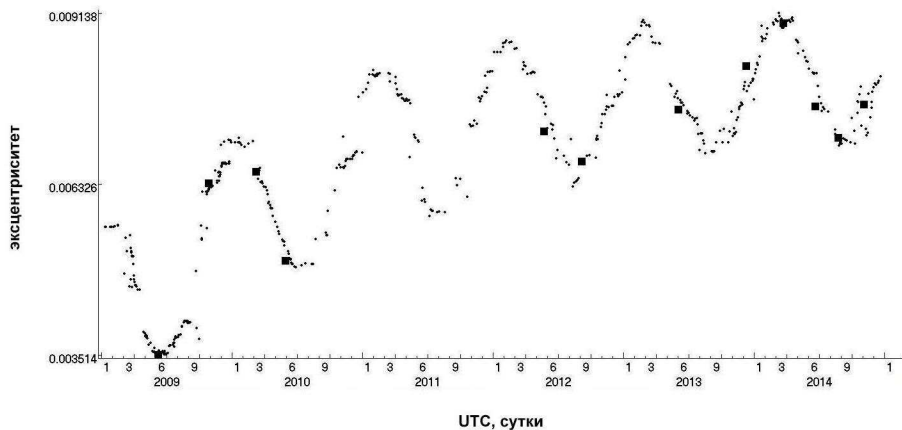


Рис. 4. Эволюция эксцентриситета орбиты объекта 90073 с 2009 г. по ноябрь 2014 г.

Только между двумя сессиями 2009 г. значение эксцентриситета орбиты увеличилось на 0.0028. Такое большое изменение указывает на действие светового давления. Неравенства в величине эксцентриситета орбиты, обусловленные суммарным влиянием Луны и Солнца, существенно меньше [6].

Факт возрастания эксцентриситета орбиты объекта на Рис. 4 получает следующее объяснение. Видно, что на восходящей ветви графика среднее значение отношения A/m больше, чем на нисходящей ветви. Таким образом, на восходящей ветви световое давление приводит к увеличению значения эксцентриситета, уменьшение этой величины на нисходящей ветви не может компенсировать полученное приращение.

Анализ долгопериодических изменений численных значений A/m позволяет выделить период, равный 392 суткам. Последние пять сессий наблюдений, проведенные за 11 месяцев, показали, что на интервале одного периода существует два максимума и два минимума, отличных друг от друга по величине (см. Рис. 5). Была поставлена задача построения модели изменения параметра на всем интервале измерений.

Было сделано важное упрощающее предположение: вариации отношения площади миделева сечения к массе объекта можно аппроксимировать гладкой функцией. Модель вариаций численных значений параметра A/m представлена точками на Рис. 5. Квадратами на графике

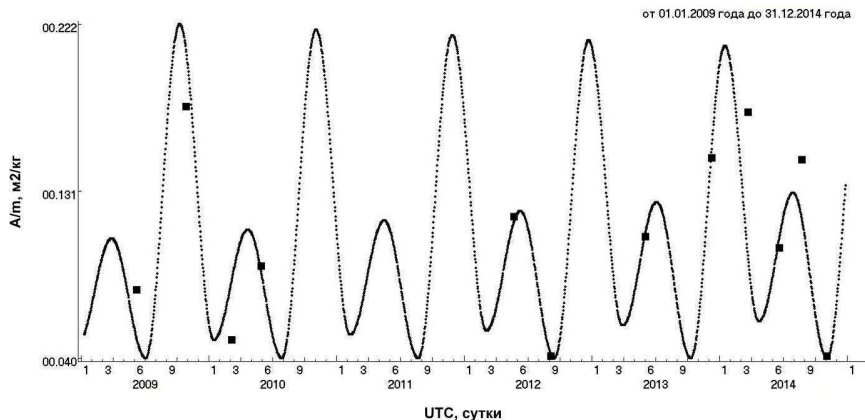


Рис. 5. Модель вариаций величины отношения A/m для объекта 90073.

отмечены величины, полученные в результате обработки наблюдений отдельных сессий.

На интервале одного периода, равного 392 дням, модель была составлена из четырёх кривых. Каждая кривая является частью синусоиды, имеющей период 196 суток. Минимальные и максимальные значения были найдены в результате последовательных приближений. Параметры модели удовлетворяют двум условиям: качественному соответствию прогнозируемых параметров движения данным NORAD и количественному соответствию результатам обработки измеренных топоцентрических положений.

В Табл. 2 представлены параметры модели на интервале времени от 12.10.2013 до 08.11.2014 (от 56577 до 56969 в модифицированных юлианских днях). Общий интервал продолжительностью 392 дня разделён на четыре интервала по 98 дней. Величины u_i и v_i соответствуют началу и концу короткого интервала. Величина t_i соответствует середине интервала, a_i — приближённое значение параметра A/m в момент t_i , A_i — амплитуда восходящей или нисходящей ветви синусоиды.

В результате для вычисления параметра A/m на интервале одного периода, равного 392 суткам, получена следующая аппроксимирующая формула:

$$\frac{A}{m} = a_i + A_i \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t - t_i}{v_i - u_i}\right). \quad (2)$$

Таблица 2. Параметры модели вариаций величины отношения A/m для объекта 90073.

Параметры	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
u_i , дни	56577	56675	56773	56871
v_i , дни	56675	56773	56871	56969
t_i , дни	56626	56724	56822	56920
a_i , м ² /кг	0.125	0.130	0.080	0.075
\dot{a}_i , м ² /кг	-0.0015	0.0002	0.004	0.0025
A_i , м ² /кг	0.085	-0.080	0.030	-0.035
\dot{A}_i , м ² /кг	-0.0015	0.003	0.0015	-0.025

Для другого большого интервала времени к значениям u_i , v_i и t_i надо добавить или от этих значений отнять число, кратное 392 суткам. Параметры a_i и A_i на другом интервале вычисляются с помощью величин \dot{a}_i и \dot{A}_i (Табл. 2). Например, интервал 55489 – 55885 в модифицированных юлианских днях отстоит от основного интервала на три периода назад по времени, в этом случае $a_i^{-3} = a_i - 3 \cdot 396 \cdot \dot{a}_i$ и $A_i^{-3} = A_i - 3 \cdot 396 \cdot \dot{A}_i$.

Предлагаемая модель периодических вариаций величины A/m проясняет детали вращательного движения объекта. Малоразмерный объект неправильной формы вращается вокруг оси с наибольшим моментом инерции и совершает около 350 оборотов за сутки. В результате сохраняется ориентация объекта в пространстве. Минимальные значения величины отношения A/m соответствуют таким положениям объекта, когда Солнце освещает меньшую часть поверхности. Далее угол между осью вращения, сохраняющей свою ориентацию в пространстве, и направлением на Солнце изменяется вследствие обращения Земли. Солнце освещает другие части поверхности спутника, площадь освещаемой поверхности возрастает, достигает наибольшего значения и начинает убывать.

Основной период модели не совпадает с периодом обращения Земли по причине прецессии оси вращения. Это явление приводит к двум эффектам: основной период вариаций величины отношения A/m превышает один год и амплитуда колебаний испытывает долгопериодические изменения. Для однозначного определения параметров прецессии необходимы дополнительные наблюдения.

В этом контексте модель вариаций параметра A/m можно считать эмпирической моделью вращательного движения объекта. Без учёта ва-

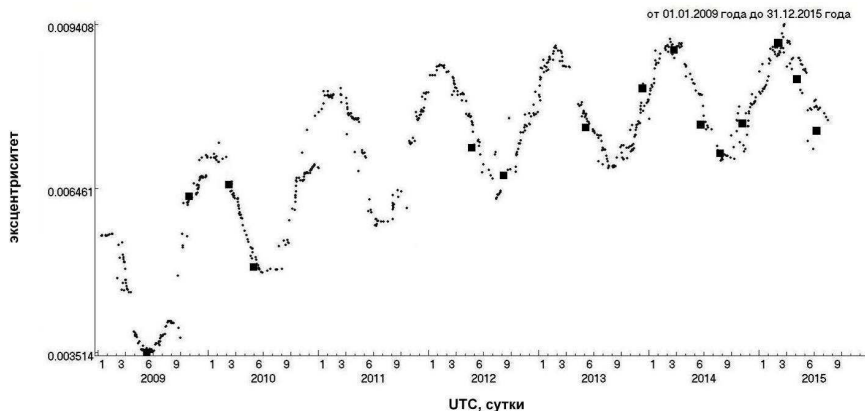


Рис. 6. Эволюция эксцентриситета орбиты объекта 90073 с июня 2009 г. по июль 2015 г.

риаций A/m прогноз поступательного движения на интервале наблюдений приводит к большим отклонениям по положению.

В начале марта 2015 г. в обсерватории на пике Терскол нами был получен контрольный ряд наблюдений исследуемого объекта. Контрольный массив включает в себя 578 измерений положений за три ночи наблюдений, в том числе и 168 измерений блеска объекта в течение 20 минут.

При прогнозе были использованы предлагаемая модель вариаций отношения площади миделева сечения к массе объекта и начальные параметры поступательного движения, полученные на основе всей совокупности предыдущих наблюдений. Оценка периода вращения объекта, полученная на этом материале, совпадает с предварительной оценкой. Абсолютная величина максимальных отклонений по прямому восхождению измеренных положений от прогнозируемых значений составляет $|\Delta\alpha_{max}| \approx 1300.0''$. Прогноз параметра A/m отличается от вычисленной оценки этой величины приблизительно на 4%.

Далее в четвёртой главе приведены результаты новых наблюдений объекта 90073, осуществленных нами в 2015 году (в мае и в июле). На Рис. 6 на график наблюдательных значений эксцентриситета нанесены последние данные наблюдений 2015 года.

На Рис. 7 представлен обновлённый график модели вариаций величины отношения A/m для объекта 90073. Добавлены данные обработки

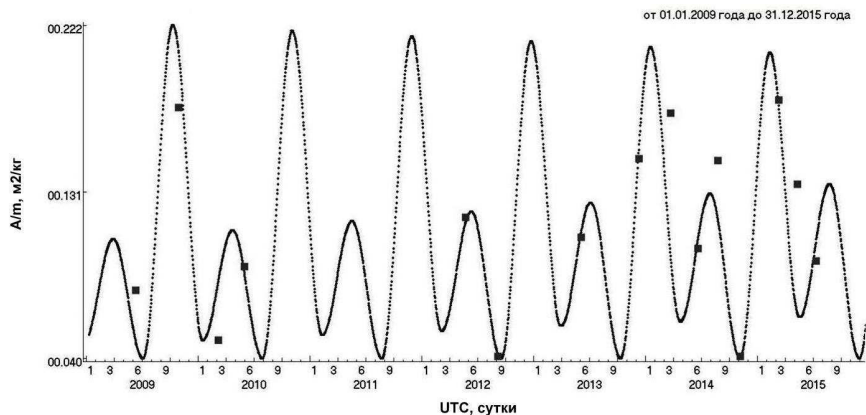


Рис. 7. Модель изменения величины A/m для объекта 90073 с июня 2009 г. по июль 2015 г.

трёх наблюдательных сеансов в 2015 году (в марте, мае и июле). По оси абсцисс отложено время наблюдений в годах, по оси ординат — значения A/m в м²/кг.

Модель, предложенная в четвёртой главе диссертации, позволяет сделать вывод о том, что исследуемый объект относится к классу быстро вращающихся фрагментов космического мусора на геосинхронной орбите. Для определения параметров вращения необходимы как проведение новых наблюдений, так и моделирование вращательного движения объекта неправильной формы в гравитационном поле Земли с учётом светового давления.

В Заключение суммированы основные результаты работы. Отмечены направления дальнейшей работы по теме диссертации.

Основные результаты диссертации:

1. В течение шести лет на телескопах Звенигородской и Терскольской обсерваторий ИНАСАН проведены наблюдения объектов космического мусора в геостационарной области и на высокоэллиптических орбитах. Полученные измерения координат соответствуют точности, необходимой для изучения долгосрочной орбитальной эволюции объектов. Обработка результатов наблюдений позволила получить массив физических и орбитальных характеристик малораз-

мерных объектов космического мусора сложной формы на высоких орбитах. Наблюдательный каталог объектов космического мусора используется для последующего сопровождения и уточнения их орбитальных параметров.

2. Во время наблюдений на комплексе телескопа Zeiss-2000 ТФ ИНАСАН были обнаружены новые, ранее не каталогизированные объекты. Результаты анализа впервые наблюдавшихся малоразмерных объектов космического мусора показали, что среди новых фрагментов есть неизвестные ранее обломки разрушений разгонного блока Transtage и спутника связи «Экран-2».
3. Проведено исследование поступательно-вращательного движения объекта космического мусора с большим отношением площади миделева сечения к массе, измерения координат и оценок блеска которого были получены в течение шести лет наблюдений на телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории. Установлен наблюдательный факт возрастания эксцентриситета орбиты объекта, который был объяснён влиянием светового давления. Показано, что для долговременного прогноза орбиты необходимы регулярные наблюдения для уточнения величины эксцентриситета.
4. Сделан вывод о вариативности величины отношения площади миделева сечения для объекта сложной формы на высокой орбите. Построена модель изменения величины отношения площади миделева сечения к массе, на основе которой были выявлены особенности вращательного движения объекта. С учётом новых данных была уточнена используемая численно-аналитическая модель движения ИСЗ и космического мусора. Показано, что учёт изменения величины отношения площади миделева сечения к массе позволяет более точно прогнозировать параметры орбиты объекта.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] *Левкина П. А.* Результаты наблюдений космических объектов в астрономической обсерватории на пике Терскол // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2010. Вып. 3. № 6. С. 45–47.
- [A2] *Бахтигараев Н. С., Левкина П. А., Сергеев А. В., Чазов В. В.* Наблюдение неизвестного фрагмента космического мусора в Терскольской обсерватории // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 6(39). С. 186–190.
- [A3] *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.
- [A4] *Бахтигараев Н. С., Левкина П. А., Рыжлова Л. В., Сергеев А. В., Тарадий В. К., Карпов Н. В., Чазов В. В.* Исследование космического мусора в Терскольской обсерватории. Физика и кинематика небесных тел // Кинематика и физика небесных тел. 2016. Т. 32. № 5. С. 34–39.
- [A5] *Бахтигараев Н. С., Левкина П. А., Рыжлова Л. В., Чазов В. В., Сергеев А. В., Карпов Н. В.* Характеристики малоразмерных фрагментов космического мусора по наблюдениям в Терскольской обсерватории // Кинематика и физика небесных тел. 2016. Т. 32. №5. С. 40–44.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] *Левкина П. А., Бахтигараев Н. С., Чазов В. В.* Наблюдение малоразмерного космического мусора в Терскольской обсерватории в 2011 году // Труды 41-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. С. 246.
- [B2] *Левкина П. А., Бахтигараев Н. С., Чазов В. В.* Результаты оптических наблюдений фрагментов космического мусора в 2012 году // Труды 41-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2013. С. 177.

- [B3] *Левкина П. А., Бахтигараев Н. С., Сергеев А. В., Чазов В. В.* Результаты фотометрических и позиционных наблюдений фрагментов космического мусора в обсерватории на пике Терскол // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове, № 220. Труды Всероссийской астрометрической конференции «ПУЛКОВО–2012». Санкт-Петербург, 2013. С. 47–52.
- [B4] *Levkina P., Bakhtigaraev N., Sergeev A., Chazov V.* Determination of physical characteristics of small-size space debris in GEO // Труды 6-й Европейской конференции по космическому мусору. Дармштадт, 22–25 апреля 2013. (ESA SP-723, August 2013).
- [B5] *Левкина П. А.* Исследование космического мусора в геостационарной области // Труды 5-й ежегодной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов Центра управления полётами. Королёв, ЦНИИмаш, 2015. С. 266–272.
- [B6] *Левкина П. А., Бахтигараев Н. С., Чазов В. В.* Поступательно-вращательное движение малоразмерных фрагментов космического мусора в геостационарной области по наблюдениям в Терскольской обсерватории // Материалы научно-технической конференции «Иосифьяновские чтения–2015». Истра: АО «НИИЭМ», 2015. С. 178–179.
- [B7] *Левкина П. А.* Характеристики малоразмерных фрагментов космического мусора в геостационарной области по данным оптических наблюдений в 2014—2015 гг. // Труды 45-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. С. 222.
- [B8] *Левкина П. А., Бахтигараев Н. С., Чазов В. В.* Результаты наблюдений неизвестных фрагментов космического мусора в геостационарной области // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове, № 223. Труды Всероссийской астрометрической конференции «ПУЛКОВО–2015». Санкт-Петербург, 2016. С. 33–38.

Цитируемая литература

1. Аксенов Е. П. Теория движения искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1977. – 360 с.
2. Чазов В. В. Основные алгоритмы численно-аналитической теории движения искусственных спутников Земли // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга. – 2000. – Т.68. – С. 5-22.
3. Поляхова Е. Н. Космический полёт с солнечным парусом: проблемы и перспективы. – М.: Наука, 1986. – 304 с.
4. Бахтигараев Н. С., Левкина П. А., Сергеев А. В., Чазов В. В. Наблюдение неизвестного фрагмента космического мусора в Терскольской обсерватории // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 6(39). С. 186–190.
5. Vallado D., Crawford P., Hujdak R., Kelso T. AIAA paper №2006-6753 [Electronic resource] // Revisiting Spacetrack Report № 3. American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2006. – Режим доступа : (<http://celestrak.com/publications/AIAA/2006-6753/>) – Загл. с экрана.
6. Киладзе Р. И., Сочилина А. С. Теория движения геостационарных спутников. – СПб.: ООО "ВВМ 2008. – 132 с.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Рыхловой Лидии Васильевне; Бахтигараеву Наилю Сагитовичу и Чазову Вадиму Викторовичу – за бесценное сотрудничество и помощь; всем сотрудникам обсерватории на пике Терскол и лично Сергееву Александру Васильевичу – за помощь в организации наблюдений и ценные советы; Куприянову Владимиру Викторовичу – за помощь в работе с программным обеспечением.