

УДК 521.9:521.13,521.16

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОБЛАСТИ

© 2016 г. Н. С. Бахтигараев¹, П. А. Левкина¹, В. В. Чазов²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
e-mail: nail@inasan.ru, ayvazovskaya@inasan.ru, vadimchazov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2015 г.

В обсерватории Терскольского филиала ИНАСАН (Кабардино-Балкария) ведутся регулярные оптические наблюдения малоразмерных фрагментов космического мусора на геосинхронной орбите. Задачи наблюдений: получение данных о техногенном загрязнении околоземного космического пространства; обнаружение, определение физических характеристик и каталогизация малоразмерных фрагментов космического мусора; поддержание каталогов орбит. Представлены результаты обработки топоцентрических измерений положений одного из таких объектов. Этот объект интересен тем, что он является малоразмерным фрагментом космического аппарата Fengyun 2D (международный номер 2006-053A) и движется вокруг точки либрации 75° в.д. с малой амплитудой. Наблюдательный материал состоял из 12 двухнедельных сессий на интервале 6 лет с 2009 по 2014 гг. Выявлена переменность отношения средней площади миделева сечения к массе объекта и предложена модель вариаций этого параметра. Основной период вариаций равен 392 сут. Достоверность модели была проверена рядом независимых наблюдений в марте 2015 г. Исследования выполнены в рамках международной программы “Астрономия в Приэльбрусье” (<http://www.inasan.ru/rus/terskol/research.html>).

Ключевые слова: геостационарная область, отношение площадь-масса, световое давление, эволюция эксцентриситета.

DOI: 10.7868/S0320930X1602002X

ВВЕДЕНИЕ

В продолжение нескольких лет в обсерватории на пике Терскол (Терскольский филиал ИНАСАН) проводятся позиционные и фотометрические наблюдения космического мусора в геостационарной области. Массив наблюдательных данных, использованных в настоящей работе, был получен на телескопе Цейсс-2000 с диаметром зеркала 2 м и фокусным расстоянием 16 м. Этот телескоп был установлен НАН Украины в 1996 г. (Tarady, Yatskiv, 1997).

Наблюдения выполнялись сессиями 2–4 раза в год. Продолжительность сессий не превышала двух недель. При наблюдениях использовались эфемериды, вычисленные на основе каталога элементов орбит (Хуторовский, 1993). Для некоторых объектов параметры движения в формате “двустрочных элементов” орбиты (Hoots, Roehrich, 1980) есть также в базе данных NASA (www.space-track.org).

Для предварительной редукции изображений и синхронизации со службой времени использовались программный модуль CameraControl и комплекс Арх II, разработанные в Пулковской обсерватории РАН (Девяткин и др., 2010).

При хорошем состоянии неба в течение ночи последовательно проводились сеансы наблюдений фрагментов космического мусора. За ночь выполнялись несколько коротких сеансов наблюдений избранных объектов. После предварительной редукции для каждого измерения были получены момент времени, топоцентрические прямое восхождение и склонение объекта в стандартной небесной системе координат и оценка блеска в интегральных звездных величинах.

На материале каждой из сессий с помощью метода дифференциального уточнения орбит (Бахтигараев, Чазов, 2005) вычислялись мгновенные параметры движения объектов. Для некоторых фрагментов получены оценки отношения площади миделева сечения A к массе спутника m . Величина отношения A/m измеряется в $\text{м}^2/\text{кг}$.

Результаты обработки измерений одной из сессий представлены в статье (Левкина и др., 2013). В процессе наблюдений регулярно обнаруживаются объекты, отсутствующие в каталоге, и вычисляются параметры их движения (Бахтигараев и др., 2011).

Таблица 1. Наблюдательный материал и результаты обработки

Дата сессии	T	n	N	σ , угл. с	Блеск, зв. вел.	A/m , м ² /кг	e	i , град	L , град
02.06.2009	11	6	187	0.66	18.4	0.077	0.00352	0.337	78.0
21.10.2009	7	4	119	0.98	16.6	0.177	0.00633	0.148	66.0
01.03.2010	1	1	23	0.45	17.3	0.050	0.00653	0.422	66.0
26.05.2010	1	2	24	0.26	17.7	0.090	0.00505	0.583	73.0
22.05.2012	11	4	105	0.59	17.8	0.117	0.00722	2.289	69.0
04.09.2012	7	5	97	1.35	18.1	0.041	0.00666	2.537	80.0
04.06.2013	10	8	325	0.48	17.9	0.106	0.00758	3.123	79.0
11.12.2013	8	6	329	0.66	17.2	0.149	0.00822	3.526	64.0
25.03.2014	10	5	142	1.93	17.3	0.174	0.00896	3.730	64.0
24.06.2014	11	7	237	0.48	17.8	0.100	0.00760	3.934	70.0
28.08.2014	10	8	239	1.61	17.6	0.149	0.00709	4.054	78.0
08.11.2014	5	5	507	1.22	18.1	0.041	0.00758	4.174	84.0

В данной статье на материале многолетних наблюдений малоразмерного объекта № 90073 (в соответствии с нумерацией в динамической базе данных космических объектов Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ РАН)) построены модель поступательного движения и модель вариаций отношения площади миделевого сечения к массе. Эти результаты являются важными для дальнейшей разработки модели поступательно-вращательного движения объектов космического мусора.

ИССЛЕДУЕМЫЙ ОБЪЕКТ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В каталоге элементов орбит космических объектов геостационарной области объект № 90073 появился в 2007 г. Тогда же сотрудниками Баллистического центра ИПМ РАН было установлено, что этот объект является фрагментом космического аппарата Fengyun 2D (номер 29640 в каталоге NORAD, международный номер 2006-053A). Аппарат был изготовлен в Китайской народной республике и выведен на геостационарную орбиту в декабре 2006 г. в точку стояния 86.5° в.д.

Фрагмент космического мусора № 90073 появился в каталоге NORAD с именем Fengyun 2D Deb и номером 33458 (0605304) в конце 2008 г. Анализ массива параметров движения из динамической базы данных NORAD показал, что этот объект находится в режиме либрации относительно точки 75.2° в.д. с амплитудой 17.4° и периодом либрации 748 сут. Отметим сразу, что прогноз положений объекта, вычисленный на основе элементов орбиты по нашим позиционным наблюдениям, подтвердил факт либрации с указанными значениями амплитуды и периода.

Для анализа были использованы измеренные топоцентрические положения и блеск объекта

№ 90073 за двенадцать сессий с 2009 по 2014 гг. Основные данные наблюдений и результаты дифференциального улучшения параметров движения представлены в табл. 1. Символом T обозначен интервал наблюдений в сутках, n — количество вечеров наблюдений, N — общее число положений и оценок блеска объекта.

В колонке σ содержатся значения средних квадратических погрешностей одного измерения в секундах дуги. В графе “блеск” приводится среднее арифметическое значение измеренной интегральной звездной величины объекта для всех наблюдений данной сессии. При вычислении среднего значения эффект фазы не учитывался, так как форма поверхности объекта неизвестна. Оценки значения отношения A/m (м²/кг) в случаях, когда количество наблюдательных ночей меньше трех, являются ненадежными. При работе с материалом каждой сессии значение параметра A/m принималось постоянным. В восьмой и девятой колонках даны, соответственно, значения эксцентриситета и угла наклона орбиты в градусах на эпоху наблюдений. В колонке L приводятся средние за сессию значения восточной долготы в градусах в момент пересечения экватора.

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 мин.

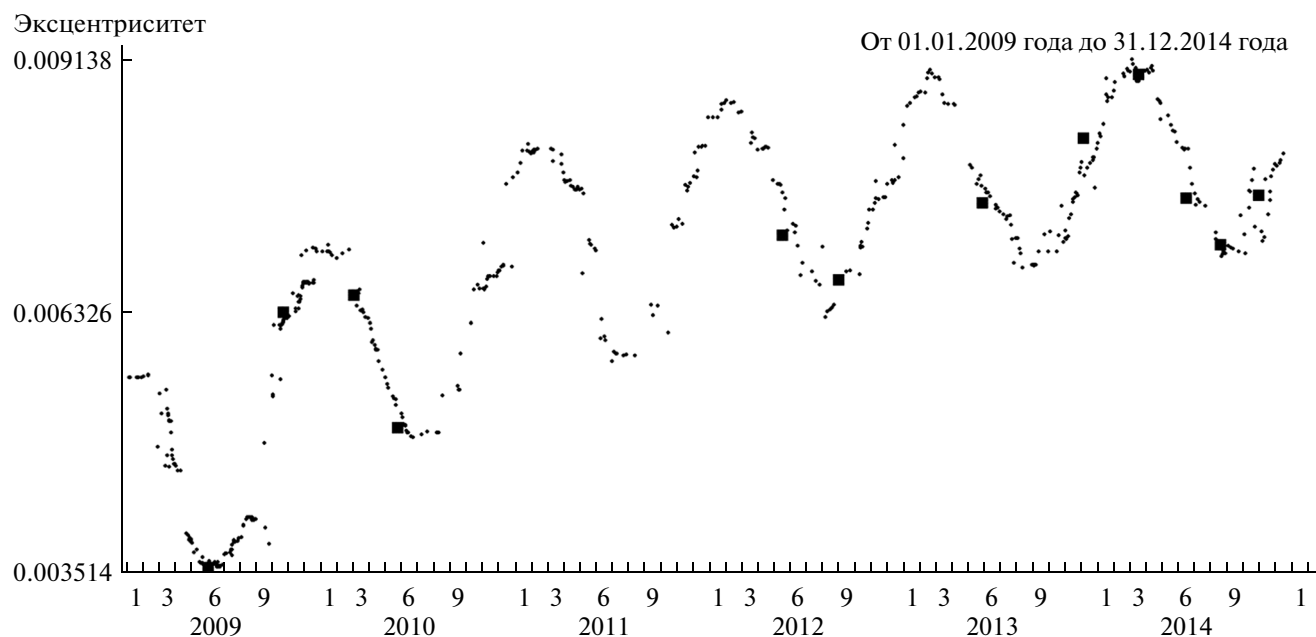


Рис. 1. Эволюция эксцентриситета орбиты.

ЭВОЛЮЦИЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ОРБИТЫ ОБЪЕКТА

Данные табл. 1 показывают, во-первых, переменность оценки величины A/m и отрицательную корреляцию между этой величиной и средними значениями блеска объекта. Этот факт подтверждает достоверность полученных результатов: объект тем ярче, чем больше оценка средней площади миделева сечения.

Во-вторых, даже наименьшее значение оценки величины A/m , равное $0.04 \text{ м}^2/\text{кг}$, превышает значение $0.03 \text{ м}^2/\text{кг}$, максимальное для функционирующих космических аппаратов.

Третий аспект наиболее важен для дальнейшего анализа: значение эксцентриситета орбиты в среднем возрастает. Иллюстрация этого факта представлена на рис. 1. График эволюции эксцентриситета орбиты включает данные NORAD (точки) и результаты обработки наших наблюдений (квадраты). Период вариаций эксцентриситета изменяется около величины, немного превышающей один год.

Аналитические вычисления по формулам из монографии “Теория движения искусственных спутников Земли” (Аксенов, 1977) позволяют сделать следующие выводы:

- на исследуемом интервале возмущающее действие Луны и Солнца приводит к уменьшению значения эксцентриситета орбиты на величину, равную приблизительно 0.0005 за год (формула 7.6.4 на с. 223, долгопериодические возмущения второго класса, обусловленные притяжением Луны и Солнца);

- на геосинхронных орбитах для объектов с большой парусностью, т.е. при численных значениях $A/m > 0.05 \text{ м}^2/\text{кг}$, световое давление является существенным возмущающим фактором в эволюции эксцентриситета;

- при постоянном значении отношения A/m эксцентриситет орбиты изменяется с почти годовым периодом и постоянной амплитудой (формула 9.3.3 на с. 289, долгопериодические возмущения, обусловленные световым давлением).

В книге (Киладзе, Сочилина, 2008) на стр. 41 даны оценки возмущений в эксцентриситете орбиты геостационарных спутников, обусловленные притяжением Луны и действием солнечной радиации. Оценка амплитуды долгопериодических возмущений от Луны составляет 0.000269 . Для отношения площади миделева сечения к массе, равной $0.015 \text{ м}^2/\text{кг}$, получена оценка амплитуды годовых изменений эксцентриситета порядка 0.00015 . В нашем случае, как будет показано в следующем разделе статьи, величина изменения эксцентриситета на порядок больше.

В статье (Левкина и др., 2013) представлены графики эволюции элементов орбиты объекта с июня 2009 г. по октябрь 2012 г. (рис. 9 и рис. 10), полученные на основе численно-аналитической модели движения спутников с учетом действия всех возмущающих факторов (Бахтигараев, Чазов, 2005). На графиках даны результаты прогноза, выполненного в обратном направлении с начальными данными за сентябрь 2012 г. и постоянным значением отношения $A/m = 0.041$, а также приведены результаты прогноза с начальными

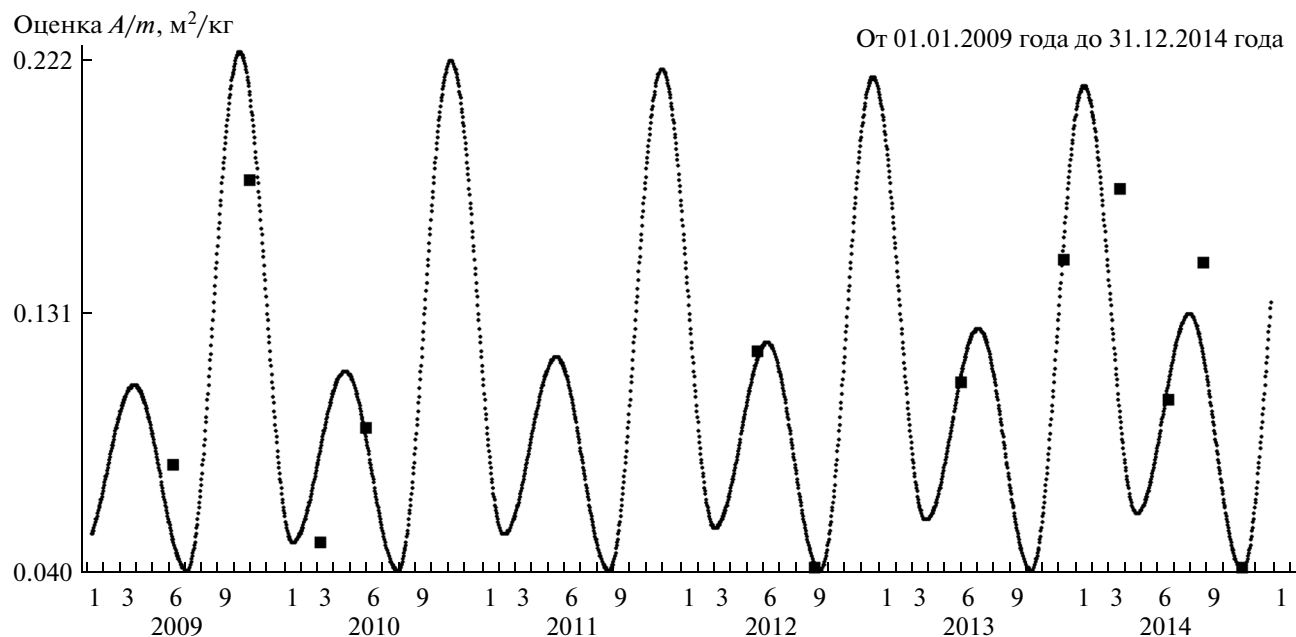


Рис. 2. Модель вариаций величины отношения A/m .

данными за июнь 2009 г. и величиной $A/m = 0.077$ (см. табл. 1 настоящей статьи). Оценка амплитуды вариаций эксцентриситета орбиты с периодом, равным одному году, для значения $A/m = 0.041$ составила 0.00049, а для величины $A/m = 0.077$ оказалась приблизительно равной 0.00092. Эти величины хорошо согласованы с предыдущими аналитическими оценками.

Из табл. 1 настоящей статьи следует, что 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.

На базе этих выводов наблюдательный факт возрастания эксцентриситета орбиты объекта на рис. 1 и в табл. 1 получает простое 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.

МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ОТНОШЕНИЯ ПЛОЩАДИ МИДЕЛЕВА СЕЧЕНИЯ К МАССЕ ОБЪЕКТА

Сравнительный анализ долгопериодических изменений численных значений A/m позволяет выделить период, равный 392 сут. Последние пять

сессий наблюдений, проведенные за 11 мес., показали, что на интервале одного периода существуют два максимума и два минимума. Оба максимума и оба минимума отличны друг от друга по величине. Этих данных оказалось достаточно, чтобы поставить задачу 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. 2. Квадратами на графике отмечены величины, полученные в результате обработки наблюдений отдельных сессий.

На интервале одного периода, равного 392 дням, модель была составлена из четырех кривых. Каждая кривая является частью синусоиды, имеющей период 196 сут. В модели использованы две восходящие ветви двух синусоид, от минимума к максимуму, и две нисходящие ветви двух синусоид, от максимума к минимуму. Минимальные и максимальные значения были найдены в результате последовательных приближений. Одно приближение включало в себя конкретные параметры модели и прогноз параметров движения объекта на всем исследуемом интервале. Выбор параметров модели был завершён после выполнения двух условий: когда были достигнуты качественное соответствие прогнозируемых параметров движения данным NORAD и количественное соответствие результатам обработки измеренных топоцентрических положений. На интервале сравнения максимальные

Таблица 2. Параметры модели вариаций величины отношения A/m

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

отклонения по прямому восхождению для каждой сессии не превышали величины $|\Delta\alpha_{\max}| \approx 2200''$.

В табл. 2 представлены параметры модели на интервале времени от 12.10.2013 г. до 08.11.2014 г. (от 56577 до 56969 в модифицированных юлианских днях). Общий интервал продолжительностью 392 дня разделен 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 — приближенное 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:

$$\frac{A}{m} = a_i + A_i \sin\left(\pi \frac{t - t_i}{v_i - u_i}\right). \quad (1)$$

Для другого большого интервала времени к значениям u_i , v_i и t_i надо добавить или от этих значений отнять число, кратное 392 сут. 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 $a_i^{-3} = a_i - 3 \times 396\dot{a}_i$ и $A_i^{-3} = A_i - 3 \times 396\dot{A}_i$.

Таблица 3. Контрольный наблюдательный материал

Дата сессии	T	n	N	σ , угл. с	Блеск, зв. вел.	A/m , м ² /кг	e	i , град	L , град
09.03.2015	5	3	578	1.06	16.7	0.180	0.00907	4.423	86.2
Прогноз	5	3	578	1300.0	16.7	0.187	0.00889	4.422	86.7

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МОДЕЛИ

Предлагаемая модель периодических вариаций величины A/m проясняет некоторые детали вращательного движения объекта. График на рис. 2 и предварительная оценка периода вращения объекта, составившая 4.0 ± 0.5 мин., могут быть интерпретированы следующим образом. Мало-размерный объект неправильной формы вращается вокруг оси с наибольшим моментом инерции и совершает около 350 оборотов за сутки. Ось вращения подвержена явлению прецессии. Угол между осью вращения и направлением на Солнце изменяется вследствие обращения Земли. В результате эффективная площадь той части поверхности объекта, которая отражает световой поток, является переменной величиной. Основной период модели не совпадает с периодом обращения Земли по причине прецессии оси вращения. Для однозначного определения параметров прецессии необходимы дополнительные наблюдения.

В этом контексте модель вариаций параметра A/m можно считать эмпирической моделью вращательного движения объекта. Без учета вариаций 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. Материал использован для оценки точности предлагаемой модели, результаты обработки представлены в табл. 3. Обозначения те же, что и в табл. 1.

Данные первой строки табл. 3 относятся к новой сессии измерений и получены при тех же условиях и ограничениях, что и данные табл. 1 для каждой из предыдущих наблюдательных сессий. Во второй строке табл. 3 даны результаты прогноза движения объекта. 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. В графе σ значение $|\Delta\alpha_{\max}| \approx 1300.0''$ характеризует абсолютную величину максимальных отклонений по прямому восхождению измеренных положений от прогнозируемых значений. Прогноз параметра A/m отличается от вычисленной оценки этой величины приблизительно на 4%.

Контрольный массив включает в себя 578 измерений положений за три ночи наблюдений, в том числе и 168 измерений блеска объекта в течение 20 мин. Оценка периода вращения объекта, полученная на этом материале, совпадает с предварительной оценкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно констатировать, что в работе получены следующие результаты:

1. Выполнены оценки мгновенных параметров движения и величины отношения площади миделева сечения A к массе объекта m в двенадцати сессиях наблюдений.

2. Выявлено, что отношение площади миделева сечения к массе является переменной величиной с максимальным значением около $0.18 \text{ м}^2/\text{кг}$.

3. Установлен наблюдательный факт возрастания эксцентриситета орбиты, указывающий на то, что эволюция этого элемента орбиты обусловлена главным образом световым давлением. На качественном уровне явление получило объяснение в рамках вариаций параметра A/m .

4. Предложена модель периодических изменений параметра A/m : основной период составляет 392 дня. На этом интервале существуют два минимума и два максимума.

5. Сделано допущение о возможности аппроксимации вариаций A/m гладкой кривой и определены параметры модели изменения этой величины.

6. Определено, что разности измеренных и вычисленных положений объекта на всем интервале прогноза движения не превышают 0.7° .

Предлагаемая модель 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 учетом светового давления.

Авторы благодарят сотрудников Терскольской обсерватории за помощь в проведении наблюдений и Л.В. Рыхлову за ценные замечания при подготовке статьи к публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов Е.П. Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1977. 360 с.
- Бахтигараев Н.С., Чазов В.В. Информационное обеспечение космических экспериментов на основе численно-аналитической теории движения искусственных спутников Земли // Космич. исслед. 2005. Т. 43. № 5. С. 386–389.
- Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Сергеев А.В., Чазов В.В. Наблюдения неизвестного фрагмента космического мусора в Терскольской обсерватории // Вестн. Сибирского гос. аэрокосмического ун-та. 2011. Т. 39. № 6. С. 186–189.
- Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещagina И.А. Программные пакеты “АПЕКС-I” и “АПЕКС-II” для обработки астрономических ПЗС наблюдений // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 1. С. 74–87. (Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Koupriyanov V.V., Verestchagina I.A. Apex I and Apex II software packages for the reduction of astronomical CCD observations // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. № 1. P. 68–80.)
- 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 // Изв. Главной астрономической обсерватории в Пулкове. 2013. № 220. С. 47–52.
- Киладзе Р.И., Сочилина А.С. Теория движения геостационарных спутников. СПб. ООО “ВВМ”. 2008. 132 с.
- Хуторовский З.Н. Ведение каталога космических объектов // Космич. исслед. 1993. Т. 31. № 4. С. 101–114.
- Hoots F.R., Roehrich R.L. Models for Propagation of NORAD Element Sets // Spacetrack Report № 3: 1980. (<http://celestrak.com/NORAD/documentation/>).
- Tarady V., Yatskiv Ya. The new 2m RCC telescope in the Northern Caucasus for modern astronomical research // Astron. and Astrophys. Trans. 1997. № 13. P. 19–21.