

УДК 520.82.054 + 521.31

Н. И. Кошкин¹, Е. А. Коробейникова¹, В. В. Лопаченко², С. М. Меликянц¹,
С. Л. Страхова¹, Л. С. Шакун¹

¹ Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»

Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Одеса

² Національний центр управління та випробування космічних засобів
Державного космічного агентства України, Євпаторія

О ХАРАКТЕРЕ ДВИЖЕНИЯ МИКРОСПУТНИКА С ПАРУСОМ В АТМОСФЕРЕ («NanoSail-D»)

Розглянуто гальмування супутника з вітрилом у верхній атмосфері Землі, а також досліджено його рух навколо центра мас. У січні 2011 р. мікросупутник «NanoSail-D» розвернув вітрило і продовжив автономний політ на висоті 635 км. Очевидно, через швидке обертання вітрила час життя супутника на орбіті перевищить попередній прогноз (~100 діб) принаймні утричі. Фотометричні спостереження виявили регулярні коливання блиску з періодом декілька секунд. З травня по серпень 2011 р. кутова швидкість обертання вітрила плавно збільшувалась. Причиною цього була взаємодія з потоком частинок верхньої атмосфери, внаслідок чого він перейшов у режим розкручування, що знизило ефективність гальмування. Представлено результати моделювання зміни блиску і обертання супутника.

ВВЕДЕНИЕ

Микроспутник НАСА «NanoSail-D» вместе с пятью другими космическими аппаратами (КА), был запущен на низкую околоземную орбиту в ноябре 2010 г. Еще до полета он был назван «солнечный парус», хотя основным фактором воздействия на КА является разреженная верхняя атмосфера Земли. Аппарат предназначен для отработки технологий разворачивания в космосе дешевых и легких парусов для сведения отработавших свой срок космических объектов с низких орбит за счет дополнительного торможения в атмосфере [3]. Парус в таком случае действует как аэродинамический тормоз, постепенно замедляя скорость спутника и приближая к плотным слоям атмосферы, где он должен благополучно сгореть.

В момент отделения «NanoSail-D» от своего спутника-носителя FASTSAT выяснилось, что капсула «парусника» застряла. Недели безус-

пешных попыток освободить аппарат уменьшали надежду операторов на успех миссии. Однако 17 января случилось неожиданное: телеметрия ясно указывала на то, что КА вышел в открытый космос. 20 января «NanoSail-D» получил команду раскрыть парус, и спустя несколько секунд раздвижные направляющие вытянули квадрат тонкой серебристой светоотражающей пленки площадью около 10 м². До настоящего времени только один космический аппарат успешно раскрывал солнечный парус — это японский зонд IKAROS, который впервые в истории космонавтики использовал давление солнечного света в качестве основного движителя. Неожиданный счастливый поворот судьбы позволил космическому аппарату «NanoSail-D» также развернуть свой парус на высоте 650 км над поверхностью Земли. Это первый в истории космический аппарат с парусом, совершающий полет в атмосфере вокруг Земли. Он получил номер 37361 по каталогу НОРАД и международный номер 2010-062L.

Начальная орбита КА на 20 января 2011 г. составляла: высота над Землей — 650 км, среднее движение — 14.78, наклонение орбиты — 72°,

© Н. И. КОШКИН, Е. А. КОРОБЕЙНИКОВА,
В. В. ЛОПАЧЕНКО, С. М. МЕЛИКЯНЦ,
С. Л. СТРАХОВА, Л. С. ШАКУН, 2012

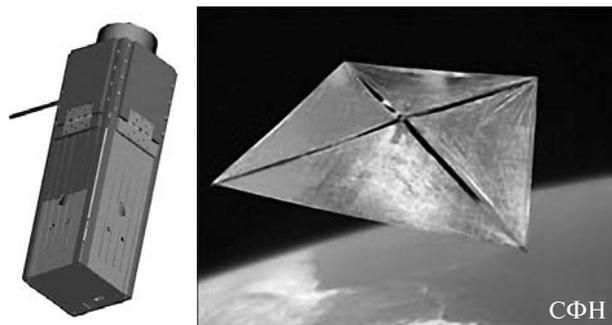


Рис. 1. Вид космического аппарата «NanoSail-D» до и после разворачивания паруса

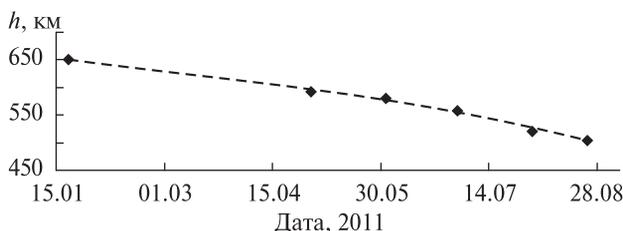


Рис. 2. Наблюдаемый темп снижения средней высоты полета космического аппарата «NanoSail-D»

эксцентриситет — 0.002. Форма паруса — четыре треугольные секции (рис. 1). Масса КА — 4 кг.

Прогнозировалась, что КА «NanoSail-D» через 70—120 сут после разворачивания паруса должен сгореть в атмосфере Земли [http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/11-010.html]. За это время необходимо было получить ценную информацию о взаимодействии паруса с атмосферой и проанализировать поведение КА. Однако по непонятным ведомственным причинам проект попал в разряд военных, и доступ к орбитальным данным КА «NanoSail-D» был ограничен — на сайте Space-track.org для гражданских пользователей этих данных нет. Вместе с тем проект был широко разрекламирован среди любителей на сайте spaceweather.com, для которых даже была объявлена денежная премия за наиболее удачные фотографии полета паруса.

Батареи «NanoSail-D» разрядились в течение нескольких дней, после чего сигнал радиомаяка был утерян. Но за это время радиолюбители успели записать радиопередачи со спутника. В дальнейшем осталась возможность только для

наблюдателей КА в оптическом диапазоне. Ожидалось, что «NanoSail-D» будет тусклым на протяжении большей части своей миссии, однако краткие вспышки яркости должны были сделать его видимым для невооруженного глаза. А по мере быстрого снижения высоты полета видимая яркость парусника должна была увеличиваться.

ОРБИТАЛЬНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «NANOSAIL-D»

На данный момент предполетный прогноз торможения КА оправдывается лишь в общем. К концу августа 2011 г. парусник снизился только до высоты 500 км (рис. 2).

Причину такого незначительного снижения орбиты полета КА авторы проекта видят в регулярном плоском вращении паруса вместо случайного его кувыркания или же стационарного полета с направленной вперед нормалью к средней плоскости паруса [http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html, http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2011/11-055.html]. Фактически это признание того, что параметры паруса не оптимальны, и вращение его не предусматривалось в проекте. Такая ситуация еще больше привлекает внимание к полету и торможению первого парусника, а также к характеру его вращения вокруг центра масс.

На рис. 3 показано изменение dn/dt среднего движения КА «NanoSail-D» (кривая 1) на наблюдаемом интервале времени по данным сайтов nanosaild.engr.scu.edu/dashboard/ и calsky.com (наблюдаемые и расчетные значения). Эта величина характеризует темп торможения, точнее снижения КА. Видим, что характерная величина dn/dt для паруса равна 0.001 и имеет тенденцию к увеличению со временем. Для сравнения приведен параметр dn/dt для другого КО 86052C на похожей орбите (кривая 2). Этот КО имеет существенно меньшее отношение площади поперечного сечения к массе объекта, вследствие чего скорость снижения его орбиты почти на два порядка ниже. Колебания величины dn/dt зависят прежде всего от вариаций плотности атмосферы на высоте полета КА и от возможного изменения средней площади проекции попереч-

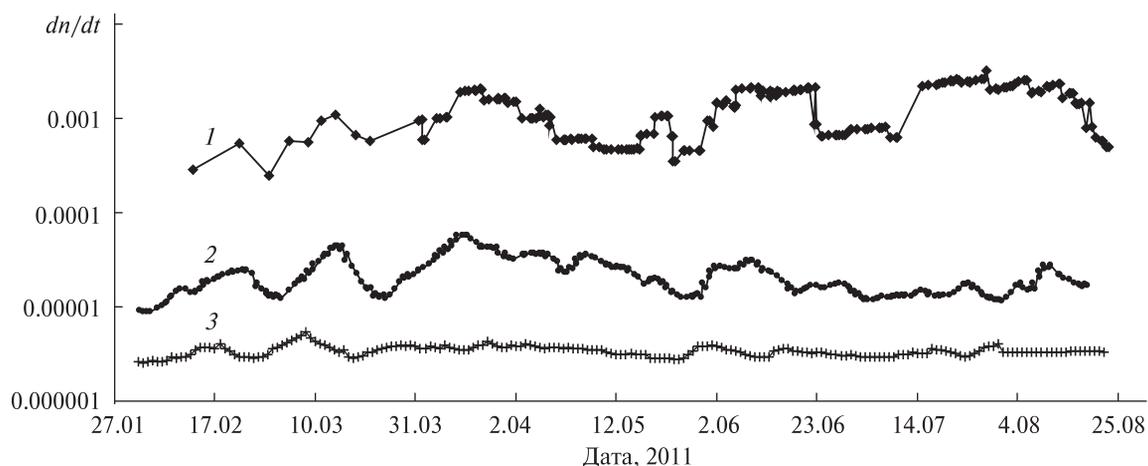


Рис. 3. Скорость dn/dt изменения среднего движения: 1 — КА «NanoSail-D», 2 — КА 86052C_SL-8Deb, кривая 3 — вариации потока $F_{10.7}$ радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см в относительных единицах

ного сечения КА по отношению к направлению его полета. Кривая 3 на рис. 3 дает представление о характере вариаций потока радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см (в относительных единицах) на рассматриваемом интервале времени.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «NANOSAIL-D»

Судить о кинематике вращения вокруг центра масс КА «NanoSail-D» можно на основе фотометрических наблюдений [1] на станциях Украинской сети оптических наблюдений и исследования спутников (УМОС) в Одессе (Астрономическая обсерватория Одесского университета) и в Евпатории (НЦУИКС). Первая кривая блеска была получена в Одессе (рис. 4, а) при неблагоприятных погодных условиях. Наблюдаемый блеск КА оставался почти постоянным и не давал оснований предполагать наличие быстрого вращения паруса.

Но уже через четыре дня 26 апреля в Евпатории в двух соседних прохождении были получены аperiодические колебания блеска «NanoSail-D» (рис. 4, б).

Фотометрические наблюдения КА «NanoSail-D», полученные в Одессе 6 июня (рис. 4, в), уже зафиксировали быструю переменность с амплитудой до одной звездной величины. Надежно определен фотометрический период около

5.3 с, в пределах которого четко видны 12 колебаний блеска.

По-видимому, в результате взаимодействия с потоком частиц верхней атмосферы спутник перешел в режим вращения около оси, которая не совпадает с осью симметрии. На рис. 4, г показана «средняя кривая» блеска «NanoSail-D» от 6 июня 2011 г. за восемь фотометрических периодов. Видно, что характер вариаций блеска на интервале около 1 мин не изменился.

Частотный спектр кривой блеска от 6 июня 2011 г. содержит несколько максимумов. Низкочастотная часть «частотограммы» показана на рис. 5.

На периодограмме и визуально на кривой блеска хорошо выделяется основной устойчивый период около 5.3 с (см. рис. 4, в и среднюю кривую на рис. 4, г). На этом интервале укладывается 12 равноотстоящих колебаний блеска (период около 0.44 с), соответствующие пики также хорошо выражены на периодограмме. Наибольший пик с периодом 1.31 сек составляет около четверти от основного, но он, как нам представляется, не соответствует физическому вращению КА. По-видимому, период 5.3 с является периодом быстрой прецессии оси вращения, а сам период вращения равен 1/3 от него, и на периодограмме выражен очень слабо в силу быстрого изменения амплитуды и среднего блеска КА за период.

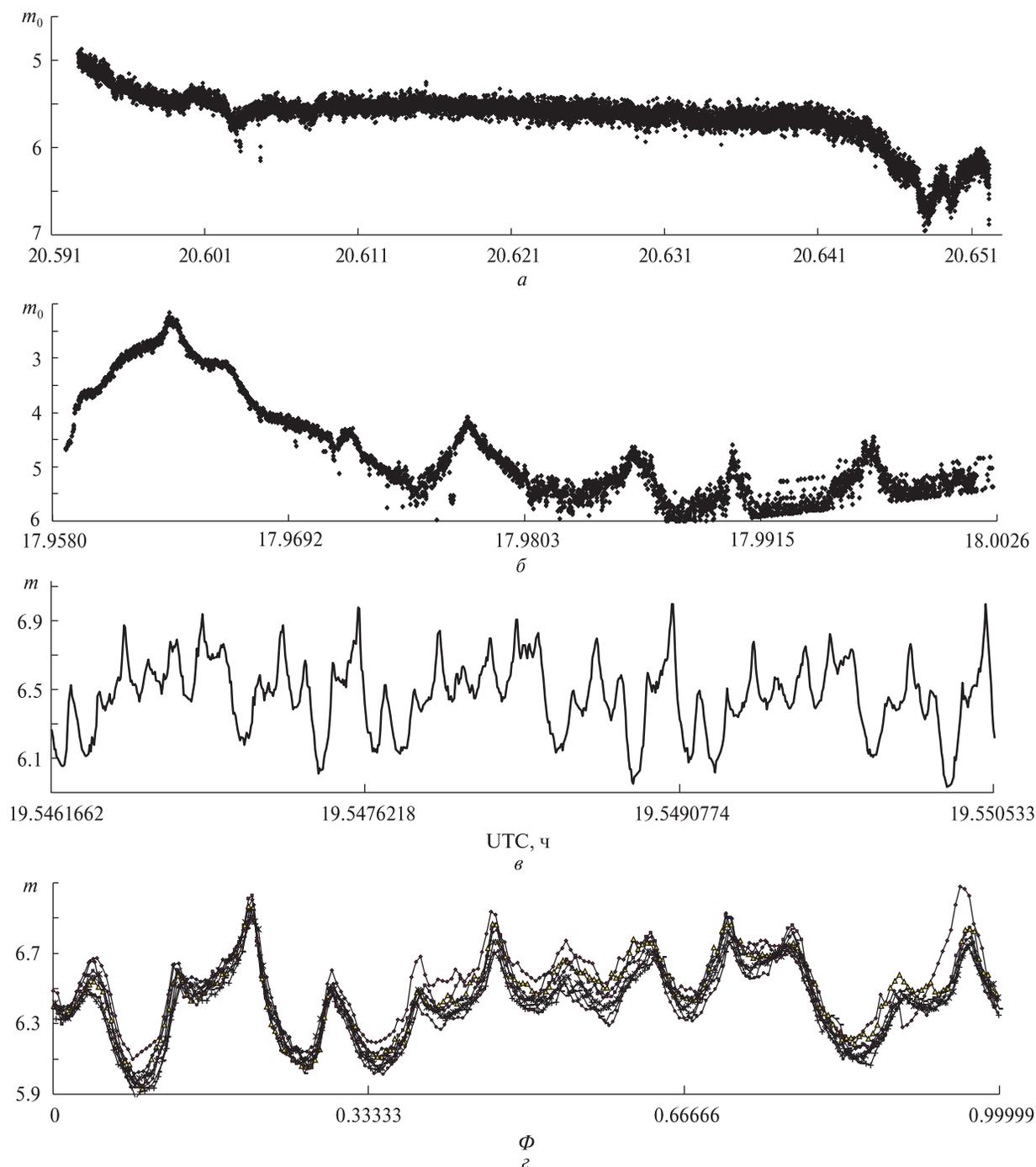


Рис. 4. Видимый блеск m_0 космического аппарата «NanoSail-D»: *a* — от 22 апреля 2011 г. (блеск — в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км); интервал наблюдений 3.6 мин (Одесса, телескоп КТ-50 с ТВ-ПЗС WAT-902H2 Sup), *б* — 26 апреля 2011 г. (первое прохождение); интервал наблюдений 2.6 мин (Евпатория, АЗТ-28, VNC-748), *в* — блеск m (в относительных звездных величинах) для трех фотометрических периодов (Одесса, 6 июня 2011 г., телескоп КТ-50), *г* — вид «средней» кривой блеска за восемь периодов (Одесса, 6 июня 2011 г., средний период $P = 5.24$ с, Φ — фаза вращения)

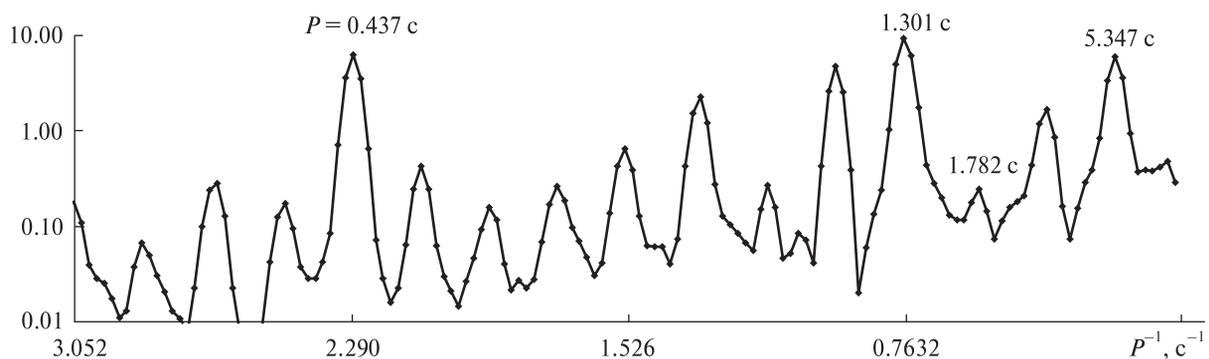


Рис. 5. Низкочастотная часть спектра кривой блеска от 6 июня 2011 г.

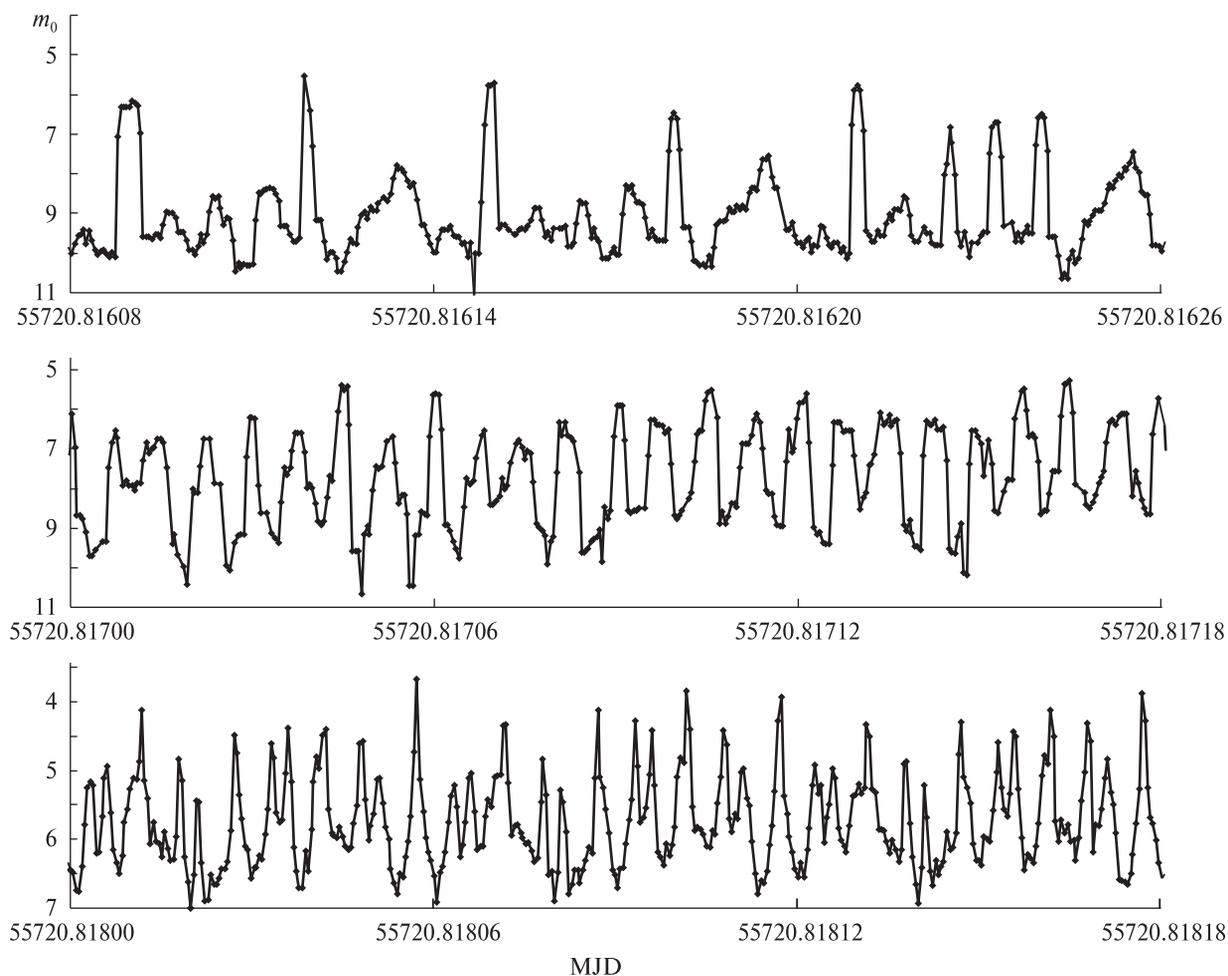


Рис. 6. Три фрагмента кривой блеска космического аппарата «NanoSail-D» от 8 июня 2011 г. (Евпатория, АЗТ-28, VNC-748)

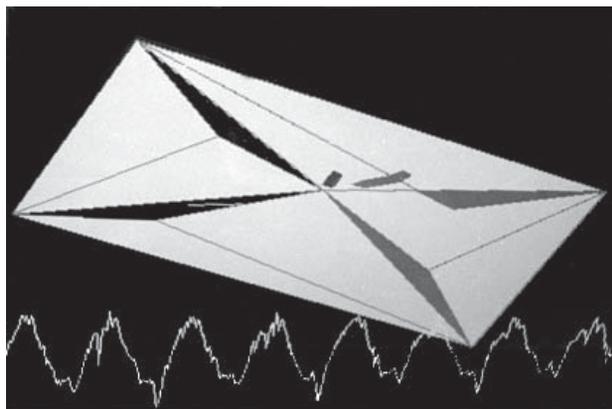


Рис. 7. Вид модели паруса с «прогибом» на середине одной стороны каждого сектора. Серым цветом показаны тени на поверхности паруса

Отметим, что также 6 июня за несколько часов до наблюдений в Одессе видеофильм пролета «NanoSail-D» записал любитель Кевин Феттер из Канады при условиях, подобных одесским. Кривые блеска оказались почти идентичными по форме, а период равен 5.27 с.

8 июня 2011 г. в Евпатории были получены новые продолжительные наблюдения «NanoSail-D». Изменения блеска однозначно свидетельствуют о быстром вращении КА. Фотометрический период уменьшился до 5.07 с, амплитуда достигает $2-4^m$, а число видимых всплесков яркости КА за период изменяется от 8 равноотстоящих до 12 неравноотстоящих. Характер

кривой блеска изменяется с изменением ракурса видимости КА. Его можно объяснить, предположив, что КА совершает уже четыре оборота за один фотометрический период, определяемый периодом прецессии оси вращения. Три фрагмента этого прохождения показаны на рис. 6.

МОДЕЛЬ ПАРУСА И ПРЕЦЕССИЯ ОСИ ВРАЩЕНИЯ

Объяснением наблюдаемого характера колебаний блеска КА, возможно, является то, что четыре треугольных сектора (секции) паруса не лежат в плоскости (так как они закреплены только в вершинах). Например, они могут быть выгнуты в форме «пропеллера». Такая форма паруса объясняет быстрое его вращение как результат действия раскручивающего момента сил от набегающего потока частиц. При вращении КА каждая секция дает свой блик и максимум на кривой блеска с периодичностью $1/4$ периода вращения и $1/12$ или $1/16$ периода прецессии. При этом изменение амплитуды колебаний блеска внутри одного оборота дает основание предполагать, что ось вращения не совпадает с осью симметрии паруса: выступающая штанга с массивным радиопередатчиком должна отклониться в сторону от набегающего потока частиц, что обеспечивает максимальный момент инерции тела.

Для исследования поведения КА «NanoSail-D» и объяснения результатов фотометрии нами было проведено предварительное моделирование возможных вариантов вращения КА и фор-

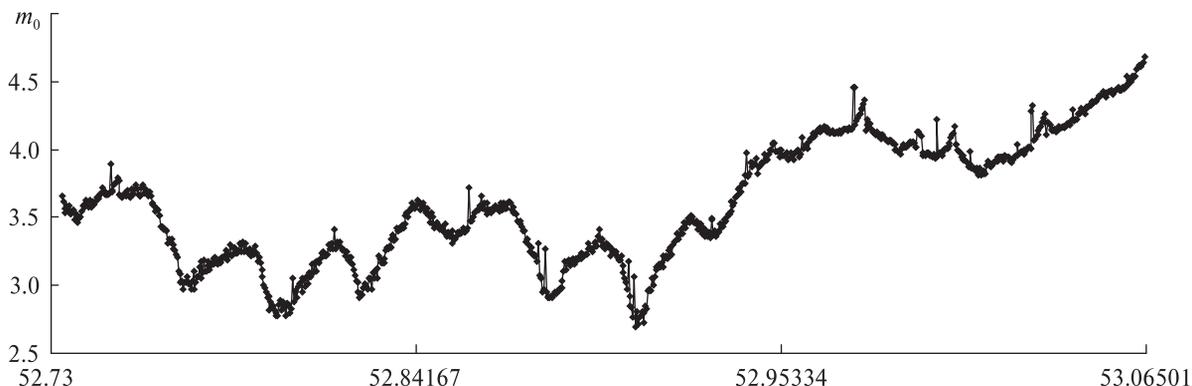


Рис. 8. Фрагмент теоретической кривой блеска модели паруса в виде прецессирующего «пропеллера». $P_{rot} = P_{prec}/3$. По оси абсцисс отложено время в относительных единицах — интервал соответствует одному периоду прецессии

мы его паруса (см. рис. 7). Основные алгоритмы и возможности программы оптико-геометрического моделирования описаны в работе [2].

На рис. 8 приведена теоретическая кривая блеска модели КА «NanoSail-D» для условий наблюдения 6 июня 2011 г. Вращение происходит вокруг оси, близкой к оси симметрии КА, с периодом, равным 1/3 периода прецессии. В данном варианте каждый из четырех секторов модели имеет «прогиб» на середине одной стороны, что делает ее похожей на «пропеллер». На рисунке показан участок, соответствующий одному витку прецессии оси вращения с раствором 6° вокруг направления орбитальной скорости КА. Моделирование показывает, что на кривой блеска проявляются все 12 локальных максимумов блеска от каждого отдельного сектора паруса (за три оборота), а их амплитуда изменяется по мере пролета КА над пунктом наблюдения. В целом амплитуда колебаний блеска близка к наблюдаемой, однако для описания больших колебаний блеска КА 8 июня необходимо уточнить соотношение зеркального и диффузного коэффициентов отражения поверхности паруса.

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Новые фотометрические наблюдения КА «NanoSail-D» удалось получить в Одессе 16 августа в 18^h37^m UTC (длительность 3.8 мин, фотометрический период равен 2.88 с) и 17 августа 2011 г. в 18^h19^m UTC (длительность 0.7 мин, период — 0.86 с). Кривые блеска в оба прохождения имеют амплитуду 2—3^m, одинаковый характер колебаний блеска внутри фотометрического периода и, по-видимому, период вращения, равный четверти от периода прецессии $P_{rot} = P_{prec}/4$.

Отметим, что любители также внесли свой вклад в исследование вращения атмосферного паруса. Наблюдатель М. Ландбрэк (Германия) с помощью простой камеры записал треки КА среди звезд 24 мая и 3 июня 2011 г. и измерил блеск спутника вдоль трека [http://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=08&month=06&year=2011]. На первой кривой период составляет около 6.5 с. На последней кривой блеска можно увидеть период модуляции около 5.5 с, при ос-

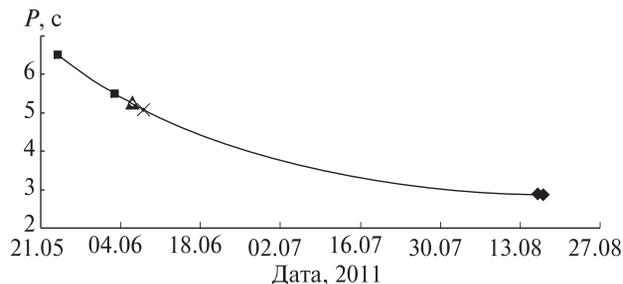


Рис. 9. Изменение периода вращения (прецессии) космического аппарата «NanoSail-D» по измерениям М. Лангбрэка (квадратики), К. Феттера (треугольник), НЦУИКС (крестик) и АО Одесского университета (ромбики)

новном колебании с периодом около 1.4 с. Амплитуда близка к 0.3^m.

На рис. 9 показан итоговый ход уменьшения периода вращения (прецессии) КА «NanoSail-D» на всем интервале полученных наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутник «NanoSail-D» имеет сложную кинематику вращения, которая отражается в постоянно изменяющихся кривых блеска. Ориентация оси вращения, по-видимому, не постоянна, и имеет место быстрая прецессия, скорость которой плавно увеличивается, т. е. КА продолжает раскручиваться. Соотношение периода прецессии P_{prec} оси вращения и периода собственного вращения P_{rot} изменяется, и в разное время было кратно 3 и 4. Вращение явилось следствием гибкости паруса и влияния на него значительных динамических нагрузок, в результате чего поверхность приняла форму, которая способствовала преобразованию момента импульса набегающего потока частиц в момент вращения паруса. Проведенное моделирование показывает, что прецессия оси вращения КА происходит вокруг направления орбитальной скорости спутника.

«NanoSail-D» находится на орбите, его история еще не окончена, и работа над определением параметров его вращения и характером торможения в атмосфере продолжается. Однако можно сказать, что форма паруса в виде отдельных секций, закрепленных лишь по углам, приводит к возникновению вращающего момента. Это снижает эффективность работы паруса, а в дру-

гих случаях может привести, например, к скручиванию троса крепления паруса.

1. Бурлак Н., Драгомирецкий В., Кошкин Н. и др. Наблюдения низкоорбитальных КО с телевизионной ПЗС-камерой // Наблюдение околоземного космического пространства (Материалы Междунар. конф.), Звенигород, Россия, 23—25 января 2007 г. — (<http://lfvn.astronomer.ru/report/0000018/Od/index1.htm>).
2. Меликянц С., Шакун Л., Кошкин Н. и др. Использование оптико-геометрического моделирования для интерпретации наблюдаемых кривых блеска ИСЗ // *Odessa Astron. Pubs.* — 2007. — 20, part 2. — P. 72—75.
3. Alhorn D. C., Casas J. P., Agasid E. F., et al. NanoSail-D: The small satellite that could! // *Proceedings of the 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, UT, USA, 8—11 Aug. 2011. — Paper: SSC11-VI-1. — (<http://smallsat.org/sessions/session6>).

Надійшла до редакції 01.10.11

N. I. Koshkin, E. A. Korobeynikova, V. V. Lopachenko, S. M. Melikyants, S. L. Strakhova, L. S. Shakun

ON THE MOTION OF A MICROSATELLITE WITH THE SAIL IN THE ATMOSPHERE (NANOSAIL-D)

The drag of the satellite NanoSail-D with the sail in the Earth's upper atmosphere is considered and the satellite motion around the center of mass is studied. The satellite is a prototype of future mechanisms for accelerated deorbit of the space debris. The satellite's dynamics is supposed to be a cause of the insufficiently quick braking of the sail. Photometric observations discover different changes in the satellite's brightness, including some regular variability. In the latter case, the photometric period is about several seconds with 12 clearly visible variations within the period. This favours the view that in the result of interaction with a particle flux of the upper atmosphere the sail switched over to the mode of rotation around an axis which does not coincide with the axis of symmetry and, possibly, rapidly precesses in space. Some results of the simulation of the NanoSail-D rotation are presented.