

NanoSail-D - первый “парусник” на орбите Земли

Н.И.Кошкин¹, В.В.Лопаченко²

¹ НИИ “Астрономическая обсерватория” Одесского университета, Одесса, Украина (nikkoshkin(a)yahoo.com)

² Национальный центр управления и испытания космических средств, ГКАУ, Евпатория, Украина

Микро спутник НАСА NanoSail-D вместе с пятью другими космическими аппаратами (КА), был запущен на низкую околоземную орбиту в ноябре 2010 года. Еще до полета он был окрещен как “солнечный парус”, хотя солнечный ветер не его основная стихия. Аппарат предназначен для отработки технологий разворачивания в космосе дешевых и легких парусов для сведения отработавших свой срок космических объектов с низкой орбиты за счет их торможения в верхней атмосфере Земли. 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 безуспешных попыток освободить аппарат уменьшали надежду операторов на успех миссии. Казалось, что этот аппарат стал еще одним провалом в сложной истории солнечного паруса... Однако, 17 января случилось неожиданное: телеметрия ясно указывала на то, что КА вышел в открытый космос. 20 января NanoSail-D получил команду раскрыть свой 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 тоже 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.

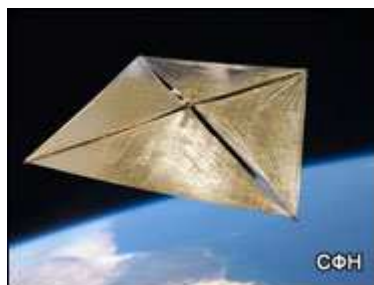


Рис. 1. Рисунок КА NanoSail-D с развернутым парусом.

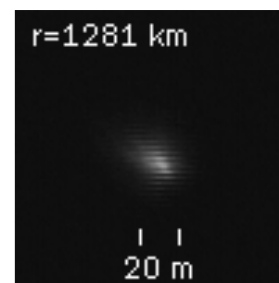


Рис.2 Изображение NanoSail-D полученное 11.04.2011 в Евпатории телескопом D=500 mm, f=8000 mm.

Прогнозировалась, что КА NanoSail-D через 70-120 дней после разворачивания паруса должен сгореть в атмосфере Земли. Так же предполагалось, что за эти месяцы полета ученые будут анализировать поведение КА, в том числе оценивать силу давления света, выделяя ее на фоне влияния атмосферы Земли. Необходимо отметить, что вероятно в погоне за научным приоритетом, авторы проекта ограничили доступ к орбитальным данным КА NanoSail-D и на сайте Space-track.org для простых пользователей их нет. Вместе с тем, этот 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. Однако, за это время радиолюбители успели записать радиопередачи со спутника. В дальнейшем осталась возможность только для визуальных наблюдателей КА. Хотя ожидалось, что NanoSail-D будет тусклым на протяжении

большей части своей миссии, все же краткие вспышки яркости должны были сделать его видимым для невооруженного глаза. А по мере быстрого снижения высоты полета видимая яркость парусника должна была возрастать.

На данный момент, предполетный прогноз торможения КА оправдывается лишь в общем. К июню 2011 года парусник снизился только до высоты 580 км. 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>). Такая ситуация еще больше привлекает внимание к полету и торможению первого парусника.

Судить о кинематике вращения вокруг центра массы можно на основе фотометрической информации. Рассматриваемая в данной статье фотометрия NanoSail-D была проведена на станциях Украинской сети оптических наблюдений и исследования спутников (УМОС) в Евпатории (НЦУИКС) и в Одессе (Астрономическая обсерватория Одесского университета). Первая кривая блеска была получена в Одессе (рис.3) при неблагоприятных погодных условиях. Наблюдаемый блеск КА оставался почти постоянным и не давал оснований предполагать наличие быстрого вращения паруса.

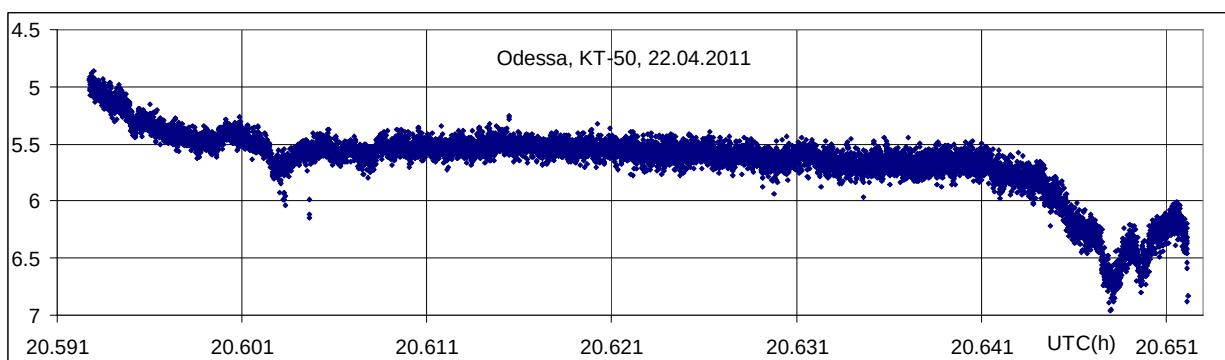


Рис.3. Видимый блеск КА NanoSail-D от 22 апреля 2011 года.

Шкала блеска в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км. Интервал наблюдений 3.6 минуты. Одесса, телескоп КТ-50 с ТВ ПЗС WAT-902H2 Sup.

Но уже через четыре дня в Евпатории были получены аperiodические колебания блеска. На двух следующих рисунках показаны кривые изменения блеска NanoSail-D полученные в Евпатории 26 апреля (2 соседних прохождения).

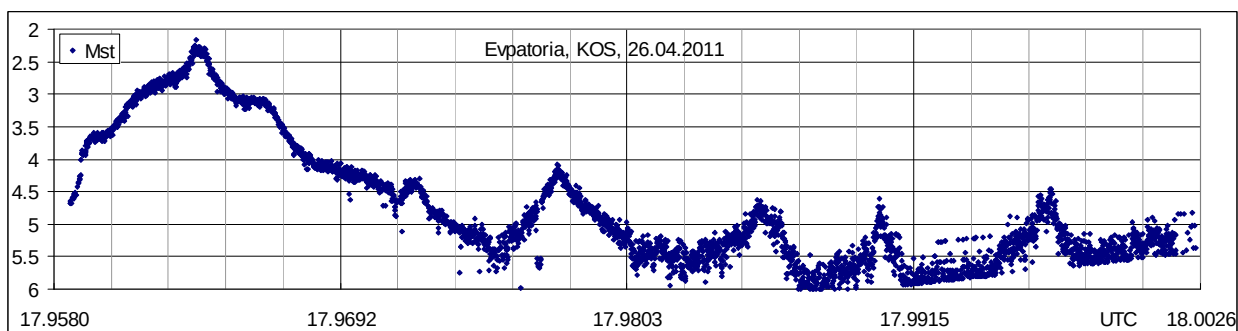


Рис.4. Кривая блеска КА NanoSail-D от 26 апреля 2011 года (1-е прохождение).

Шкала блеска в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км. Интервал наблюдений 2.6 минуты. Евпатория, АЗТ-28, VNC-748.

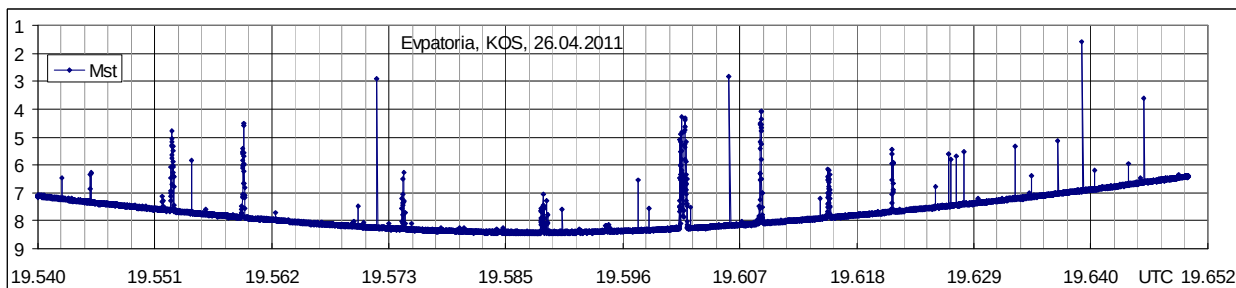


Рис.5. Кривая блеска КА NanoSail-D от 26 апреля 2011 года (2 прохождение).
Шкала блеска в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км.
Интервал наблюдений 6.7 минуты.
Евпатория, АЗТ-28, VNC-748.

Фотометрические наблюдения КА NanoSail-D, полученные в астрономической обсерватории Одесского университета 6 июня (рис. 6), так же обнаружили быструю переменность с изменяющейся амплитудой менее одной звездной величины. Надежно определяется фотометрический период около 5.3 сек, в пределах которого четко видны 12 колебаний блеска.

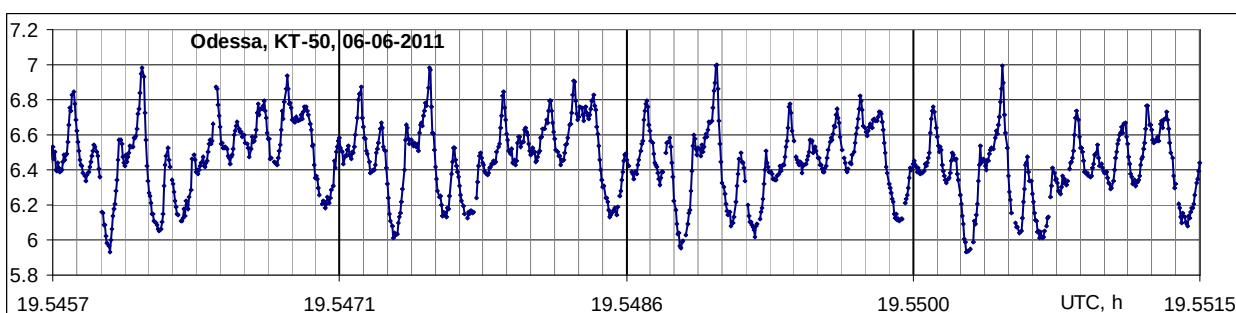
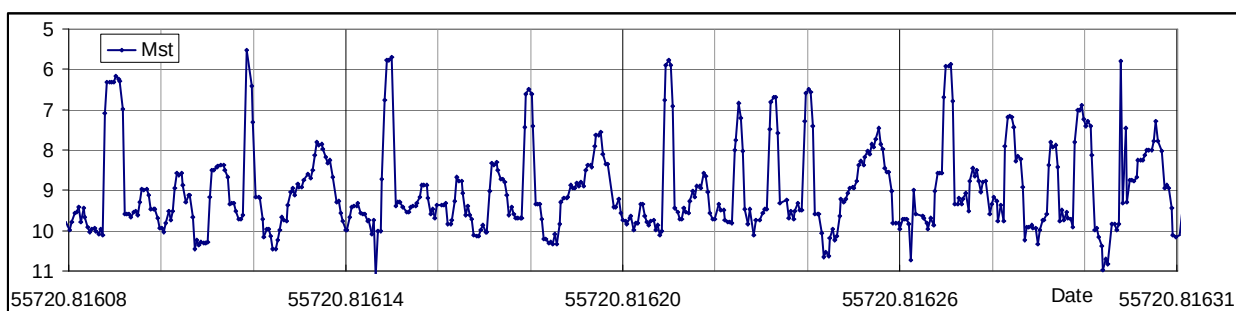


Рис. 6. Фрагмент кривой блеска ИСЗ Nanosail-D – 4 фотометрических периода.
Блеск в относительных звездных величинах, время UTC – в часах.
Одесса, 6.06.2011, телескоп КТ-50.

По-видимому, в результате взаимодействия с потоком частиц верхней атмосферы спутник перешел в режим вращения около оси, которая не совпадает с осью симметрии.

8 июня 2011 года в Евпатории были получены продолжительные наблюдения Nanosail-D. Характер кривой блеска однозначно свидетельствует о быстром вращении КО. Фотометрический период уменьшился до 5.07 сек, амплитуда достигает 2-4 звездных величины, а число видимых всплесков яркости КА за период меняется от 8 до 12. Три фрагмента этого прохождения показаны на следующих рисунках.



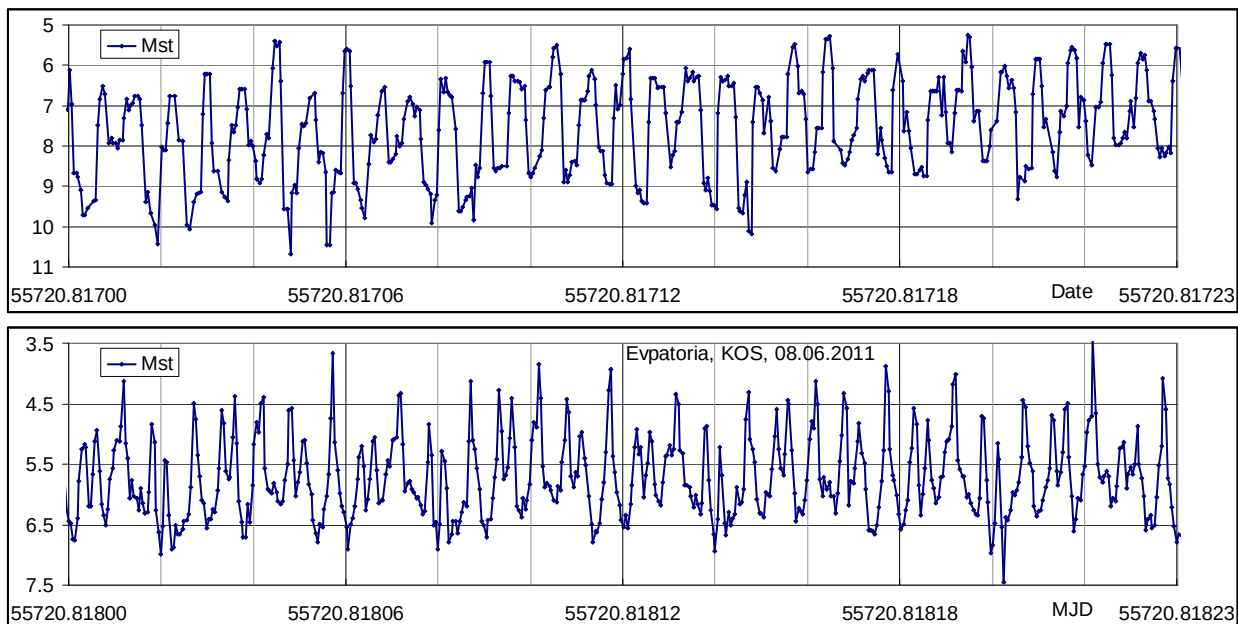


Рис. 7. Три фрагмента кривой блеска КА NanoSail-D от 08 июня 2011 года.
Шкала блеска в звездных величинах, приведенных к дальности 1000 км.
Евпатория, АЗТ-28, VNC-748.

На рис.8 показана “средняя кривая” блеска Nanosail-D от 6.06.2011 за 8 фотометрических периодов. Видно, что характер изменений блеска на интервале около 1 минуты не изменился.

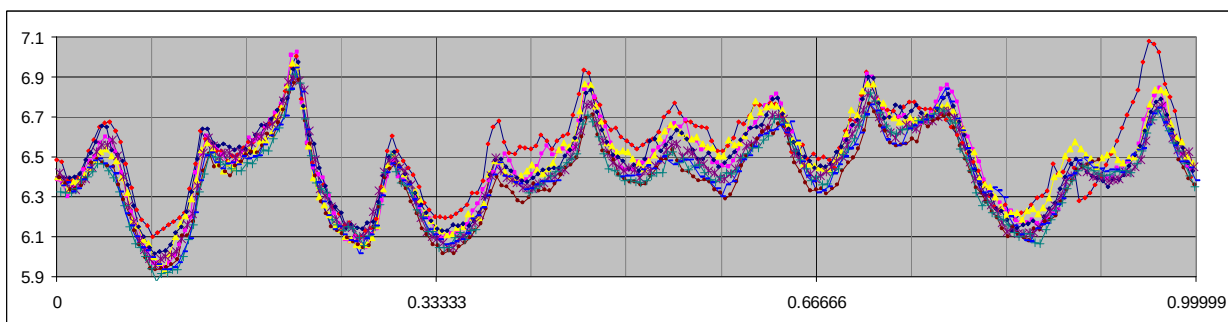


Рис.8. Вид «средней» кривой блеска за 8 периодов. Одесса, 6.06.2011.
Свертка сделана с $P = 5.24$ сек.

Частотный спектр кривой блеска от 6.06.2011 содержит несколько максимумов. Низкочастотная часть «частотограммы» показана на рис. 9.

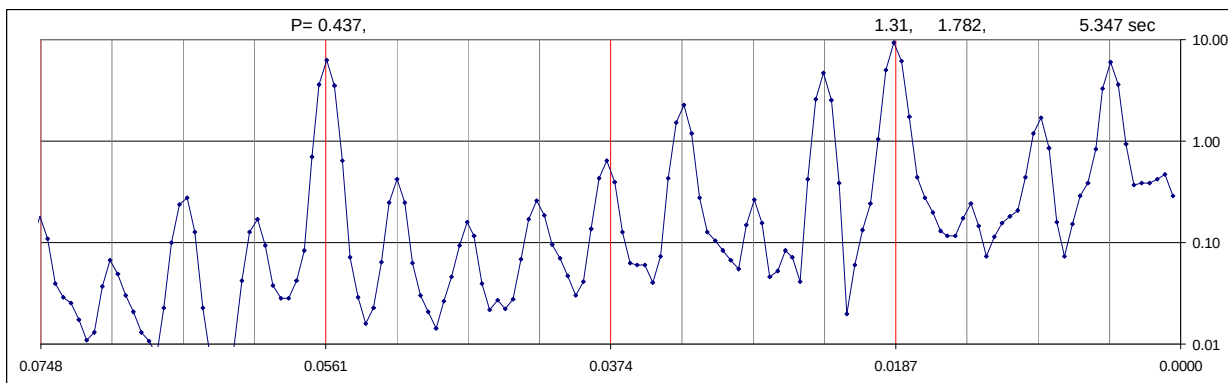


Рис.9. Низкочастотная часть спектра кривой блеска от 06.06.2011 года.
Соответствующие значения периодов (в сек) для четырех пиков мощности
указаныверху рисунка.

На периодограмме и визуально на кривой блеска хорошо выделяется основной устойчивый период около 5.3 сек (см. рис.6 и среднюю кривую на рис.8). На этом интервале укладывается 12 колебаний блеска (период около 0.44 сек), 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 сек 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. Возможно также, что четыре треугольных сектора (секции) паруса не лежат в одной плоскости (так как они закреплены только в вершинах). Например, они могут быть выгнуты в форме «пропеллера» (такая форма паруса объясняла бы быстрое его вращение как результат действия раскручивающего момента сил от набегающего потока частиц). При вращении КА каждая секция дает свой блик (максимум на кривой блеска) с периодичностью около 0.44 сек, что равно $1/4$ периода вращения и $1/12$ периода прецессии. Ось вращения не обязательно совпадает с осью симметрии паруса: выступающая штанга с массивным радиопередатчиком должна отклониться в сторону от набегающего потока воздуха, что обеспечивает максимальный момент инерции тела.

Для исследования поведения Nanosail-D и объяснения результатов фотометрии нами было проведено предварительное моделирование возможных вариантов вращения КА. (См. рис.10, а также видеофайл: http://lfvn.astronomer.ru/report/0000077/Shtopor_NanoSail.avi)

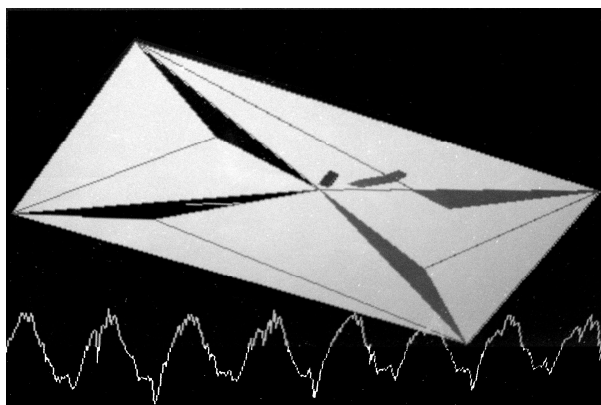


Рис.10. Вид модели “солнечного паруса” с “прогибом” на середине одной стороны каждого сектора. Серым цветом показаны тени на поверхности паруса.

На рис.11 приведены две теоретические кривые блеска модели КА Nanosail-D для двух вариантов его вращения вокруг центра массы. В данном случае каждый из четырех секторов модели имеет “прогиб” на середине одной стороны, что делает ее похожей на “пропеллер”. На рисунке показаны участки, соответствующие одному витку прецессии оси вращения с раствором 6° вокруг направления скорости КА (верхний) и вокруг биссектрисы фазового угла (нижний). Вращение происходит вокруг оси близкой к оси симметрии КА с периодом, равным $1/3$ периода прецессии. Из этих фрагментов теоретических кривых блеска следует, что в первом случае проявляются все 12 локальных максимумов блеска от каждого отдельного сектора паруса (за 3 оборота). Амплитуда колебаний блеска близка к наблюдаемой, правда, имеет место несоответствующая наблюдениям модуляция кривой блеска, но это, возможно, требует более адекватного подбора фазы прецессии. Для описания больших колебаний блеска КА 8 июня необходимо уточнить соотношение диффузного и зеркального коэффициентов отражения паруса.

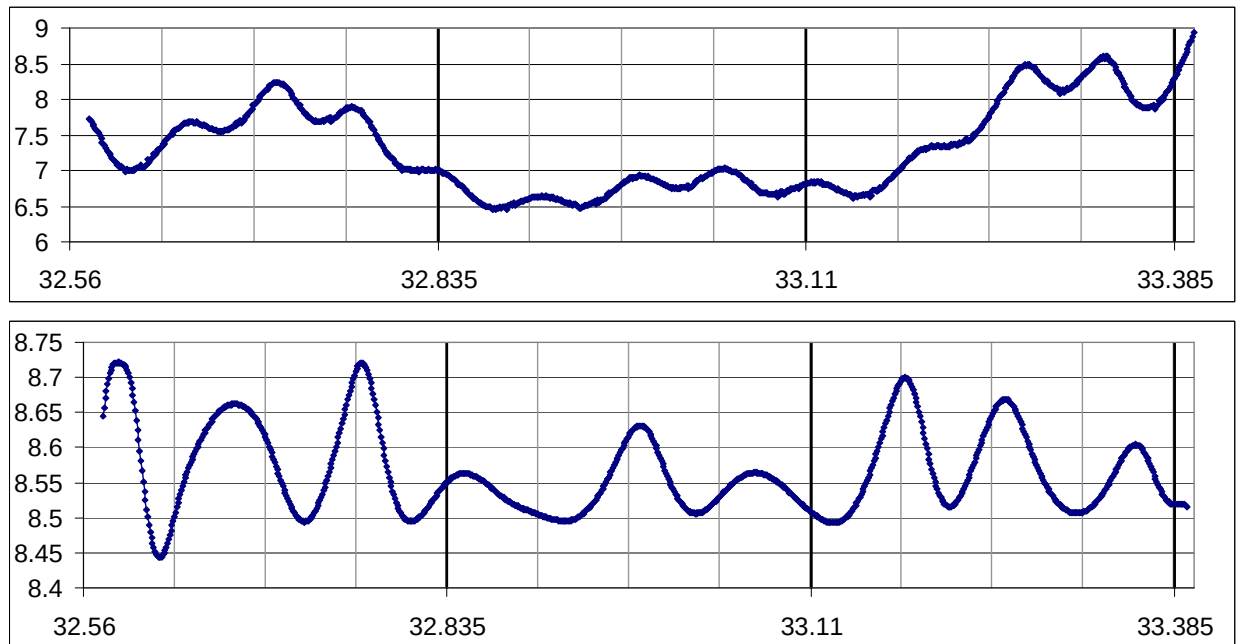


Рис. 11. Фрагменты теоретической кривой блеска модели “солнечного паруса” в виде прецессирующего “пропеллера”. $P_{\text{rot}} = P_{\text{prec}}/3$.

Отметим, что любители также внесли свой вклад в исследование вращения солнечного паруса. Ниже приведена кривая блеска, полученная с помощью простой камеры 3 июня 2011 года (рис. 12). Здесь тоже можно увидеть период модуляции около 5.5 сек, при основном колебании с периодом около 1.4 сек. Амплитуда около 0.3^m .

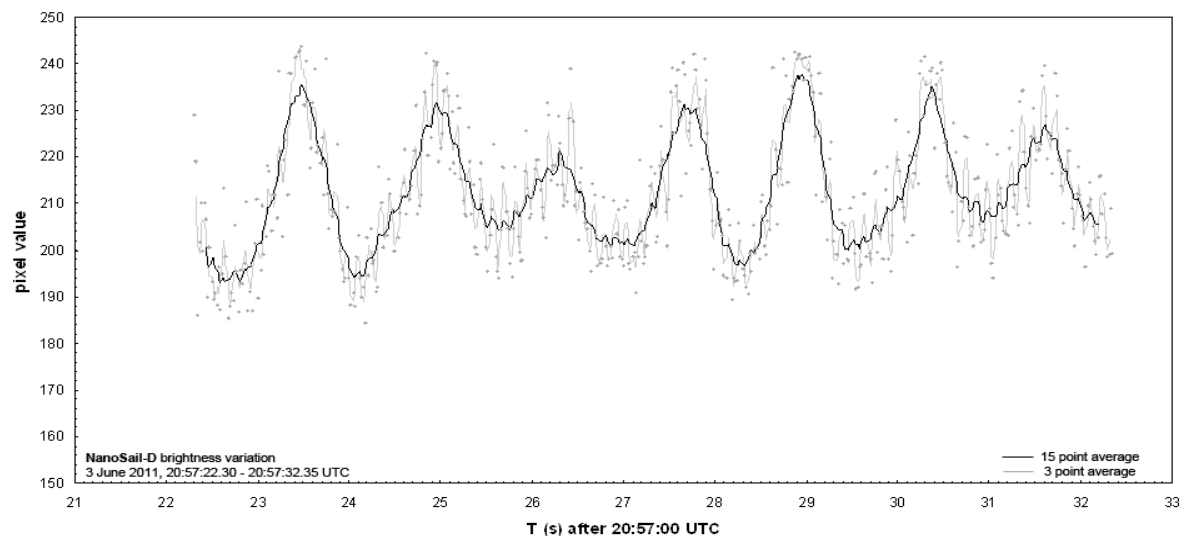


Рис. 12. Такую кривую NanoSail-D записал в сумерках 03-06-2011 Marco Langbroek. (См. <http://spaceweather.com/archive.php?view=1&day=08&month=06&year=2011>).

В заключение следует сказать, что NanoSail-D имеет сложную кинематику вращения, которая постоянно изменяется. По-видимому, ориентация оси вращения так же непостоянна и вероятно имеет место быстрая прецессия $P_{\text{prec}} \approx 3 \cdot P_{\text{rot}}$. Следствием гибкости паруса и влияния на него значительных динамических нагрузок является неопределенность формы поверхности и ее непостоянство во времени. Полученные наблюдения показывают, что период вращения КА медленно уменьшается, то есть он продолжает раскручиваться.

Пока NanoSail-D находится на орбите, его история еще не окончена и работа над определением параметров вращения продолжается.

09.07.2011 г.