

УДК 629.783.054 : 535.24

**В. П. Епишев¹, И. И. Исак¹, В. И. Кудак¹, И. И. Мотрунич¹, И. Ф. Найбауэр¹,
Н. И. Кошкин², А. И. Билинский³, К. П. Мартынюк-Лотоцкий³, Я. Т. Благодыр³,
В. В. Лопаченко⁴, В. В. Рыхальский⁴, С. В. Рыщенко⁵, А. В. Жуковецкий⁵**

¹Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

²Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова, Одеса

³Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету ім. Івана Франка, Львів

⁴Національний центр управління і випробовування космічних систем, Євпаторія

⁵Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля, Дунаївці

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ НА ОРБИТЕ ИСЗ В НЕШТАТНОМ РЕЖИМЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Приведено результати аналізу поведінки на орбіті космічного апарата «EgyptSat» у нештатному режимі у порівнянні з параметрами вільного обертання інших ШСЗ. Висувається версія виникнення нештатної ситуації з даним об'єктом. Показано, що об'єднання високоточної координатної інформації з фотометричною, отриманих з різних пунктів спостережень, дозволяє оперативно і ефективно аналізувати поведінку космічних апаратів на орбіті, з якими немає зв'язку.

Объединение высокоточной координатной информации с фотометрической позволяет изучать поведение космического аппарата (КА) на орбите, с которым по разным причинам отсутствует связь, определять его ориентацию, контуры и форму, оптические характеристики поверхности и их изменение со временем [1, 5].

Рассмотрим задачу поведения на орбите КА с которым нет связи. Ее успешное решение возможно только при комплексном подходе, в котором должны быть результаты качественной фотометрии, полученной синхронно с результатами позиционных наблюдений ИСЗ, соответствующие компьютерные программы, необходимые знания теории возмущенного движения ИСЗ.

Именно фотометрия дает возможность фиксировать появление в поле зрения наблюдателя отдельных фрагментов поверхности спутни-

ка, освещенных Солнцем. Периодичность их появления вследствие вращения ИСЗ вокруг собственной оси позволяет оценить, и довольно точно, период изменения блеска наблюдаемого объекта. Но от фиксации изменения блеска ИСЗ до установления точного значения собственного, а затем и прецессионного периода его вращения, лежит долгий путь сложных расчетов с их всесторонним анализом, в том числе с подключением информации, полученной по другим каналам. Например — данные анализа скорости изменения ориентации в пространстве одной из главных осей КА, сведения о форме его поверхности.

В Лаборатории космических исследований Ужгородского национального университета (ЛКИ УжНУ) создана программа «Период», в которой реализован алгоритм поиска скрытой периодичности процессов произвольной природы [7]. Метод неоднократно совершенствовался с учетом набранного опыта и расширен на поиск скрытой периодичности в пространственно-часовых реализациях с нарушением непрерывности. В решении нашей задачи означает, что в

© В. П. ЕПИШЕВ, И. И. ИСАК, В. И. КУДАК,
И. И. МОТРУНИЧ, И. Ф. НАЙБАУЭР, Н. И. КОШКИН,
А. И. БИЛИНСКИЙ, К. П. МАРТЫНЮК-ЛОТОЦКИЙ,
Я. Т. БЛАГОДЫР, В. В. ЛОПАЧЕНКО, В. В. РЫХАЛЬСКИЙ,
С. В. РЫЩЕНКО, А. В. ЖУКОВЕЦКИЙ, 2012

реализации (записи блеска) между интервалами наблюдений длительностью в несколько минут есть большие временные разрывы (сутки и более).

Усовершенствованная программа позволила в нашем случае не только объединить результаты наблюдений, разнесенные во времени, но и установить периодические процессы, значительно более длительные, чем время одного интервала наблюдений.

Результаты фотометрических и позиционных синхронных наблюдений дают возможность также получить необходимую информацию об ориентации неуправляемого ИСЗ на моменты наблюдений. Здесь расчеты базируются на законах зеркального и диффузного отражения света с учетом разных стереометрических форм, которые имеют фрагменты поверхности ИСЗ [2, 3].

В ЛКИ УжНУ определение всех нужных направлений, в том числе и осей объекта, ведется относительно положения плоскости орбиты на момент наблюдений. Это положение определяется в двух системах координат — горизонтальной и экваториальной.

В горизонтальной системе координат картина происходящих на орбите событий разворачивается относительно наблюдателя, что позволяет ему более наглядно представить ее характер. Основные же вычисления проводятся в экваториальной спутникоцентрической системе координат. Объединение полученных расчетов с данными изменения блеска ИСЗ позволяет сделать достаточно точные выводы и о характере вращения ИСЗ, и об изменении его ориентации на исследуемом интервале наблюдений.

Такой подход, отработанный на изучении вращения реальных ИСЗ, пребывающих на разных высотах в эпохи их дестабилизации и поло-

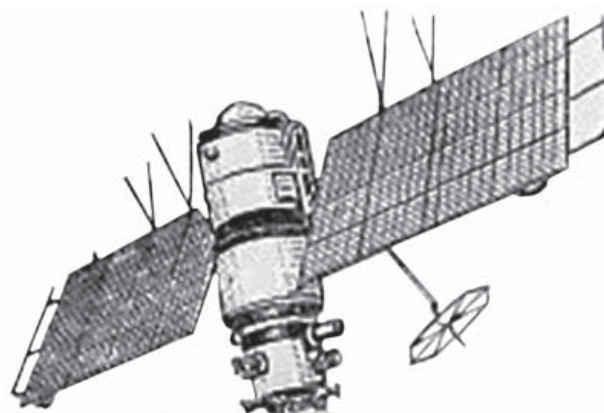


Рис. 1. ИСЗ системы «Метеор»

мок, оправдал себя неоднократно и помог накопить огромный опыт в решении задач по оценке природы и величины возмущающих факторов, действующих на космический объект [4, 6]. Он же был применен и при анализе вращения КА «EgyptSat» в нештатной ситуации.

Для того чтобы глубже представить, что же произошло с аппаратом «EgyptSat», рассмотрим вначале результаты определения периода собственного вращения на длительных временных интервалах, пребывающих на разных высотах в дестабилизированном режиме трех ИСЗ системы «Метеор», и одного китайского ИСЗ «Feng-Yun-1A».

Данные о периодах наблюдений, высоте H полета спутников, наклоне i их орбит, пределах ΔP_0 изменений периода собственного вращения ИСЗ на всем интервале наблюдений, пределах $\Delta P_{пр}$ изменений периода прецессионного вращения ИСЗ приведены в табл. 1.

ИСЗ «Метеор». Внешний вид и типичная кривая блеска ИСЗ системы «Метеор» приведена на рис. 1 и 2.

Таблица 1. Отдельные орбитальные и вращательные характеристики исследуемых ИСЗ

ИСЗ	Номер ИСЗ	Время наблюдений	H , км	i , град	ΔP_0 , с	$\Delta P_{пр}$, с
«Метеор-1»	64053A	1977(IX)—1982(X)	607—863	65	93—125	584—708
«Метеор-М»	69084A	1973(XII)—1983(XII)	618—673	81	78—109	490—766
«Метеор-М»	71059A	1976(IV)—1983(XII)	613—640	81	10—99	546—406
«Feng-Yun-1A»	88080A	1990(III)—1990(X)	900	99	25—32	575—588
«EgyptSat»	07012A	2010(VII)—2010(VIII)	660	98	118—122	24.5—24.6

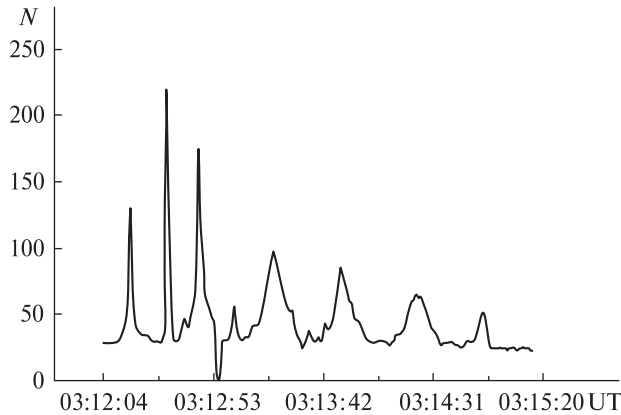
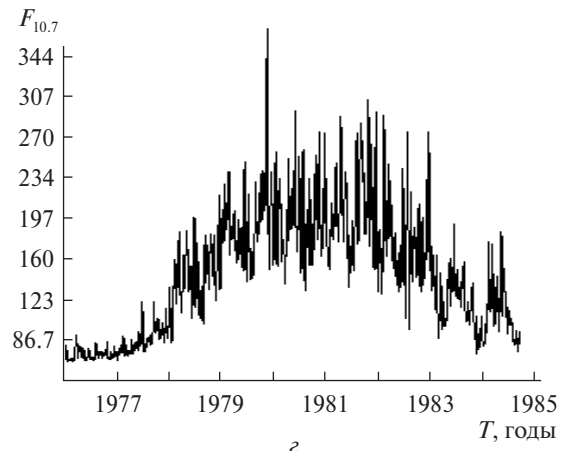
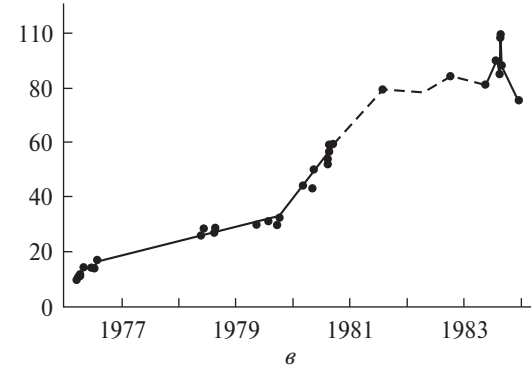
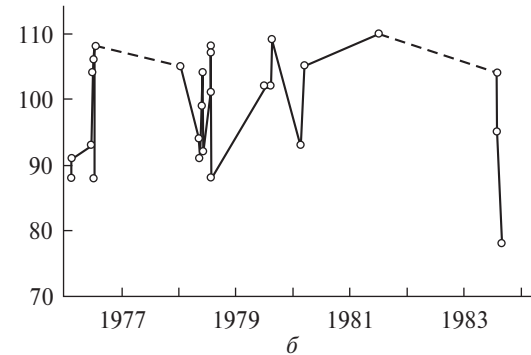
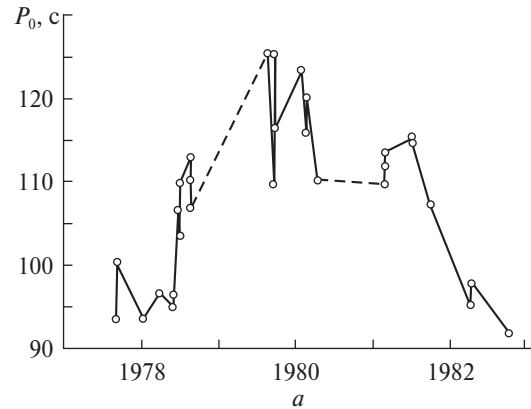


Рис. 2. Видимая кривая блеска объекта «Метеор» (71059А) за 12 октября 1979 г. (N — амплитуда изменения сигнала)

Вид кривых блеска объектов данной системы практически одинаков. Его изменения связаны с увеличением периодов собственного и прецессионного вращения ИСЗ и переходом их в режим «кувыркания». На рис. 3, *a—в* приведены графики изменения периодов собственного вращения исследуемых ИСЗ системы «Метеор» в режиме дестабилизации на длительных (5—8 лет) интервалах наблюдений. На рис. 3, *г* для сравнения показаны изменения солнечного излучения на $\lambda = 10.7$ см в годы наблюдения этих спутников.

Объекты 64053 и 69054 наблюдались уже в режиме «кувыркания». А ИСЗ 71059 — от момента отключения на спутнике стабилизирующих устройств и до полного вхождения в режим «кувыркания». Только в таком режиме космический аппарат ведет себя как полностью свободное тело. И его вращение даже может коррелировать с изменениями солнечной активности, если спутник находится на достаточной высоте, где возмущающий момент, рожденный солнечным излучением, больше за аэродинамический (объект 64053). На меньших высотах преобладают аэродинамические возмущения (объект 69054).

Рис. 3. Изменения периода P собственного вращения на интервале нескольких лет: *a* — ИСЗ «Метеор» (64053), *б* — ИСЗ «Метеор» (69054), *в* — ИСЗ «Метеор» (71059); *г* — поток солнечного излучения на $\lambda = 10.7$ см во время максимума 21-го цикла солнечной активности



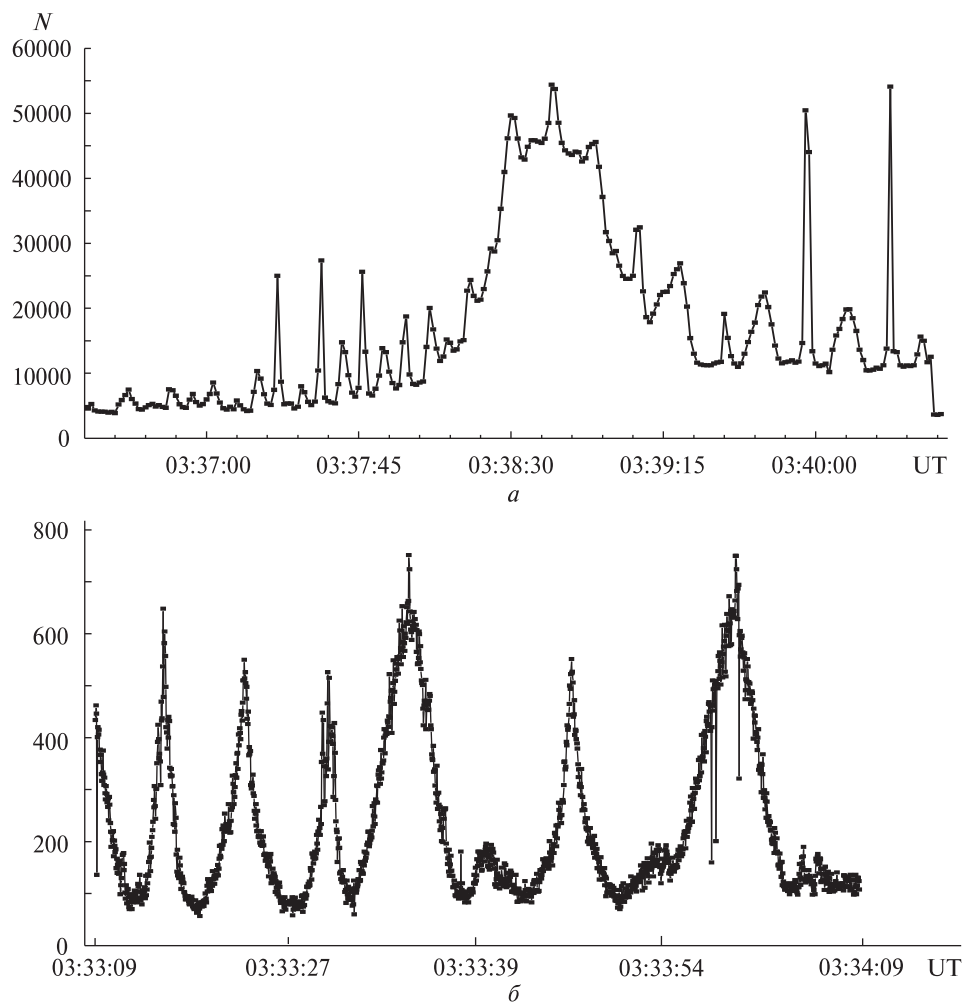


Рис. 4. Видимая кривая блеска ИСЗ «Feng-Yun-1A»: *a* — записанная 10 октября 1990 г., *б* — записанная 19 октября 1990 г. (*N* — число фотоэлектронов)

После отключения стабилизирующих устройств спутник практически сразу начинает быстро вращаться вокруг собственной оси, с последующим (до нескольких лет) затуханием, и постепенным переходом в режим «кувыркания». Эту типичную картину наглядно видно на примере объекта 71059.

ИСЗ «Feng-Yun-1A». Наблюдения данного объекта велись на относительно небольшом интервале времени после двухгодичного его пребывания в режиме дестабилизации. Две приведенные кривые его блеска отличаются между собой только из-за разной ориентации спутника относительно наблюдателя. Так, на

кривой блеска (рис. 4, *a*) в момент широкого максимума, ось собственного вращения объекта была обращена к наблюдателю. На рис. 4, *б* отображено изменение блеска ИСЗ при другом ракурсе относительно наблюдателя. На рис. 5 отображены направления двух осей, вокруг которых происходило видимое вращение данного спутника.

Полученные результаты помогли впоследствии построить модель вращения ИСЗ «Египт-Sat». Здесь следует отметить, что «Feng-Yun-1A» и после двух лет пребывания в режиме дестабилизации еще довольно быстро вращался и не достиг режима «кувыркания».

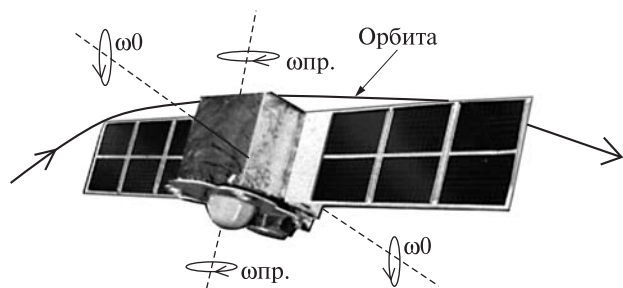


Рис. 5. Схема вращения ИСЗ «Feng-Yun-1A»

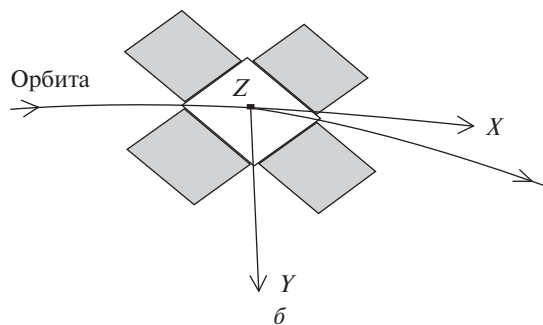
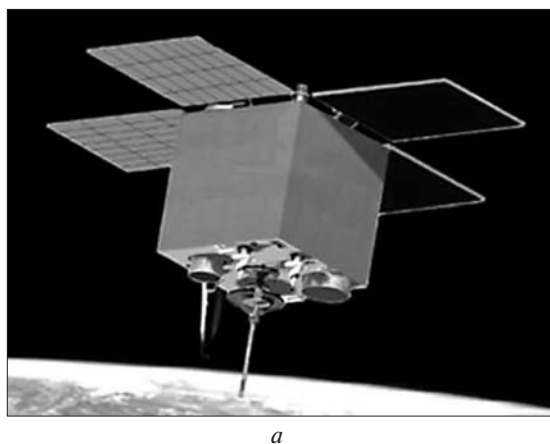


Рис. 6. ИСЗ «EgyptSat» на орбите (а) и его ориентация в штатном режиме (б, вид сверху)

ИСЗ «EgyptSat» (рис. 6). В июле 2010 г., еще до истечения гарантийного срока работы ИСЗ, его поведение на орбите резко изменилось. КА практически перестал повиноваться средствам радиоконтроля. Тогда к ним были подключены имеющиеся в Украине средства оптических наблюдений ИСЗ — обсерватории Львовского и Одесского университетов, ЛКИ УжНУ и станции слежения НКАУ в пп. Дунаевцы и Евпато-

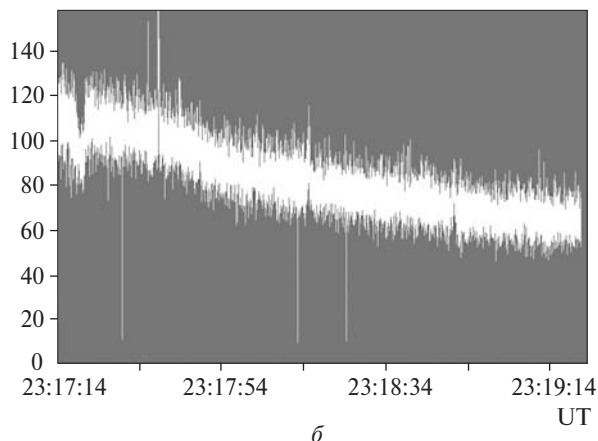
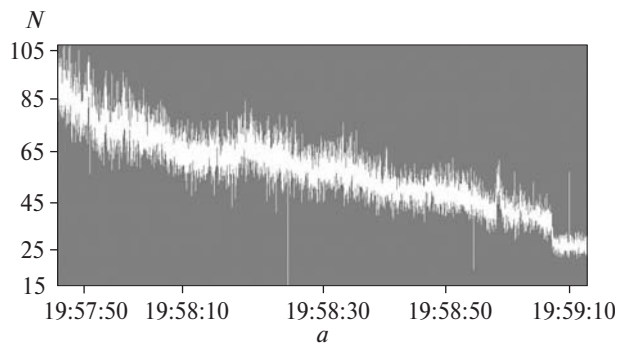


Рис. 7. Видимые кривые блеска ИСЗ в штатном режиме полета: а — для «EgyptSat» 26 февраля 2008 г., б — для «SaudiSat-3» 12 августа 2010 г. (получены на станции Дунаевцы)

рия. На протяжении месяца на перечисленных пунктах велись фотометрические наблюдения этого объекта. Было зафиксировано более 40 его проходов. Время записи фотометрической информации на отдельных пунктах колебались от 15 до 240 с. Обработка и анализ поступающих результатов наблюдений в оперативном режиме проводилась в ЛКИ УжНУ. Всего было проанализировано информацию по 25 прохождениям ИСЗ. Остальную из-за разных причин отбраковали. Оказалось, что вследствие какого-то одноразового воздействия на КА возникло его медленное вращение вокруг перпендикулярной к плоскости орбиты оси Y с периодом 24.5 мин. Кроме того, конусообразное движение вертикальной оси объекта Z вокруг направления радиуса-вектора с периодом в среднем 120 с, с постепенным уходом этой оси с плоскости орбиты порой до 55° . Последнее вращение, на наш

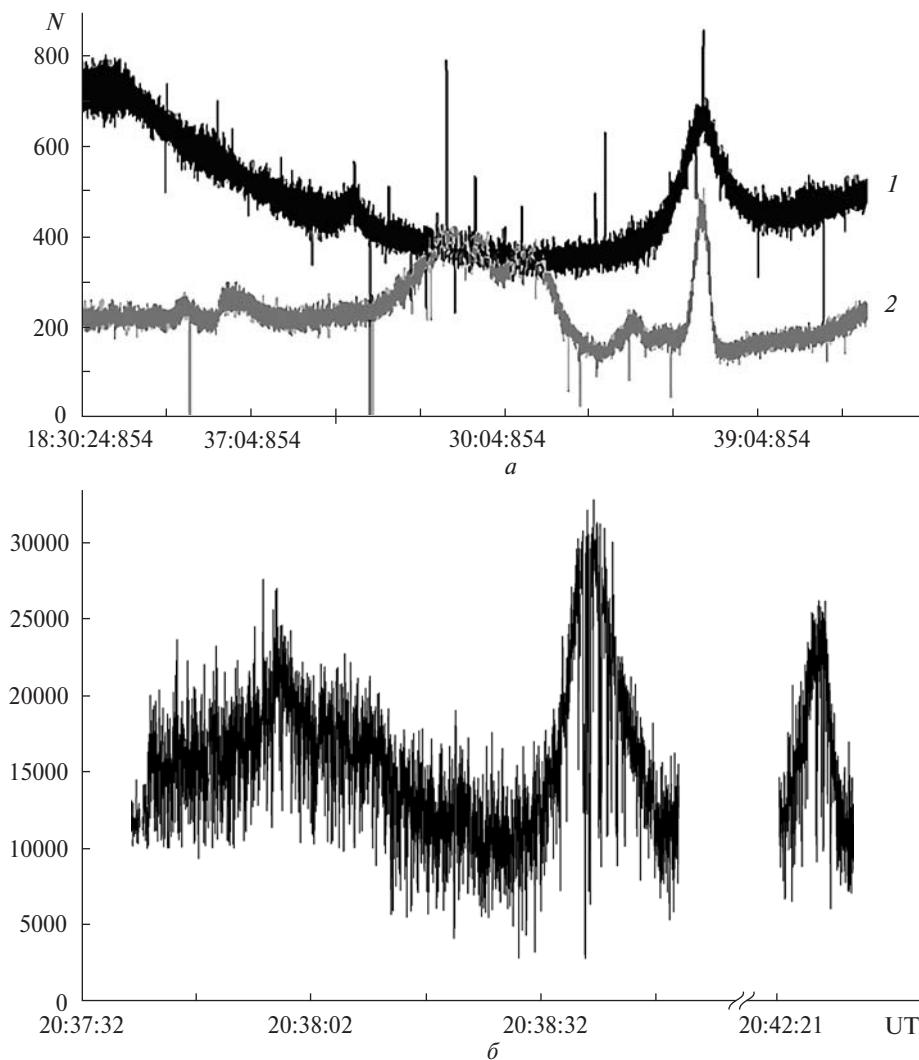


Рис. 8. Видимая кривая блеска ИСЗ «EgyptSat», полученные 23 августа 2010 г.: *а* — на станции Дунаевцы (*1* — интегральный свет, *2* — зеленая область спектра), *б* — на станции Львов (интегральный свет)

взгляд, было вызвано уже воздействием на ИСЗ возникшего аэродинамического момента.

На рис. 7 приводятся кривые блеска двух одинаковых по форме объектов «EgyptSat» и «SaudiSat-3», когда они находились на орбите в штатном режиме.

Как только ИСЗ «EgyptSat» вышел из штатного режима, характер перепада его блеска резко изменился. На рис. 8 для примера приводим две кривые блеска из 25 обработанных. Результаты обработки всех 25 проходов данного объек-

та по упомянутой выше методике приведены в табл. 2.

В таблице приведены дата, пункт и интервал наблюдений из одного пункта в шкале всемирного времени UT, количество M характерных максимумов блеска на кривой (зеркальных или квазизеркальных), которые служили исходной информацией для определения ориентации ИСЗ, значение узла орбиты объекта на момент наблюдений (наклон орбиты имел постоянное значение $i = 97.9965^\circ$), значение угла ν между на-

Таблица 2. Результаты анализа оптических наблюдений ИСЗ «EgyptSat» в режиме дестабилизации

Дата, 2010 г.	Станция	УТ (начало — конец)	M	Ω , град	ν , град	β , град	P_z , с	P_y , мин	Видимый сегмент поверхности ИСЗ
29 июля	Львов	20 ^h 03 ^m 01 ^s — 20 ^h 08 ^m 16 ^s	3	103.9	55—31	29	117.9	—	Верх и боковые грани
29 июля	Ужгород	20 ^h 04 ^m 59 ^s — 20 ^h 07 ^m 00 ^s	1	103.9	43	29	117.9	—	
4 августа	Одесса	19 ^h 50 ^m 02 ^s — 19 ^h 51 ^m 46 ^s	2	109.7	29—22	16—21	118.3	—	Частично верх, далее нижняя часть
10 августа	Львов	19 ^h 35 ^m 06 ^s — 19 ^h 35 ^m 17 ^s	1	115.6	58	30	119.3	24.523	Нижняя часть, торец
10 августа	Львов	21 ^h 13 ^m 03 ^s — 21 ^h 13 ^m 19 ^s	1	115.7	51	16*	119.3	24.523	Частично верх, далее нижняя часть
10 августа	Ужгород	21 ^h 13 ^m 15 ^s — 21 ^h 15 ^m 03 ^s	2	115.7	45—42	17*	119.3	24.523	Частично верх, далее нижняя часть
11 августа	Одесса	20 ^h 04 ^m 52 ^s — 20 ^h 05 ^m 35 ^s	3	116.6	38—35	1—2*	120.0	24.523	Нижняя часть, торец
11 августа	Ужгород	20 ^h 05 ^m 57 ^s — 20 ^h 06 ^m 30 ^s	2	116.6	45—39	32	120.0	24.523	
12 августа	Дунаевцы	20 ^h 34 ^m 36 ^s — 20 ^h 37 ^m 17 ^s	1	117.5	43.7	13*	120.0	24.523	Верх
12 августа	Львов	18 ^h 58 ^m 46 ^s — 19 ^h 00 ^m 31 ^s	1	117.5	61	48	120.0	24.523	Нижняя часть, торец
12 августа	Львов	20 ^h 34 ^m 55 ^s — 20 ^h 39 ^m 04 ^s	2	117.5	52—12	1*	120.0	24.523	Верх
13 августа	Евпатория	19 ^h 31 ^m 03 ^s — 19 ^h 31 ^m 19 ^s	1	118.5	—	—	120.0	24.523	Верх
13 августа	Дунаевцы	19 ^h 27 ^m 35 ^s — 19 ^h 31 ^m 45 ^s	3	118.5	59—49—52	27—34	120.0	24.523	Нижняя часть, торец
14 августа	Львов	19 ^h 57 ^m 28 ^s — 19 ^h 57 ^m 42 ^s	1	119.5	56	19	120.2	—	Верх
14 августа	Евпатория	18 ^h 21 ^m 00 ^s — 18 ^h 22 ^m 48 ^s	3	119.4	—	—	120.2	—	Верх
20 августа	Дунаевцы	19 ^h 43 ^m 23 ^s — 19 ^h 48 ^m 23 ^s	2	125.4	45—38	24—51	121.4	24.541	Нижняя и боковая части
20 августа	Ужгород	19 ^h 44 ^m 10 ^s — 19 ^h 46 ^m 45 ^s	2	125.4	44—38	25—50	121.4	24.541	
21 августа	Львов	20 ^h 15 ^m 28 ^s — 20 ^h 17 ^m 38 ^s	2	126.4	19—20	27	121.4	24.541	Нижняя часть, торец
22 августа	Львов	19 ^h 06 ^m 19 ^s — 19 ^h 09 ^m 39 ^s	1	127.4	59	37	121.4	24.541	Нижняя часть, боковые грани
22 августа	Львов	20 ^h 44 ^m 23 ^s — 20 ^h 45 ^m 05 ^s	2	127.4	41—38	10°—11°	121.4	24.541	Верх
23 августа	Дунаевцы	19 ^h 36 ^m 25 ^s — 19 ^h 39 ^m 25 ^s	3	128.5	53—42	28—50	121.4	24.541	Частично верх, потом нижняя часть — боковая грань, торец
23 августа	Львов	19 ^h 36 ^m 42 ^s — 19 ^h 41 ^m 21 ^s	2	128.5	53—46	32—46 — 26	121.4	24.541	
25 августа	Львов	20 ^h 37 ^m 32 ^s — 20 ^h 40 ^m 51 ^s	3	130.3	34—10	0—2	121.6	24.554	Нижняя часть, торец
29 августа	Львов	19 ^h 23 ^m 29 ^s — 19 ^h 26 ^m 29 ^s	2	134.2	51—50	40—29	121.6	24.561	Нижняя часть, торец
29 августа	Львов	21 ^h 01 ^m 26 ^s — 21 ^h 03 ^m 10 ^s	2	134.2	30—24	18*—17*	121.6	24.561	Нижняя часть, боковые грани

правлением квазинормали (близкой к реальной) и радиусом-вектором ИСЗ в момент очередного максимума блеска, значение угла β отклонения квазинормали в левую сторону от плоскости орбиты (обозначено звездочкой) и в правую, период P_z собственного вращения спутника (оси Z) вокруг радиуса-вектора, период P_y вращения спутника вокруг оси Y на интервале нескольких прохождений, видимая наблюдателю сторона спутника, а именно: нижняя часть объекта — торцевая сторона спутника и нижние стороны

панелей солнечных батарей; верхняя — это четыре панели и верхняя сторона корпуса спутника, боковая часть — одна из четырех граней корпуса ИСЗ (рис. 6, а).

На основе полученных результатов построена модель вращения ИСЗ «EgyptSat» в двух плоскостях. Схематически она отображена на рис. 9.

ВЫВОДЫ

1. Установленное вращение ИСЗ «EgyptSat» в режиме дестабилизации в августе 2010 г. не отве-

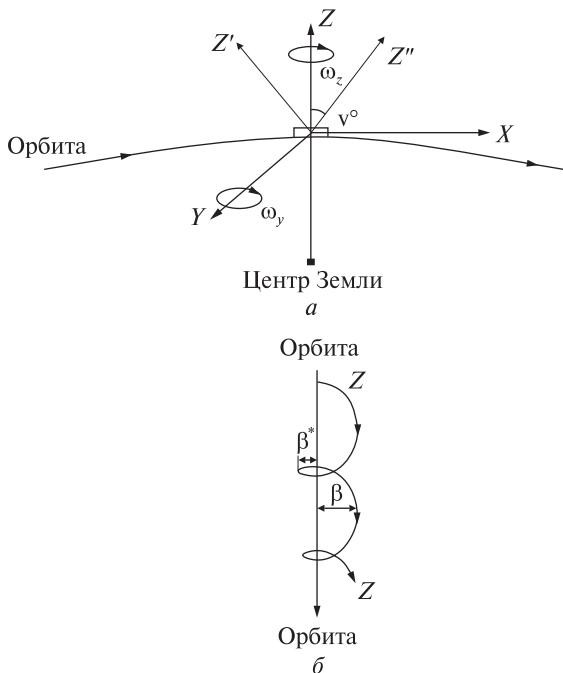


Рис. 9. а — схема вращения ИСЗ «EgyptSat» в орбитальной системе координат, б — след на небесной сфере конца оси Z ИСЗ «EgyptSat», видимый наблюдателю находящемуся в плоскости орбиты во время его фотометрии в августе 2010 г.

чало вращению космического объекта, у которого полностью отключена система стабилизации.

2. Одной из причин возникновения нештатной ситуации с египетским спутником, на наш взгляд, мог стать сбой, возможно одноразовый вследствие удара извне, в работе главного стабилизирующего маховика. Маховик после сбоя не отключился, но изменился режим его работы, что привело к вращению ИСЗ вокруг оси Y с периодом $P_y \approx 24.5$ мин.

3. Возникшее вращение спутника, в свою очередь, вывело его панели солнечных батарей и корпус из оптимального положения относительно направления вектора возмущающего аэродинамического момента, действующего на ИСЗ. Это привело к еще одному вращению объекта вокруг направления радиуса-вектора его оси Z с периодом $P_z \approx 120$ с и постепенным увеличением угла отклонения данной оси от плоскости орбиты. В этом случае главную дестабилизирующую

роль во вращении ИСЗ выполняло уже сопротивление земной атмосферы.

1. Ардашев А. Ю., Дородницына О. А., Рыжлова А. В. и др. Оптические наблюдения высокоорбитальных космических объектов для контроля космического пространства // Околоземная астрономия (Космический мусор) / Под ред. А. Г. Масевича. — М.: Космоинформ, 1998. — С. 128—144.
2. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению // Астрометрия и астрофизика. — 1983. — Вып. 50. — С. 89—93.
3. Епишев В. П., Исак И. И., Кудак В. И. и др. Определение ориентации ИСЗ по наземным наблюдениям // Радиотехнические тетради. — 2008. — № 36. — С. 53—54. — (Тр. Первой междунар. конф. «Наблюдения околоземного космического пространства», 22—24 января 2008 г.).
4. Епишев В. П., Исак И. И., Мотрунич И. И. и др. Метод определения величины и природы возмущений, оказывающих воздействие на вращение ИСЗ // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 56. — С. 152—155.
5. Епишев В. П., Исак И. И., Мотрунич И. И. и др. Идентификация искусственных космических объектов: пути решения задачи // Околоземная астрономия-2005. — Казань, 2006. — С. 267—273.
6. Епишев В. П., Исак И. И., Мотрунич И. И. и др. Возмущения во вращении ИСЗ и их причинная взаимосвязь. Результаты исследований // Околоземная астрономия — 2009 (Казань, ИАРАН, КГУ). — М.: ГЕОС, 2010. — С. 35—41.
7. Исак И. И. Решение задач поиска скрытых периодичностей методом наименьших квадратов // Науч. информ. ИНАСАН. — 1994. — Вып. 72. — 14 с.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. P. Epishev, I. I. Isak, V. I. Kudak, I. I. Motrunich, I. F. Noibauer, N. I. Koshkin, A. I. Bilinskii, K. P. Martyniuk-Lototskij, Ya. T. Blagodyr, V. V. Lopachenko, V. V. Rykhalskij, S. V. Ryschenko, A. V. Zhukovetskij

SOME RESULTS OF STUDIES OF THE BEHAVIOUR OF A SATELLITE IN ORBIT IN CONTINGENCY MODE UNDER THE NEAR-EARTH SPACE INFLUENCE

We give some results of our analysis of the behaviour of the spacecraft EgyptSat in orbit in contingency mode as compared with free rotation parameters for other satellites. We propose a conception of an emergency situation with the object. It is shown that the integration of high-precision coordinate and photometric information obtained from different points allows one rapidly and efficiently to analyze the behaviour of spacecrafts which are in orbit without radio connection.