

УДК 629.783:523; 521.1

ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ЛУНЫ И СОЛНЦА НА ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СОБСТВЕННОМ ВРАЩЕНИИ ИСЗ СЕРИИ «МИДАС»

© 2018 В. П. Епишев^{1*}, В. И. Кудак^{1,2}, В. М. Периг¹,
И. И. Мотрунич¹, И. Ф. Найбауер¹, Э. Й. Новак¹, О. Ю. Бут¹

¹Лаборатория космических исследований, Ужгородский национальный университет, Ужгород, 88000, Украина

²Институт физики, факультет естественных наук, Университет Павла Йозефа Шафарика, Кошице, 040 010 Словакия

Поступила в редакцию 11 января 2018 года; принята в печать 27 марта 2018 года

Представлены результаты анализа изменений собственного вращения нескольких дестабилизированных ИСЗ на многолетних временных интервалах. Причины циклических вариаций периода собственного вращения ИСЗ «Мидас-7», который с 1963 г. вращается вокруг Земли на высоте 3700 км, длительное время были непонятны. Эти изменения не объяснялись ни влиянием земной атмосферы и магнитного поля Земли, ни солнечной активностью. Из результатов 40-летних наблюдений за ИСЗ «Мидас-4», «Мидас-6», «Мидас-7» удалось установить, что кроме диссипативного тормозного изменения в их собственном вращении проявляются долгопериодические вариации с периодами 477 суток у ИСЗ «Мидас-4», 466 суток у «Мидас-6», 346 суток у «Мидас-7» с разными по величине амплитудами. У этих спутников явно проявляется резонансный характер таких изменений. Исходя из результатов проведенного исследования и моделирования наблюдаемой динамики у данных ИСЗ на орбите, предложено объяснение выявленных процессов. Долгопериодические изменения в собственном вращении этих космических аппаратов происходят в результате совместного влияния на них гравитационных полей Земли, Луны и Солнца в зависимости от ориентации в пространстве плоскости их орбиты. Величина амплитуды таких изменений обусловлена углом наклона орбит ИСЗ к экватору: чем он ближе к полюсному (то есть к 90°), тем она больше.

Ключевые слова: *методы: наблюдательный — космические аппараты — техника: фотометрия — Солнце: общее — Луна*

ВВЕДЕНИЕ

Переход неуправляемых ИСЗ в режим «свободного» вращения, то есть «кувыркания», у разных космических аппаратов (КА) растянут на годы и зависит от высоты орбиты ИСЗ [1]. После отключения стабилизирующих устройств спутник вначале раскручивается, а потом, благодаря в основном аэродинамическому моменту, замедляет собственное вращение до полного своего «опрокидывания» на орбите. И только достигнув режима «кувыркания», аппарат практически входит в резонансный режим со всеми возмущающими моментами, в том числе и со стороны Луны и Солнца [2, 3].

Наблюдения дестабилизированных ИСЗ показали, что их поведение на орбите может быть

хорошим индикатором физических процессов, протекающих в околоземном космическом пространстве [1, 4–6].

В Лаборатории космических исследований Ужгородского национального университета (ЛКИ УжНУ) длительное время ведется контроль за собственным вращением и ориентацией целого ряда дестабилизированных ИСЗ, в том числе серии «Мидас», которые находятся на высоте 3600–3700 км. Такая высота дает возможность исследовать влияние солнечной активности на собственное вращение ИСЗ в так называемом «чистом» виде, без «вмешательства» аэродинамического возмущающего момента.

Система противоракетной обороны «Мидас» была развернута США вокруг Земли в первой половине 60-х гг. прошлого столетия. Это объекты формы цилиндр–конус длиной 9.14 м и диаметром

*E-mail: lab-space@uzhnu.edu.ua

1.52 м. Каждый из них имеет по две панели солнечных батарей (ПСБ) длиной около 4 м ребристой формы. Не все спутники этой системы вышли на расчетные орбиты. Те, что вышли, в активном режиме работали от месяца до полугода. Выйдя из режима стабилизации, эти ИСЗ постепенно превратились в объекты—индикаторы протекания различных физических процессов в околоземном космическом пространстве на высоте их пребывания.

Так, у ИСЗ «Мидас-4» ранее по наблюдениям в 70–80 гг. была установлена довольно высокая корреляция между изменениями в его собственном вращении и интенсивностью солнечного излучения во время 21-го цикла солнечной активности. На основе полученных результатов нами была проведена даже оценка относительного изменения величины «солнечной постоянной» в наблюдаемый период времени. Ее величина, примерно 0.81%, хорошо согласовывалась с данными, полученными с помощью американского космического аппарата [4]. Однако на кривых блеска проявлялась еще одна периодичность, которую в то время объяснить не удалось [5].

Во вращении объекта «Мидас-7» было еще больше непонятного. С одной стороны, проявлялся предположительно сезонный характер с одним максимумом и одним минимумом, а с другой — не все в его поведении объяснялось только сезонными изменениями. В 70–80 гг. прошлого столетия (21-й цикл солнечной активности) этот ИСЗ вращался относительно быстро осенью ($P_0 = 105$ с) и более медленно весной ($P_0 = 127$ с), с сохранением 22-секундной амплитуды. С 2008 г. и до середины 2017 г. изменение в периоде его собственного вращения на годичном интервале происходило от 125 с (весной) до 150 с (осенью). То есть вращение ИСЗ стало более медленным уже не весной, а осенью, при сохранении одного максимума и величины амплитуды сезонного изменения периода вращения постоянной порядка 22 с.

Длительное время приемлемых объяснений такому поведению ИСЗ «Мидас-7» не было. В первую очередь наблюдаемые изменения связывались с физическими процессами в верхней атмосфере Земли под влиянием солнечного излучения. Рассматривалась их возможная связь с влиянием годовой вариации магнитной возмущенности или процессами, вызванными низкоэнергетическим корпускулярным излучением Солнца и имеющими годичную вариацию [7]. Возникло даже подозрение, что причиной могла стать переполюсовка магнитного полюса на Солнце на интервале 22 лет.

Все гипотезы со временем оказывались тупиковыми, пока в своих поисках мы не установили, что скорость перемещения плоскости орбиты ИСЗ «Мидас-7» в пространстве практически совпадает

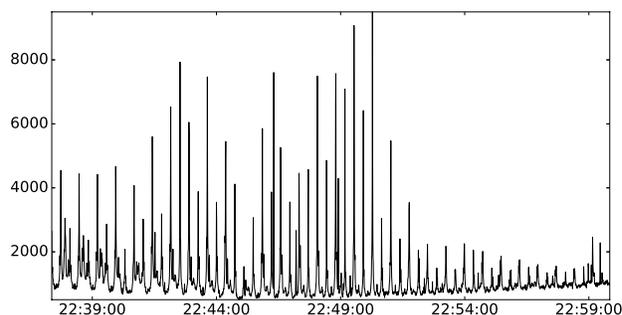


Рис. 1. Типичная кривая блеска спутника «Мидас-4», полученная 23 марта 2012 г. в V-фильтре.

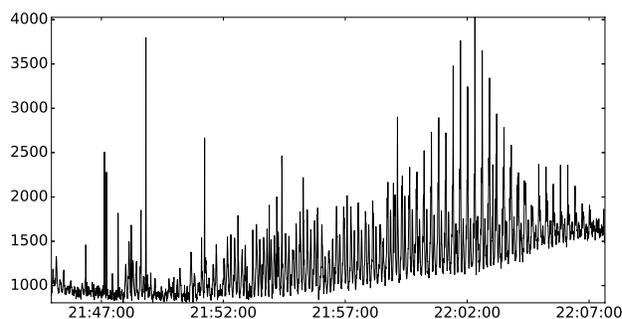


Рис. 2. Типичная кривая блеска спутника «Мидас-6», полученная 23 марта 2012 г. в V-фильтре.

с скоростью перемещения плоскости орбиты Луны. А число оборотов ИСЗ вокруг Земли за период сароса (18.03 года) равно целому числу $N = 56\,500$.

Добавив к результатам наших фотометрических наблюдений этого объекта данные, приведенные в базе ММТ-9 [8], мы установили, что период вековых изменений в собственном вращении ИСЗ «Мидас-7» практически совпадает с лунным драконическим годом. Таким образом, поиски решения задачи были направлены в новое русло.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

В процессе исследования нами использованы результаты фотометрических и позиционных наблюдений трех ИСЗ системы «Мидас», которые проводились в 70-е и 80-е годы прошлого столетия и с 2007 г. по июль 2017 г. в Ужгороде, а также данные фотометрии этих объектов, проводимой с июня 2014 г. на Mini-Mega TORTORA (ММТ-9) [8, 9]. Типичные кривые блеска ИСЗ серии «Мидас», записанные в разное время, приведены на рис. 1–3.

В таблице 1 представлены интервалы наблюдений исследуемых ИСЗ в Ужгороде, отдельные характеристики их орбит (высота перигея h_{per} и апогея h_{ap} , наклон орбиты i , скорость смещения

Таблица 1. Орбитальные и динамические характеристики ИСЗ серии «Мидас»

Название ИСЗ	$h_{\text{пер}}$, km	$h_{\text{ап}}$, km	i , deg	$\dot{\Omega}$, deg day ⁻¹	P , min	ΔP_0 , s	Интервал наблюдений ΔT	Кол-во кривых блеска
«Мидас-4»	3620	3650	95.8	0.2070	160.0	104.7	Jul 01, 1973	85
						141.0	Nov 06, 1984	
						84.1	Feb 25, 2009	32
						89.3	Apr 03, 2016	
«Мидас-6»	3600	3680	87.3	0.0945	166.4	71.5	Jul 10, 1973	28
						81.9	Sep 18, 1974	
						64.0	Aug 28, 2007	35
						72.2	May 18, 2015	
«Мидас-7»	3727	3765	88.5	0.0554	167.9	105.0	Jul 23, 1978	106
						130.7	Aug 19, 1984	
						126.6	Jan 10, 2007	76
						151.6	May 23, 2017	

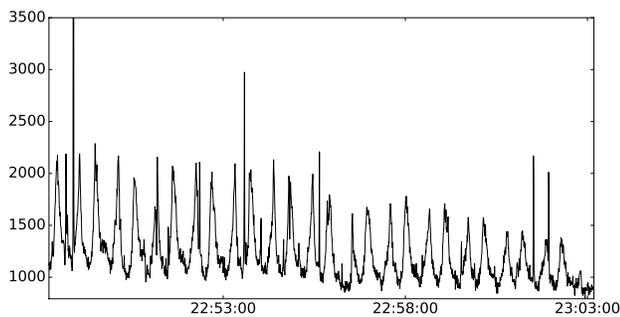


Рис. 3. Типичная кривая блеска спутника «Мидас-7», полученная 29 марта 2011 г. в V-фильтре.

узла орбиты $\dot{\Omega}$ и орбитальный период P_{orb}), количество включенных в обработку кривых блеска КА, пределы изменения величины периода их собственного вращения P_0 в разные эпохи наблюдений.

Орбитальные параметры ИСЗ определялись как по результатам их позиционных наблюдений в Ужгороде, так из элементов орбит, приводимых в NORAD. Погрешность проведенных расчетов не превышала $0^{\circ}01$. Определение величины периода собственного вращения ИСЗ осуществлялось по данным из кривых блеска, с точностью не хуже 0.1 с.

Наблюдаемые зеркальные вспышки от ИСЗ возникали вследствие отражения света от панелей солнечных батарей. Их периодичность и постоянная повторяемость подтверждают собственное вращение данных объектов.

Исследование ориентации КА показало, что она происходит вокруг продольной оси для всех трех ИСЗ «Мидас», которая по направлению практически совпадает с направлением «спутник—центр Земли.» Ее отклонения вследствие нутационных колебаний не превышали в разное время 5° – 7° .

Определение ориентации ИСЗ на все эпохи наблюдений осуществлялось с использованием специальной программы «Ориентация», разработанной в ЛКИ УжНУ [10]. Результаты определения ориентации данных объектов в полном объеме хранятся в архиве лаборатории. Увеличение угла нутации с 5° до 7° за время сорокалетних наблюдений спутника «Мидас-7» можно объяснить постепенным диссипативным торможением его собственного вращения на орбите.

Различные значения угла между направлениями нормали к бликующим площадкам и продольной оси КА практически подтверждают тот факт, что ПСБ этих спутников имеют ребристую структуру.

2. АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ИСЗ

Фотометрические наблюдения ИСЗ системы «Мидас» на протяжении более 40 лет в ЛКИ УжНУ проводились на трех спутниковых электрофотометрах, изготовленных в лаборатории. На первом двухканальном фотометре записи блеска

космических объектов велись в интегральном свете с помощью самописца [11].

Следующий прибор был изготовлен как двухканальный колориметр ($D = 10$ см), работающий в спектральных диапазонах B и V . Регистрация блеска на нем вначале велась с помощью цифropечатающего устройства. В настоящее время фотометрическая информация вводится в ПК [12]. Данный прибор размещен на специальной спутниковой фотокамере АФУ-75.

В последние 10 лет фотометрические наблюдения также ведутся в сменных фильтрах V и R на одноканальном фотометре в прямом фокусе специального телескопа ТПЛ-1М ($D = 100$ см) со второй площадки, размещенной в 15 км от Ужгорода [13].

Записи изменения блеска ИСЗ являются базовым экспериментальным материалом для определения параметров собственного и прецессионного вращений ИСЗ. Для успешного решения данной задачи в ЛКИ УжНУ был разработан метод под названием «Период.» В нем реализован алгоритм поиска скрытой периодичности процессов разнообразного происхождения, которые можно представить математически в качестве определенной функции. Последняя может быть получена в форме таблицы или графика. Разработанный алгоритм является универсальным для изучения периодичности. В нем не делаются никакие упрощения, не рассматриваются условности и не ограничивается количество требуемых вычислений. Метод базируется на использовании автокорреляционных функций и рядов Фурье [14].

В последние пять лет для определения периода собственного вращения ИСЗ нами также используется разработанное в ЛКИ программное обеспечение на базе известного метода Ломба—Скаргла [15]. Подобный метод применяется для анализа фотометрических наблюдений и в программах системы мониторинга ММТ-9 [9].

После анализа результатов определения периода собственного вращения трех ИСЗ «Мидас» полученных в разное время на основании метода Фурье и Ломба—Скаргла в Ужгороде, мы объединили их с данными ММТ-9. Среднее значение погрешности в приведенных оценках периода в данном случае не превышает 0.1 с.

Таким образом, мы проанализированы величины периодов собственного вращения по данным 268 сетов наблюдений ИСЗ «Мидас-4», 183 — «Мидас-6», 318 — «Мидас-7», которые стали основой для установления природы выявленных долгопериодических возмущений во вращении этих объектов.

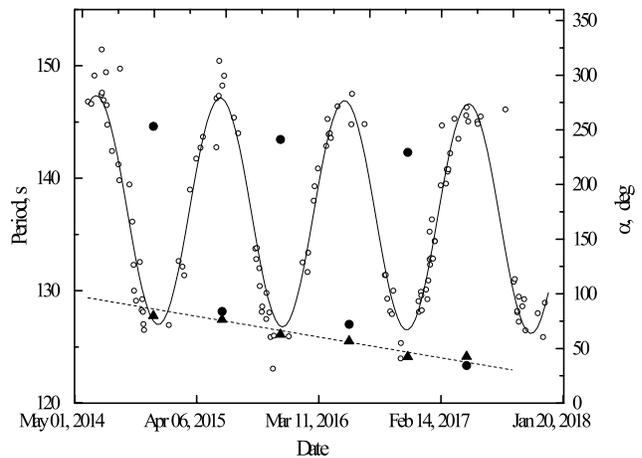


Рис. 4. Зависимость изменения периода собственного вращения спутника «Мидас-7» от положения Солнца, Луны и восходящего узла орбиты спутника на интервале 2014–2017 гг. Сплошной линией представлена функция (1), пунктиром — изменения прямого восхождения узла орбиты ИСЗ «Мидас-7», пустые кружки — значения собственного вращения ИСЗ «Мидас-7», заполненные кружки — положение Солнца, черные треугольники — положение Луны.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ВО ВРАЩЕНИИ ИСЗ СЕРИИ «МИДАС»

Долгопериодические возмущения наиболее ярко проявились в собственном вращении ИСЗ «Мидас-7» (рис. 4, 5, 6). Подобный характер возмущений обнаружен и во вращении двух других ИСЗ «Мидас» (см. рис. 7, 8). Анализ нескольких сотен кривых блеска данных ИСЗ, полученных в Ужгороде на протяжении примерно 40 лет, и собранная различная информация о самих объектах показывают, что в работе [9] приведены кратные значения истинных периодов собственного вращения спутников «Мидас.» Так, у «Мидас-4», «Мидас-7» это $\frac{1}{2}P_0$, а у «Мидас-6» — $\frac{1}{4}P_0$. Поэтому в дальнейшем все значения периодов из базы данных [8] были приведены к значениям истинного периода вращения ИСЗ и уже после этого объединены с вычислениями, проведенными в ЛКИ УжНУ.

Рассмотрим более детально вращение ИСЗ «Мидас-7.» Как видно на графиках (рис. 5, 6), изменения периода вращения спутника на первый взгляд носят предположительно сезонный характер — один максимум и один минимум на протяжении практически года. На первом этапе наблюдений (1970–1980 гг.) и на втором (2007–2017 гг.) амплитуда долгопериодических изменений сохраняется почти одинаковой, $A \approx 22$ с.

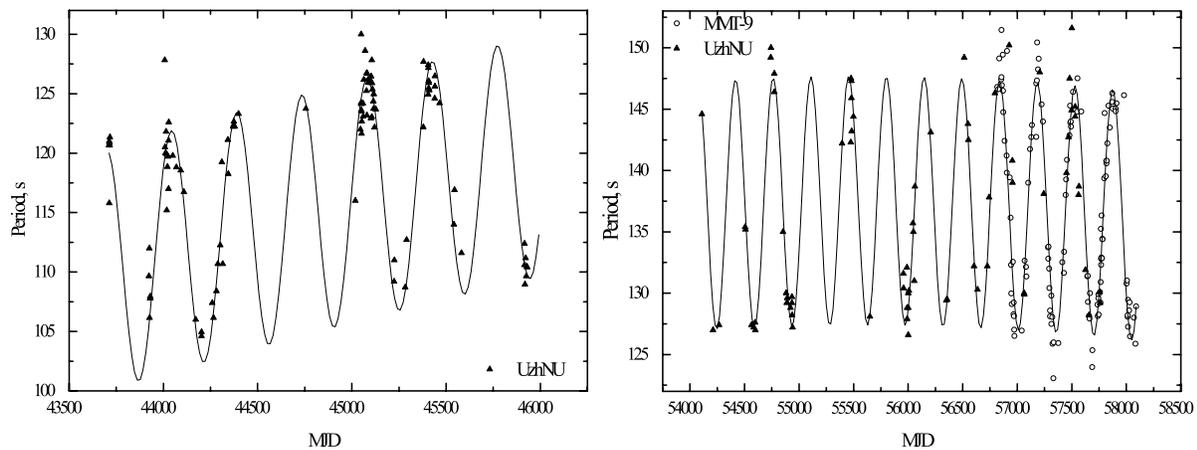


Рис. 5. Изменение периода вращения спутника «Мидас-7» на интервале 1978–1984 гг. (а) и на интервале 2007–2017 гг. (б). Линией представлена функция (1), пустые кружки — данные, полученные на ММТ-9 [8], черные треугольники — данные ЛКИ УжНУ.

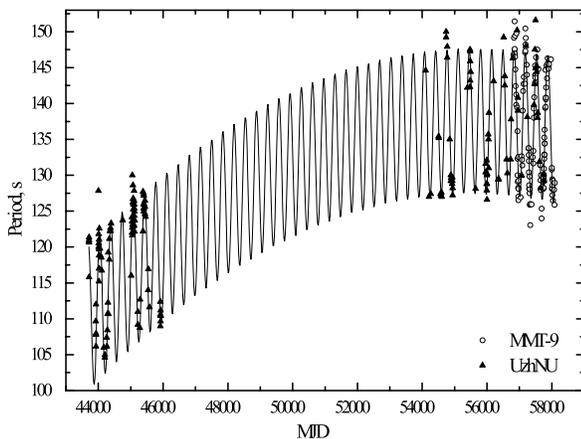


Рис. 6. Изменение периода вращения спутника «Мидас-7» на интервале 1978–2017 гг. Обозначения аналогичны предыдущему рисунку.

Однако граничные значения этих изменений разные. В 80-е гг. XX века они были в пределах 105–127 секунд, во втором десятилетии XXI века — 126.5–151.6 с. То есть среднее значение периода собственного вращения \overline{P}_0 увеличилось практически на 22 секунды.

Изменения периода собственного вращения ИСЗ «Мидас-7» на еще больших временных интервалах наиболее точно описываются комбинацией квадратической функции и синуса. Если взглянуть на рис. 6, то визуально заметно, что изменение периода ИСЗ может быть описано квадратической функцией, а синусоидальная составляющая взята для представления периодичности процесса. Иные комбинации функций дают большие отклонения χ^2

и в статье не приводятся. Функция имеет вид:

$$y = A + Bx + Cx^2 + K \sin\left(\pi \frac{x - x_c}{w}\right), \quad (1)$$

а ее параметры представлены в таблице 2.

Это увеличение \overline{P}_0 на 0.66 с за год можно, с одной стороны, объяснить присущей диссипацией энергии во вращении ИСЗ вследствие его взаимодействия (в основном трения) с окружающей средой околоземного космического пространства. А с другой стороны, его характер, как видно на рис. 6, может быть обусловлен более глубокими и длительными физическими процессами в околоземном космическом пространстве, происходящими с полупериодом около 44–45 лет. Эти процессы, возможно, связаны с циклическими (примерно 90 лет) изменениями солнечной активности (СА), во многом пока еще непонятными. Например, на 23-м переходном цикле СА вслед за ослаблением более чем в два раза общего магнитного поля Солнца уменьшились практически все характеристики как на Солнце, так и в межпланетном пространстве [16]. Сохранение же на наблюдаемом интервале около 40 лет постоянного значения амплитуды этих изменений и наличие на интервале неполного года лишь одного максимума и минимума не увязывалось с известными суточными, месячными, полугодовыми, годовыми циклами физических процессов на Солнце и их проявлениями в земной атмосфере [7]. Установив, что наблюдаемый период долгопериодических изменений во вращении ИСЗ $P_l = 345^d8$ почти совпадает с величиной лунного драконического года $P_l = 346^d6$, мы пришли к выводу о ключевой (на годовом интервале) роли гравитационного поля Луны как возможного источника возмущений.

Таблица 2. Значения параметров уравнения (1), описывающие изменения периода ИСЗ «Мидас-7»

Переменная	Значение
A	-462.6492 ± 35.5002
B	0.0216 ± 0.0014
C	$-1.9445e-07 \pm 1.3801e-08$
K	10.1362 ± 0.1729
x_c	57443.1828 ± 1.1079
w	172.9091 ± 0.0372

$\chi^2 = 2450.52$, reduced $\chi^2 = 6.05$

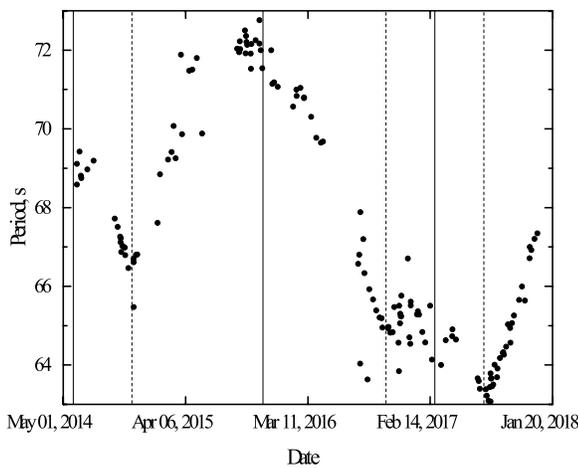


Рис. 7. Изменение периода вращения спутника «Мидас-6» на интервале 2014–2017 гг. Сплошная вертикальная линия — моменты максимумов, штриховые вертикальные линии — моменты минимумов, согласно данным таблицы 5.

Оказалось, что скорость перемещения узлов орбиты данного ИСЗ и Луны практически одинакова и они смещаются в одном направлении (таблица 3). Однако для объяснения причины наличия лишь одного максимума и минимума на интервале 345.8 суток влияния только гравитационного поля Луны на вращение ИСЗ было явно недостаточно. Все стало на свои места, когда в рассматриваемую модель было включено и видимое годовое перемещение Солнца относительно плоскости орбиты этого ИСЗ.

В результате мы рассмотрели динамическую модель, объясняющую, на наш взгляд, источники выявленных долгопериодических возмущений и их влияние на собственное вращение ИСЗ «Мидас-7» (рис. 9).

В случае конфигурации, представленной на верхней схеме рис. 9, ускоряющее возмущение

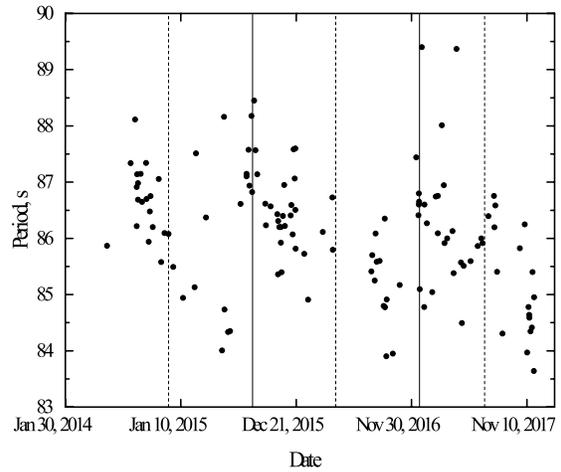


Рис. 8. Изменение периода вращения спутника «Мидас-4» на интервале 2014–2017 гг. Сплошные вертикальные линии — моменты максимумов, штриховые — моменты минимумов, согласно данным таблицы 4.

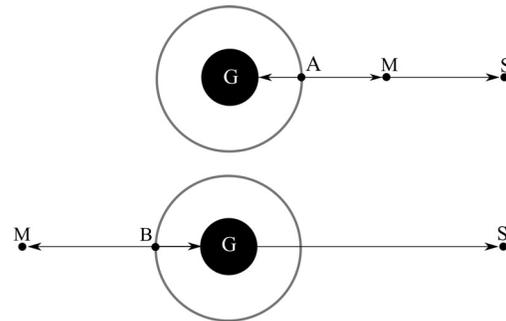


Рис. 9. Схематическое изображение ускоряющего возмущения, действующего на вращение ИСЗ в моменты нахождения Луны и Солнца в плоскости орбиты спутника

можно представить как $\vec{a}_A = \vec{a}_G + \vec{a}_M + \vec{a}_S$, для нижней схемы — $\vec{a}_B = \vec{a}_G - \vec{a}_M + \vec{a}_S$, где \vec{a}_A и \vec{a}_B — ускоряющее возмущение, действующее на спутник соответственно в точках А и В; \vec{a}_G — ускоряющее возмущение со стороны Земли; со стороны Луны — \vec{a}_M ; со стороны Солнца — \vec{a}_S .

Узлы орбит Луны и объекта «Мидас-7» перемещаются в западном направлении практически с одинаковой скоростью навстречу видимому перемещению Солнца по эклиптике. И если в какой-то момент времени Луна и Солнце практически одновременно пересекают плоскость орбиты ИСЗ «Мидас-7», находясь на одной стороне относительно Земли, то следующий такой момент наступает примерно через 346 суток, и период собственного вращения ИСЗ P_0 достигает максимального значения. Если же Солнце и Луна опять одновременно пересекают плоскость орбиты данного ИСЗ, но в конфигурации, когда между ними находится

Земля, период P_0 имеет минимальное значение. И это наблюдается на протяжении 40 лет. Данные из таблицы 3 графически представлены на рис. 4.

Похожий характер проявляемых возмущений был впоследствии выявлен также у ИСЗ «Мидас-6» и «Мидас-4» (рис. 7 и 8). Поскольку скорость перемещения узлов орбиты ИСЗ «Мидас-4» и «Мидас-6» отличается от «Мидас-7» относительно Луны, то практически одновременное пересечение плоскостей их орбит Луной и Солнцем происходит соответственно только через примерно 477 и 466 суток, что совпадает с экстремальными точками на кривых долгопериодических возмущений в их собственном вращении.

Несколько больший разброс значений периода собственного вращения у ИСЗ «Мидас-4» вдоль кривой на рис. 8 объясняется, на наш взгляд, как точностью определения самого периода, так и повышенной чувствительностью вращения данного объекта к изменениям прямого солнечного излучения [5]. В какой-то степени это объясняется наклоном орбиты ИСЗ, заметно отличающимся от 90° .

Результаты вычислений положения Луны, Солнца и одного из узлов орбиты ИСЗ серии «Мидас» в геоцентрической экваториальной системе координат на моменты минимумов и максимумов периода долгопериодических возмущений P_l представлены в таблицах 3–5 только координатой α . Какая-либо корреляция между периодом P_l и положением Луны и Солнца по координате δ в границах точностей выполненных вычислений ($\pm 0^d.15$) не обнаружена.

В первой колонке таблиц 3–5 приведен номер по порядку, во второй — даты экстремальных значений периода собственного вращения ИСЗ, в третьей — значения экстремумов на этот момент периода собственного вращения ИСЗ (максимальное и минимальное), в четвертой, пятой и шестой колонках — прямое восхождение α соответственно узла орбиты ИСЗ (восходящего или нисходящего), положение Солнца вдоль эклиптики, положение Луны на орбите. Положения Солнца и Луны указаны с точностью $0^d.1$.

В таблице 6 приведены для сравнения средние значения периодов долгопериодических возмущений P_l , амплитуды этих возмущений ΔA и наклона орбиты ИСЗ — i , а также количество обращений исследуемых ИСЗ вокруг Земли на интервале сароса (N). Во всех случаях оно равно целому числу, косвенно подтверждая резонансный характер вращения данных объектов и одну из ключевых ролей в этом Луны.

С другой стороны, величина амплитуды долгопериодических изменений, скорее всего, обусловлена величиной угла наклона i плоскости орбиты ИСЗ к экватору и различным влиянием на них

Таблица 3. Положения Солнца (α_S), Луны (α_M) и узла орбиты ИСЗ «Мидас-7» ($\alpha_{\Omega_{\text{sat}}}$) в моменты (Max, Min) периода вековых изменений (P_l) на интервале наблюдений

$P_l \approx 346 \text{ days}, \dot{\Omega} = 0.0558 \text{ deg day}^{-1}$					
No.	Date	P	$\alpha_{\Omega_{\text{sat}}}$, deg	α_S , deg	α_M , deg
1	2	3	4	5	6
1	Jul 05, 1978	Max	102.5	103.5	105.0
2	Jan 02, 1979	Min	99.2	285.5	98.5
3	Jun 24, 1979	Max	90.6	92.0	93.5
4	Dec 04, 1979	Min	81.0	251.0	85.5
5	Jun 12, 1980	Max	72.0	80.1	72.0
6	Nov 26, 1980	Min	63.0	241.2	65.5
7	Apr 23, 1982	Max	35.3	31.0	33.5
8	Oct 04, 1982	Min	26.3	189.5	23.2
9	Apr 16, 1983	Max	17.3	20.5	19.0
10	Apr 01, 1984	Max	3.0	10.5	7.0
11	Oct 27, 2008	Max	210.6	220.0	210.7
12	Apr 10, 2009	Min	200.9	18.7	201.1
13	Sep 20, 2009	Max	191.4	178.0	190.7
14	Mar 29, 2010	Min	180.3	7.5	181.7
15	Sep 06, 2010	Max	171.1	167.5	170.5
16	Mar 17, 2011	Min	162.2	357.0	164.0
17	Aug 29, 2011	Max	153.0	157.0	154.0
18	Mar 07, 2012	Min	143.8	347.0	143.0
19	Aug 16, 2012	Max	132.6	146.0	132.8
20	Jan 27, 2013	Min	124.5	309.5	126.1
21	Jul 09, 2013	Max	115.3	108.5	115.5
22	Dec 20, 2013	Min	106.2	267.5	105.1
23	Jun 27, 2014	Max	96.4	96.5	100.2
24	Dec 07, 2014	Min	86.5	254.2	87.2
25	Jun 16, 2015	Max	76.0	83.2	77.2
26	Nov 26, 2015	Min	66.1	242.0	72.0
27	Jun 04, 2016	Max	55.9	72.2	58.5
28	Nov 14, 2016	Min	46.7	230.0	48.0
29	Apr 27, 2017	Max	37.8	34.5	39.0
30	Nov 30, 2017	Min	26.9	218.2	24.8

Таблица 4. Положения Солнца (α_S), Луны (α_M) и узла орбиты ИСЗ «Мидас-4» ($\alpha_{\Omega_{sat}}$) в моменты (Max, Min) периода вековых изменений (P_l) на интервале наблюдений

$P_l = 477 \text{ days}, \dot{\Omega} = 0.2070 \text{ deg day}^{-1}$					
No.	Date	P	$\alpha_{\Omega_{sat}}$, deg	α_S , deg	α_M , deg
1	2	3	4	5	6
1	Nov 20, 1979	Max	245.3	235.2	239.0
2	Aug 15, 1982	Max	94.5	144.0	90.2
3	Dec 05, 2014	Min	60.4	251.0	62.0
4	Aug 13, 2015	Max	113.0	142.0	119.0
5	Apr 18, 2016	Min	163.7	26.2	173.0
6	Dec 24, 2016	Max	215.2	273.0	214.0
7	Aug 20, 2017	Min	254.5	105.4	260.5

Таблица 5. Положения Солнца (α_S), Луны (α_M) и узла орбиты ИСЗ «Мидас-6» ($\alpha_{\Omega_{sat}}$) в моменты (Max, Min) периода вековых изменений (P_l) на интервале наблюдений

$P_l = 466 \text{ days}, \dot{\Omega} = 0.0944 \text{ deg day}^{-1}$					
No.	Date	P	$\alpha_{\Omega_{sat}}$, deg	α_S , deg	α_M , deg
1	2	3	4	5	6
1	Sep 27, 1973	Max	190.6	183.5	186.2
2	May 29, 2014	Max	73.6	66.5	75.1
3	Nov 08, 2014	Min	58.7	223.1	57.5
4	Nov 07, 2015	Max	204.0	222.7	203.0
5	Oct 14, 2016	Min	359.1	199.3	0.5
6	Feb 27, 2017	Max	346.2	340.8	345.0
7	Jul 13, 2017	Min	333.5	112.5	333.0

прямой солнечной радиации. И чем угол наклона ближе к 90° , тем амплитуда больше. Усредненные количественные оценки величины возмущений со стороны гравитационных полей Луны и Солнца на собственное вращение ИСЗ серии «Мидас» приведенные в Разделе 4, подтверждают сделанные выводы.

Таблица 6. Результаты сравнения амплитуды долгопериодических возмущений в собственном вращении ИСЗ серии «Мидас» ΔA с наклоном орбит i

Название ИСЗ	P_l , days	i , deg	ΔA , s	N
«Мидас-4»	477	95.8	4	57340
«Мидас-6»	466	87.3	8	56992
«Мидас-7»	346	88.5	22	56500

4. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОБСТВЕННОЕ ВРАЩЕНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ИСЗ

Собственное вращение ИСЗ на орбите рассматривается как движение гироскопа, имеющего в основном три степени свободы. Влияние внешних сил на такой гироскоп проявляется через гироскопический момент (момент силы \vec{M}), который вызывает вращение объекта вокруг собственной оси и прецессионное движение самой оси вращения с угловыми скоростями ω и ω_0 соответственно.

В общей форме связь между гироскопическим моментом \vec{M} и вращением гироскопа выражается известным соотношением:

$$\vec{M}_g = L\vec{\omega}_{pr}, \tag{2}$$

где L — момент количества движения, равный

$$L = I\omega_0, \tag{3}$$

где I — момент инерции вращающегося тела. Отсюда:

$$\vec{M}_g = I\omega_0\omega_{pr} \sin \beta, \tag{4}$$

где β — угол прецессии оси собственного вращения ИСЗ.

Если ω_0 и ω_{pr} характеризуют вращение объекта, то величина I обусловлена его массой и формой. Угловые скорости определяются через периоды соответствующего вращения T :

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \tag{5}$$

Величину возмущающего момента, действующего на вращающийся объект, определяют как

$$M_L = \frac{dL}{dt}, \tag{6}$$

то есть изменение момента количества движения на рассматриваемом временном интервале.

Для установления источника возмущений необходимо с учетом характеристик исследуемого ИСЗ оценить величину всех возможных возмущающих

моментов и сравнить их с результатами наблюдений.

В результате проведенных ранее исследований нами было установлено, что все три объекта вращаются вокруг своей продольной оси, направленной практически в нади́р, так как угол ее колебаний относительно плоскости орбиты сохраняется в пределах $5^\circ\text{--}7^\circ$. Рассматривая каждый из объектов «Мидас» как симметрическое цилиндрическое тело, вращающееся вокруг продольной оси z , можно записать $I_z = 0.5mr^2$. А с учетом распределения массы вдоль двух ПСБ

$$I_z = 0.513mr^2, \quad (7)$$

где m — масса спутника, r — его радиус. Согласно решению задачи трех тел, максимальное возмущение на гироскопический момент \vec{M} спутника со стороны Луны при пересечении плоскости орбиты ИСЗ составляет 0.052% от его величины, а со стороны Солнца в аналогичной ситуации — 0.024%.

Результаты приведенных вычислений представлены в таблицах 7 и 8. В первом столбце таблицы 7 приведено название ИСЗ, во втором — их массы (m), в третьем — площадь одной ПСБ (S), в четвертом — орбитальный период (P_{orb}), в пятом — угловая скорость прецессии $\omega_{\text{пр}}$, в шестом и седьмом — угловая скорость собственного вращения ИСЗ в моменты максимума и минимума периода долгопериодических изменений ω_0 и ω .

В таблице 8 в первом столбце — название ИСЗ, во втором — суммарный возмущающий момент источника долгопериодических изменений в собственном вращении ИСЗ (M_L), установленный из наблюдений, в третьем — суммарный возмущающий момент со стороны гравитационных полей Луны и Солнца ($M_{M,S}$), полученный в результате вычислений, в четвертом — усредненное значение возмущающего момента со стороны прямой солнечной радиации (M_\odot), методика вычисления которого для ИСЗ серии «Мидас» приведена в работе [5], в пятом — вычисленный суммарный возмущающий момент со стороны гравитационных полей Луны, Солнца и прямой солнечной радиации ($\sum M$), в шестом — гироскопический момент во время нахождения Луны и Солнца на противоположных сторонах орбиты ИСЗ (M_{g1}), в седьмом — гироскопический момент во время нахождения Луны и Солнца с одной стороны орбиты ИСЗ (M_{g2}).

Если исключить отдельные (очень редкие в 24-м цикле солнечной активности) вспышки на Солнце, то влияние возмущающего момента со стороны солнечной радиации на собственное вращение ИСЗ будет практически постоянным по величине и направлению. Полученные нами результаты показывают, что для ИСЗ «Мидас» этот возмущающий

момент по величине меньше периодически изменяющегося суммарного гравитационного момента со стороны Луны и Солнца (столбцы (3) и (4) таблицы 8). Он больше влияет на скорость диссипативного торможения во вращении ИСЗ, чем на периодичность изменений гравитационного момента. Наибольшая сложность в таких исследованиях как раз возникает на этапе разделения суммарного возмущающего момента на составные компоненты.

Вычисления гравитационных возмущающих моментов со стороны Луны и Солнца проводились при условии, что орбиты всех исследуемых ИСЗ — полярные, а Луна и Солнце находятся строго в их плоскости. В этом случае гравитационное влияние на вращение ИСЗ со стороны Луны и Солнца будет максимальным. Такое условие выполняется практически только для ИСЗ «Мидас-7.» Тут расчетные и установленные из наблюдений значения возмущающих моментов практически совпадают (столбцы (2) и (5) таблицы 8). Для ИСЗ «Мидас-4,» «Мидас-6» расчетные значения возмущающих моментов завышены по сравнению с наблюдаемыми, и поэтому их значения расходятся. Чем меньше угол наклона орбиты ИСЗ, тем сильнее ослабевает реальное влияние на вращение ИСЗ гравитационных моментов со стороны Луны и Солнца [17]. В нашем случае это также видно из полученных результатов наблюдений ИСЗ «Мидас.»

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что все дестабилизированные искусственные объекты стремятся войти в резонанс с различными возмущающими моментами, обусловленными физическими полями в околоземном космическом пространстве. Источников возмущений много, их влияние на вращающиеся вокруг Земли объекты сказывается по-разному в зависимости от высоты полета ИСЗ и площади их поперечного сечения, величины магнитного и аэродинамического моментов, наличия коронарных дыр на Солнце и фазы протекания 11-летнего цикла солнечной активности. Сюда необходимо отнести и гравитационные моменты, возникающие под влиянием естественных космических тел [1, 2, 5, 6, 10].

В любом случае анализ собственного вращения дестабилизированных ИСЗ может помочь обнаружению слабовыраженных физических процессов в околоземном космическом пространстве. Проявление таких процессов имеет довольно сложную картину, «замытую» их взаимокompенсацией. Во многих случаях воздействие таких процессов становится заметным только на довольно длительных промежутках времени после целой цепочки преобразований [5, 6, 10]. Именно такой сложный характер их проявления мы наблюдаем и в собственном вращении ИСЗ системы «Мидас.»

Таблица 7. Геометрические и динамические параметры ИСЗ серии «Мидас»

Название ИСЗ	m , kg	S , m ²	$P_{\text{orb}} \pm 0.1$, min	$\omega_{\text{pr}} \times 10^{-4}$, s ⁻¹	$\omega_0 \times 10^{-2}$, s ⁻¹	$\omega \times 10^{-2}$, s ⁻¹
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
σ				$\pm 0.2 \times 10^{-4}$	$\pm 0.8 \times 10^{-4}$	$\pm 0.8 \times 10^{-4}$
«Мидас-4»	1800	10.353	165.95	6.31	7.036	7.475
«Мидас-6»	1840	11.717	166.40	6.22	8.702	9.817
«Мидас-7»	2000	9.678	167.85	6.24	4.189	4.948

Таблица 8. Результаты определения влияния возмущающих моментов на вращение ИСЗ «Мидас» со стороны гравитационных полей Земли, Луны, Солнца и прямой солнечной радиации

Название ИСЗ	$M_L \times 10^{-6}$, N · m	$M_{M,S} \times 10^{-6}$, N · m	$M_{\odot} \times 10^{-6}$, N · m	$\sum M \times 10^{-6}$, N · m	$M_{g1} \times 10^{-6}$, N · m	$M_{g2} \times 10^{-6}$, N · m
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
σ	$\pm 0.2 \times 10^{-7}$	$\pm 0.1 \times 10^{-6}$	$\pm 0.1 \times 10^{-6}$	$\pm 0.2 \times 10^{-6}$	$\pm 0.3 \times 10^{-7}$	$\pm 0.3 \times 10^{-7}$
«Мидас-4»	0.89	9.16	3.64	5.52	2.074	1.969
«Мидас-6»	2.40	7.86	3.85	4.01	2.793	2.063
«Мидас-7»	2.38	5.51	3.15	2.36	1.515	1.284

На высоте пребывания исследуемых КА аэродинамический момент практически отсутствует, и основным источником наблюдаемых возмущений, по мнению специалистов, является прямое или переработанное земной атмосферой солнечное излучение [5]. По результатам проведенных исследований можно заключить, что помимо прямого солнечного излучения существенным заметным возмущающим источником является также совместное влияние гравитационных полей Земли, Луны и Солнца, которое периодически ускоряет или замедляет угловую скорость собственного вращения данных ИСЗ. Отметим, что это суммарное влияние практически не сказывается на орбитальных параметрах ИСЗ [18]. Его видно только в изменениях собственного вращения объектов, кинетическая энергия которого на несколько порядков меньше орбитальной. Следовательно, такого уровня возмущения удастся зарегистрировать лишь благодаря точным фотометрическим наблюдениям.

Исследование механизма влияния возмущающих гравитационных моментов Луны и Солнца и их взаимодействия на изменения кинетического момента КА, который определяет собственное и прецессионное вращение объекта, является продолжением исследований, начатых с ИСЗ «Пагеос» [19]. Последний, испытав высокую степень

разрушения, восстановил характерную для него динамику поведения на орбите за неполных три месяца. Потеря массы и части поверхности у этого ИСЗ была компенсирована увеличением скорости собственного вращения, и он снова вошел в резонанс с возмущающими природными силами, действующими на него в месте его пребывания на орбите. При этом ИСЗ сохранил момент количества движения, который удалось зарегистрировать лишь благодаря точным фотометрическим наблюдениям.

Полученные результаты исследования причин возмущений в собственном вращении ИСЗ «Мидас-4», «Мидас-6», «Мидас-7» и «Пагеос» на длительных временных интервалах подтверждают также универсальность закона сохранения количества движения и в случае искусственных космических тел.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проведено в рамках государственного бюджетного проекта No. 0116U004790.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. P. Epishev, I. I. Isak, V. I. Kudak, et al., Space Sci. Technology **18**, 60 (2012).

2. В. В. Белецкий, *Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле: Учебное пособие* (МГУ, Москва, 1975) [in Russian].
3. W. B. Patterson and K. E. Kissell, *J. Spacecraft Rockets* **12**, 539 (1975).
4. A. T. Mecherikunnel, R. B. Lee, III, H. L. Kyle, and E. R. Major, *J. Geophys. Research: Atmospheres* **93**, 9503 (1988).
5. V. P. Epishev, I. I. Isak, I. I. Motrunich, et al., *Space Sci. Technology* **10**, 152 (2004).
6. В. П. Епишев, И. И. Исак, И. И. Мотрунич и др., in *Тр. конф. по околоземной астрономии-2009, Казань, Россия, 2009* (ГЕОС, Москва, 2010), pp. 35–41 [in Russian].
7. M. M. Lychak, *Space Sci. Technology* **14**, 39 (2008), [in Ukrainian].
8. Mini-MegaTORTORA (MMT-9), (2014) <http://astroguard.ru/satellites>.
9. G. M. Beskin, S. V. Karpov, A. V. Biryukov, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 81 (2017).
10. V. I. Kudak, V. P. Epishev, V. M. Perig, and I. F. Neybauer, *Astrophysical Bulletin* **72**, 340 (2017).
11. M. V. Bratijchuk, Y. M. Motrunich, T. J. Laslo, and S. I. Ignatovich, *Astrometriia Astrofizika* **21**, 109 (1974).
12. M. V. Bratijchuk, V. P. Epishev, T. I. Laslo, et al., *Astrometriia Astrofizika* **46**, 84 (1982).
13. S. I. Ihnatovich, Y. M. Motrunich, V. S. Melnik, et al., *Uzhgorod Univ. Sci. Herald. Ser. Physics* (2006).
14. I. I. Isak, *Nauch. Inform. INASAN* **72**, 14 (2004).
15. J. D. Scargle, *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982).
16. V. N. Ishkov, *Cosmic Research* **55**, 381 (2017).
17. В. И. Левантовский, *Механика космического полета в элементарном изложении* (Наука, Москва, 1980) [in Russian].
18. V. I. Kudak, V. U. Klimik, and V. P. Epishev, *Astrophysical Bulletin* **65**, 300 (2010).
19. V. P. Epishev, I. I. Isak, I. I. Motrunich, et al., in *Abstract Book of 13th Ukrainian Conf. on Space Researches* (Eupatoria, 2013), p. 69.

Influence of the Gravitational Fields of the Moon and Sun on the Long-Periodical Changes in the Own Rotation of the Artificial Satellites “Midas” Series

V. P. Epishev, V. I. Kudak, V. M. Perig, I. I. Motrunich, I. F. Noybauer, E. J. Novak, and O. J. But

Results of the analysis of the causes of secular changes in the rotation of several destabilized satellites at long time intervals are presented in paper. For a long time there was no explanation for a cyclical change in the period of the own rotation of the “Midas-7” satellite, which since 1963 revolves around the Earth at an altitude of 3700 km. These changes were not explained either by the influence of the Earth’s atmosphere and the Earth’s magnetic field, nor by solar activity. From the results of 40-year observations of the “Midas-4,” “Midas-6,” “Midas-7” satellite, it was possible to establish that, in addition to dissipative inhibitory, long-period changes occur in their own rotation with a period: in the “Midas-4” satellite, $P_l = 477$ days, “Midas-6”— $P_l = 466$ days, “Midas-7”— $P_l = 346$ days with different values of amplitude. All objects clearly show the resonance nature of such changes. Based on the results of the conducted study and simulation of the observed dynamics of the satellite data in orbit, the reasons for the identified processes are proposed. The secular changes in the rotation of these spacecraft, at our opinion, occur as a result of the mutual influence of the gravitational fields of the Moon and the Sun, depending on the satellite orbit plane orientation in the space. The magnitude of the amplitude of such changes is due to the angle of inclination of the orbit of the satellite to the equator. The closer it is to the pole (i.e. 90°), the greater the amplitude value is.

Keywords: methods: observational — space vehicles — techniques: photometric — Sun: general — Moon