

УДК 621.396

## ОЦЕНКА ДВИЖЕНИЯ АВАРИЙНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА МАСС ПО РЕАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

*Алешин В. П.<sup>1</sup>, Новгородцев Д. Д.<sup>2</sup>, Выгон В. Г.<sup>3</sup>, Гришин Е. А.<sup>4</sup>, Дорноступ С. А.<sup>5</sup>, Симонов Г. В.<sup>6</sup>, Шаргородский В. Д.<sup>7</sup>, Юрасов В. С.<sup>8</sup>*

ESTIMATION OF NONOPERATING SPACECRAFTS MOTION NEAR CENTER OF MASS USING THE REAL OPTICAL OBSERVATIONS

Aleshin V. P., Novgorodtsev D. D., Vigon V. G., Grishin E. A., Dornostup S. A., Simonov G. V., Shargorodsky V. D., Yurasov V. S.

The paper considers motion estimation of emergency satellites about the center of mass of the three types: the slow unstabilized movement ("UARS", "Coronas-Photon", "Phobos-Grunt"), the rotational motion according the Euler-Poinsot model ("Ocean"), the movement of the satellite "BLITS" after a collision with unknown space debris fragment.

Keywords: adaptive optics, satellites, satellite emergency, satellite motion about center of mass.

Оценка движения аварийных ИСЗ относительно центра масс (ЦМ) важна для анализа причин и последствий аварий, а также для прогноза падения ИСЗ (оценка миделя). Особенно актуален мониторинг движения фрагментов КА относительно ЦМ при авариях, вызванных столкновениями с космическим мусором. В работе рассмотрены следующие виды движения ИСЗ: 1) медленное нестабилизированное изменение ориентации либрационного типа (ИСЗ «UARS», «Коронас-Фотон», «Фобос-Грунт»); 2) свободное вращение в рамках модели Эйлера-

Пуансо (серия ИСЗ типа «Океан». Анализ 1) проводился по информации адаптивной оптической системы Алтайского оптико-лазерного центра (АОЛЦ). По серии аппаратов типа «Океан», прекративших активное функционирование, обнаружено и оценено сравнительно быстрое прецессирующее вращение (до нескольких периодов за проводку), которое реализуется, несмотря на наличие штанги гравитационной стабилизации. При оценке движения ИСЗ «Океан» использовалась информация адаптивной оптической системы «Чапалы».

<sup>1</sup>Алешин Владимир Петрович, канд. техн. наук, начальник сектора алгоритмов обработки изображений и распознавания ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: aleshin\_vl@mail.ru.

<sup>2</sup>Новгородцев Дмитрий Дмитриевич, начальник группы алгоритмов прогноза изображений ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: novgorodtsev-dmitry@yandex.ru.

<sup>3</sup>Выгон Вадим Григорьевич, канд. физ.-мат. наук, заместитель генерального конструктора ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: vygon@niipp-moskva.ru.

<sup>4</sup>Гришин Евгений Алексеевич, канд. техн. наук, главный конструктор Алтайского оптико-лазерного центра, заместитель генерального конструктора ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: grishin@niipp-moskva.ru.

<sup>5</sup>Дорноступ Сергей Александрович, начальник группы экспериментальной обработки Алтайского оптико-лазерного центра — филиала ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: nto@aolc.ru.

<sup>6</sup>Симонов Георгий Валерьевич, начальник научно-технического отдела Алтайского оптико-лазерного центра — филиала ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: nto@aolc.ru.

<sup>7</sup>Шаргородский Виктор Даниилович, д-р техн. наук, профессор, генеральный конструктор ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: niipp@niipp-moskva.ru.

<sup>8</sup>Юрасов Василий Степанович, канд. техн. наук, начальник отдела астродинамики ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»; e-mail: yurasov@niipp-moskva.ru.

Таблица 1. Параметры «UARS»

ДМВ	$N_i$	$R_{\min}$	Солнце	Разворот
07.06.08 21:19:54	2567	426	$r: -0,335$ $s: 0,435$ $w: 0,836$	$\phi_r: 112^\circ$ $\phi_s: -162^\circ$ $\phi_w: -125^\circ$
28.03.09 17:10:22	1656	420	$r: -0,208$ $s: -0,972$ $w: -0,11$	$\phi_r: 102^\circ$ $\phi_s: 36^\circ$ $\phi_w: 235^\circ$

Таблица 2. Параметры «Коронас-Фотон»

ДМВ	$N_i$	$R_{\min}$	Солнце	Разворот
16.06.10 19:36:28	2567	587	$r: -0,351$ $s: 0,736$ $w: 0,579$	$\phi_r: 22^\circ$ $\phi_s: 15^\circ$ $\phi_w: 45^\circ$
17.06.10 19:32:45	2328	575	$r: -0,308$ $s: 0,735$ $w: 0,604$	$\phi_r: 20^\circ$ $\phi_s: 5^\circ$ $\phi_w: 35^\circ$
22.06.10 19:10:51	1686	598	$r: -0,248$ $s: 0,646$ $w: 0,722$	$\phi_r: 20^\circ$ $\phi_s: 35^\circ$ $\phi_w: 25^\circ$

Отдельно исследовалось движение фрагментов аварийного ИСЗ «BLITS» относительно ЦМ после столкновения с некаталогизированным объектом космического мусора. Использовалась фотометрическая информация АОЛЦ. Обнаружение разрушения действующего ИСЗ на два фрагмента и соответствующее исследование проводится впервые (разрушение ИСЗ «Иридиум» в свое время привело к многочисленным обломкам). Оценка параметров проводилась с помощью алгоритмов и программ, принципы которых изложены в [1–4]. Как показали исследования [5], использование возможностей зрения человека и способностей мозга принимать решения в плохо формализуемых ситуациях является весьма эффективным. Соответствующие интерактивные алгоритмы [6, 7] позволяют проводить ситуационное оценивание сложных космических событий.

### 1. Оценка движения нестабилизированных ИСЗ «UARS», «Коронас-Фотон», «Фобос-Грунт»

Анализ осуществляется в орбитальной системе координат (орты  $\mathbf{R}, \mathbf{S}, \mathbf{W}$ ), где  $\mathbf{R}$  — радиус вектор из центра Земли,  $\mathbf{S}$  — касательная к орбите в сторону направления вектора скорости,  $\mathbf{W}$  — орт (бинормаль), дополняющий  $\mathbf{R}, \mathbf{S}$  до правой тройки. Ориентация ИСЗ в орбитальной системе координат задается матрицей поворота следующим образом

$$\mathbf{M} = \Psi_w \Psi_s \Psi_r, \quad (1.1)$$

$$\Psi_w = \begin{pmatrix} \cos \varphi_w & \sin \varphi_w & 0 \\ -\sin \varphi_w & \cos \varphi_w & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\Psi_s = \begin{pmatrix} \cos \varphi_s & 0 & \sin \varphi_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_s & 0 & \cos \varphi_s \end{pmatrix},$$

$$\Psi_r = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_r & \sin \varphi_r \\ 0 & -\sin \varphi_r & \cos \varphi_r \end{pmatrix},$$

где  $\varphi_r, \varphi_s, \varphi_w$  — углы последовательных поворотов исходной трехмерной модели ИСЗ относительно осей  $\mathbf{R}, \mathbf{S}, \mathbf{W}$  соответственно.

Оцененные параметры по ИСЗ «UARS», «Коронас-Фотон», «Фобос-Грунт» приведены в табл. 1, 2, 3 соответственно. Обозначения в таблицах следующие: ДМВ — время начала проводки,  $N_i$  — число кадров в проводке,  $R_{\min}$  — минимальная дальность до ИСЗ в км, Солнце — орт на Солнце, Разворот — ориентация (1.1). На рис. 1 и 2 приведены соответствующие гипотезы ориентации 3D моделей ИСЗ в орбитальной системе координат

### 2. Оценка вращения (случай Эйлера-Пуансо) ИСЗ типа «Океан»

Анализ осуществляется в «узловой» системе координат (квазиинерциальной) — (орты  $\mathbf{N}, \mathbf{Q}, \mathbf{W}$ ), орт  $\mathbf{N}$  — направлена по линии узлов на восходящий узел, орт  $\mathbf{Q}$  — находится в плоскости орбиты и составляет  $90^\circ$  с ортом  $\mathbf{N}$  в направлении движения ИСЗ, орт  $\mathbf{W}$  — перпендикулярна плоскости орбиты и

Таблица 3. Параметры «Фобос-Грунт»

ДМВ	$N_i$	$R_{\min}$	Солнце	Разворот
29.11.11 14:45:26	1167	235	$r: -0,636$ $s: -0,697$ $w: 0,329$	$\phi_r: 121^\circ$ $\phi_s: -12^\circ$ $\phi_w: 251^\circ$
01.12.11 14:33:48	1578	227	$r: -0,610$ $s: -0,764$ $w: 0,206$	$\phi_r: 107^\circ$ $\phi_s: -173^\circ$ $\phi_w: 77^\circ$
23.12.11 04:29:17	1261	276	$r: 0,202$ $s: 0,263$ $w: -0,943$	$\phi_r: 164^\circ$ $\phi_s: 13^\circ$ $\phi_w: 44^\circ$
24.12.11 04:13:43	2634	265	$r: 0,174$ $s: 0,354$ $w: -0,918$	$\phi_r: 99^\circ$ $\phi_s: 21^\circ$ $\phi_w: 28^\circ$
25.12.11 03:58:08	1199	259	$r: 0,146$ $s: 0,441$ $w: -0,885$	$\phi_r: 45^\circ$ $\phi_s: 31^\circ$ $\phi_w: -303^\circ$
25.12.11 05:29:16	1791	256	$r: 0,252$ $s: 0,396$ $w: -0,882$	$\phi_r: -116^\circ$ $\phi_s: 39^\circ$ $\phi_w: 238^\circ$

дополняет правую тройку. Ориентация ИСЗ в «узловой» системе координат задается матрицей поворота  $M$  следующим образом

$$M = \Psi_w \Psi_q \Psi_n,$$

$$\Psi_q = \begin{pmatrix} \cos \varphi_q & 0 & \sin \varphi_q \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_q & 0 & \cos \varphi_q \end{pmatrix}$$

$$\Psi_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_n & \sin \varphi_n \\ 0 & -\sin \varphi_n & \cos \varphi_n \end{pmatrix},$$

где  $\varphi_n, \varphi_q, \varphi_w$  — углы последовательных поворотов исходной трехмерной модели ИСЗ относительно осей  $\mathbf{N}, \mathbf{Q}, \mathbf{W}$  соответственно.

Рассмотрим случай свободного (на интервале наблюдения («проводки»)) вращательного движения космического объекта (рис. 3). Эллипсоид инерции будет вращаться около вектора кинетического момента (предполагается, что на интервале проводки моментом внешних сил можно пренебречь по сравнению с кинетическим моментом вращения) по плоскости перпендикулярной вектору кинетического момента (теорема Пуансо). Под «разворотом ИСЗ» понимается разворот 3D модели ИСЗ на начало проводки в «узловой» системе координат (см. выше). «Вращение» соответствует параметрам собственного вращения (оси вращения в сферических углах  $\theta, \phi$  и периоду  $T$ ) на начало проводки в «узловой» системе координат. «Прецессия» — это параметры вращения оси собственного вращения (ось прецессии в сферических углах  $\Theta, \Phi$  и период  $T$ ) в «узловой» системе координат (табл. 4, 5).

### 3. Анализ столкновения ИСЗ «BLITS» с некаталогизированным фрагментом космического мусора

Конструкция ИСЗ «BLITS» приведена на рис. 4. ИСЗ был разработан и изготовлен ОАО «НПК «СПП» в интересах решения научных и прикладных задач космической геодезии, геодинамики и калибровки лазерных дальномеров с беспрецедентной до этого точностью. ИСЗ безаварийно проработал более 3 лет (40 мес.).

В январе 2013 г. ИСЗ перестал давать отраженный сигнал от лазерных дальномеров. В результате экспресс-анализа эволюции орбиты ИСЗ «BLITS», проведенного по TLE данным, было выявлено, что 22–23 января 2013 г. скачком произошло уменьшение большой полуоси его орбиты на 120 м [8]. При этом орбитальный период и скорость ИСЗ уменьшились на 0,17 с и 0,067 м/с соответственно. Наиболее вероятным, с нашей точки зрения, является столкновение ИСЗ «BLITS» с более мелким, некаталогизированным осколком космического мусора. Оценим массу и размеры объекта, с которым могло произойти возможное столкновение. Воспользуемся оценкой изменения скорости ИСЗ «BLITS», равной  $-0,067$  м/с. Рассмотрим простейший случай, когда два объекта массой  $m_1$  и  $m_2$  с одинаковыми скоростями ( $V$ ) движутся навстречу друг другу. Используем допущение, что в момент столкновения объекты «вминаются» друг в друга и продолжают двигаться со скоростью  $V_{\text{col}}$ . Воспользуемся законом сохранения количества дви-

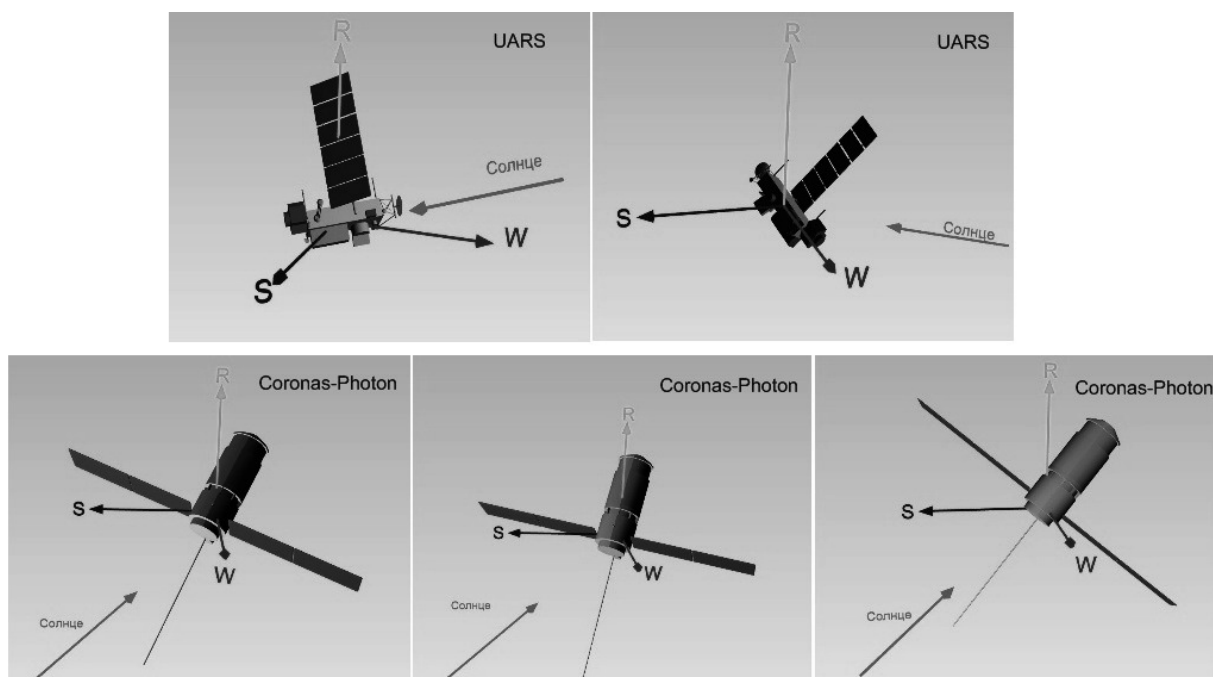


Рис. 1. Ориентация ИСЗ «UARS» 07.06.2008 и 28.03.2009. Ориентация ИСЗ «Коронас-Фотон» 16.06.2010, 17.06.2010 и 22.06.2010

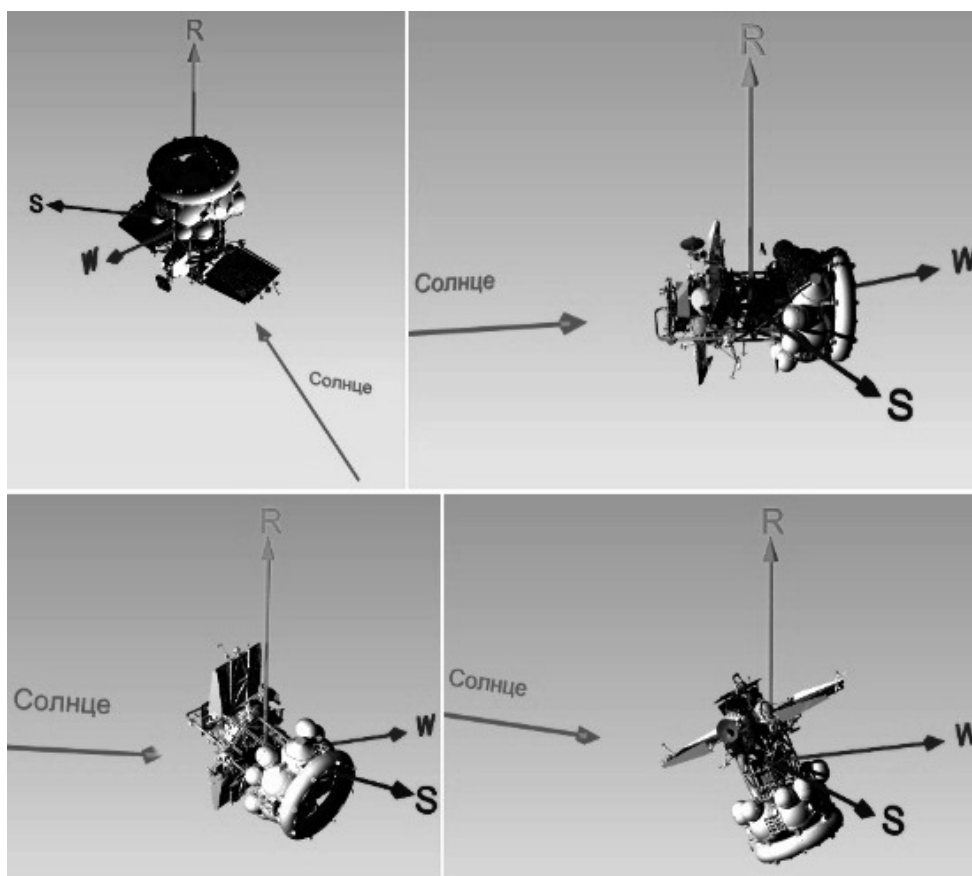


Рис. 2. Ориентация ИСЗ «Фобос-Грунт» 29.11.2011, 23.12.2011, 24.12.2011 и 25.12.2011



Рис. 3. Последовательные ориентации ИСЗ «Океан» (шаг около 25 с)

Таблица 4. Параметры вращения ИСЗ «Океан» 319274

ДМВ	$N_i$	$R_{min}$	Солнце	Разворот ИСЗ	Вращение	Прецессия
04.09.12 01:37:10	2090	638	$n: 0,273$ $q: -0,181$ $w: -0,945$	$\phi_n: 167^\circ$ $\phi_q: 172^\circ$ $\phi_w: 86^\circ$	$\theta: 30^\circ$ $\phi: -30^\circ$ $T: 48$ с	$\Theta: 0^\circ$ $\Phi: 5^\circ$ $T: 144$ с
05.09.12 04:39:34	3510	680	$n: 0,296$ $q: -0,049$ $w: -0,954$	$\phi_n: 32^\circ$ $\phi_q: 17^\circ$ $\phi_w: 140^\circ$	$\theta: 88^\circ$ $\phi: 75^\circ$ $T: 68$ с	$\Theta: 90^\circ$ $\Phi: 0^\circ$ $T: 171$ с

Таблица 5. Параметры вращения ИСЗ «Океан» 320510

ДМВ	$N_i$	$R_{min}$	Солнце	Разворот ИСЗ	Вращение	Прецессия
06.09.12 04:09:31	2324	644	$n: 0,297$ $q: 0,043$ $w: -0,954$	$\phi_n: 4^\circ$ $\phi_q: -160^\circ$ $\phi_w: 0^\circ$	?	не наблюдается
07.09.12 04:17:47	2223	585	$n: 0,271$ $q: 0,06$ $w: -0,961$	$\phi_n: 156^\circ$ $\phi_q: 172^\circ$ $\phi_w: -17^\circ$	$\theta: 110^\circ$ $\phi: 0^\circ$ $T: 41$ с	не наблюдается

**Mass 7.53 kg, diameter 170.32**



*Disassem*

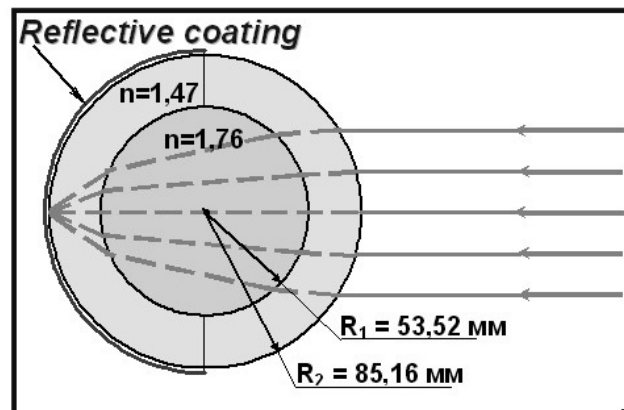
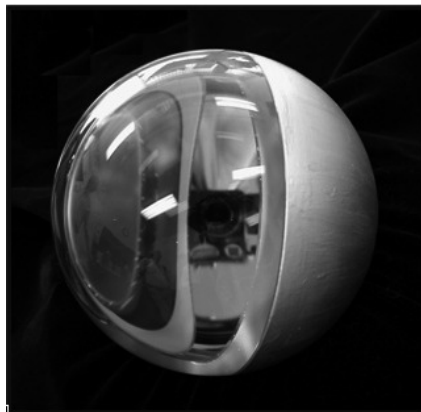


Рис. 4. Конструкция ИСЗ «BLITS»

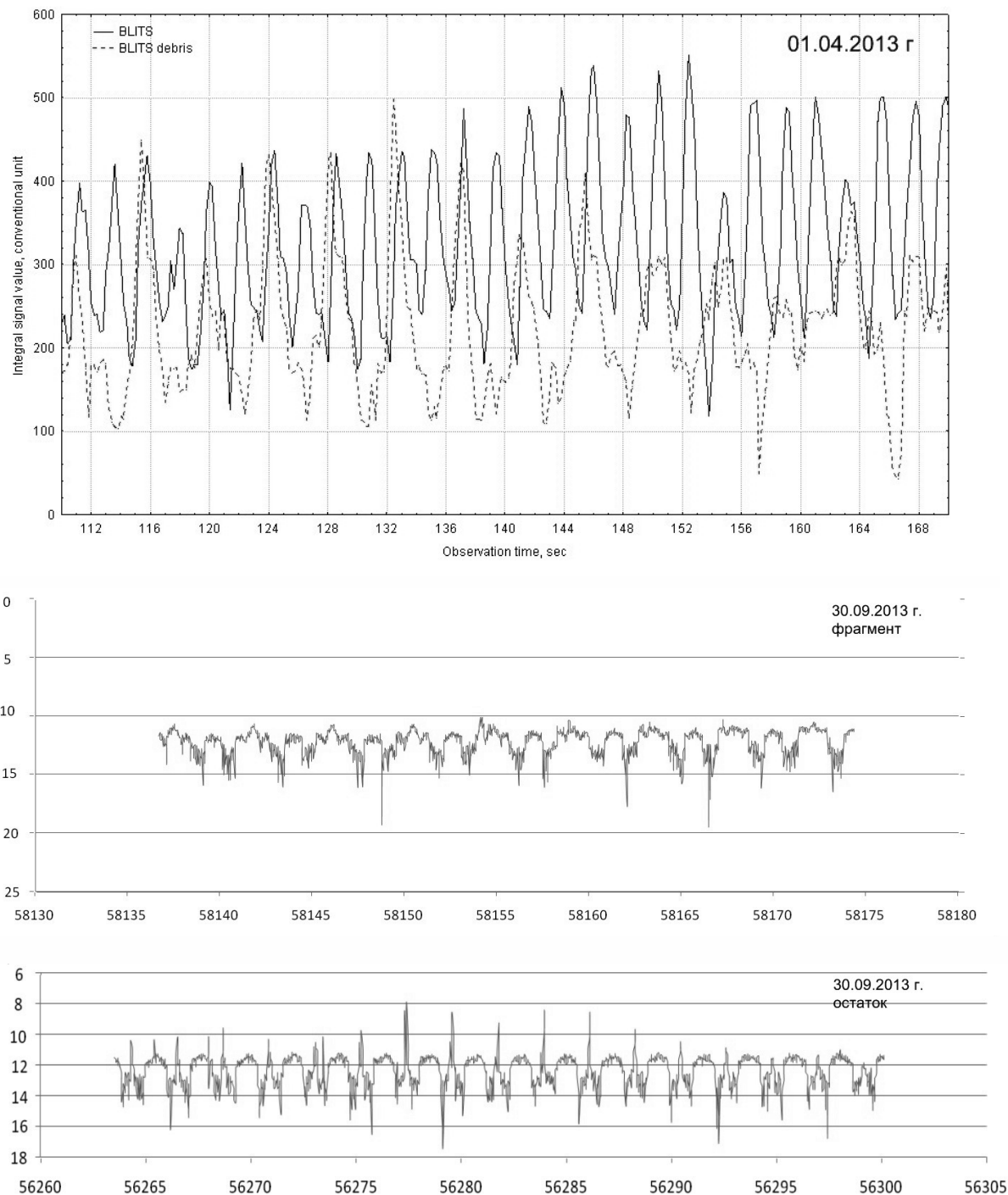


Рис. 5. Реализации фотометрии по фрагменту ИСЗ «BLITS» и остатку ИСЗ «BLITS» от 01.04.2013 г. и от 30.09.2013 г.

жения

$$m_1 V - m_2 V = (m_1 + m_2) V_{col}.$$

Отсюда легко определить изменение скорости первого объекта:

$$\Delta V = V_{col} - V = -2 \frac{m_2}{m_1 + m_2} V.$$

При известных значениях  $m_1 = 7,53$  кг,  $V = 7,43$  км/с и  $\Delta V$  легко найти массу второго объекта. Она оказывается равной  $m_2 = 0,000034$  кг, что по расчетам соответствует размеру около 5 мм.

Анализ показывает, что траектория движения ИСЗ «VLITS» высотой около 800 км и наклоном  $98,6^\circ$  проходит как раз через области пространства, в которых накопилась наибольшая концентрация космического мусора. Подробный баллистический анализ аварии проведен в [8].

Остановимся на анализе фотометрических сигналов, полученных Алтайским оптико-лазерным центром. До разрушения период вращения составлял 5,6 с. После аварии был проведен сеанс фотометрии, который дал следующие реализации (рис. 5). Сплошная линия — остаток ИСЗ «VLITS», пунктирная — отколовшийся фрагмент ИСЗ «VLITS». Наблюдаемый период реализации остатка ИСЗ «VLITS» — около 2 с (2,07 с), период реализации для фрагмента — 4,1 с.

Одна из наиболее обычных гипотез объяснения различия вращения — кратность периода реализации — остаток ИСЗ «VLITS» дает вдвое меньший наблюдаемый период реализации, чем фрагмент. 30 сентября 2013 г. было получено несколько реализаций от остатка и фрагмента ИСЗ «VLITS». Периоды реализаций сохранились (рис. 5) — около 4 и 2 с. Средние яркости реализаций совпадают (около 11 m). В настоящее время не имеется полной интерпретации реализаций, так как мы впервые столкнулись с цельно-стеклянным фрагментом.

### Литература

1. Алешин В. П., Новгородцев Д. Д., Симонов Г. В. Оценка некоординатных параметров КА

с помощью реальных оптических наблюдений и их заатмосферного прогноза // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. №1. Т. 18. С. 5–11.

2. Алешин В. П., Новгородцев Д. Д., Выгон В. Г., Гришин Е. А., Шаргородский В. Д. Мониторинг аварийных ситуаций ИСЗ на основе измерений и прогноза изображений адаптивной оптики и фотометрических сигналов // Международная конференция «Околоземная астрономия 2011». Красноярск. Вестник СибГАУ. Вып. 6(39). С. 159–165.
3. Aleshin V. P., Grishin E. A., Shargorodsky V. D., Novgorodtsev D. D. Altay Optic-Laser Center Capability To Satellites Emergencies Estimation // 9<sup>th</sup> US/Russian Space Surveillance Workshop. 2012. Listvyanka, Irkutsk. P. 1–23.
4. Aleshin V. P., Grishin E. A., Novgorodtsev D. D., Shargorodsky V. D. Monitoring of near-space anthropogenic pollution by observation of the Altay laser-optical center // International Conference On One Wave – Two Wave Laser Range Estimation. St.-Peterburg. 2012. P. 76–78.
5. Aleshin V., Afanasiev V., Bobkov A., Klimenko S., Kuliev V., Novgorodtsev D. Visual 3D Perception of Motion Environment and Visibility Factors in Virtual Space / In. Proc. Transaction on Computer Science, XVI, Lecture Notes on Computer Science 7380. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. P. 17–33.
6. Алешин В. П., Новгородцев Д. Д., Гришин Е. А., Шаргородский В. Д. Интерактивная система технического зрения для мониторинга состояния космических аппаратов (КА) // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления». 2012. ИКИ РАН, Москва. С. 79–87.
7. Aleshin V., Klimenko S., Novgorodtsev D. Space objects localization and recognition using an adaptive optical observation system // Proc. of the 19<sup>th</sup> International Conference “GraphiCon-2009”, Moscow. P. 311–313.
8. Kelso T. S., Parkhomenko N. N., Shargorodsky V. D., Vasiliev V. P., Yurasov V. S., Nazarenko A. I., Tanygin S., Hiles R. M. What Happened to VLITS? An Analysis of the 2013 Jan 22 Event // AMOS conference. Wailea Marriott, Maui, Hawaii. 2013. P. 1–9.

Ключевые слова: адаптивная оптика, искусственный спутник Земли (ИСЗ), аварийная ситуация, движение ИСЗ относительно центра масс.

Статья поступила 12 ноября 2013 г.

ОАО «Научно-производственная корпорация “Системы прецизионного приборостроения”», г. Москва

© Алешин В. П., Новгородцев Д. Д., Выгон В. Г., Гришин Е. А., Дорноступ С. А., Симонов Г. В., Шаргородский В. Д., Юрасов В. С., 2013