

УДК 629.78+521.3+520.3

В. К. Тарадий, А. В. Сергеев

Міжнародний центр астрономічних та медико-екологічних досліджень Національної академії наук України, Київ

НАЗЕМНАЯ ПОДДЕРЖКА СТАРТОВ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ

Описується застосування астрономічних комплексів високогірної обсерваторії Терскол для відстеження подій та процесів, що відбуваються у навколосемному просторі при космічних стартах. Наводяться практичні результати наземних оптичних спостережень з метою одержання високоточних траєкторних даних та контролю стану космічного апарата.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение успешной навигации искусственных небесных объектов (ИНО) в околоземном пространстве требует решения ряда задач:

- организации и выполнения специальных позиционных и фотометрических наблюдений на этапах выведения объекта на заданную орбиту, при переводе его в точку стояния, при полёте в окрестности этой точки, а также на различных этапах активного и пассивного полета объекта;

- независимого определения по данным наблюдений параметров орбитального движения небесных объектов с целью обеспечения прецизионного контроля качества управления их навигацией и верификации траекторных измерений, полученных другими техническими средствами;

- прогноза движения сопровождаемого космического аппарата и сопутствующих объектов;

- мониторинга окрестностей ИНО с целью обнаружения в непосредственной близости к нему посторонних объектов;

- независимого фотометрического и визуального контроля процессов на ИНО (раскрытие панелей солнечных батарей, разделение блоков ИНО, его вращение, выбросы газа, включение двигателей и др.);

- оперативного мониторинга объекта в критических точках и ситуациях (задержка для обработки и передачи координат и блеска не более 20—30 с).

Следует отметить, что дополнительные возможности при решении навигационных задач по данным оптических наблюдений ИНО с применением разработанной методики появились в связи с созданием на пике Терскол современного научного комплекса «Цейс-2000», включающего в качестве штатных приборов ПЗС-приемники излучения, а также допускающего использование оперативных методов обработки цифровых изображений [1, 3, 4].

Высокая проникающая способность комплекса «Цейс-2000» и автоматизация процесса цифровой обработки ПЗС-изображений обеспечили возможности поиска объектов и их фрагментов, наблюдения процессов фрагментации объектов в реальном времени на переходных и геостационарных орбитах, а также значительно снизили влияние климатических факторов и условий наблюдений. Начиная с 2004 г., после внедрения автоматической процедуры первичной обработки ПЗС-наблюдений и использования более точного каталога UCAC2, точности позиционных измерений значительно улучшились, и средние квадратичные погрешности результатов не превосходят 0.30".

С ноября 1997 г. по настоящее время астрономическая обсерватория на пике Терскол выполнила наземное сопровождение более 20 стартов космических аппаратов, включая проекты «Купон», «Ямал-100», «Бонум», «КазСат», «Тугауа 1», «Электро-Л» и другие. В табл. 1 приведены данные для некоторых стартов.

Оптические наблюдения с помощью астрономического комплекса двухметрового зеркального телескопа на пике Терскол позволяют независимо контролировать правильность отработки многих операций, выполняемых ИНО в период запуска, в том числе:

- определение параметров движения связки — разгонный блок (РБ) и космический аппарат (КА), а также сопутствующих объектов на переходной орбите;
- визуальные наблюдения процесса отделения КА от разгонного блока и определение параметров этого процесса;
- фрагментации блока КА (плановые и аварийные);
- фотометрические наблюдения и подтверждение степени раскрытия солнечных батарей КА;

• изучение параметров вращения КА и его фрагментов.

Для ярких объектов, с целью одновременного наблюдения событий на нескольких объектах или фрагментах, дополнительно использовались малые автоматические телескопы «Celestron 11» и «Meade 14», которые обеспечивали непрерывность как позиционных наблюдений, так и слежение за событиями и процессами на объектах и в окружающем пространстве [2].

ПОЗИЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРОГНОЗ ДВИЖЕНИЯ

Знание с высокими точностями положений ИНО и окружающих их объектов в заданные моменты времени имеет первостепенное значение для осуществления навигации в околоземном пространстве. Эти положения могут быть найдены лишь после определения их орбит по данным наблюдений и вычисления высокоточных значений эфемерид. Выбор модели сил, действующих на КА, зависит от длины орбитальной дуги, на которой вычисляется движение КА, и высоты перигея его орбиты. Выполненные нами мо-

Таблица 1. Поддержка стартов астрономическими комплексами на пике Терскол

Дата	Название ИСЗ	Номер по каталогу NORAD	Количество наблюдений		Средние квадратичные ошибки наблюдений	
			позиционных	фотометрических	позиционных	фотометрических
28.05—31.05.1999	«Горизонт-28»	93069A	17	—	0.5—1.1"	—
28.05—31.05.1999	«Горизонт-31»	96005A	31	—	0.4—0.7"	—
22.06—24.06.1999	«Raduga 1-3»	94008A	22	—	0.5—0.6"	—
20.07—22.08.1999	«Бонум-1»	98068A	77	—	0.7—1.5"	—
08.09—22.09.1999	«Ямал-100»	99047B	81	380	0.8—1.2"	0.3—0.7 ^m
08.09—24.09.1999	«Ямал-100»	99047C	77	280	0.7—1.0"	0.4—0.8 ^m
07.10—06.11.1999	«Ямал-100»	99047B	50	243	0.7—1.5"	0.3—0.7 ^m
01.11—02.11.1999	«Ямал-100»	99047C	17	—	0.9—1.6"	—
15.11—03.02.2000	«Горизонт-28»	93069A	79	—	0.7—1.7"	—
20.11—03.02.2000	«Ямал-100»	99047C	147	—	0.5—1.5"	—
01.02—30.04.2000	«Горизонт-28»	93069A	149	—	0.8—1.4"	—
01.02—30.04.2000	«Ямал-100»	99047C	148	—	0.8—1.2"	—
14.05—22.06.2000	«Ямал-100»	99047B	54	237	0.3—1.2"	0.2—0.4 ^m
17.06—21.06.2000	«БРИЗ-М»	00029B	25	202	0.8—1.3"	0.05—0.4 ^m
08.06—09.06.2000	«Горизонт-45»	00029A	20	—	0.8—1.3"	—
30.11—05.12.2000	РБ ДМ	00077D	80	84	1.8—2.2"	0.05—0.9 ^m
30.11—03.12.2000	«Sirius-3»	00077A	44	46	1.9—3.0"	0.04—0.7 ^m
20.01—22.07.2011	«Электро-Л»	37344U	2640	~5000	0.3—0.4"	0.3—0.4 ^m
19.07—28.07.2011	«Спектр-Р»	37755	178	~1000	0.3—0.4"	0.3 ^m

дельные расчеты показали, что для вычисления с погрешностью $0.5''$ сферических координат КА при высоте перигея его орбиты 20000 км достаточно учитывать гармоники в разложении геопотенциала до 8-й степени и порядка, при высоте перигея 6000 км — до 20-й степени и порядка, а при высоте перигея 1700 км — до 35-й степени и порядка. Учитываемые возмущения в движении ИНО должны включать также и гравитационные притяжения объекта Луной и Солнцем. При этом координаты Луны и Солнца берутся из фундаментальных эфемерид LE200/DE200. На движение геостационарных КА заметное влияние оказывает солнечное световое давление. Величина смещения КА под его действием зависит также и от отношения площади поперечного сечения спутника к его массе (A/M). Как показали расчеты для ГИСЗ с $A/M = 0.05 \text{ м}^2/\text{кг}$, его смещение по долготе на дуге 5 сут достигает $20''$, а на дуге 30 сут — около $120''$. Таким образом, для надежного определения орбиты спутника необходимо знать соответствующее значение A/M и изменение этого параметра со временем, если КА имеет сложную форму и вращается относительно Земли. Если же величина A/M неизвестна априори, то из анализа высокоточных позиционных наблюдений спутника на продолжительных интервалах времени можно достаточно уверенно определить дифференциальную поправку к принятому усредненному значению произведения интегрального коэффициента отражения солнечного излучения на величину A/M .

Реализованный программный комплекс для определения орбит КА и вычисления их эфемерид состоит из двух частей, а именно:

- программ определений орбит КА на основе наблюдений;
- программ вычислений эфемерид КА на основе элементов их орбит.

Исходными данными для программы определения орбиты КА по позиционным наблюдениям являются:

а) сформированный по итогам сеанса наблюдений файл расположенных в хронологической последовательности значений топоцентрических экваториальных координат КА (прямого восхождения и склонения);

б) прямоугольные геоцентрические координаты пункта наблюдений.

Для определения элементов орбиты достаточно 5—8 измерений на орбитальной дуге. Момент наблюдения, приведенный в шкале времени UTC, соответствует моменту получения экспозиции ПЗС-камеры. Этот момент не исправлен за абберационное время, поскольку для его вычисления необходимо знать расстояние между ПЗС-камерой и объектом, а оно становится известным только после определения орбиты объекта. В качестве начальных условий для уравнений движения объекта нами выбраны прямоугольные координаты и составляющие вектора скорости на некоторый начальный момент. Обычно выбирают момент первого наблюдения обрабатываемой орбитальной дуги, хотя это может быть и любой другой момент, предшествующий моменту первого используемого наблюдения.

Начальные значения координат и составляющих вектора скорости КА вычисляются по двум наблюдениям в предположении круговой орбиты. После этого выполняется численное интегрирование на интервале всей обрабатываемой дуги. Начальные условия уравнений движения определяются методом дифференциального улучшения. Для этого составляются уравнения невязок по прямому восхождению и склонению. Для нахождения коэффициентов уравнений невязок используется метод вариаций. Для этого производится совместное интегрирование трех уравнений движения второго порядка и 18 вариационных уравнений второго порядка.

Уравнения невязок по прямому восхождению и склонению составляются для каждого наблюдения. Решая систему этих уравнений, получаем значения поправок к начальным условиям уравнений движения. Процесс уравнивания производится итеративно до сходимости. Обычно достаточно выполнить 3—6 итераций на дуге. В итоге орбитального анализа вычисляются значения прямоугольных геоцентрических координат и составляющих вектора скорости объекта на заданный момент времени, исправленные за время распространения света от КА до наблюдателя (световой промежуток). Эти значения использу-

ются в первоочередном порядке для моделирования полученных результатов наблюдений на данной орбитальной дуге с целью их верификации.

Вычисление прогнозных эфемеридных значений экваториальных координат КА для будущих моментов наблюдений производится путем численного интегрирования уравнений движения спутника с использованием программы, реализующей алгоритм метода Адамса с переменным шагом и с переменным порядком, основанный на разделенных разностях.

АКТУАЛЬНОСТЬ НАЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В связи с густой заселенностью геостационарной зоны (ГСЗ) искусственными и естественными небесными объектами мировым сообществом были установлены жесткие ограничения на изменения положений ГИСЗ относительно выделенной ему точки на орбите во избежание столкновений с каким-нибудь из других объектов. Именно поэтому основной задачей при осуществлении навигации КА на ГСО является обеспечение его полета при установке в рабочую точку и при полете в рабочей точке с отклонениями по широте и долготе, не превышающими 0.1° . Эта задача решается с помощью коррекций положений КА относительно рабочей точки. Методы оптических наблюдений с помощью астрономического комплекса «Цейс-2000» в обсерватории на пике Терскол позволяют определять в зависимости от точности используемых опорных каталогов положения КА на орбитах с критическим наклоном с погрешностями $0.3\text{--}1.5''$. Оперативность выдачи результатов таких измерений составляет от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от требований к точности и скорости передачи информации. Поскольку допустимые пределы изменений положений ИНО относительно рабочей точки на ГСО более чем на два порядка по величине превосходят эти погрешности, то можно утверждать, что оптические измерения на пике Терскол могут обеспечивать надежный контроль как качества программы управляемых маневров, так и верификацию данных измерений других наземных служб, особенно на этапах полетных испытаний.

После обнаружения и уверенного отождествления фрагментов разделившегося ИНО всегда возникает необходимость определения орбит появившихся объектов (в том числе объектов-осколков). Фотометрический мониторинг, выполнявшийся всегда в процессе оптических наблюдений ИНО, позволяет зарегистрировать процессы и события на этих объектах, такие как раскрытие панелей солнечных батарей, разделение модулей или фрагментов КА, сброс топлива или газа, работа системы ориентации КА, вращение объекта и др. Кроме того, оптическое сопровождение актуально для поддержки работ по совершенствованию космической техники в связи с необходимостью повышения точности, надежности и оперативности получения информации о реализованных характеристиках выведения ИНО на орбиту и данных о его состоянии и траектории полета. При этом оптические средства обеспечивают наземные службы независимой информацией о состоянии объекта и осуществляют мониторинг событий в случаях нарушения штатных схем управления полетом. В соответствии с рабочими планами исследований были проведены позиционные наблюдения и определены орбиты для многих ИНО и их фрагментов, в том числе для КА «Горизонт-45» в июне 2000 г., «Сириус-3» в декабре 2000 г., «Экран» в апреле 2001 г., «Нимик-2» в декабре 2002 г., АМС-9 в июне 2003 г., «Глонасс» в декабре 2003 г., «Интелсат-10» в июне 2004 г., АМС-12 в феврале 2005 г. и других. Отметим, что при исследованиях динамики активных и пассивных фрагментов в рамках программы модернизации РБ основное внимание после разделения ИНО уделялось наблюдениям разгонных блоков и появившихся сопутствующих фрагментов.

ПОДДЕРЖКА СТАРТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЭЛЕКТРО-Л»

В качестве примера работы обсерватории на пике Терскол по сопровождению старта и навигации КА в околоземном пространстве рассмотрим мониторинг старта КА «Электро-Л», выполненный в период с января по июль 2011 г.

Объект наблюдений, головной блок (ГБ), на геопереходной орбите был уверенно обнаружен

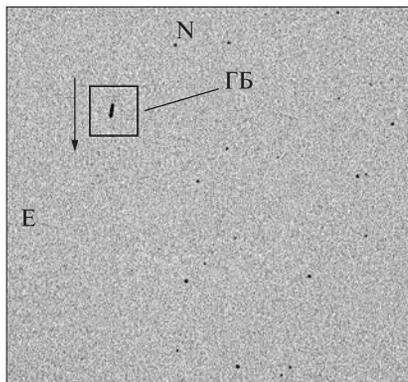


Рис. 1. Обнаружение головного блока «Электро-Л» на геопереходной орбите в 16^h19^m57^s UTC 20 января 2011 г.

средствами обсерватории на пике Терскол в момент времени 16^h19^m57^s UTC 20 января 2011 г. На рис. 1 показано изображение ГБ среди звезд на момент обнаружения. Факт обнаружения ГБ и его движение, близкое к расчетной геопереходной орбите, был своевременно передан по каналам связи наземным службам сопровождения. В дальнейшем выполнялись сопровождение и съемка ГБ на фоне звезд до момента входа в тень Земли. Оперативная обработка изображений позволила вычислить параметры реальной геопереходной орбиты для оценки ситуации и дальнейшего сопровождения полета ГБ. Результаты позиционных наблюдений и элементы орбиты приведены в табл. 2.

Из данных анализа были получены оценки отклонения полета ГБ от расчетной орбиты и, попутно, оценки качества публикуемых данных каталога NORAD. Параметры сравниваемых элементов приведены в табл. 3, а расхождение прогноза движения с данными наблюдений — в табл. 4.

После выхода головного блока из тени позиционные наблюдения и мониторинг окрестностей были продолжены с целью удержания объекта в

Таблица 2. Данные позиционных наблюдений головного блока «Электро-Л» 20 января 2011 г. до момента разделения

UTC	α	δ
16 ^h 48 ^m 05.506 ^s	06 ^h 02 ^m 27.323 ^s	+42°37'27.92"
16 ^h 50 ^m 04.998 ^s	06 ^h 11 ^m 38.675 ^s	+41°17'43.10"
16 ^h 52 ^m 06.301 ^s	06 ^h 19 ^m 50.161 ^s	+40°01'52.54"
16 ^h 54 ^m 12.443 ^s	06 ^h 27 ^m 22.522 ^s	+38°47'59.44"
16 ^h 56 ^m 14.186 ^s	06 ^h 33 ^m 52.304 ^s	+37°41'04.93"
16 ^h 58 ^m 05.608 ^s	06 ^h 39 ^m 15.502 ^s	+36°43'15.75"
17 ^h 02 ^m 08.188 ^s	06 ^h 49 ^m 30.713 ^s	+34°47'16.02"
17 ^h 06 ^m 01.267 ^s	06 ^h 57 ^m 52.314 ^s	+33°06'45.32"
17 ^h 10 ^m 14.178 ^s	07 ^h 05 ^m 42.029 ^s	+31°27'41.37"
17 ^h 20 ^m 18.810 ^s	07 ^h 20 ^m 45.698 ^s	+28°03'19.55"
17 ^h 22 ^m 20.747 ^s	07 ^h 23 ^m 20.098 ^s	+27°26'34.32"
17 ^h 24 ^m 25.049 ^s	07 ^h 25 ^m 50.053 ^s	+26°50'20.36"
17 ^h 28 ^m 09.234 ^s	07 ^h 30 ^m 03.352 ^s	+25°47'59.69"
17 ^h 32 ^m 07.034 ^s	07 ^h 34 ^m 11.019 ^s	+24°45'34.69"
17 ^h 36 ^m 08.109 ^s	07 ^h 38 ^m 03.125 ^s	+23°45'43.83"
17 ^h 39 ^m 58.523 ^s	07 ^h 41 ^m 30.005 ^s	+22°51'24.37"
17 ^h 44 ^m 09.153 ^s	07 ^h 45 ^m 00.194 ^s	+21°55'07.54"
17 ^h 47 ^m 55.728 ^s	07 ^h 47 ^m 58.546 ^s	+21°06'30.93"

Элементы орбиты

$$a = 24463.167338 \text{ км}, e = 0.724668, i = 48.577212^\circ, \pi = 0.049562^\circ, \Omega = 315.809538^\circ \text{ М.Ан.} = 39.928195^\circ$$

Ортогональные координаты и их ошибки:

$$\begin{aligned} X &= -2284.734522 \pm 0.644061 \text{ км}, \\ V_x &= -3.000561 \pm 0.000364 \text{ км/с} \\ Y &= 17570.142542 \pm 1.856608 \text{ км}, \\ V_y &= 3.370175 \pm 0.000371 \text{ км/с} \\ Z &= 12473.507147 \pm 1.116223 \text{ км}, \\ V_z &= 0.368318 \pm 0.000078 \text{ км/с} \end{aligned}$$

поле зрения телескопов и контроля событий и посторонних объектов в окрестности полета ГБ. Основной массив астрометрических и фотометрических наблюдений получен перед этапом разделения ГБ, который был запланирован на 20 января 21^h28^m12.7^s UTC. В ночь 21—22 января наблюдения

Таблица 3. Сравнение элементов геопереходной орбиты головного блока на эпоху 20 января 2011 г.

Данные	UTC	a , км	e	i , град	π , град	Ω , град	Mean An., град
Прогноз орбиты ГБ	160908.810	24508.3978	0.725319	48.6001	360.0000	315.8833	2.4475
Наблюдения NORAD	160446.678	26610.227	0.7243666	48.5201	359.9588	315.8221	359.8545
Наблюдения Терскол	171509.171	24463.167338	0.724668	48.577212	0.049562	315.809538	39.928195

Таблица 4. Рассогласование орбит прогноза движения головного блока с данными наблюдений Терскола (20 января 2011 г.)

UTC	MJD	H, м	V, м/с	Ang.Separ., град
16 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.694444	21185	27.083	0.0869
17 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.708333	46270	28.058	0.1205
17 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.722222	77860	30.159	0.1553
17 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.736111	112644	32.416	0.1891
18 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.750000	150127	34.706	0.2223
18 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.763889	190161	37.042	0.2553
18 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.777778	232722	39.456	0.2887
19 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.791667	277857	41.989	0.3230
19 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.805556	325674	44.681	0.3585
19 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.819444	376325	47.574	0.3959
20 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.833333	430010	50.719	0.4355
20 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.847222	486987	54.169	0.4781
20 ^h 40 ^m 00 ^s	55581.861111	547572	57.990	0.5243
21 ^h 00 ^m 00 ^s	55581.875000	612146	62.264	0.5749
21 ^h 20 ^m 00 ^s	55581.888889	681182	67.092	0.6310

Таблица 5. Параметры орбиты космического аппарата «Электро-Л» по данным позиционных наблюдений 21—22 января 2011 г.

Элементы орбиты

$$a = 41930.894918 \text{ км}, e = 0.006243, i = 0.447316^\circ, \pi = 5.131190^\circ, \Omega = 285.594548^\circ, \text{M.An.} = 190.932927^\circ$$

Ортогональные координаты и их ошибки

$$\begin{aligned} X &= -22057.892492 \pm 0.012660 \text{ км}; \\ V_x &= -2.610148 \pm 0.000002 \text{ км/с} \\ Y &= 35962.017773 \pm 0.017415 \text{ км}; \\ V_y &= -1.605265 \pm 0.000003 \text{ км/с} \\ Z &= -90.395274 \pm 0.010263 \text{ км}; \\ V_z &= -0.022997 \pm 0.000001 \text{ км/с} \end{aligned}$$

были проведены в несколько этапов с целью вычисления элементов орбиты для анализа данных и верификации работы наземных комплексов сопровождения. Полная обработка всех снимков за ночь 21—22 января позволила получить значительно более точные параметры движения «Электро-Л», которые представлены в табл. 5.

По завершению маневра разделения модулей ГБ оптические средства обсерватории Терскола также выполняли позиционные наблюдения полета РБ «Фрегат-СБ» в период 20—23 января 2011 г. с целью контроля процесса увода разгон-

Таблица 6. Позиционные наблюдения разгонного блока «Фрегат-СБ» в ночь 22—23 января 2011 г.

UTC	α	δ	$(O-C)_a$	$(O-C)_\delta$
16 ^h 45 ^m 13.450 ^s	05 ^h 52 ^m 58.811 ^s	-06°24'44.63"	0.26"	0.14"
16 47 36.673	05 55 27.412	-06 24 57.06	-0.21	-0.19
16 50 15.711	05 58 12.408	-06 25 10.33	-0.06	0.07
16 52 54.750	06 00 57.326	-06 25 23.55	-0.16	0.49
16 55 17.893	06 03 25.720	-06 25 36.27	-0.06	0.14
17 58 40.439	07 08 49.034	-06 31 29.63	0.25	-0.02
18 01 03.742	07 11 16.180	-06 31 44.32	0.10	-0.68
18 03 42.951	07 13 59.597	-06 31 59.36	-0.12	-0.09
18 06 22.154	07 16 42.956	-06 32 14.96	-0.18	-0.02
18 09 01.358	07 19 26.281	-06 32 30.66	0.14	-0.00
19 56 31.536	09 08 53.638	-06 43 14.23	0.30	-0.23
20 01 17.647	09 13 42.900	-06 43 41.72	0.17	-0.11
20 03 40.675	09 16 07.577	-06 43 54.51	2.07	<u>0.84</u>
20 08 26.731	09 20 56.464	-06 44 22.75	0.62	-0.07
20 13 44.648	09 26 17.411	-06 44 52.78	-0.10	0.05
20 15 04.130	09 27 37.571	-06 44 59.32	<u>-1.04</u>	<u>1.00</u>
20 49 35.689	10 02 24.679	-06 48 09.33	-0.46	-0.21
20 51 42.952	10 04 32.659	-06 48 20.26	-0.62	-0.01
20 54 53.821	10 07 44.296	-06 48 37.14	<u>-4.76</u>	-0.29
20 57 32.890	10 10 24.498	-06 48 50.59	-0.25	-0.03
21 58 28.808	11 11 30.547	-06 53 35.23	0.33	0.50
00 19 32.024	13 32 24.150	-06 59 41.45	0.00	-0.00
00 23 14.749	13 36 06.652	-06 59 44.47	-0.15	0.03
00 24 34.286	13 37 26.156	-06 59 46.64	0.39	<u>-1.14</u>
00 28 01.085	13 40 52.750	-06 59 47.66	-0.22	0.23
00 30 08.293	13 42 59.886	-06 59 49.13	0.03	0.07

Элементы орбиты

$$a = 41472.496851 \text{ км}, e = 0.014480, i = 0.497240^\circ, \pi = 78.327646^\circ, \Omega = 290.753317^\circ, \text{M.An.} = 115.176368^\circ$$

Ортогональные координаты и их ошибки:

$$\begin{aligned} X &= -24381.741031 \pm 0.017214 \text{ км}, \\ V_x &= -2.523365 \pm 0.000002 \text{ км/с} \\ Y &= 33872.321068 \pm 0.033558 \text{ км}, \\ V_y &= -1.766988 \pm 0.000005 \text{ км/с} \\ Z &= -93.705944 \pm 0.014673 \text{ км}, \\ V_z &= -0.025913 \pm 0.000001 \text{ км/с} \end{aligned}$$

ного блока на орбиту его дальнейшего пребывания в пассивном режиме. Данные наблюдений и вычислений параметров орбиты РБ «Фрегат-СБ» представлены в табл. 6.

При фотометрическом мониторинге состояния ГБ на геопереходной орбите основное вни-

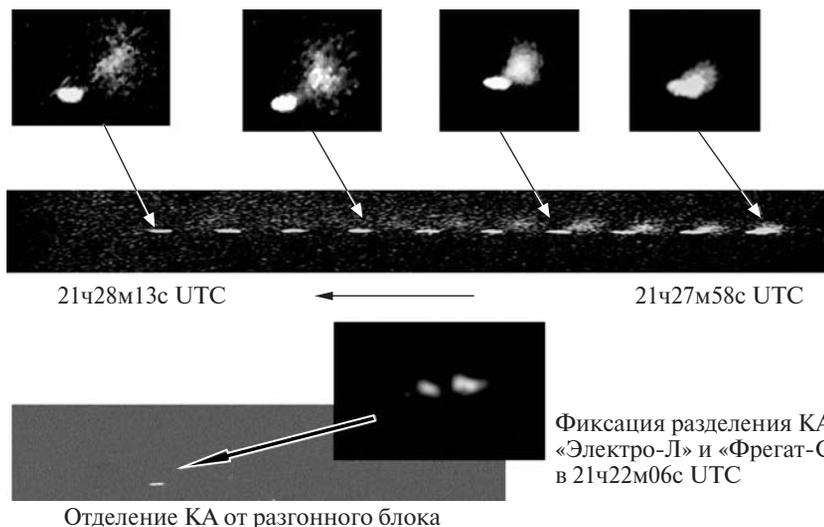


Рис. 2. Вспышка в 21 ч 28 мин UTC и облако в окрестности головного блока в момент разделения КА и РБ

мание уделялось контролю этапа отделе-ния КА «Электро-Л» от РБ «Фрегат-СБ». С этой целью до и после планового момента разделения проводилась скоростная съемка (интервал между снимками менее 1.5 с) головного блока и визуальный контроль оператором событий в реальном времени. Данные съемки архивировались для последующего анализа, и при необходимости могут быть заново просмотрены для анализа проблемных или нестандартных ситуаций.

В процессе мониторинга этапа разделения оператором комплекса была зафиксирована вспышка и облако в окрестности ГБ. Динамика последовательности развития облака показана на рис. 2, где также показаны траектория движения связки и относительные положения модулей для отдельных моментов времени. Эта вспышка была обнаружена в момент времени, близкий к плановой команде на разделение. Дальнейший мониторинг полета ГБ позволил в 21^h33^m06^s UTC надежно зафиксировать раздельный полет КА «Электро-Л» и РБ «Фрегат-СБ». Данные об оптической вспышке, облаке газа и подтверждение визуального разделения ГБ на модули РБ и КА были оперативно сообщены наземным службам сопровождения запуска по каналам связи.

В дальнейшем мониторинг РБ «Фрегат-СБ» проводился с целью отслеживания отработки команд и исследования его физического состояния. На рис. 3 показано изменение траектории

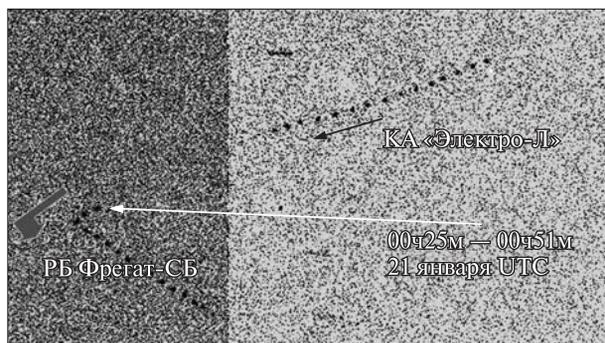


Рис. 3. Маневр увода разгонного блока на орбиту пребывания

движения РБ «Фрегат-СБ» на этапе четвертого включения двигательной установки для выполнения запланированного штатного маневра увода на орбиту пребывания.

При дальнейшем сопровождении полета в одной из серий фотометрических наблюдений, около 1^h32^m24^s 21.01.2011 UTC, было зафиксировано появление нескольких фрагментов, отлетающих в разных направлениях от РБ «Фрегат-СБ». В серии из 170 последовательных кадров зафиксированы быстрые и глубокие изменения блеска этих фрагментов, вплоть до полного исчезновения. Около 2^h20^m 21.01.2011 UTC был зафиксирован второй эпизод отделения фрагмента, который был ярче, чем фрагменты первого эпизода. Второй эпизод представлен на рис. 4, где показаны относительные положения фрагмента в отдельные моменты

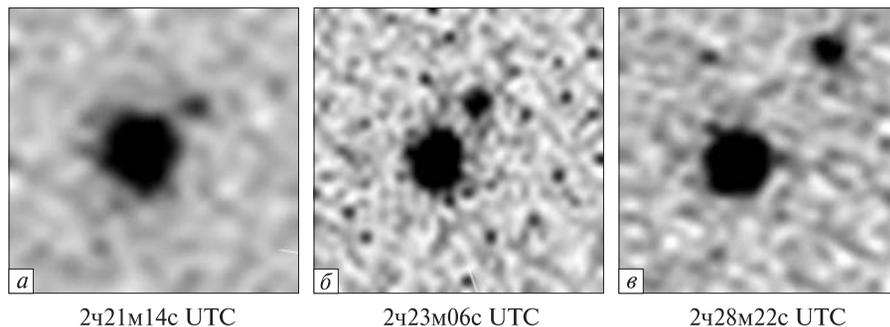


Рис. 4. Фрагментация разгонного блока «Фрегат-СБ» 21 января 2011 г.

времени. Изменения характера кривой блеска РБ, также представленной на рис. 4, коррелирует с процессами фрагментации РБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обсерватории на пике Терскол создан и много лет успешно функционирует астрономический комплекс наземной поддержки стартов и навигации космических аппаратов в околоземном пространстве. Выполнено сопровождение более 20 стартов и испытаний космической техники. Сопровождение запуска КА «Электро-Л» в январе 2011 г. от фазы пассивного полета связи РБ «Фрегат-СБ» и КА «Электро-Л» до фазы дрейфа КА «Электро-Л» в точку стояния и выхода РБ «Фрегат-СБ» на орбиту пребывания демонстрирует возможности астрономического комплекса терскольской обсерватории. В процессе этой работы было выполнено:

- расчет эфемерид для мониторинга положений и событий;
- поиск, обнаружение и своевременная передача информации о полете ГБ на геопереходной орбите;
- вычисление элементов орбиты и прогноз движения РБ «Фрегат-СБ» и КА «Электро-Л» в период мониторинга для обеспечения работ наземных служб;
- независимое и своевременное подтверждение запланированных событий на орбите, включая разделение модулей ГБ, маневры модулей движения РБ «Фрегат-СБ» и КА «Электро-Л» и их взаимное расположение;
- обнаружение и фиксация оптических явлений на РБ «Фрегат-СБ»;
- обнаружение и фиксация фрагментации РБ «Фрегат-СБ»;

- обнаружение и фиксация изменения параметров вращения РБ «Фрегат-СБ» на интервале времени отделения фрагментов;

- вся полученная информация оперативно передавалась по каналам связи наземным службам сопровождения старта.

1. Сергеев А. В., Жиляев Б. Е., Стеценко К. О. и др. Спектрометр низкого разрешения для быстрой спектроскопии малых тел Солнечной системы // Околоземная астрономия–2009: Сб. тр. конф. (Казань, 23–26 августа 2009 г.) — Москва: ГЕОС, 2010. — С. 278–282.
2. Сергеев А. В., Тарадий В. К., Бахтигараев Н. С. и др. Новые возможности терскольской обсерватории для исследования космического мусора в околоземном пространстве // Околоземная астрономия 2009. Сборник трудов конференции (Казань, 23–26 августа 2009 г.) — Москва: ГЕОС, 2010. — С. 105–109.
3. Тарадий В. К. Навигация искусственных небесных тел по данным оптических наблюдений в обсерватории на пике Терскол // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото съемка. — 2006. — № 2. — С. 82–97.
4. Тарадий В. К., Сергеев А. В., Карпов Н. В. Прецизионный измерительный комплекс определения положения объектов в ближнем космосе // Измерительная техника. — 2006. — № 3. — С. 38–42.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. K. Tarady, A. V. Sergeev

OPTICAL OBSERVATIONS AT THE TERSKOL PEAK OBSERVATORY FOR GROUND-BASED LAUNCH SUPPORT AND SOLVING NAVIGATION PROBLEMS IN OUTER SPACE

We describe the use of astronomical facilities at the high-altitude Terskol Peak Observatory for the monitoring of events and processes which are occurred in the outer space during space launches. Some practical results derived from ground-based optical observations and used for precise flight path determination as well as for control over the state of a spacecraft are presented.