

УДК 629.783

С.В. Козелков<sup>1</sup>, Е.И. Махонин<sup>2</sup>, А.А. Моргун<sup>3</sup>, Е.С. Козелкова<sup>4</sup>, С.С. Москаленко<sup>5</sup><sup>1</sup> Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Полтава<sup>2</sup> Государственное космическое агентство Украины, Киев<sup>3</sup> Европейский университет, Киев<sup>4</sup> Национальный университет обороны Украины, Киев<sup>5</sup> Национальный центр управления и испытаний космических средств ГКАУ, Евпатория

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА ВРЕМЕНИ И РАЙОНА ПРЕКРАЩЕНИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ФОБОС-ГРУНТ»

В настоящей статье представлен анализ результатов прогноза времени и района прекращения существования космического аппарата «Фобос-Грунт», полученных Центром контроля космического пространства Украины. Рассматриваются принципы прогноза и результаты прогнозирования падения космического аппарата «Фобос-Грунт».

**Ключевые слова:** космический аппарат, измерительная информация, время и район прекращения существования.

### Введение

Автоматическая межпланетная станция (АМС), далее читать космический аппарат (КА) «Фобос-Грунт», была запущена 9 ноября 2011 года с космодрома Байконур. Однако, она не смогла выйти на траекторию перелета к Марсу из-за того, что не запустился маршевый двигатель станции.

Попытки установить контроль над КА «Фобос-Грунт», «застрявший» на низкой околоземной орбите, не увенчались успехом. Начался медленный сход с орбиты.

От недостатка достоверной информации журналисты, за много недель до прекращения существования, наперебой сообщали различные варианты развития событий и вероятные районы падения. Информация долгое время была сомнительная и недостоверная.

Но правда была одна: реальная угроза падения обломков КА «Фобос-Грунт» на населенные территории Земли существовала.

В Центре контроля космического пространства Украины проводились работы по прогнозу времени и района падения данного КА. Получены реальные результаты, по качеству не уступающие данным РФ и Америки.

**Постановка проблемы.** В настоящее время большое внимание уделяется наблюдению и уточнению координатной информации по аварийным космическим аппаратам для последующего прогноза времени и района падения.

Случившаяся недавно аварийная ситуация с российским КА «Фобос-Грунт» тому подтверждение и показала, что существует реальная угроза падения несгоревших обломков КА в густонаселенных участках планеты.

Для государства, обладающего наземной измерительной инфраструктурой, данная задача является актуальной и переходит в разряд задач по обеспечению национальной безопасности.

В Центре контроля космического пространства Украины, с момента возникновения нештатной ситуации при выводе на орбиту КА «Фобос-Грунт», проводились работы по прогнозу времени и района падения данного КА.

### Раздел основного материала

Персонал Центра контроля космического пространства систематически проводил работы по оценке состояния КА «Фобос-Грунт» с момента его нештатного выведения на орбиту.

По данному приоритетному КА проводилось ежедневное уточнение начальных условий из открытых источников координатной информации, а также по измерениям, полученным от оптических наблюдательных средств контроля космического пространства Украины.

По мере обновления начальных условий проводился прогноз времени существования данного КА на орбите.

При расчетах времени прекращения существования и вероятного района падения использовались программные комплексы из состава программно-технического комплекса ЦККП Украины.

Основные расчеты проводились на экспериментальном программно-техническом комплексе (ЭПТК).

Данный программный комплекс, разработчик Валерий Аронович Ямницкий, г. Харьков, прошел успешную аттестацию при прогнозах времени и районов прекращения существования станции «Мир» и КА «Сич-1М» (табл. 1, 2).

Таблица 1

Сравнение данных о падении станции «Мир»  
по данным ЭПТК и фактическим наблюдениям

Параметр	Наблюдение разрушения, Jonathan's Space Report	Прогноз ЭПТК
Время падения, UTC	23.03.2001 06:00:00	23.03.2001 05:58:46±3 <sup>m</sup>
Средняя долгота падения	160 W	161.4 W
Средняя широта падения	40 S	38.1 S

Таблица 2

Сравнение данных о падении КА «Сич-1М»  
по данным ЭПТК и фактическим наблюдениям

Наблюдение разрушения в Андалузии	15.04.2006 20:54:15 UTC
ЭПТК, прогноз входа атмосферу На высоте 90 км	15.04.2006 20:03:37 ± 7 <sup>m</sup> UTC

Ниже рассматриваются принципы прогноза и результаты прогнозирования падения космического аппарата «Фобос-Грунт» [1 – 5].

В связи с тем, что Южный и Западный центры радионаблюдений, находящиеся в городах Севастополь и Мукачево, в настоящее время отключены, в качестве основного источника координатной информации для прогноза падения космических аппаратов используются данные, полученные с официального сайта стратегического командования США United States Space Command (USSPACECOM).

В отдельных случаях для прогноза падения космических аппаратов привлекались оптические средства контроля космического пространства Украины, однако, в связи с неблагоприятными погодными условиями и незначительной высотой полета подобных объектов такие наблюдения были единичными.

В качестве основного метода прогноза использовался метод «третичной обработки» каталогов космических объектов [1 – 3].

Начальные условия движения КА «Фобос-Грунт» формировались по окончании «третичной» обработки набора так называемых «псевдоизмерений». Для этого формировался заказ на набор начальных условий USSPACECOM за определенное количество суток. Методика выборки начальных условий состоит в следующем:

- за 5 и более суток до падения – брать «псевдоизмерения» за 5 суток;
- за 4 суток до падения – брать «псевдоизмерения» за 4 суток;
- за 3 суток до падения – брать «псевдоизмерения» за 3 суток ;
- за 2 суток до падения – брать «псевдоизмерения» за 2 суток;

– за 0.5 суток до падения – брать «псевдоизмерения» за 2 суток;

– менее 0.5 суток до падения – брать «псевдоизмерения» за 1 сутки.

Из этих данных формировались так называемые «псевдоизмерения», по которым и проводилось уточнение начальных условий и баллистического коэффициента методом наименьших квадратов (МНК) [1 – 3]. Следует упомянуть, что МНК – это только первый шаг расчета падения, получение уточненных начальных условий (УНУ), а второй шаг – собственно расчет точки падения.

При этом вплоть до точки падения сохраняется значение согласующего баллистического коэффициента, полученного по МНК, а космический аппарат считается неразрушаемым моноблоком.

Также очень важным моментом при прогнозе падения КА является использование различных моделей атмосферы [4, 5].

Для прогноза времени существования на длительном интервале времени используется статистическая модель атмосферы. Динамическая атмосфера используется за несколько суток до предполагаемого падения и до самого его момента.

Один из важных недостатков при выполнении данных работ в ЦККП Украины – это отсутствие оперативной информации по солнечной активности на момент проведения прогноза. При отсутствии возможности прогноза солнечной активности возникает ошибка времени падения, составляющая 20% от интервала прогнозирования.

Ошибка ЭПТК +/- 1 минута – это только прогноз корреляционной матрицы МНК, она пока что не учитывает прогноз будущей атмосферы.

В ЦККП России, например, при выполнении работ по прогнозу падения информацию об измене-

нии солнечной активности и атмосферы предоставляют несколько институтов.

Для описания плотности верхней атмосферы в программном комплексе ЭПТК использованы следующие модели [4, 5]:

- модель «статической» атмосферы (для высот менее 120 км);
- модель проектной динамической атмосферы ГОСТ 25645.101-83;
- модель динамической атмосферы ГОСТ 22721-77,
- модель динамической атмосферы

ГОСТ 25645.115-84.

Наилучшие результаты были получены при использовании динамической атмосферы ГОСТ 22721-77 с формированием «согласующего баллистического коэффициента», получаемого в процессе «третичной обработки» каталогов методом наименьших квадратов.

В табл. 3 представлен фрагмент результатов прогноза времени и района прекращения существования КА «Фобос-Грунт» в период с 10.01.2012 по 15.01.2012. В целом, работы по прогнозу времени и района падения велись с 23.11.2011 по 15.01.2012.

Таблица 3

Прогноз времени и района прекращения существования КА «Фобос-Грунт» в период с 10.01.2011. по 15.01.2012

Дата и время УНУ (UTC)	Дата и время падения (UTC) / время начала баллистического спуска с высот 120 км (UTC)	Кь	Координаты точки падения град.	
			Долгота	Широта
10.01.2012 09:23:45	16.01.2012 00:01:20±55 <sup>m</sup> / 15.01.2012 21:17:55	0.0013	247.9	16.6
12.01.2012 09:20:08	15.01.2012 20:47:39±60 <sup>m</sup> / 19:20:58	0.0014	241.9	-39.6
13.01.2012 06:17:43	15.01.2012 22:46:04±60 <sup>m</sup> / 15.01.2012 21:16:03	0.0013	209.4	-30.8
14.01.2012 05:40:41	15.01.2012 22:41:18±37 <sup>m</sup> / 15.01.2012 20:51:31	0.0014	293.4	38.1
15.01.2012 07:54:04	15.01.2012 18:36:26±14 <sup>m</sup> / 16:32:24	0.0015	92.1	41.4
15.01.2012 09:21:13	15.01.2012 18:08:15±9 <sup>m</sup> / 16:29:33	0.0016	327.4	4.0
15.01.2012 16:36:03	15.01.2012 17:26:25±1 <sup>m</sup> / 16:36:53	0.0016	162.2	-9.1
15.01.2012 16:36:03	+1 измерение 15.01.2012 17:26:17±1 <sup>m</sup> / 16:36:53	0.0016	161.9	-8.7

Финальный расчет проводился по последним данным USSPACECOM от 15.01.2012, 16:36:03 UTC.

С обработкой было много трудностей, т.к. последние данные USSPACECOM относились к времени 19:36 UTC, т.е. прямо при входе в атмосферу (высота 112 км). Пришлось отказаться от прогноза на экватор [1 – 5].

В процессе обработки выяснилось, что пара последних измерений USSPACECOM (18:09 и 19:36), "утянула" траекторию вниз, причем предпоследнее измерение 18:09 UTC в расчет не бралось из-за больших ошибок.

При этом возрос баллистический коэффициент – с 0.001552 до 0.001631. А так как начальные условия 19:36 UTC находятся уже в зоне баллистического спуска (перигей 112 км), то и падение произошло раньше на целый виток. Однако, поскольку в начальных условиях движения аргумент широты находится на 0.00078 град. то можно предположить, что это прогноз на экватор.

Если верить последнему американскому изме-

рению, то точка падения – это район Соломоновых островов. Возможно, последние "псевдоизмерения" USSPACECOM содержат ошибки – объективные или сознательно привнесенные.

По данным Центра контроля космического пространства Украины 15.01.2012 года, в 17:26:25 UTC завершен полет межпланетной станции «Фобос-Грунт». На высоте 120 километров космический аппарат вошел в плотные слои атмосферы ориентировочно в 16:36:53 UTC, в районе с координатами: широта 2,71°, долгота 349° (рис. 1).

Крупные несгоревшие обломки упали 15.01.2012 года ориентировочно в районе акватории Тихого океана с центром: широта – 9,17°, долгота 162°, в 17:26:25 UTC (рис.2.).

Причем, 15.01.2012 с 09.30 UTC USSPACECOM прекратил выдачу начальных условий, возобновил выдачу в 15:09 UTC. Поэтому результаты прогноза ЦККП Украины долгое время считались устаревшими. Между тем, специалисты ЦККП РФ и других иностранных ведомств, обладая информацией, поступающей с национальных радио-

технических и оптических средств, информацию о возможном месте КА «Фобос-Грунт» выдавали периодически, без перебоев.



Рис. 1. Вход КА «Фобос-Грунт» в плотные слои атмосферы



Рис.2. Центр района падения несгоревших обломков КА «Фобос-Грунт»

Расчетное рассеивание несгоревших элементов конструкции: по продольной оси +700 км, -550 км, по боковой дальности +100 км, -100 км.

При этом, следует отметить, что в вопросе прогноза падения космических объектов в различных источниках имеются существенные разночтения, в том числе и в самом определении «времени и точки падения космического аппарата».

Так, на сайте [reentrynews.aero.org](http://reentrynews.aero.org) используется термин Predicted Reentry Time (время возврата в атмосферу). Описан термин следующим образом: «...time at which a reentering object might first become visible due to aerodynamic heating, corresponding to an altitude of ~120 km (~65 nmi), in units of UTC» (время UTC повторного входа объекта в атмосферу, при котором объект становится видимым из-за аэродинамического нагрева, что соответствует высоте ~120 км или ~65 морских миль).

На сайте «Space-Track», USSPACECOM используется термин Predicted Decay Date/Time (Прогнозируемая Дата/Время разрушения), который, судя по всему, также относится к высоте 120 км.

Поэтому для приведения всех данных к одному виду, для последующего анализа и сравнения, пришлось вносить некоторые изменения в ЭПТК, после чего в результате прогноза программным комплексом ЭПТК формируются два времени:

- время начала баллистического спуска, UTC, соответствующее высоте 120 км;
- время падения, UTC, соответствующее пересечению траектории КА с Земной поверхностью, которое не учитывает фрагментацию объекта (предполагается, что объект является моноблоком до самого момента падения).

В табл. 4 представлены сравнительные результаты прогноза падения по данным независимых источников.

Таблица 4

Сравнение окончательных данных о падении КА «Фобос-Грунт» по данным различных источников

Источник информации	Дата и время входа в атмосферу UTC H=120 км.
ЭПТК	15.01.2012 16:36:53 ± 01 <sup>m</sup>
USSPACECOM	15.01.2012 17:23:00 ± 0.4 <sup>h</sup>
Spaceflight	15.01.2012 17:33:00 ± 20 <sup>m</sup>
Reentrynews	15.01.2012 17:52:00 ± 19 <sup>m</sup>
РФ	15.01.2012 17:45:00 ± 15 <sup>m</sup>

Результаты прогноза, полученные с помощью программного комплекса ЭПТК, лежат в пределах статистической ошибки [1 – 3]. Этот факт доказывает возможность использования ЭПТК для выполнения задач прогноза времени и районов прекращения существования космических объектов.

Как видно из табл. 4, все три «внешних» источника информации (USSPACECOM, spaceflight и reentrynews) дают на интервале времени около 2 суток погрешность порядка 20% и более, что озна-

чает недостоверность исходных данных, по которым рассчитан прогноз падения. Обычно, на примере КА UARS и ROSAT, за 2 суток до падения ошибки не превышают 2...6 часов.

Что касается USSPACECOM, то в данных за 13.01.2012 раздел «60 Day Decay Predictions» не обновлялся с 11.01.2012, а в разделе «Current Decay Predictions» – «From TIP Messages» данные, относящиеся к КА «Фобос-Грунт» были вообще заблокированы.

Вероятно, USSPACECOM испытывал трудности с прогнозом падения КА «Фобос-Грунт», обычно данные в этом разделе у них появлялись за 5...7 дней до падения.

Если рассмотреть невязки времени прохождения при формировании уточненных начальных условий по данным USSPACECOM, которые приведены на рис. 3, то можно заметить, что невязки последних двух «псевдоизмерений» в 5...10 раз превышают остальные невязки [1 – 3].

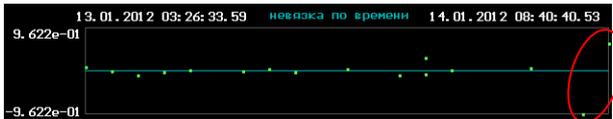


Рис. 3. Невязки времени прохождения при формировании УНУ по данным USSPACECOM

Вероятно, это связано со снижением высоты орбиты и, соответственно, значительным уменьшением времени пребывания аппарата в зоне наблюдения радиолокационных станций (РЛС).

В данном случае можно предположить, что USSPACECOM производит свои прогнозы на основе последнего наблюдения, полагаясь на точность РЛС, отсюда – трудности с прогнозом падения и значительные ошибки прогноза.

Аналогично, вероятно, обстоят дела и с прогнозами spaceflight и reentrynews.

Программный комплекс ЭПТК, основанный на «третичной» обработке каталогов, лишен этого недостатка, являясь в этом отношении уникальным.

Что касается прогнозов РФ, то их данные рассчитаны по собственным измерениям РЛС, и к ним вышеизложенные соображения не относятся.

### Выводы

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что проводить сравнительный анализ данных ЦККП Украины, РФ и USSPACECOM в принципе нецелесообразно, так как при прогнозировании времени и района падения космических объектов применяются различные

методики, используются различные модели формы Земли и атмосферы [4, 5].

Следует отметить, что виток входа в атмосферу и виток падения, рассчитанные ЦККП Украины, полностью совпадают с витками ЦККП РФ и USSPACECOM, есть несущественный разброс в координатах точки падения.

Но для системы контроля анализа космической обстановки, не обладающей на данный момент измерительной информацией национальных радиотехнических средств, подобный результат является допустимым и приемлемым.

Это говорит о том, что в ЦККП Украины применяется правильная методика и математический аппарат для прогноза космических объектов прекращающих свое существование, который при минимальной координатной информации позволяет получить достоверный результат. В случае задействования национальных радиотехнических средств результат был бы улучшен на порядок.

### Список литературы

1. Силин И.Н. Стандартная программа для решения задач методом наименьших квадратов / И.Н. Силин. – Д.: Препринт ОИЯИ, 1967. – № 11-33-62. – 45 с.
2. Дубошин Г.Н. Небесная механика, основные задачи и методы / Г.Н. Дубошин. – М.: Наука, 1968. – 793 с.
3. Чеботарев Г.А. Аналитические и численные методы небесной механики / Г.А. Чеботарев. – М.: Наука, 1965. – 350 с.
4. Таратынова Г.П. О движении искусственного спутника в нецентральной поле тяготения Земли при наличии сопротивления атмосферы / Г.П. Таратынова // Успехи физических наук. – 1957. – Т. 63, вып. 1а. – С. 51-58.
5. Проскурин В.Ф. Возмущения первого порядка в движении искусственных спутников, вызываемые сжатием Земли / В.Ф. Проскурин, Ю.В. Батраков // Искусственные спутники Земли. – 1959. – Вып. 3. – С. 32-38.

Поступила в редколлегию 17.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОГНОЗУ ЧАСУ І РАЙОНУ ПРИПИНЕННЯ ІСНУВАННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ «ФОБОС-ГРУНТ»

С.В. Козелков, Є.І. Махонін, О.А. Моргун, К.С. Козелкова, С.С. Москаленко

У статті представлений аналіз результатів прогнозу часу і району припинення існування космічного апарату «Фобос-Грунт», отриманих Центром контролю космічного простору України. Розглядаються принципи прогнозу і результати прогнозування падіння космічного апарату «Фобос-Грунт».

**Ключові слова:** космічний апарат, вимірвальна інформація, час і район припинення існування.

### AN ANALYSIS OF RESULTS OF PROGNOSIS OF TIME AND DISTRICT OF STOPPING OF EXISTENCE OF SPACE VEHICLE OF «FOBOS-GRUNT»

S.V. Kozelkov, E.I. Makhonin, A.A. Morgun, E.S. Kozelkova, S.S. Moskalenko

In the real article the analysis of results of prognosis of time and district of stopping of existence of space vehicle is presented «Fobos-Grunt», got Center of control of space of Ukraine. Principles of prognosis and results of prognostication of falling of space vehicle are examined «Fobos-Grunt».

**Keywords:** space vehicle, measuring information, time and district of stopping of existence.