

11. Итоги кампании по определению падения КА Прогресс М 27-М

Определение времени и места падения КА выполнялось регулярно, начиная с 30-го апреля, вплоть до падения КА 8 мая 2015 г. Работа была проведена по инициативе ИКИ РАН. Для автора это был удобный случай демонстрации возможностей разработанной и усовершенствованной методики решения рассматриваемой задачи, основы которой изложены в ряде публикаций [1–5]. В качестве исходных измерений использовались т.н. американские двухрядные элементы орбиты (TLE), которые скачивались с соответствующего сайта [6]. Для уточнения начальных условий по измерениям и прогнозирования движения КА до точки падения применялись разработанные автором алгоритмы и программы.

По результатам текущих расчетов было подготовлено 10 кратких отчетных материалов. На рисунке 1 представлены все оценки баллистического коэффициента, который характеризует уровень текущего торможения КА в атмосфере, и результаты прогнозирования времени падения КА «ПРОГРЕСС». Чёрная сплошная линия показывает прогнозируемое время падения (UTC) в зависимости от времени уточнения начальных условий для прогноза. Пунктирными линиями показан диапазон возможных значений времени падения. Правый из рисунков показывает те же результаты для 3-х последних суток перед падением.

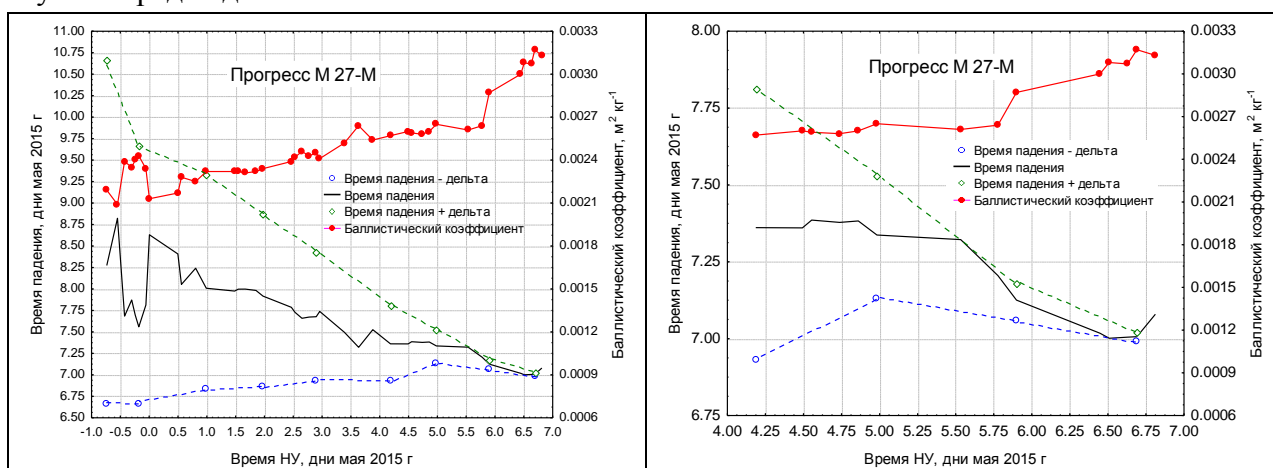


Рисунок 1. Оценки баллистического коэффициента и ожидаемого времени падения КА (UTC)

Из этих данных видно, что на интервале с 1-го по 6 мая в оценках баллистического коэффициента и времени падения не было резких изменений. Они менялись плавно, в соответствии с возможными погрешностями расчета торможения КА в атмосфере. Отсутствие резких изменений оценок обусловлено тем, что на предшествующем интервале времени геофизическая обстановка была спокойной (см. рисунок 2). Однако 6 мая произошла довольно сильная геомагнитная буря, которая длилась одни сутки.

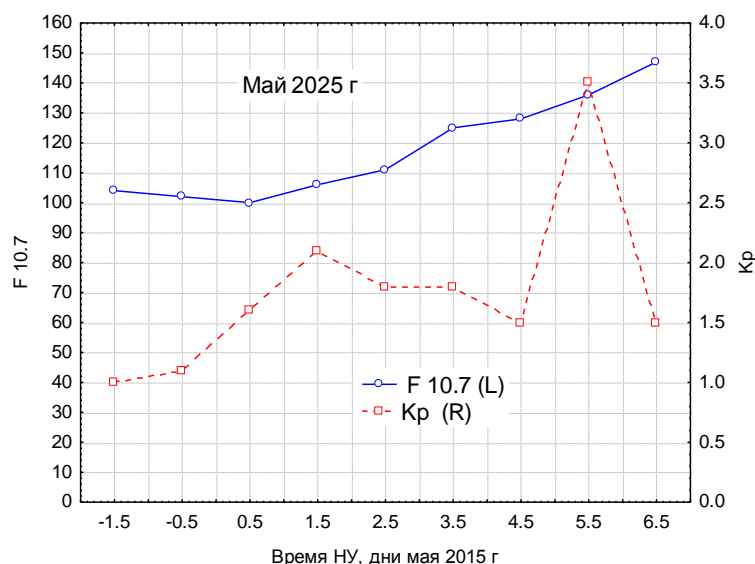


Рисунок 2. Данные о солнечной и геомагнитной активности в начале мая

Влияние геомагнитной бури проявилось в увеличении торможения и приближении ожидаемого момента падения КА на 4 часа 40 мин ($\approx 11\%$ от оставшегося времени существования). К началу 7 мая геомагнитная буря прекратилась. Поэтому следовало ожидать, что оценки баллистического коэффициента уменьшатся. Однако этого не произошло. Оценки продолжали расти и достигли значения $0.00313 \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$. Соответствующие результаты обработки измерений приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов за последние сутки существования КА

Исходные данные			Sb, $\text{м}^2 \text{ кг}^{-1}$	Данные о падении			Время существ.	Критерий
Виток	дата	Время		Виток	дата	Время		
166	07.05	0.447808	0.00300	175	08.05	0.017722	0.57	1.34
167	07.05	0.508598	0.00308	175	08.05	0.001320	0.49	1.23
169	07.05	0.630122	0.00307	175	08.05	0.004898	0.37	5.96
170	07.05	0.690836	0.00317	175	08.05	0.006466	0.32	1.18
172	07.05	0.812263	0.00313	176	08.05	0.079527	0.27	4.54

Эти последние результаты характерны рядом обстоятельств:

1. Оценки баллистического коэффициента Sb продолжали расти, хотя геомагнитная буря прекратилась.
2. При относительно малом изменении оценок баллистического коэффициента (увеличились на 5.5%) время падения уменьшилось на 0.073 суток, что составляет 23% от оставшегося времени существования. Такое увеличение времени существования является неожиданным и трудно объяснимым.
3. Значения минимизируемого критерия при уточнении НУ на 2-х из 3-х последних витков являются существенно завышенными. Они превышает «идеальное» значение в 6.0 и 4.5 раза. Эти измерения не были отбракованы потому, что на последнем этапе существования КА такая операция является рискованной.

Комментарий. Автор неоднократно сталкивался с тем, что точность последних TLE ухудшается. В частности при определении времени падения КА Фобос-Грунт последние TLE были отбракованы.

Приведенная в последней строке оценка времени падения 1 час 54 мин (0.0795 UTC) согласуется с данными NORAD и Роскосмоса. Тем не менее, эта оценка времени падения не согласуется с предшествующими орбитальными данными за 7 мая.

На рисунке 3 представлены результаты сравнения оценок баллистического коэффициента S_b с соответствующими оценками BSTAR, которые содержатся в TLE, но имеют другую размерность.

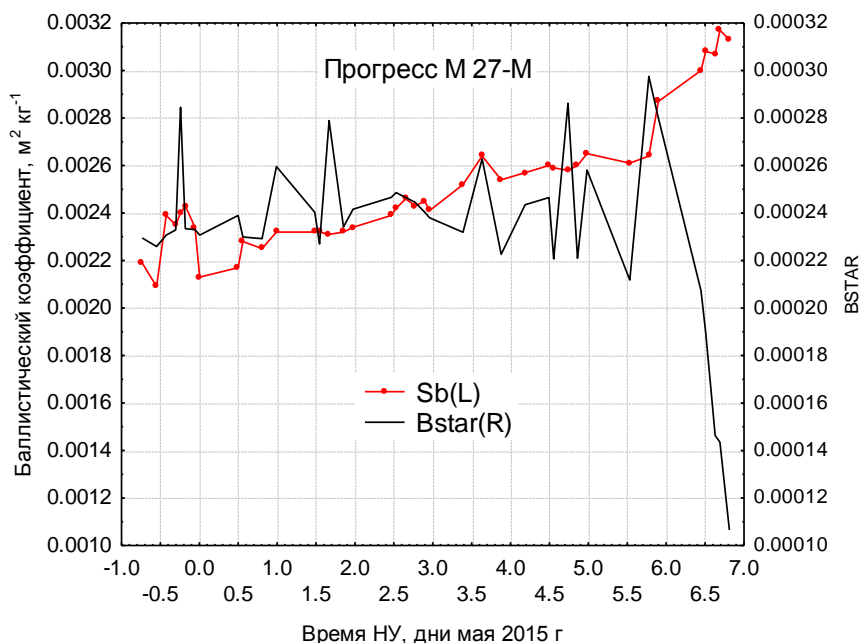


Рисунок 3. Сравнение оценок S_b и BSTAR

Из этих материалов видно, что, хотя в оценках BSTAR имеются существенные отклонения от среднего значения, на интервале времени до 7 мая наблюдается приемлемое согласие обеих оценок. В частности, четко видно существенное увеличение торможения в результате воздействия геомагнитной бури 6 мая. Однако очень большие расхождения оценок имеются в данных за 7 мая. В течение этих суток наши оценки S_b увеличились на 10%, а оценки BSTAR **уменьшились в 3 раза**. Такое уменьшение торможения КА перед падением невозможно объяснить никакими обстоятельствами, кроме как наличием в TLE аномальных погрешностей. Этот вывод согласуется и с упомянутыми выше аномальными значениями минимизируемого критерия при обработке измерений на этом интервале.

Таким образом, на последних сутках перед падением КА в исходных TLE имеются существенные погрешности. Поэтому все результаты за 7 мая не являются достаточно достоверными.

В нашем отчете за 6 мая были приведены такие оценки ожидаемого времени падения КА:

Среднее значение времени падения - **2 часа 30 минут 8 мая**.

Разброс возможных отклонений реального времени падения КА от приведенного среднего значения составляет **± 1.5 часа**.

В данном отчете, подготовленном утром 7 мая, имеется примечание: «В лучшем случае следующее размещение TLE на сайте Space Track ожидается вечером 7 мая. Однако это может и не произойти. Поэтому не исключено, что изложенные выше результаты являются последними».

Сравним изложенные выше результаты с соответствующими данными из других источников. Наиболее полные результаты определения времени и места падения КА публиковались на сайте [6]. На рисунке 4 приведен «снимок» этих результатов.

NORAD_CAT_ID	MSG_EPOCH	INSERT_EPOCH	DECAY_EPOCH	WINDOW	REV	DIRECTION	LAT	Lon	INCL	NEXT_REPORT	ID
40619	2015-05-08 03:25:00	2015-05-08 03:52:49	2015-05-08 02:20:00	1	159	descending	-51	273	51.6	0	5158
40619	2015-05-07 23:26:00	2015-05-07 23:42:02	2015-05-08 01:52:00	180	159	descending	37.4	169.1	51.6	0	5157
40619	2015-05-07 19:22:00	2015-05-07 19:27:26	2015-05-08 01:47:00	300	159	descending	46.4	151.3	51.6	2	5155
40619	2015-05-07 13:04:00	2015-05-07 13:05:21	2015-05-08 01:36:00	120	177	ascending	46.3	85.7	51.6	6	5154
40619	2015-05-07 03:10:00	2015-05-07 03:17:41	2015-05-08 03:32:00	1080	160	descending	-0.6	181.2	51.6	12	5153
40619	2015-05-06 11:12:00	2015-05-06 11:15:24	2015-05-08 08:59:00	1440	164	ascending	51.6	1.3	51.6	24	5152
40619	2015-05-05 12:38:00	2015-05-05 12:42:33	2015-05-08 12:17:00	2880	166	descending	1.7	45.5	51.6	48	5151
40619	2015-05-04 16:03:00	2015-05-04 16:29:22	2015-05-08 13:13:00	2880	167	ascending	35	246.1	51.6	48	5150

Рисунок 4. Данные сайта SpaceTrack о падении КА Прогресс М 27-М.

Здесь приведено 8 результатов, полученных на интервале времени с 4 по 8 мая. Самые последние результаты (верхняя строка) размещены на сайте уже после падения КА – в 03:52:49 8 мая. На сайте они обозначаются как “historical”. Остальные результаты помещены на сайт до падения КА и получены на основе прогноза его движения. В столбце “WINDOW” приведены оценки возможного отличия реального времени падения от расчетного значения (в минутах). Для всех прогнозных оценок значения «окна» составляют сотни и тысячи минут. Только у последней оценки это значение равно 1 мин. Данное обстоятельство позволяет предположить, что оценка времени падения 02:20:00 8 мая подтверждена какими-то реальными данными наблюдения процесса падения КА.

Для определения того, как данные сайта SpaceTrack согласуются с нашими результатами, нанесем их на график, представленный на рисунке 1. Соответствующие результаты представлены на рисунке 5.

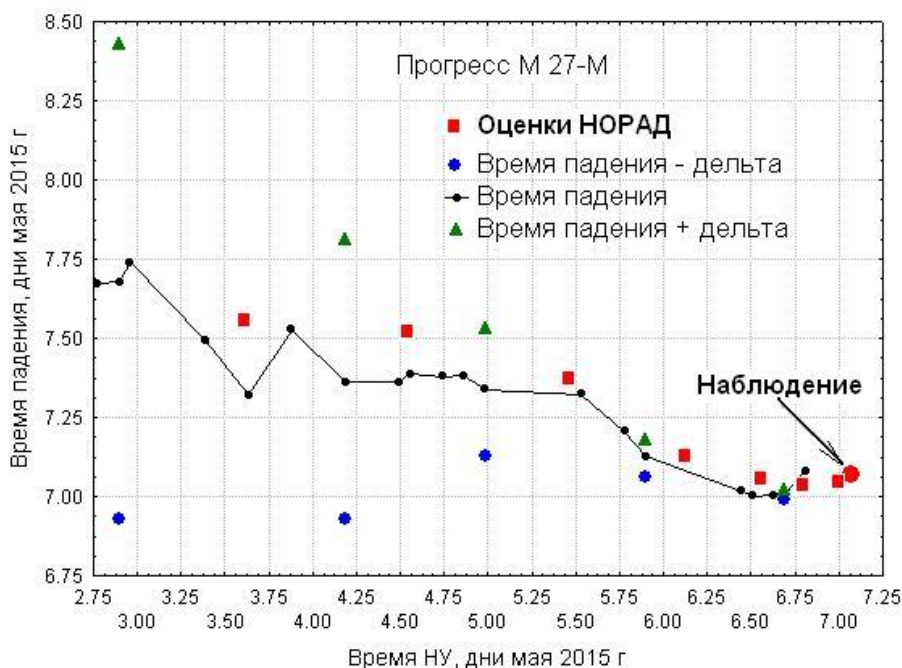


Рисунок 5. Сравнение оценок времени падения

Из данных этого рисунка видно, что во всех случаях, кроме 3-х оценок за 7 мая, наши результаты лучше согласуются с последними данными наблюдения, чем оценки, приведенные на сайте SpaceTrack (НОРАД). Однако для указанных 3-х случаев различие оценок не превышает 1.5 часов, что существенно меньше размеров «окна», приведенного на сайте SpaceTrack. Выше упоминалось, что на наши результаты за 7 мая оказали влияние завышенные погрешности исходных TLE.

На сайте ТАСС от 8 мая было опубликовано такое сообщение:

«По данным Роскосмоса, космический корабль "Прогресс М-27М" сойдет с орбиты и сгорит в атмосфере ориентировочно с 01:13 до 04:51 мск 8 мая. "Корабль полностью сгорит в плотных слоях атмосферы Земли, и только некоторые небольшие фрагменты элементов конструкции могут достичь поверхности планеты", - говорится в сообщении пресс-службы ведомства.

Объединенное командование аэрокосмической обороны Северной Америки (NORAD) ранее сообщило, что прогнозирует падение "Прогресса" в 01:36 по Гринвичу, то есть в 04:36 мск пятницы, плюс-минус два часа.

В Институте космических исследований РАН ожидают падения корабля в **02:30 мск** с погрешностью в полтора часа.

Ранее Европейское космическое агентство сообщило, что сход "Прогресса" с орбиты произойдет между поздним вечером четверга и днем пятницы, подчеркнув, что более конкретные прогнозы являются спекуляцией.»

Комментарии.

1. Данные Роскосмоса согласуются с нашими оценками за 7 мая. При этом правая граница интервала «04:51 мск 8 мая» **меньше** приведенного выше эталонного значения на 30 минут.
2. Как видно из рисунка 5, данные NORAD (01:36 по Гринвичу) являются прогнозными. Они размещены на сайте в 13:05:21 7 мая и имеют размер «окна» ± 2 часа. Упомянутое выше эталонное значение находится **внутри** этого интервала.
3. Приведенная в сообщении ТАСС оценка ИКИ РАН содержит **ошибку**. А и именно, в нашем кратком отчете за 11 часов 7 мая (см. Приложение 1) оценка времени падения 02:30 выражена в UTC, а не в мск. Данная оценка всего на 10 минут отличается от принятого эталонного значения. Соответствующая относительная погрешность составляет 2%. Из всех перечисленных оценок времени падения она является **самой точной**. Поэтому заявленное «окно» является вполне оправданным.
4. Сообщение Европейского космического агентства содержит размер «окна», которое составляет примерно ± 9 часов. В сообщении отсутствуют данные о том, к какому моменту времени относится эта оценка. Если учесть данные сайта SpaceTrack (рисунок 4), то такое «окно» относилось к оценкам за 03:17:41 7 мая. Это означает, что при прогнозе на сутки возможная максимальная погрешность определения времени падения принималась равной 9 часам. Этому соответствует относительная погрешность $\pm 37\%$. Утверждение представителей Европейского космического агентства, что «более конкретные прогнозы являются спекуляцией» имеет принципиальный характер и нуждается дополнительных комментариях.
5. По-видимому, упоминание о возможной «спекуляции» является реакцией на приведенные выше оценки ИКИ РАН, в которых упоминается сравнительно небольшой размер «окна» (± 1.5 часа). Утверждение ЕКА было бы правильным при отсутствии возможности повысить точность прогнозирования времени падения. Однако многолетние исследования автора показывают, что такая возможность существует.

6. Для специалистов Европейского космического агентства образцом для подражания является Американская система контроля космического пространства (Space Surveillance System), которая снабжает сайт SpaceTrack всей основной информацией. Эта система ведет каталог космических объектов и регулярно определяет ожидаемое время и место падения большого числа спутников. Она выдает результаты в двух формах: более точной (для своих потребителей) и менее точной (в формате TLE). Это обстоятельство подтверждают и данные рисунков 4 и 5. Их результаты на последних сутках полета были достаточно высокого качества, в то время как TLE имели повышенный уровень погрешностей. Тот факт, что данные сайта SpaceTrack содержат большие значения интервала возможного времени падения («окна»), объясняется стремлением перестраховаться в условиях автоматической обработки информации (без участия человека). При этом используется устоявшаяся технология уточнения начальных условий и прогнозирования движения.
7. В упомянутых выше публикациях показано, что имеется реальная возможность повысить точность определения времени падения спутников на последнем этапе их существования, доведя уровень относительных погрешностей до нескольких процентов. Показать в полной мере преимущества усовершенствованной методики в данной работе не удалось, поскольку последние TLE за 7 мая имели повышенный уровень погрешностей. Тем не менее, даже в этих условиях (при использовании менее точных измерений) все наши оценки на предшествующем интервале оказались более точными по сравнению с оценками NORAD (см. рисунки 4 и 5).

На рисунке 6 представлены относительные погрешности всех наших 40 оценок времени падения КА. Они не выходят за границы интервала $\pm 25\%$. Без учета результатов за последние сутки среднее значение относительных погрешностей составило 13%, а СКО – 4%. Это еще раз подтверждает реальную возможность существенного уменьшения уровня случайных погрешностей при расчете времени падения КА.

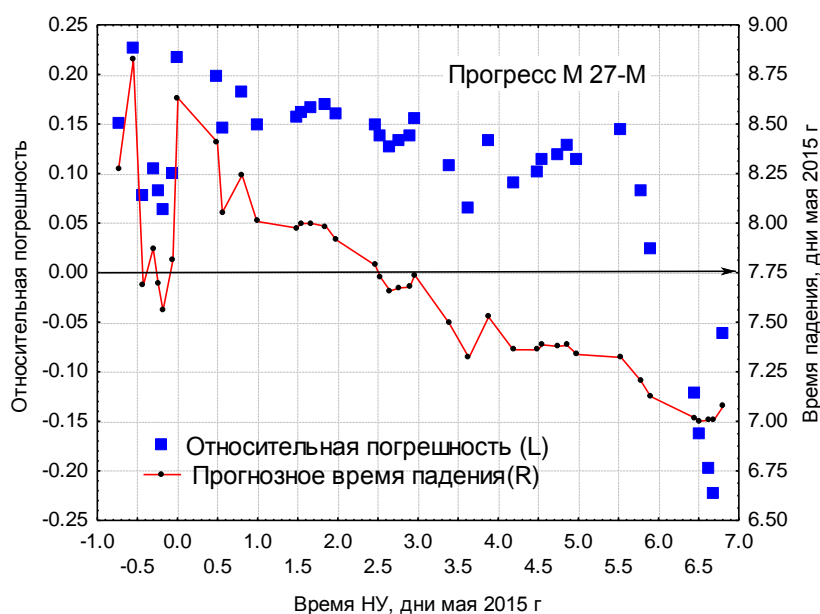


Рисунок 6. Относительные погрешности определения времени падения

Литература

1. А.И. Назаренко, Л.Г. Маркова. Методы определения и прогнозирования орбит ИСЗ при наличии погрешностей в математическом описании движения. Сб. *Прикладные задачи космической баллистики*. Изд-во «НАУКА» Москва 1973, с.с. 36-67.

2. A.I. Nazarenko. Determination and Prediction of Satellite Motion at the End of the Lifetime // International Workshop on Salyut-7/Kosmos-1686 Reentry, ESOC, Darmstadt (G), 9 April 1991.
3. А.И. Назаренко. Оценка времени прекращения существования КА GOCE. Сайт “satmotion.ru”, 2013.
4. A. I. Nazarenko Application of the Method for Optimum Filtering of Measurements for Determination and Prediction of Spacecraft Orbits. Solar System Research, 2013, Vol. 47, No. 7, pp. 564–568.
5. А.И. Назаренко. Определение и прогнозирование орбит низких спутников. Доклад на семинаре ИКИ РАН, посвященном 100-летию со дня рождения П.Е. Эльясберга. Таруса, июнь 2014.
6. Сайт “<http://www.spacetrack.org>”.

А.И. Назаренко

10 мая 2015 г, 18 часов