

Падение космического аппарата Молния 1-44. Комментарии

А.И. Назаренко, д.т.н., профессор, пенсионер

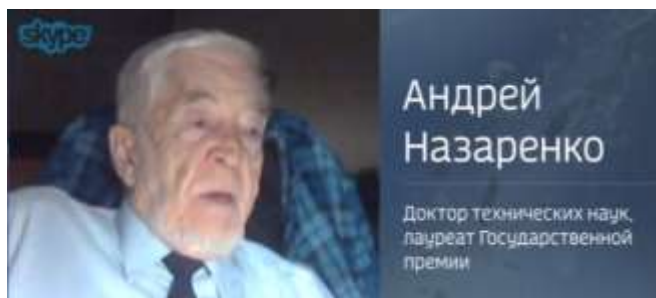
1. Введение

В октябре 2017 г в средствах массовой информации появились многочисленные сообщения о приближающемся сходе с орбиты большого российского спутника Молния 1-44.

<p>Советский спутник «Молния-1-44» сошел с орбиты - Технологии и ... www.fox.ru/news/2017/10/23/1072352 * 4 дня назад - Советский спутник двойного назначения «Молния-1-44» сошел с орбиты и сгорел в атмосфере. Об этом сообщает ...</p> <p>Названо время падения на Землю советского спутника Молния ... korespondent.net/ru/Наука/Россия/ * 5 дней назад - Американская Система контроля космического пространства прогнозирует, что отработавший советский спутник связи «Молния-1-44» ... Вы посмотрели эту статью ранее.</p> <p>Вести.Ру: В пучины космического кладбища низвергнется 38 ... https://www.vedo.ru/doc/109790-2046174 * 5 дней назад - Вечером 23 октября на Землю упадет советский радиотрансляционный спутник «Молния-1-44». На орбите он пролежит 38 лет. Советский ...</p> <p>Советский спутник «Молния-1-44» распался над территорией ... https://www.gazeta.ru/science/news/2017/10/24/n_10723502.shtml * 7 дней назад - Советский спутник двойного назначения «Молния-1-44» сгорел в атмосфере, таким образом прекратил свое существование. Об этом ...</p> <p>Спутник "Молния-1-44" сгорел в атмосфере, заявил эксперт - РИА ... https://ria.ru/news/20171028/1505421002.html * 8 дней назад - Спутник связи двойного назначения «Молния-1-44», который был запущен в советское время, сгорел в атмосфере, донести до Земли ...</p> <p>Советский спутник «Молния-1-44» сгорел в атмосфере – Политика ... http://www.komunisty.ru/news/5448965 * 4 дня назад - Советский спутник двойного назначения «Молния-1-44» прекратил свое существование. «Объект распался над территорией ...</p> <p>38-летний советский спутник «Молния» сойдет с орбиты вечером ... https://tvrussia.ru/news/5448965 * 5 дней назад - В Системе контроля космического пространства в США прогнозируют, что отработавший советский спутник связи «Молния-1-44» ...</p> <p>Советский спутник «Молния-1-44» сгорел в атмосфере Наука ... www.af.ru/science/sovetskiy_sputnik_molnya-1-44_sgorel_v_atmosfere * 4 дня назад - Советский спутник двойного назначения «Молния-1-44» сгорел в ... связи на базе «Молния-1» использовались для обеспечения ...</p>	<p>Слева приведены сведения о публикациях. Такого рода события считаются опасными, так как могут привести к ущербу для объектов на Земле. В публикациях сообщались сведения о времени ожидаемого падения, а также результаты определения фактического схода КА с орбиты. В частности, сообщалось: <i>Американская Система контроля космического пространства прогнозирует, что отработавший советский спутник связи Молния-1-44 сойдет с орбиты в понедельник, 23 октября, сообщает <u>Интерфакс</u>. Согласно постоянно уточняемому прогнозу, прекращение баллистического существования спутника произойдет вечером 23 октября. Это произойдет над Тихим океаном в нескольких сотнях километров к югу от Алеутских островов.</i></p>
--	---

По оценкам экспертов, спутник должен разрушиться при вхождении в плотные слои атмосферы, однако отдельные его несгоревшие фрагменты могут достигнуть поверхности Земли.

22 октября к автору обратились представители ТВ канала Ролссия 24 с предложением прокомментировать это событие. Вечером 22 октября интервью было записано и на следующий день опубликовано. Ниже приведены фрагменты телевизионной передачи (<https://www.vesti.ru/videos/show/vid/734110/cid/4461>): запись комментариев автора и фотография известного специалиста В. Айлора (Aerospace Corporation) рядом с упавшим ранее объектом космического мусора.



24 октября (после падения спутника) автор нашел в интернете официальные данные об определении времени и места падения спутника Молния 1-44, опубликованные Командованием военно-космических сил ВВС США и кампанией Aerospace Corporation. Российские данные не обнаружены.

2. Опубликованные данные о падении КА Молния 1-44

В таблице 1 приведены данные Американской Системы контроля космического пространства (сайт <https://www.space-track.org>). Существенными данными здесь являются: время определения параметров орбиты (MSG_EPOCH) и время падения (DECAY_EPOCH). Кроме того, приведены: возможная погрешность расчетного времени падения (окно, мин), долгота и широта точки падения (град).

Таблица 1. Данные Американской Системы контроля
время

№ КА	Определение	Публикация	Падение	Окно	Виток	Направл.	Широта	Долг.
NORAD_CAT_ID	MSG_EPOCH	INSERT_EPOCH	DECAY_EPOCH	WINDOW	REV	DIRECTION	LAT	LON
11474	2017-10-23 14:38:00	2017-10-23 14:53:40	2017-10-23 14:38:00	1	58384	ascending	-28.6	23.5
11474	2017-10-23 11:45:00	2017-10-23 11:51:38	2017-10-23 14:02:00	29	58384	ascending	-28.6	23.5
11474	2017-10-23 07:57:00	2017-10-23 08:19:07	2017-10-23 14:11:00	60	58386	ascending	2.9	39.7
11474	2017-10-23 02:08:00	2017-10-23 02:14:11	2017-10-23 13:12:00	120	58384	descending	47.2	197.9
11474	2017-10-22 11:24:00	2017-10-22 11:31:13	2017-10-23 10:05:00	300	58382	ascending	61.6	179.3
11474	2017-10-21 11:57:00	2017-10-21 12:06:05	2017-10-23 08:07:00	540	58380	ascending	-29	113.3
11474	2017-10-20 12:23:00	2017-10-20 12:34:25	2017-10-23 10:25:00	840	58382	descending	13.3	268.2
11474	2017-10-19 23:45:00	2017-10-19 23:59:45	2017-10-23 13:21:00	1140	58384	descending	22.8	217.7

В верхней строке приведены последние данные. Они получены уже после падения спутника. Остальные строки относятся к предыдущим результатам. Они расположены в порядке убывания времени определения.

Последнее прогнозируемое время падения приведено во второй строке: 23 октября **14^h 02^m**. Ему соответствует возможный разброс оценок ± 29 минут. Уже после падения информантства сообщили, что «спутник двойного назначения "Молния-1-44" (серия Молния-1+) распался над территорией Зимбабве». Данные второй строки соответствуют этому району.

Время падения, указанное в первой строке таблицы (14^h 38^m) отличается от данных второй строки, однако координаты в этих строках совпадают. Указанная точка падения (широта -28.6°, долгота 23.5°) не согласуется с данными прогноза из предыдущего раздела (южнее Алеутских островов). Району южнее Алеутских островов соответствуют результаты прогноза из четвертой строки таблицы. Причины отличий оценок времени падения, приведенных в разных строках таблицы 1, объясняются влиянием непредсказуемых вариаций плотности атмосферы. Специалистам известно, что погрешность прогноза времени падения имеет порядок 10% оставшегося времени существования. Приведенные в таблице оценки «окна» согласуются с этой закономерностью. Они составляют $\approx 20\%$ оставшегося времени существования. Эти оценки формируются без вмешательства специалистов (с «запасом»). В заключение заметим, что данные Американской Системы контроля космического пространства являются результатом автоматической системы обработки информации.

На сайте кампании Aerospace Corporation (<http://www.aerospace.org/cords/reentry-predictions/>) размещена следующая информация о падении КА Молния 1-44.

Reentry Prediction

Predicted Reentry Time: 23 OCT 2017 14:46 UTC \pm 1 hour

Prediction Epoch: 23 OCT 2017 10:07:42.382 UTC

Prediction Ground Track:



На карте кружком отмечена расчетная точка падения 23 октября в **14^h 46^m**. Прогноз выполнен по НУ за 07^h 42^m. Интервал прогноза составил 424 мин. Назначенное «окно» (\pm 1 час) составляет 14% от оставшегося времени существования. Результат Американской Системы контроля (14^h 02^m) отличается от данных рисунка на 44 мин. На карте этому времени соответствует район пролета над Южной Африкой. Приведенные здесь результаты подготовлены подразделением «Center for Orbital and Reentry Debris Studies» (CORDS). Руководитель – упомянутый выше В. Айлор.

CORDS was established in 1997 to focus the corporation's research and technology applications in the areas of space debris, collision avoidance, and reentry breakup and to provide a single point-of-contact for organizations seeking to take advantage of Aerospace's more than 50 years of experience in these and related technical areas.

Outer space presents a number of hazards to spacecraft. Temperature extremes, radiation, solar flares, and micrometeoroids have long been essential considerations in spacecraft and mission design.

Collisions between manmade objects

Increasing use of space has brought a new source of risk — collisions between manmade objects. Given the high relative velocities of objects in space, even small untracked objects can damage critical sensors and spacecraft components.

Recent collisions have raised awareness of the growing hazard from space debris and the risk to space operations.

As users of space have recognized the hazards of space debris on operating satellites, plans have been made to deorbit old inoperative spacecraft and hardware back into Earth's atmosphere, where the heat of reentry will destroy the satellite and its components.

Unfortunately, some portions of the spacecraft — sometimes large components — may survive reentry and pose a hazard to people and property on the ground.

Reentry breakup recorder (REBR)

As part of its ongoing research into orbital debris, CORDS spearheaded development of a tool called the Reentry Breakup Recorder (REBR). This is a small, autonomous device that records temperature, acceleration, rotational rate, and other data during the reentry of space hardware into the Earth's atmosphere and its subsequent breakup due to aerodynamic heating and loads. [Click here](#) to read about the REBR and Aerospace's role in developing this unique instrument.

3. Применение метода оптимальной фильтрации измерений

Автор много лет занимается проблемой определения и прогнозирования движения спутников в атмосфере ([1] – [12]). Первая публикация об определении времени падения спутников относится к 1991 г. По материалам накопленного опыта разработана усовершенствованная методика определения и прогнозирования орбит с учетом влияния случайных возмущений, названная методом оптимальной фильтрации измерений (ОФИ). Показано, что ее применение обеспечивает повышение точности по сравнению с традиционным подходом.

Данные о падении КА Молния 1-44 послужили поводом для проведения соответствующих расчетов с применением методики ОФИ. Исходные данные (измерения) в форме т.н. TLE на предшествующем месячном интервале времени были скачены 23 октября с сайта <http://www.space-track.org> (105 наборов элементов орбит). На рисунке 1 представлены некоторые из результатов. Каждая точка – это результат обработки 8-ми предшествующих измерений в форме TLE.

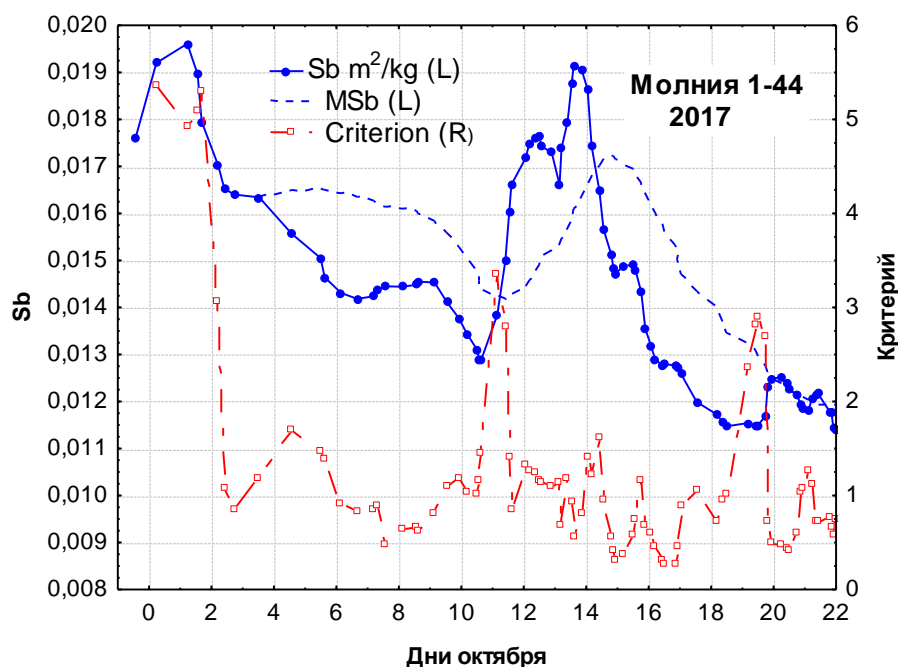


Рисунок 1. Оценки баллистического коэффициента

Оценки баллистического коэффициента (S_b) меняются в пределах от 0,0115 до 0,0195 м²/кг, т.е. в 1,7 раза. Эти оценки играют важную роль, так как используются в качестве исходных данных для расчета торможения КА в атмосфере. Если бы значения S_b , отражающие изменения плотности атмосферы, были бы постоянными, погрешности прогноза движения КА были бы намного меньше. Именно непредсказуемые вариации торможения в атмосфере являются основной причиной возникновения погрешностей решения рассматриваемой задачи. Наиболее сильные вариации торможения наблюдались 1 и 2 октября, а также в интервале времени с 11 по 15 октября. Синей пунктирной линией отмечены усредненные оценки S_b на некотором предшествующем интервале времени (скользящее среднее). Они используются при формировании исходных данных для прогноза. Красная штрихпунктирная линия показывает оценки минимизируемого критерия, который зависит от остаточных невязок. Видно, что максимумы критерия имели место в моменты времени существенного изменения

оценок Sb. Это является естественным следствием ухудшения согласованности применяемой модели движения и конкретных измерений.

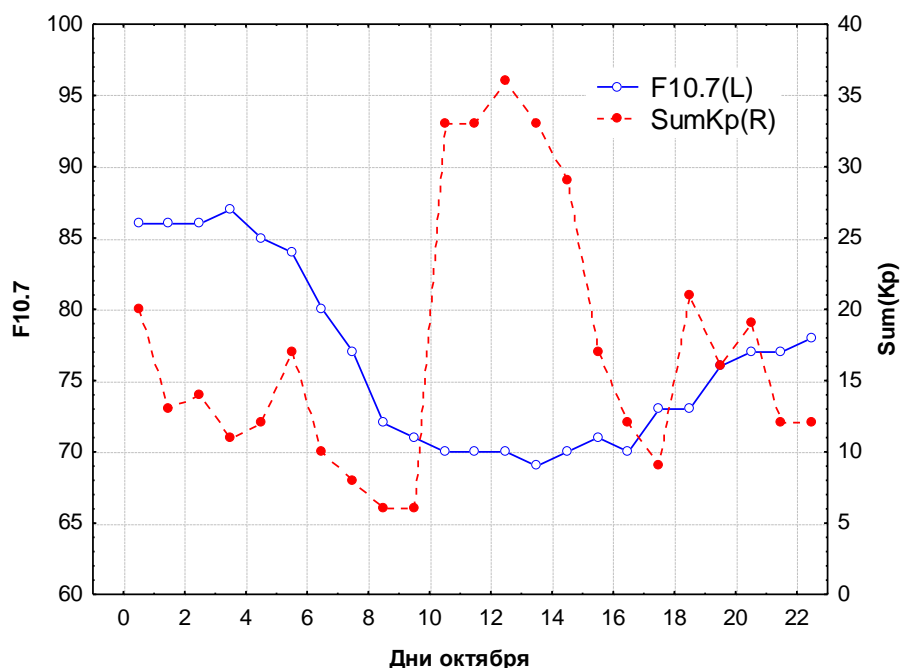


Рисунок 2. Данные о солнечной и геомагнитной активности.

На рисунке 2 представлены данные о индексах солнечной и геомагнитной активности (F10.7 и Kp) в октябре 2017 г (сайт <http://www.swpc.noaa.gov>). Из этих данных видно, что при относительно небольших изменениях солнечной активности (индекс F10.7) наблюдались сильные вариации индекса геомагнитной возмущенности Kp. Длительная магнитная буря наблюдалась на 5-ти дневном интервале времени с 11 по 15 октября. Существенные геомагнитные возмущения наблюдались также 1 октября и 18-20 октября.

Сравнение данных рисунков 1 и 2 свидетельствует о том, что именно вариации солнечной и геомагнитной активности являются основной причиной наблюдаемых существенных непредсказуемых изменений торможения КА в атмосфере. Из этого сравнения видны достоинства метода ОФИ, который позволяет отслеживать вариации реального торможения с меньшими амплитудными и фазовыми искажениями по сравнению с другими методами обработки измерений.

На рисунке 3 представлены результаты 85-ти прогнозов движения КА до момента достижения высоты входа в плотные слои атмосферы (80 км) на основе упомянутых выше результатов уточнения НУ. Расчетные моменты входа находятся в интервале значений от 12 часов 21 октября до 12 часов 24 октября. Минимумы имели место после геомагнитных бурь 1-го и 11-15 октября. Это является естественным следствием увеличения фактического торможения. Максимальное значение времени входа было достигнуто после минимума оценок Sb 11 октября, непосредственно перед началом упомянутой выше сильной геомагнитной бури.

Характерной особенностью данных рисунка 3 является стабилизация расчетных значений времени входа на интервале времени после 19 октября. Этот район выделен прямоугольником. Такая стабилизация объясняется рядом причин:

- По мере уменьшения высоты спутника растет плотность атмосферы и уменьшается ее изменчивость в результате влияния разного рода геофизических факторов.
- Достоинства применения метода ОФИ в части повышения точности определения и прогнозирования орбит проявляются именно при краткосрочных прогнозах.

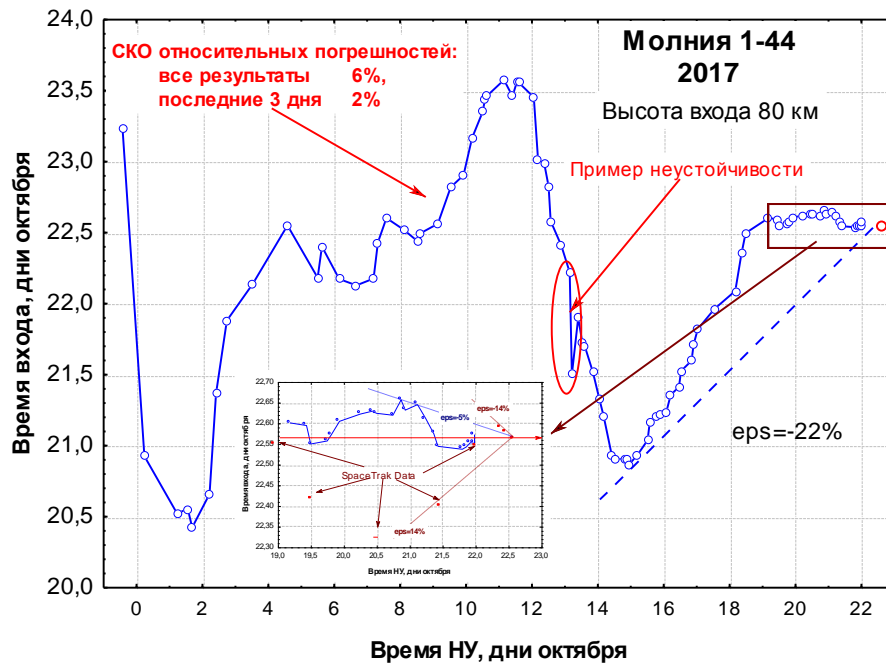


Рисунок 3. Прогнозные оценки времени входа в плотные слои атмосферы

Последний прогноз выполнен по начальным условиям за 23^h 25^m 22 октября. Расчетное время входа составило 23 октября **13^h 46^m**. Длительность полета КА от момента времени НУ до точки входа ≈ 14 часов. Результаты расчетов на последнем перед падением 3-х дневном интервале времени будут рассмотрены ниже более подробно.

Важной характеристикой точности определения времени входа является относительная погрешность (ϵ_{ps}). Она рассчитывается как отношение разности расчетного и эталонного времени входа к оставшемуся времени существования. Эта оценка была рассчитана для всех 85-ти прогнозов при разных начальных условиях. В качестве эталонного значения использовалось последнее расчетное время входа. По данным всех прогнозов СКО относительной погрешности составило 6 %, а по данным за последние 3 дня – 2 %.

Из данных рисунка 3 видно, что наряду с понятными изменениями прогнозных оценок времени входа, обусловленными влиянием геофизических факторов, имеется одно скачкообразное изменение расчетного времени входа, соответствующее НУ за 14 октября. Данный район выделен красным эллипсом. При начальных условиях за 03^h 21^m 14 октября время ожидаемое время входа составило 05^h 17^m 23 октября. При использовании следующих начальных условий за 05^h 02^m той же даты расчетное время входа составило 12^h 03^m 22 октября, т.е. уменьшилось сразу на ≈ 17 часов. При использовании последующих НУ расчетное время входа вернулось к ожидаемым значениям (плавное изменение оценок). Возможность возникновения неустойчивых оценок времени существования спутников была предсказана в монографии [13] (стр. 108).

Доказано, что эта неустойчивость возникает у низких спутников на эллиптических орбитах при некоторых значениях аргумента перигея. Именно таким спутником является КА Молния 1-44.

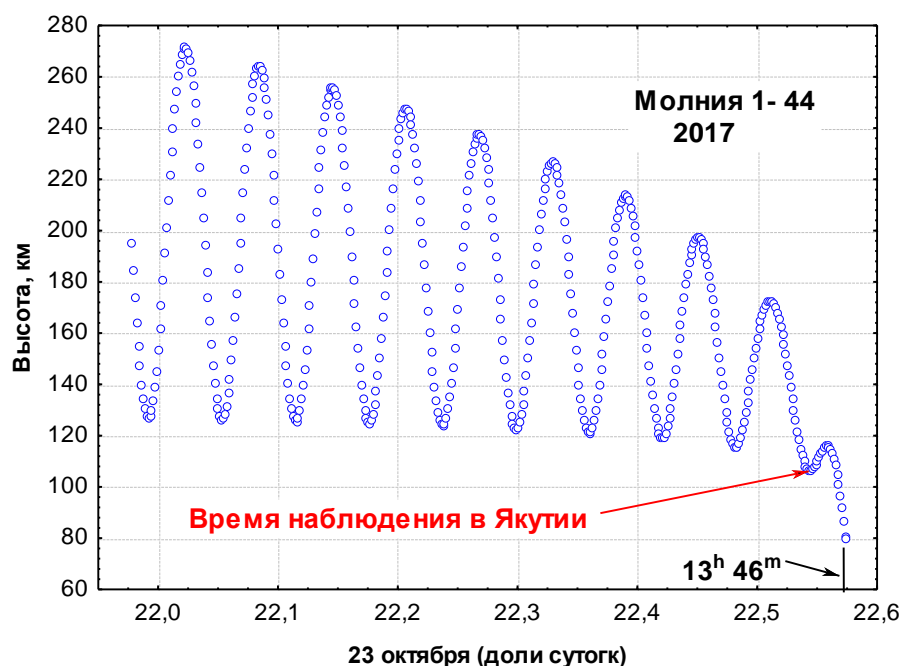


Рисунок 4. Изменение высоты при прогнозе до точки входа

Данные этого рисунка очень полезны для объяснения изложенных выше результатов. Видна большая разница высот апогея и перигея, который у этого КА находился на широте $\approx 61^\circ$. На полусуточном интервале прогноза, как и следовало ожидать, высота апогея существенно уменьшилась – на 100 км. На этом интервале высота перигея уменьшалась намного медленнее. В момент последнего перед падением пролета КА в высоких широтах (в момент времени $\approx 12^h 59^m$) высота составила 102 км. После этого началось быстрое уменьшение высоты. Через 48 минут КА снизился до 80 км. Как показывают расчеты, после достижения высоты ≈ 100 км спутники долго не существуют. В большинстве случаев они прекращают существование уже через 20 - 30 минут. В данном случае это время оказалось намного больше – составило ≈ 50 мин. Это объясняется положением перигея в высоких широтах. Все дело в том, что после пролета перигея высота спутника меняется в результате влияния двух обстоятельств:

- увеличивается вследствие удаления от перигея;
- уменьшается под действием торможения и влияния сжатия Земли.

Первое обстоятельство приводит к продлению времени существования. Однако в данном случае второе обстоятельство оказалось более существенным. Это видно из правой части графика на рисунке 4.

Достоверность приведенной здесь оценки времени достижения высоты 80 км (**13^h 46^m**) подтверждают сведения о том, что вечером 23 октября ($12^h 29^m$ UT) жители Якутии наблюдали и сфотографировали падение спутника. Именно в это время КА Молния 1-44 пролетал над Якутией. Яркое свечение падающих спутников наблюдается обычно при их сгорании в верхних слоях атмосферы. Наблюдение падения в Якутии показывает, что КА начал разрушаться уже на высоте более 102 км. От него отделились легкие элементы конструкции большого размера, имеющие большое отношение площади к массе. Именно

такие фрагменты наблюдали жители Якутии. Тяжелые фрагменты разрушения малого размера могли продолжать полет еще несколько десятков минут. Таким образом, интервал времени от 12^h 59^m до 13^h 46^m 23 октября является наиболее вероятным временем прекращения существования фрагментов КА Молния 1-44.

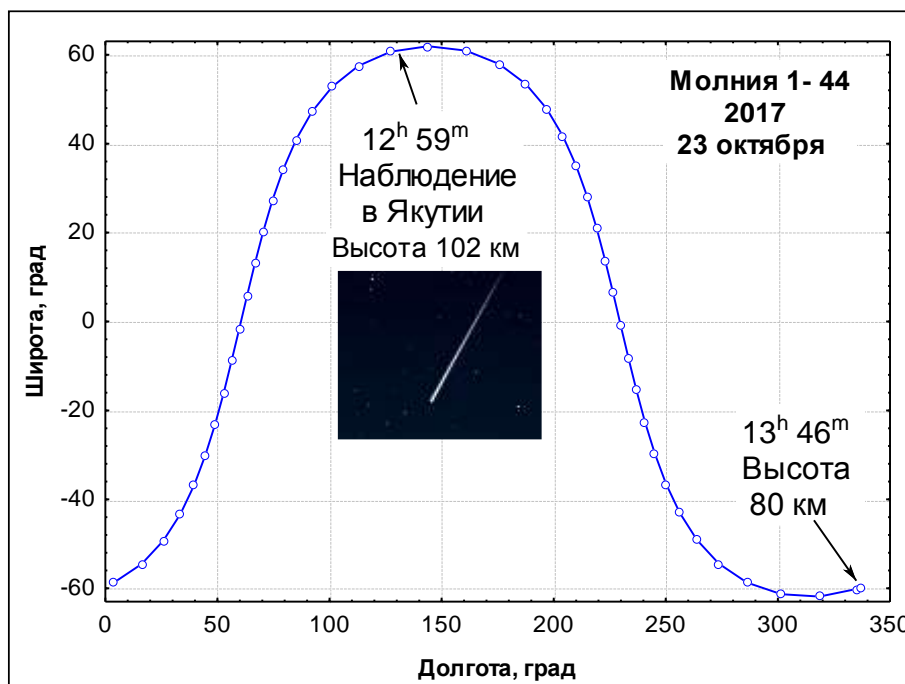


Рисунок 5. Координаты подспутниковых точек перед падением КА

Здесь на 86-ти минутном интервале времени приведен след орбиты на поверхности Земли перед расчетным временем падения КА в 13^h 46^m 23 октября. Правая часть графика (после пролета над Якутией) характеризует наиболее вероятный район сгорания и падения фрагментов КА. Весь этот район относится к Тихому океану и, отчасти, к юго-западной части Атлантического океана.

4. Сравнение результатов определения времени падения

Сравнение результатов применения метода ОФИ с данными таблицы 1 приведено на рисунке 6.

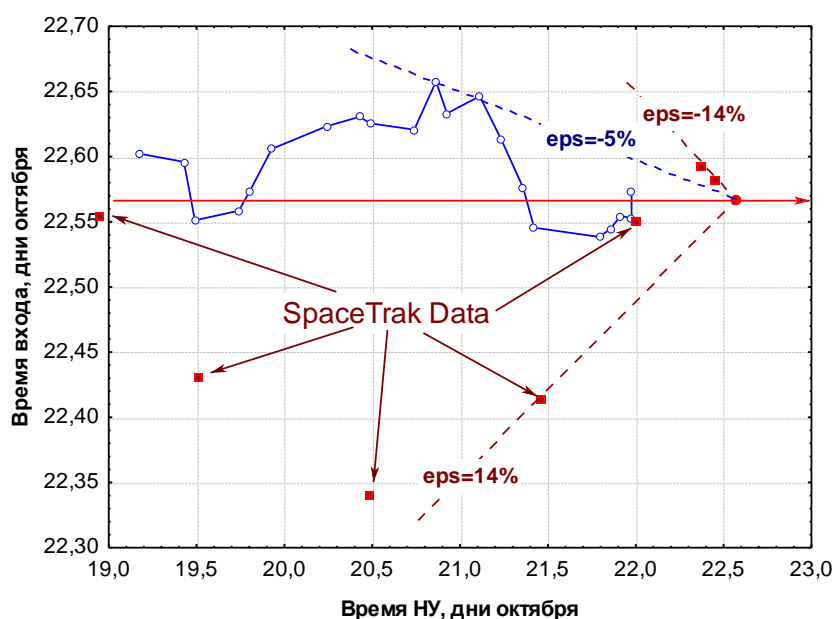


Рисунок 6. Сравнение оценок времени падения

Здесь данные таблицы 1 помечены коричневыми квадратами. Видно, что в 5-ти случаях из 7-ми результаты прогноза времени падения довольно сильно отличаются от эталонного значения. Относительная погрешность достигает 14%. При использовании методики ОФИ относительная погрешность не превысила 5% при СКО относительных погрешностей, равном 2%.

Важно отметить, что в Американской Системе контроля последнее уточнение параметров орбиты по измерениям было выполнено в 11^h 45^m, т.е. за 2 часа 17 мин до их расчетного времени падения в 14^h 02^m 23 октября. Кроме того, на одном из предыдущих витков они также имели измерения. Объявленное окно (± 29 мин) не противоречит нашим данным, так как момент времени 14^h 02^m - 29^m = 13^h 33^m меньше нашей оценки времени падения 13^h 46^m.

Таким образом, несмотря со существенно лучшие информационные возможности Американской Системы контроля, уровень относительных погрешностей их данных (14%) был в ≈ 3 раза больше результатов применения метода ОФИ.

На рисунке 7 представлены окончательные результаты всех рассмотренных выше определений времени и района падения. Красным цветом отмечены данные применения метода ОФИ.



Рисунок 7. Данные о возможных районах падения

Таблица 2. Основные результаты

Источник	Время падения	Долгота	Широта
ОФИ	12 ^h 59 ^m - 13 ^h 46 ^m	327.8°	- 61.2°
Система контроля	14 ^h 02 ^m \pm 29 ^m	23.5°	-28.6°
Aerospace	14 ^h 45 ^m \pm 60 ^m	197.6°	19.8°

Выше было показано, что по данным применения метода ОФИ интервал времени от 12^h 59^m до 13^h 46^m 23 октября является наиболее вероятным временем прекращения существования фрагментов КА Молния 1-44. По Американским данным левая граница интервала возможного времени падения практически совпадает с результатом прогноза точки падения на основе применения метода ОФИ (13^h 46^m). **Однако эти результаты не согласуются с достоверными данными о наблюдении падения фрагментов КА над Якутией в 12^h 59^m 23 октября.**

Выводы

1. Падение большого Российского спутника Молния 1-44 23 октября 2017 г. привлекло внимание общественности. Опубликовано множество материалов об ожидаемом времени и месте падения. Эти материалы были противоречивыми и во многих случаях дилетантскими.
2. В соответствии с международным правом страна, которой принадлежит спутник, несет ответственность за возможный ущерб от его падения. Она обязана предупреждать мировое сообщество о возможной опасности.
3. В мире имеется только две организации, которые оперативно ведут каталог космических объектов и на его основе регулярно определяют время и место падения всех спутников. Это – Российская и Американская системы контроля космического пространства (Space Surveillance Systems). Данные организации принадлежат соответствующим военным ведомствам и, поэтому, распространение информации о результатах их работы имеет ограничения.
4. Имеется несколько организаций, которые периодически и выборочно решают рассматриваемую задачу на основе доступной информации. Одна из таких организаций – Aerospace Corporation (США). Общедоступной информацией являются данные каталога Американской системы контроля в форме т.н. двухрядных элементов орбит (Two Line Elements).
5. Методика определения времени и места падения спутников основана на интегрировании уравнений движения с учетом известных возмущающих факторов. Начальные условия определяются на основе применения классического метода наименьших квадратов. Многочисленные предшествующие работы показали, что погрешность определения времени падения составляет $\approx 10\%$ от оставшегося времени существования. Основной причиной погрешностей являются непредсказуемые вариации силы атмосферного торможения.
6. На основе накопленного опыта автором разработана усовершенствованная методика определения и прогнозирования орбит с учетом влияния случайных возмущений, названная методом оптимальной фильтрации измерений (ОФИ). Доказано, что ее применение обеспечивает повышение точности по сравнению с традиционным подходом. На ряде примеров показано, что применение методики ОФИ приводит к уменьшению погрешностей определения времени падения в несколько раз.
7. Метод ОФИ применен для определения времени и места падения КА Молния 1-44. Установлено, что интервал времени от $12^{\text{h}} 59^{\text{m}}$ до $13^{\text{h}} 46^{\text{m}} 23$

октября является наиболее вероятным временем прекращения существования фрагментов КА Молния 1-44. Этот район относится к Тихому океану и, отчасти, к юго-западной части Атлантического океана. По результатам 20-ти прогнозов на последнем 4-х дневном интервале времени перед падением относительная погрешность не превысила 5% при СКО относительных погрешностей, равном 2%.

8. Результаты Американских организаций:

Источник	Время падения	Долгота	Широта
Система контроля	14 ^h 02 ^m ±29 ^m	23.5°	-28.6°
Aerospace	14 ^h 45 ^m ±60 ^m	197.6°	19.8°

Возможный разброс оценок определен как ±20% оставшегося времени существования. В соответствии с этими данными левая граница интервала возможного времени падения практически совпадает с результатом прогноза точки падения на основе применения метода ОФИ (13^h 46^m).

Однако эти результаты не согласуются с достоверными данными о наблюдении падения фрагментов КА над Якутией в 12^h 59^m 23 октября.

9. Таким образом, еще раз продемонстрирована возможность существенного (в несколько раз) повышения точности решения рассматриваемой задачи на основе применения метода ОФИ.

10. Внедрение методики оптимальной фильтрации измерений в практику регулярных расчетов является актуальной нерешенной проблемой.

Литература

1. Назаренко А.И., Маркова Л.Г. Методы определения и прогнозирования орбит при наличии погрешностей в математическом описании движения. Сб. Прикладные задачи космической баллистики, Наука, 1973.
2. Nazarenko A.I. 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. Nazarenko A.I. Determination and Prediction of Orbits with Due Account of Disturbances as a «Color» Noise // AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Monterey, CA, February 1998. AAS 98-191.

4. Nazarenko A.I. Accuracy of Determination and Prediction Orbits in LEO // Estimation Errors Depending on Accuracy and Amount of Measurements, Seventh US/Russian Space Surveillance Workshop, Monterey, October-November 2007.
5. Nazarenko A.I. Accuracy of orbit determination and prediction for SOs in LEO. Dependence of estimate errors from accuracy and number of measurements. 26-th IADC, Moscow, (2008)
6. Nazarenko A.I. Increasing the accuracy of orbit forecasting on the basis of improvement of statistical methods for processing measurements. Fifth European Conference on Space Debris, ESA SP-672, 2009.
7. Назаренко А.И., Погрешности прогнозирования движения спутников в гравитационном поле Земли, Москва, Институт космических исследований РАН, 2010, 225 с.
8. Назаренко А.И., Клименко А. Г. Патент на изобретение 2463223, Российская Федерация. Способ определения и прогнозирования движения космического аппарата на низких орбитах, подверженного влиянию торможения в атмосфере. ОАО «Российские космические системы». Заявка № 2011112179, приоритет изобретения 30.03.2011.
9. Назаренко А.И., Применение метода оптимальной фильтрации измерений для уточнения и прогнозирования орбит космических аппаратов. Вестник, научно-технический журнал ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. № 2, 2012.
10. Назаренко А.И., Определение и прогнозирование орбит низких спутников. Доклад на семинаре ИКИ РАН, посвященном 100-летию со дня рождения П.Е. Эльясберга. Таруса, июнь 2014.
11. Nazarenko A.I., How can we increase the accuracy of determination of spacecraft's lifetime? Acta Astronautica, 115 (2015), p.p. 229-236.
12. Назаренко А.И., Задачи стохастической космодинамики. Математические методы и алгоритмы решения. Москва, URSS, 2017, 352 с.
13. Назаренко А.И., Скребушевский Б.С. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. Москва, МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1981, 285 с.

25 октября 2017 г.