

## VII. Определение времени падения КА “Tiangong-1”

15 января 2018

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

Изложенные ниже материалы являются продолжением текстов под тем же названием, размещенных на сайте satmotion.ru в ноябре-декабре 2017 г [1 - 6].

### 1. История оценок за сентябрь-октябрь 2017 г

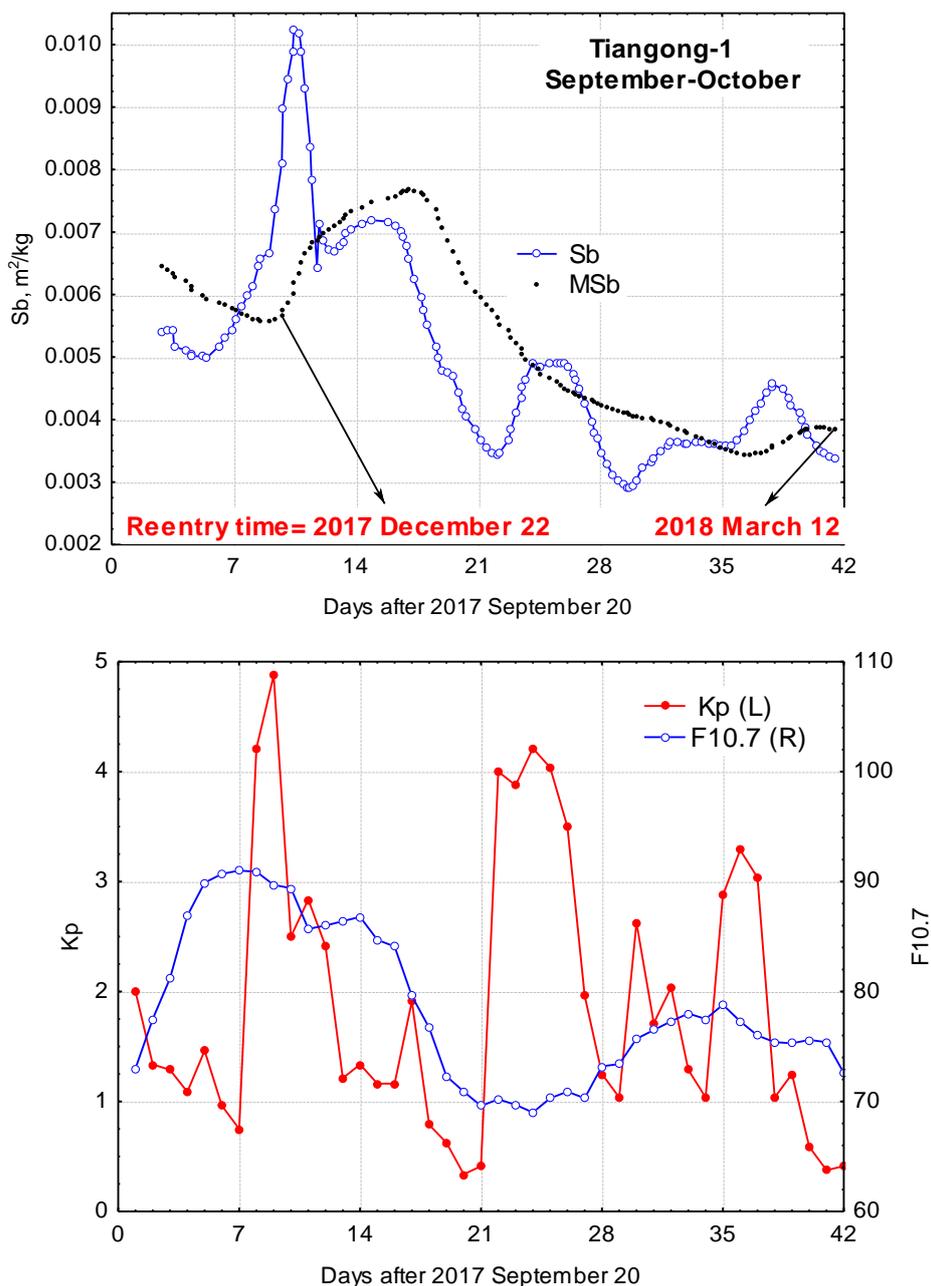


Рисунок 1. Изменения характеристик в сентябре-октябре

В этот период наблюдались очень большие вариации оценок баллистического коэффициента. Максимум отличается от минимума в 3.5 раза! Видно, что эти вариации являются следствием роста солнечной и геомагнитной активности. По НУ за 1 октября ожидаемое время падения спутника – 22 декабря 2017 г.

По НУ за 1 ноября ожидаемое время падения спутника – 12 марта 2018 г.

## 2. История оценок за ноябрь-декабрь 2017 г

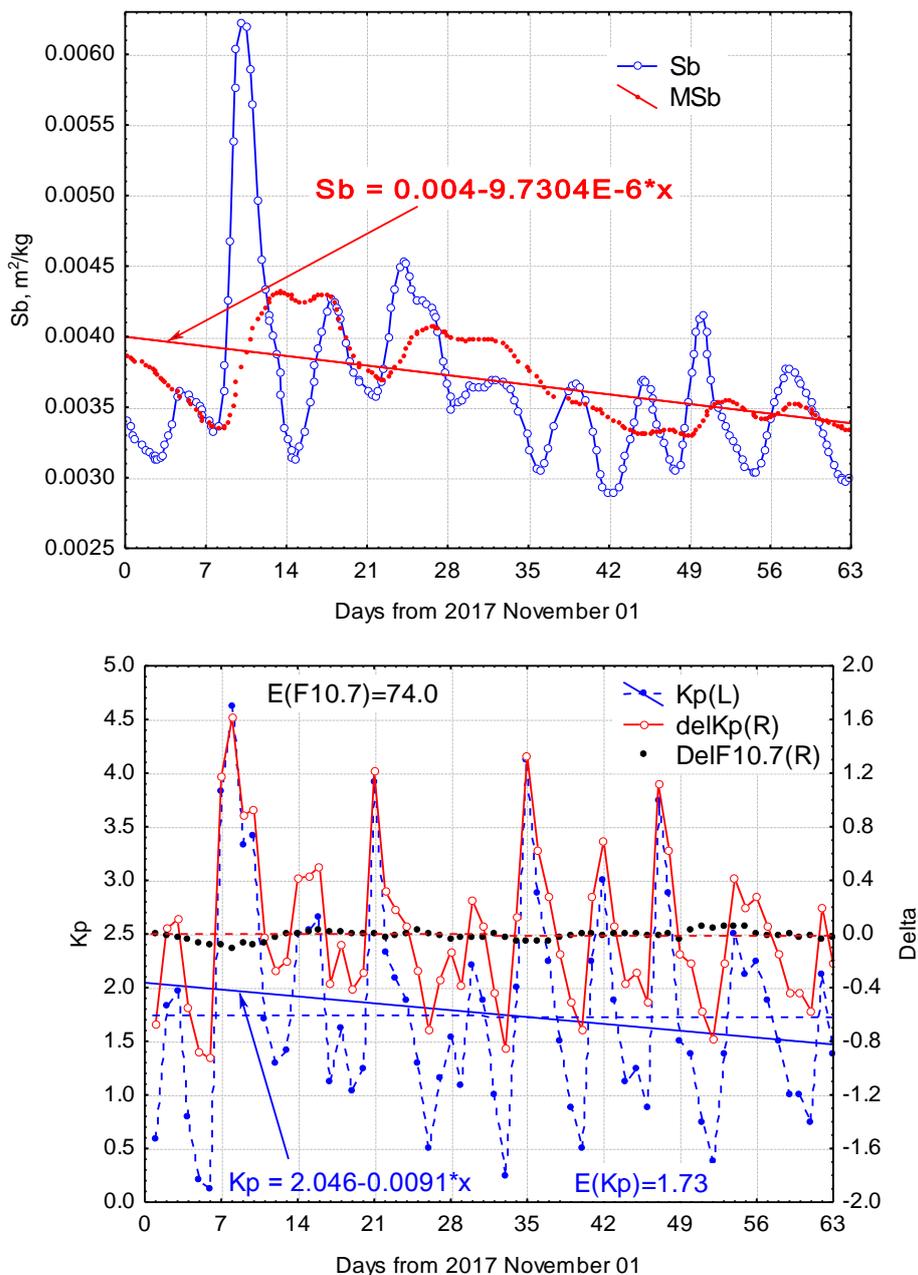


Рисунок 2. Изменения характеристик в ноябре-декабре

Из этих данных видно, что уменьшение геомагнитной активности ( $K_p$ ) и оценок торможения КА в атмосфере ( $S_b$ ) продолжилось. По усредненным оценкам баллистического коэффициента построен тренд

$$E(S_b) = 0.0040 - 0.00000973 * \text{days}. \quad (1)$$

На 63-х дневном интервале уменьшение составило 12% от исходной оценки.

На нижнем рисунке представлены данные о геомагнитной и солнечной ( $F_{10.7}$ ) активности. По данным о значениях геомагнитного индекса ( $K_p$ ) построен тренд

$$E(Kp) = 2.040 - 0.0091 * \text{days}. \quad (2)$$

На 63-х дневном интервале уменьшение составило 28% от исходной оценки.

Таким образом, наблюдается согласованное изменение геомагнитной активности и уровня торможения КА в атмосфере. Эту связь подтверждают и данные о вариациях указанных характеристик, вычисленные по формуле

$$\Delta x = \frac{x - E(x)}{E(x)}. \quad (3)$$

Вариации Kp индекса, а также индекса F10.7 также представлены на рисунке. Видно, что величина вариаций первого индекса на порядок больше, чем у второго. Это является следствием минимума солнечной активности в рассмотренный период времени.

Более удобные для сравнения данные о вариациях разных характеристик в ноябре-декабре 2017 г. представлены на рисунке 3.

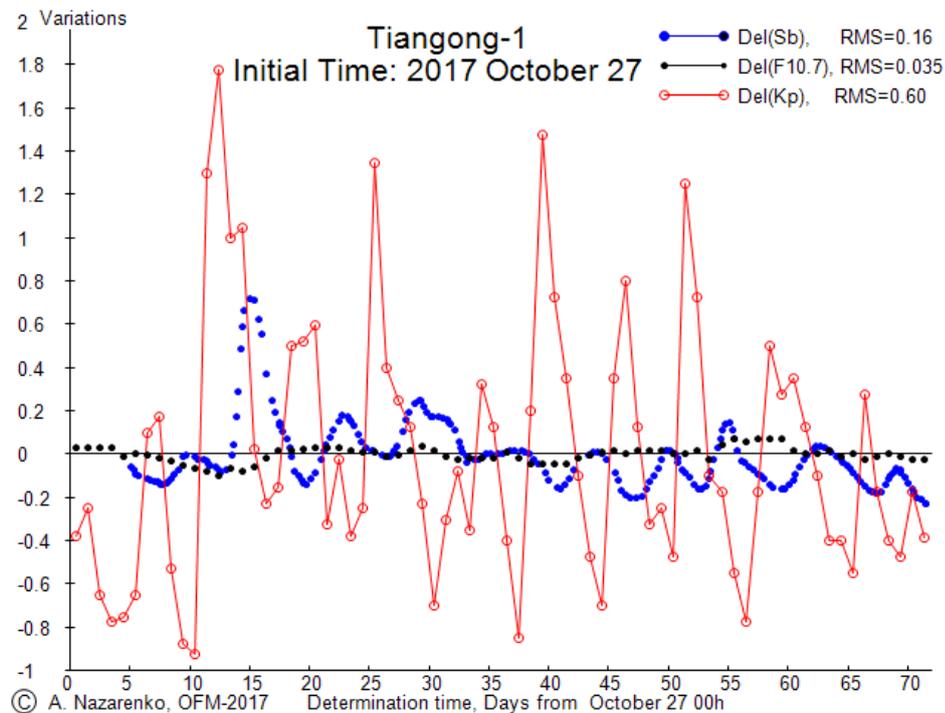


Рисунок 3. Нормированные вариации характеристик в ноябре-декабре

При внимательном рассмотрении этих данных видно, что в период минимума солнечной активности основной причиной вариаций уровня торможения КА в атмосфере являются вариации геомагнитной активности (красная кривая). Для количественной оценки этой связи построена функция взаимной корреляции

$$Cor(\tau) = \frac{E[\Delta Sb(t) \cdot \Delta Kp(t - \tau)]}{RMS(Sb) \cdot RMS(Kp)}. \quad (4)$$

Эта корреляционная функция представлена на рисунке 4. Она построена по данным рисунка 3. При этом использовались значения:  $RMS(Sb)=0.16$  и  $RMS(Kp)=0.60$ .

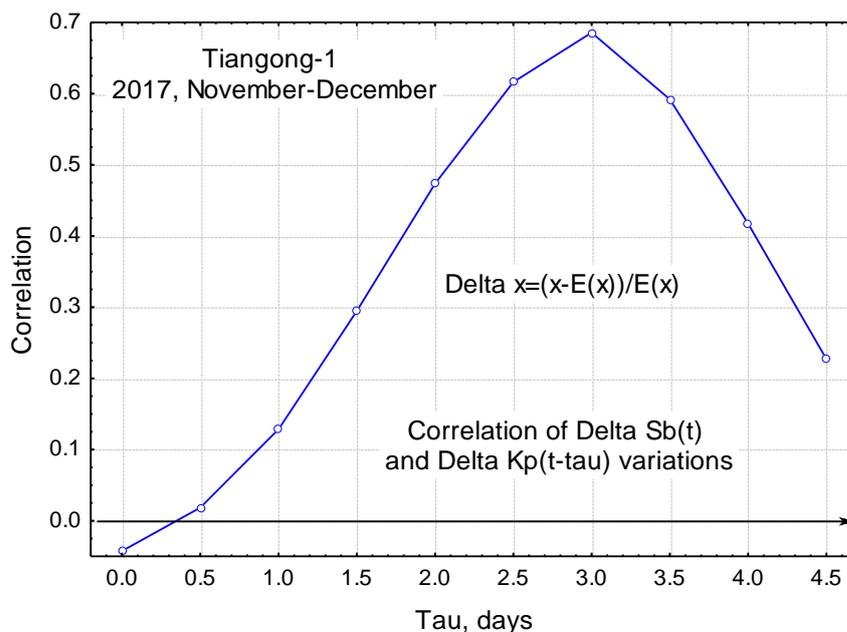


Рисунок 4. Взаимная корреляция вариаций геомагнитной активности и торможений КА в атмосфере

Максимальное значение корреляции (при  $\tau=3$  дня) составляет  $\approx 0.7$ . Это свидетельствует об очень существенной связи вариаций геомагнитной активности и уровня торможения КА в атмосфере. При этом интервал времени, на котором корреляция превышает значение 0.5, составляет 2-4 суток. Такое запаздывание наблюдаемого отклика атмосферы на вариации геомагнитной активности является естественным следствием усреднения торможения на мерном интервале. Вопрос об амплитудно-фазовых характеристиках системы слежения за движением спутников был подробно рассмотрен в статье [8].

Таким образом, причиной ослабления торможения КА в атмосфере в ноябре – декабре, которое привело к существенному увеличению его времени существования, является наблюдаемое снижение уровня геомагнитной активности в этот период времени.

### 3. Результаты за 15 января 2018 г.

Для 60-ти предшествующих моментов времени привязки измерений было выполнено уточнение параметров орбиты КА по массиву исходных измерений, в качестве которых использовались известные TLE [7]. Ниже представлены результаты последнего по времени уточнения (НУ 7). Здесь координаты (км) и скорости (км/сек) – в геоцентрической инерциальной системе координат (как в TLE).

21928.760042- модифицированная Юлианская дата=14 января 18<sup>h</sup> 14<sup>m</sup> 27.62<sup>s</sup>  
 5678.786760 - x  
 -3492.068733 - y  
 -0.499809 - z

2.9646605674 -  $V_x$   
 4.8376955535 -  $V_y$   
 5.2493992362 -  $V_z$   
 0.00280 -  $S_b$  (баллистический коэффициент,  $m^2/kg$ ).

На рисунке 5 представлены оценки баллистического коэффициента, значения индекса геомагнитной возмущенности ( $K_p$ ) и минимизируемого критерия для всех предшествующих моментов времени уточнения параметров орбиты после 3 января 2018 г.

Оценки баллистического коэффициента ( $S_b$ ) менялись в пределах от 0.00280 до 0.00337  $m^2/kg$ , т.е. в 1.2 раза. Такое изменение является самым маленьким из всех рассмотренных ранее определений баллистического коэффициента, что характерно для периода минимума солнечной активности. Наибольшие вариации торможения наблюдались в 10-11 января, что является следствием локального максимума индекса  $K_p$  9 января. Черной линией отмечены усредненные оценки  $S_b$  на некотором предшествующем интервале времени (скользящее среднее). На интервале времени после 3 января они уменьшились на 15%.

Значения приведенного на рисунке минимизируемого критерия имеют смысл усредненного на мерном интервале отношения остаточных невязок к расчетной среднеквадратической погрешности. Эти значения зависят от величины текущих остаточных невязок и меняются в интервале от 0.31 до 1.06. При идеальной настройке параметров алгоритма их среднее значение должно быть близко к 1. Усредненное значение критерия (0.72) оказалось существенно меньше единицы, что объясняется малым уровнем возмущений на рассмотренном интервале времени.

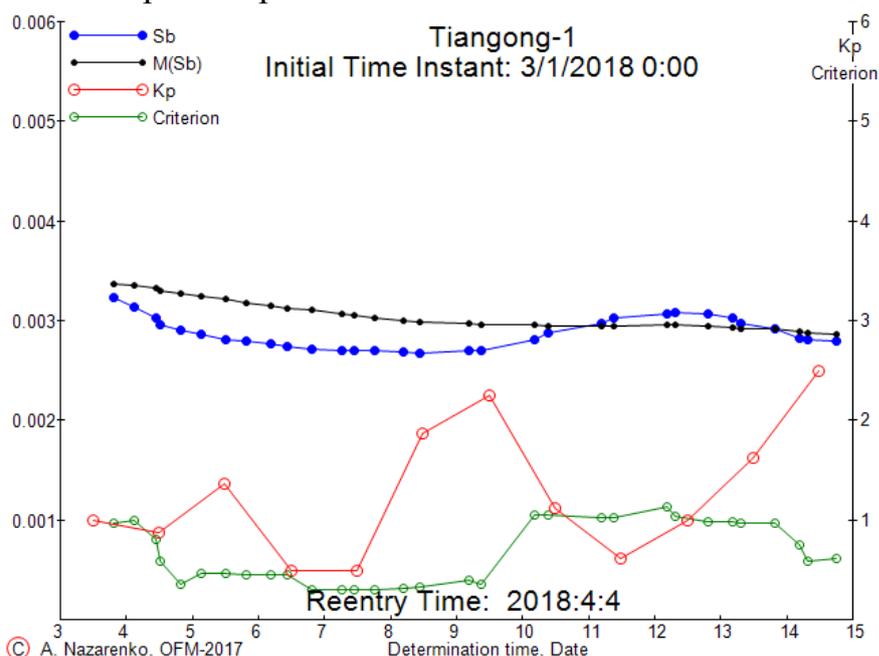


Рисунок 5. Оценки  $S_b$ , значения  $K_p$  и минимизируемого критерия

Последняя сглаженная оценка баллистического коэффициента ( $0.00287 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) использовалась в качестве постоянного значения при прогнозе движения КА до момента его входа в плотные слои атмосферы. Соответствующие результаты прогноза при упомянутых выше начальных условиях (НУ 7) представлены на рисунке 6.

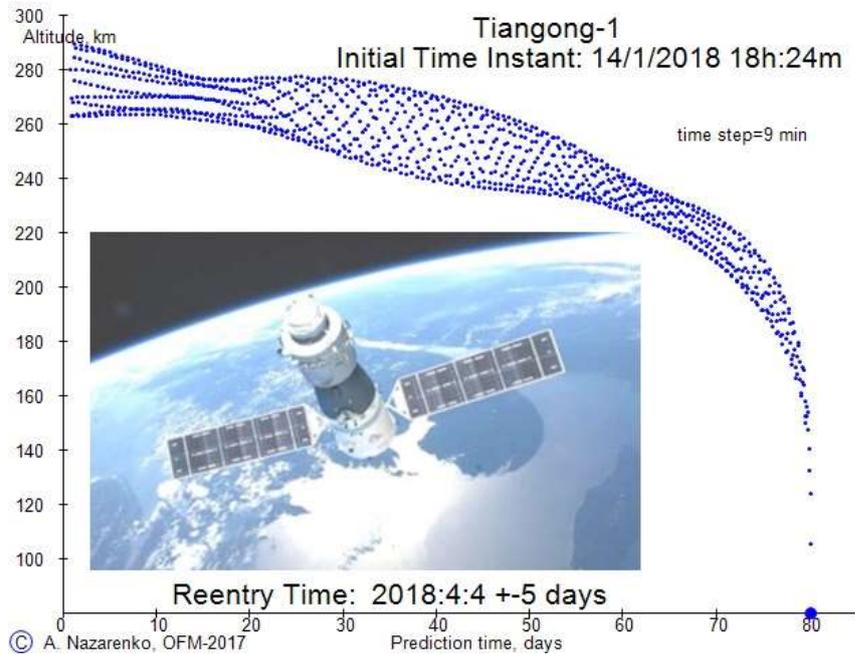


Рисунок 6. Изменение высоты на интервале прогноза

Результат прогноза.

**Ожидаемое время входа в плотные слои атмосферы 04:04:2018 г ±5 дней.**

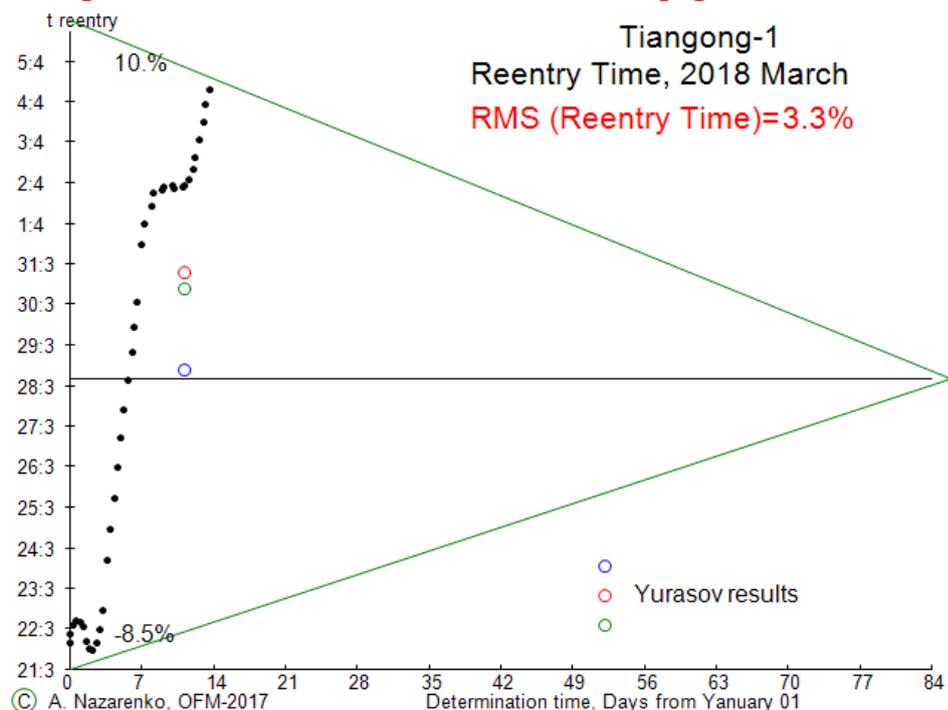


Рисунок 7. Все определения времени падения в 2018 г

На рисунке 7 представлены результаты всех 36-ти определений времени падения КА Tiangong-1, полученных на основе разработанной автором

методики после 1-го января. Среднее значение времени падения  $\approx 28$  марта. Отклонения от среднего не превышают 10.0% оставшегося времени существования. СКО погрешностей составило 3.3%, что в несколько раз меньше традиционных оценок погрешностей. Удаление времени падения согласуется с приведенным выше уменьшением средних значений  $S_b$  на 15%.

#### 4. Последние публикации других авторов

a) **Tiangong-1 is predicted to reenter in mid-late March 2018  $\pm$  2 weeks.**

This prediction was performed by The Aerospace Corporation on 2018 January 10.

How Difficult is it to Accurately Predict a Reentry?

*Due to the uncertainties involved, it is very difficult to predict the exact timing of a space object's reentry. There are several sources of uncertainty which include: 1) significant variation in the density of the upper layers of the atmosphere, 2) significant uncertainties in the orientation of the space craft over time, uncertainties in some physical properties of the spacecraft such as the exact mass and material composition, and 3) uncertainties in the exact location and speed of the space station. When aggregated, these factors translate into a reentry timing uncertainty that is roughly 20% of the "time to go" (the time between the date of the prediction and the predicted date of reentry).*

Will objects from this reentry hit me or my property?

*It is highly unlikely that debris from this reentry will strike any person or significantly damage any property. The only known case of space debris striking a person is [Ms. Lottie Williams](#) of Tulsa, Oklahoma who was struck by a small piece of space debris in 1996 but was not harmed in any significant way. The Aerospace Corporation will perform a person and property risk calculation for the Tiangong-1 reentry a few weeks prior to the event.*

b) Данные В.С. Юрасова (частное сообщение)

Результаты обработки TLE на предшествующем недельном интервале и прогноза движения КА до момента падения:

Время начальных условий	Результат	Модель атмосферы		
		ГОСТ 1984	NRLMSIS	ГОСТ 2004
9 ноября 2017	t reentry	10 марта 02ч	9 марта 06ч	7 марта 00ч
	$S_b, m^2/kg$	0.00384	0.00386	0.00368
1 декабря 2017	t reentry	12 марта 03ч	9 марта 18ч	11 марта 22ч
	$S_b, m^2/kg$	0.00361	0.00389	0.00360
9 декабря 2017	t reentry	14 марта 00ч	16 марта 12ч	18 марта 06ч
	$S_b, m^2/kg$	0.00367	0.00373	0.00347
19 декабря 2017	t reentry	19 марта 14ч	21 марта 03ч	17 марта 14ч
	$S_b, m^2/kg$	0.00349	0.00361	0.00359
28 декабря 2017	t reentry	19 марта 20ч	20 марта 18ч	20 марта 15ч
	$S_b, m^2/kg$	0.00347	0.00369	0.00346
12 января 2018	t reentry	28 марта 10ч	30 марта 22ч	30 марта 10ч
	$S_b, m^2/kg$	0.00331	0.00341	0.00325

c) ESOC, Space Debris Office, 12 January 2018

## → TIANGONG-1 REENTRY UPDATES

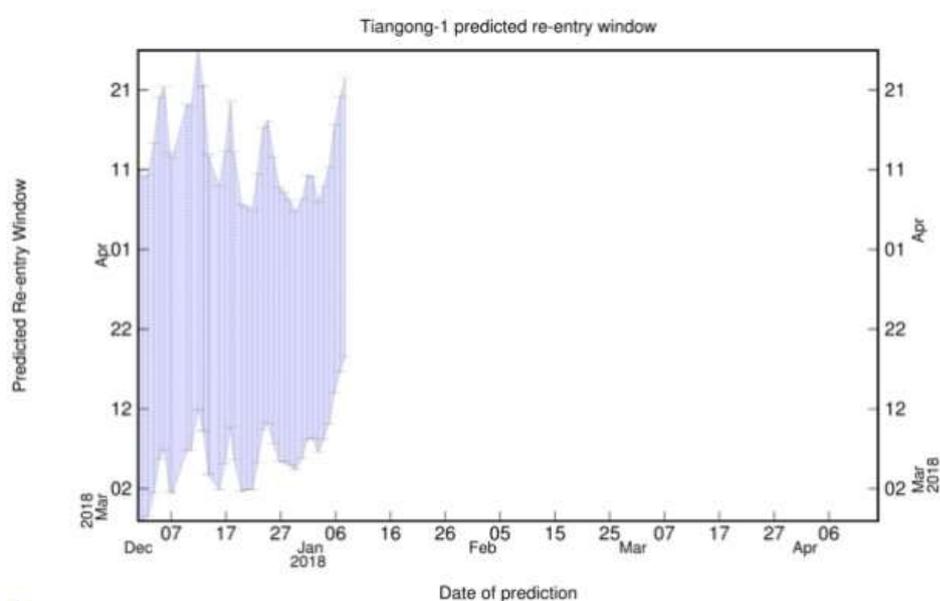
Latest reentry time window forecast provided by the [Space Debris Office](#) at ESA's [ESOC mission control centre](#), Darmstadt, Germany.

Note: [Read our updated FAQ](#)

Update 12 January 2018

The current estimated window is ~17 March to ~21 April; this is highly variable.

Reentry will take place anywhere between 43°N and 43°S (e.g. Spain, France, Portugal, Greece, etc.). Areas outside of these latitudes can be excluded. At no time will a precise time/location prediction from ESA be possible.



## Литература

1. А.И. Назаренко. Определение времени падения КА “Tiangong-1”, 1 ноября 2017
2. А.И. Назаренко. Определение времени падения КА “Tiangong-1”, 15 ноября 2017
3. А.И. Назаренко. Определение времени падения КА “Tiangong-1”, 1 декабря 2017
4. А.И. Назаренко. Определение времени падения КА “Tiangong-1”, 10 декабря 2017
5. А.И. Назаренко. Определение времени падения КА “Tiangong-1”, 20 декабря 2017
6. А.И. Назаренко. Определение времени падения КА “Tiangong-1”, 30 декабря 2017
7. <http://www.space-track.org>
8. В. А. Братчиков, А. И. Назаренко, Исследование чувствительности системы слежения за движением искусственного спутника Земли, Автомат. и телемех., 1991, выпуск 5, 80–86