

С. Д. Варламов

Полёт и падение спутника Земли

В статье выясняются причины того, почему орбиты низко летающих спутников постепенно снижаются и те, в конце концов, падают. На примере международной космической станции рассматривается влияние различных факторов на её движение

Несколько замечаний

Над нашими головами всё время летает множество искусственных космических тел – спутники связи, спутники-«шпионы», метеорологические спутники, спутники с космическими туристами ... Полёты этих аппаратов проходят на таких высотах, где из-за разреженности атмосферы силы трения мало влияют на их движение, и они успевают совершить огромное число оборотов вокруг Земли прежде, чем упадут.

Спутники Земли обычно относят к трём разным группам, отличающимся высотой полёта. Высоко летающие спутники (первая группа) – это аппараты, среднее расстояние от которых до поверхности Земли, превышает 3-5 радиусов Земли. К этой группе, в частности, относятся так называемые геостационарные спутники. Спутники, летающие на средних высотах (вторая группа) находятся на расстояниях от Земли от 1000км до 3-5 радиусов Земли. Самая многочисленная группа спутников – это низко летающие спутники со средней высотой полёта меньше 1000 км над поверхностью Земли.

Низко летающие спутники, если их периодически не «приподнимать», со временем сходят на всё более близкие к Земле орбиты, и, испытывая на последнем этапе своего движения действие больших сил торможения атмосферой, падают.

Связь сил трения и скорости снижения спутника

Решим задачу о скорости снижения спутника массы M , на который в течении времени ΔT действует постоянная сила $F \ll Mg$, направленная против скорости его движения V . Высота полёта над поверхностью Земли $H \ll R_3$. Предполагается, что уменьшение высоты Δh значительно меньше самой высоты полёта H над поверхностью Земли.

Решение: Скорость полёта спутника находится из условия:

$$\frac{MV^2}{R_3 + H} = \frac{GMm_3}{(R_3 + H)^2} \quad V = \sqrt{\frac{Gm_3}{(R_3 + H)}} \approx 8 \text{ км/с} \quad (1)$$

Суммарная энергия спутника, движущегося по почти круговой орбите радиуса $R_3 + H$ равна:

$$U_{\text{потенц}} + E_{\text{кинетич}} = -\frac{GMm_3}{R_3 + H} + \frac{MV^2}{2} = -\frac{GMm_3}{2(R_3 + H)} \quad (2)$$

Сила трения уменьшает эту энергию, при этом высота полёта уменьшается.

$$-\frac{GMm_3}{2(R_3 + H + \Delta h)} - \left(-\frac{GMm_3}{2(R_3 + H)} \right) = -\Delta TVF \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta T} \approx -\frac{2FV(R_3 + H)^2}{MGm_3} = -\frac{2F\sqrt{\frac{Gm_3}{(R_3 + H)}}(R_3 + H)^2}{MGm_3} \quad (3)$$

Как видно, скорость снижения зависит и от силы трения, и от высоты полёта спутника, и от массы спутника.

Сама сила трения F в свою очередь зависит от высоты его полёта, от размеров спутника, от состава того, что находится в космосе на высоте полёта спутника.

Международная космическая станция и её параметры

Известно, что Международная космическая станция (МКС), летающая ныне на высотах 300–400 км, каждые сутки опускается примерно на 150–200 м, а во время магнитных бурь ежесуточная скорость спуска достигает 300 м. Поэтому станцию периодически «подталкивают» транспортными кораблями, пристыковывающимися к ней.



Если при этом ей сообщается дополнительная скорость $\approx 2,5$ м/с, то её орбита приподнимается в среднем на 4 км, при этом среднее значение модуля скорости движения станции относительно Земли уменьшается. Чтобы удерживать станцию примерно на одной высоте, такие «толчки» нужно проводить даже чаще, чем раз в месяц.

В настоящее время масса МКС достигла 208 тонн. Станция имеет солнечные батареи, которые обеспечивают её электрической энергией. Мощность энергоснабжения станции составляет 120 кВт. Каждый квадратный метр солнечных батарей даёт электрическую мощность порядка 100 Вт. (Это справедливо только в том случае, когда панели солнечных батарей ориентированы перпендикулярно

солнечным лучам.) Следовательно, площадь всех батарей МКС (составляющих большую часть площади всего поперечного сечения станции S) может быть оценена: $S_{\text{бат}} \approx 1200 \text{ м}^2$. На снимке МКС видно, что размеры панелей батарей и других частей станции сравнимы по величине, а также можно отметить, что не все панели батарей ориентированы одинаково. Если считать, что поперечное сечение составлено из площади батарей $\approx 66\%$ и площади сечения других блоков станции $\approx 33\%$, то площадь поперечного сечения всей МКС может быть оценена величиной порядка $S \approx 2000 \text{ м}^2$.

Почему возникает сила трения?

Торможение спутников, из-за которого происходит уменьшение высот их орбит, может быть обусловлено несколькими факторами. Во-первых, – это действие на космический аппарат остатков атмосферы, которые состоят из тех же газов, что и воздух вблизи поверхности Земли, во-вторых, – это взаимодействие с ионами кислорода, и, в-третьих, – это влияние на спутник силы Ампера, возникающей при движении проводящего аппарата в электропроводящей разреженной среде околоземного пространства.

Торможение атмосферными газами

Рассмотрим движение искусственного спутника Земли (ИСЗ) перед последним этапом его полёта, когда основную роль играет сопротивление земной атмосферы. Траектория его движения напоминает спираль с очень медленно меняющимся расстоянием от спутника до поверхности Земли (в течение одного оборота это расстояние меняется мало). Учтём известный факт: с подъёмом на каждые 15 км над поверхностью Земли плотность и давление атмосферы убывают примерно в 10 раз (плотность воздуха на уровне океана $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$). Следовательно, на высотах, значительно меньших земного радиуса, плотность атмосферного воздуха (составленного из электрически не заряженных молекул азота и кислорода) можно находить с помощью простого соотношения, в котором $A=15 \text{ км}$:

$$\rho_H = \rho_0 \cdot 10^{-\frac{H}{A}} \quad (4)$$

Скорость движения спутника во много раз больше средних скоростей теплового движения молекул атмосферы. Поэтому можно считать, что при столкновениях молекул со спутником молекулы до столкновения покоились. Если нужно грубо оценить силу сопротивления, то можно предположить, что после столкновения молекулы приобретают такую же скорость, что и спутник. В этом случае сила сопротивления F может быть оценена с помощью формулы:

$$F_H = \rho_H S v^2 = \rho_0 S v^2 10^{-\frac{H}{A}} \quad (5)$$

Здесь S – площадь поперечного сечения космического аппарата. Если соединить формулу (3) и формулу (5), то получится соотношение для скорости спуска спутника:

$$\frac{\Delta h}{\Delta T} \approx -2 \frac{\rho_0 S \sqrt{Gm_3 (R_3 + H)}}{M} \times 10^{\frac{H}{A}}. \quad (6)$$

Приняв, например, отношение $S/M=0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$ (то есть таким, как у МКС), получим, что на высоте $H = 150 \text{ км}$ скорость

уменьшения высоты его орбиты $\frac{\Delta h}{\Delta T}$, равна: $13,4 \text{ см/с}$. За один

оборот, то есть примерно за 92 минуты, спутник с такими параметрами опустится на расстояние: $740 \text{ м} \ll 150 \text{ км}$. На последнем этапе его полёта, когда движение определяется в основном степенным множителем в правой части (6), можно пренебречь изменением величины, стоящей под знаком корня. С учётом этого можно упростить уравнение (6):

$$\frac{\Delta h}{10^{\frac{H}{A}}} \approx -2\Delta T \frac{\rho_0 S \sqrt{Gm_3 R_3}}{M}$$

Получившееся дифференциальное уравнение легко интегрируется. Из этого уравнения следует, что время, оставшееся до падения спутника, находится из соотношения:

$$\frac{H}{\ln(10)} 10^{\frac{H}{A}} \approx 2T \frac{\rho_0 S \sqrt{Gm_3 R_3}}{M} \quad (7)$$

Подставив в это соотношение $S/M=0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$, и выбрав высоту 150 км , мы получим время полёта всего $T=0.5 \times 10^5 \text{ с} \approx 14 \text{ часов}$, то есть меньше суток.

Конечно, если спутник имеет автономное электропитание, например, ядерный источник энергии, то ему не нужны солнечные батареи. Для такого спутника отношение площади поперечного сечения к его массе может быть значительно меньше величины $S/M=0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$. В этом случае время существования спутника с начальной высотой полёта 150 км может быть в несколько раз больше.

Вернёмся к формуле (6). В соответствии с ней подъём на каждые 15 км уменьшает скорость спуска в 10 раз. Таким образом, на высоте $\approx 300 \text{ км}$ эта формула предсказывает скорость спуска спутника с отношением S/M таким же, как у МКС, равной всего 74 нм/оборот или около 1.2 мкм за сутки. Эта величина абсолютно не согласуется с наблюдающимся на практике темпом снижения МКС. Следовательно, на тех высотах ($H > 300 \text{ км}$), где летает МКС, столкновения спутника с нейтральными молекулами сильно разреженных атмосферных газов N_2 и O_2 не могут обеспечить наблюдающееся на практике уменьшение высоты орбиты космического аппарата с заданным отношением $S/M \approx 0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$. На высоте примерно 300 км над поверхностью Земли концентрация нейтральных атомов азота должна составить величину примерно равную:

$$n = 6 \times 10^{23} \times \frac{\rho_0}{\mu} 10^{\frac{H}{A}} = 6 \times 10^{23} \times \frac{1.2}{0.028} 10^{\frac{-300}{15}} = 2.6 \times 10^5 (\text{м}^{-3})$$

Из полученного несоответствия можно сделать вывод, что спутник на высотах порядка 300 км и более «цепляется» не за молекулы, а за что-то другое.

Атомарный кислород

По данным справочника «Физические величины» на высотах 300 – 400 км температура достигает величины 700 К ночью и 900 К днём, (а на высоте около 200 км – 400 К ночью и 600 К днём). При этом концентрация электронов в дневное время на высоте 300 км достигает в максимуме величины $n = 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Это на несколько порядков больше концентрации нейтральных молекул на этих же высотах. Значит, не они являются «поставщиками» электронов. Измерения показывают, что на высотах больших 200 км основным компонентом атмосферы является атомарный кислород. Возникает этот атомарный кислород из молекулярного кислорода под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца. Почему именно кислород, а не атомарный азот, ведь азота в атмосфере у поверхности Земли больше? Это связано с несколькими факторами. В первую очередь с тем, что энергия диссоциации молекул кислорода (500 кДж/моль \approx 5 эВ) значительно меньше, чем энергия диссоциации молекул азота (946 кДж/моль \approx 9,5 эВ).¹ Эти энергии соответствуют длинам волн солнечного света 240 нм и 125 нм. В спектре излучения Солнца плотность потока энергии вблизи 240 нм в несколько раз больше плотности потока энергии вблизи 120 нм, но не это обстоятельство является решающим. Главное, по-видимому, в том, что вероятность рекомбинации встретившихся атомов азота значительно больше вероятности рекомбинации атомов кислорода, то есть время жизни атомарного кислорода значительно больше времени жизни атомарного азота.

Образовавшийся на верхней границе молекулярной атмосферы атомарный кислород «подбрасывается» вверх тепловым движением. Для атомарного кислорода масса каждой частицы примерно вдвое меньше масс молекул азота и кислорода, поэтому скорости теплового движения этих атомов больше скоростей теплового движения молекул. Заметим, что в распределении атомов по энергиям (и по скоростям тоже) всегда есть частицы, имеющие энергии в несколько раз большие, чем средняя энергия теплового движения. Если, к примеру, энергия атома кислорода всего в три раза больше средней энергии теплового движения (²), то высота полёта может составить:

$$\Delta H = \frac{9kT}{2mg} = \frac{9RT}{2\mu g} \approx \frac{9 \times 8.31 \times 600}{2 \times 0.016 \times 10} = 1.4 \times 10^5 \text{ (м)} = 140 \text{ км}$$

Кстати, при концентрации молекул $n = 10^{13} \text{ м}^{-3}$, что соответствует высоте примерно 185 км, длина свободного пробега атомов составляет около 300 км, следовательно, можно считать, что с

¹ Сравните эти величины с удельной теплотой испарения воды (40 кДж/моль).

² Более 3% атомов имеют такую энергию.

высот >185 км атомы с указанной энергией летят в направлении «вверх» почти свободно и взлетают до высоты 325 км. И, если их там ничто не задерживает, то они падают обратно вниз. Время полёта «вверх и вниз» составляет для таких «энергичных» атомов кислорода около 5 минут, что гораздо меньше длительности дня или ночи. Из всего указанного времени полёта на высотах, больших 300 км атом в рассматриваемом случае проводит более 1 минуты, то есть весьма значительную часть времени 20%. Если в течение этого времени атом будет ионизирован солнечным излучением, то возврат его на высоты порядка 200 км будет задержан.

Аналогичным образом ведут себя и молекулы азота и кислорода, только взлетают они на вдвое меньшую высоту, так как их масса вдвое больше массы атома кислорода.

Ионизация молекул и атомов и движение ионов в магнитном поле

По данным справочника «Физические величины» на высотах более 160 км на дневной стороне атмосферы значительная часть молекул азота и кислорода, а также атомов кислорода ионизирована. Образовавшиеся на некоторой высоте ионы и электроны не могут «упасть» обратно, так как их «не пускает» вниз магнитное поле Земли. На движущийся с тепловой скоростью ион со стороны магнитного поля Земли действует сила, направленная перпендикулярно скорости иона и направлению магнитного поля. Если пренебречь гравитационным полем Земли и считать, что магнитное поле в небольшой окрестности от выбранного для наблюдений места является однородным, то траектории ионов будут представлять собой спирали, как бы «навивающиеся на линии» магнитного поля. Оценим характерные размеры спиралей, в частности радиус цилиндра, на который она «намотана», для ионов кислорода:

$$R = \frac{\sqrt{3\mu RT}}{eAB} = \frac{\sqrt{3 \times 0.016 \times 8.31 \times 800}}{1.6 \times 10^{-19} \times 6 \times 10^{23} \times 5 \times 10^{-5}} = 3.6 \text{ м}$$

При таком радиусе «навивки» можно считать, что ион кислорода просто «привязан» к силовой линии магнитного поля Земли и гравитацией действительно можно пренебречь. Если у иона имеется составляющая скорости вдоль магнитного поля, то он движется вдоль магнитного поля. Ионы, можно сказать, бегают вдоль линий магнитного поля от одного магнитного полюса Земли к другому полюсу. Таким характер движения остаётся вплоть до момента, когда положительно заряженный ион встречается с электроном и в результате рекомбинации вновь образуется нейтральный атом кислорода. Встречи ионов и электронов весьма редки, поэтому время пребывания иона на высоте значительно вырастает в сравнении со временем пребывания на такой же высоте нейтральной частицы (атома или молекулы).

В результате этого эффекта на высотах 160 – 250 км (F_1) и 250 – 400 км (F_2) в дневное время возникают слои, содержащие электроны и ионы молекул (F_1) и электроны и ионы атомов кислорода (F_2). Днём концентрация ионов и электронов в этих слоях растёт, а ночью убывает, но не до нуля. Обнаружены эти

слои, заполненные плазмой, в экспериментах по распространению радиоволн. Коротковолновое излучение в диапазоне длин волн 10 – 70 метров отражается этими слоями плазмы, причём главными «виновниками» отражения радиоволн являются электроны. Если электроны имеют кинетические энергии (после ионизации) порядка 1–2 эВ, то они тоже движутся по спиральям с характерным радиусом «навивки» около 0,1 м, и с характерными скоростями 10^6 м/с (вдоль магнитного поля). То есть, в отличие от медленно движущихся ионов электроны движутся в 100 раз быстрее спутника.

Торможение спутника ионами атомарного кислорода

В течение светлого времени суток на высоте концентрация ионов и электронов увеличивается, а в течение ночи уменьшается, так как рекомбинация ионов и электронов делает их вновь нейтральными атомами, на движение которых магнитное поле Земли не оказывает влияния.

При максимальной концентрации ионов атомарного кислорода $n = 10^{12}$ м⁻³ сила сопротивления, связанная с механическими ударами этих частиц о спутник, может быть рассчитана с помощью формулы:

$F_H = \rho_H S v^2$. В этой формуле «заложено» предположение, что площадь, с которой спутник «собирает» ионы равна геометрической площади его поперечного сечения, и то, что удары неупругие. Для спутника с параметрами МКС ($S/M = 0,01$ м²/кг) оценка скорости снижения может быть получена с помощью формулы (3):

$$\frac{\Delta h}{\Delta T} \approx -2 \frac{\rho_H S R_3 \sqrt{g R_3}}{M} \approx 2,6 \text{ мм/с} . \quad (8)$$

Если бы такая сила постоянно действовала на спутник в течение суток, то он опустился бы на 220 метров. Однако спутник пролетает то над освещённой частью поверхности Земли, то над той частью поверхности, где во время его пролёта ночь. Поэтому на него в соответствии со сделанным предположением о площади «сбора» должна действовать в среднем меньшая сила, и спутник должен снижаться с меньшей скоростью. Пусть среднее значение концентрации ионов вдвое меньше максимального значения, тогда скорость снижения МКС составит около 110 м/сутки. Эта величина заметно меньше наблюдаемой на практике скорости снижения спутника с параметрами МКС (150–200 м/сутки).

Сила Ампера

Рассмотрим теперь возможное влияние на движение спутника магнитного поля Земли. Величина магнитного поля вблизи поверхности Земли имеет порядок 5×10^{-5} Тл. В конструкциях спутника, движущегося с большой скоростью в магнитном поле, возникает ЭДС электромагнитной индукции. При внешних размерах спутника порядка $l \approx S^{0.5}$ возникает ЭДС порядка $vBl = vB\sqrt{S}$. Для МКС, например, величина ЭДС может достигать 15 В. Эта электродвижущая сила вызывает перераспределение электрических зарядов в проводящих ток элементах конструкции спутника. Вокруг спутника появляется электрическое поле, которое влияет на движение электрически заряженных частиц в окружающем пространстве. К тем частям спутника, которые имеют положительный потенциал (по отношению к средней части спутника) притягиваются электроны, а к тем частям спутника, которые имеют отрицательный потенциал, притягиваются положительно заряженные ионы. Электроны и ионы, попавшие на поверхность конструкций спутника, объединяются в нейтральные атомы кислорода, при этом электроны «путешествуют» в проводящих конструкциях спутника, создавая электрический ток.

Спутник, перемещаясь в пространстве, «собирает» из окружающего пространства электроны и ионы. Для грубой оценки величины тока, который может течь по проводящим конструкциям спутника, будем считать, что сбор происходит только с площади, равной площади поперечного сечения спутника и все ионы и электроны участвуют в создании тока. За каждую секунду о поверхность спутника (примерно равную S) ударяются около $N = SVn$ ионов. Следовательно, величина тока имеет порядок $I = SVne$. Для спутника с размерами МКС эта величина равна: 2,5 А.

При протекании тока по проводящим деталям спутника на них действует «тормозящая» сила Ампера направленная, как легко сообразить, в сторону противоположную направлению скорости спутника:

$$F \sim IlB = SVne\sqrt{SB} = Sne\sqrt{SB} \sqrt{\frac{Gm_3}{(R_3 + H)}} \quad (9)$$

Объединим формулу (9) с формулой (3):

$$\frac{\Delta h}{\Delta T} \approx - \frac{2Sne\sqrt{SB}}{M} (R_3 + H). \quad (10)$$

Заметим, что в формуле (10) скорость снижения спутника пропорциональна примерно кубу его линейных размеров (S)^{1.5}. Для МКС грубая оценка скорости снижения с помощью формулы (10) даёт величину: 48 мкм/с или 4 м/сутки. Такая оценка для скорости спуска значительно меньше скорости спуска, наблюдающейся на практике.

Может ли площадь «сбора» ионов быть больше площади поперечного сечения спутника?

Энергия теплового движения, которую имеют ионы кислорода, равна примерно 0,1 эВ. В электрическом поле, созданном зарядами,

перераспределившимися на поверхности спутника, ионы могут приобретать энергии в несколько раз большие. Например, для спутника с параметрами международной космической станции это энергии порядка $15/2$ эВ=7,5 эВ. Ионы с такими энергиями в магнитном поле Земли движутся по спиральям, максимальный радиус которых равен примерно:

$$R = \frac{\sqrt{2mvBe\sqrt{S}}}{eB} = \sqrt{\frac{2mv\sqrt{S}}{Be}} \approx 49 \text{ м} \quad (11)$$

Здесь e – это заряд иона кислорода, а m – это его масса. Поскольку линейные размеры МКС имеют такой же порядок величины, то это означает, что площадь сбора ионов $S_{\text{эфф}}$ может быть в несколько раз больше площади поперечного сечения станции S .

$$\frac{S_{\text{эфф}}}{S} = \frac{1}{S} \times \frac{\pi \left(R + \sqrt{\frac{S}{\pi}} \right)^2}{2} \approx 4$$

Для электронов радиусы спиралей увеличатся всего до 0,2–0,3 м, то есть несущественно в сравнении с размерами спутника (МКС).

Увеличение скорости «притока» положительных зарядов на спутник за счёт увеличения эффективной площади сбора ионов с лихвой компенсируется притоком электронов, которые движутся со скоростями примерно в 100 раз большими скорости спутника. То есть спутник не приобретает некомпенсированный положительный заряд.

Корректировка расчётов

Если учесть это возможное увеличение эффективной площади сбора положительных ионов, то понятно, что столкновения с ионами кислорода могут обеспечить наблюдаемую скорость снижения МКС 150–200 м/сутки: $110 \times 4 = 440$ даже с учётом того, что среднесуточная концентрация ионов меньше её максимального значения.

Сила Ампера тоже в принципе может вырасти, но её вклад ($4 \times 4 = 16$ м/сутки) всё равно составляет только около 10 % от наблюдаемой на практике скорости снижения МКС.

Таким образом, для МКС, по-видимому, самым существенным фактором, обеспечивающим уменьшение высоты полёта, является действие на станцию силы, возникающей при столкновениях станции с ионами кислорода.

Во время магнитных бурь концентрация заряженных частиц в пространстве, окружающем Землю, может во много раз увеличиваться. Это происходит вследствие того, что в спектре излучения Солнца во время магнитных бурь увеличивается доля ультрафиолетового излучения. В результате более интенсивно идёт процесс образования в верхних слоях атмосферы атомарного кислорода и вырастает скорость его поступления на те высоты, где летают спутники.

Полученные формулы №№ 6, 8, 10, 11 для оценки вкладов различных факторов в общую скорость снижения спутника на высотах 300–400 км позволяют оценить скорость снижения спутника с любыми размерами и массой.

Кстати, увидеть МКС можно в каждую безоблачную ночь. Примером служит фотография МКС на фоне Луны. Снимок взят с сайта Astronet.ru. Аппарат двигался справа налево и находился от наблюдателя на расстоянии примерно в 100 раз меньшем, чем расстояние от Земли до Луны. Под МКС виден кратер Тихо.



Предложение читателям: проанализируйте предлагаемые варианты усовершенствования конструкции МКС.

1. Представьте, что на МКС установили такой источник ЭДС (около 30В), который изменил знак тока, текущего по проводящим конструкциям станции. Тогда при той же величине тока сила Ампера не помогает спутнику снижаться, а, наоборот, уменьшает суммарную силу сопротивления на 20 %. Это же здорово: потребуется реже подталкивать станцию, чтобы поднимать её орбиту.
2. На станции установили электронную пушку, которая в непрерывном режиме «выбрасывает» в пространство электроны с током $J > 250$ А. При этом ток электронов из окружающего пространства не успевает компенсировать возникший на станции положительный заряд. В результате отталкивания положительно заряженной станции и положительно заряженных ионов перестанут происходить столкновения ионов со станцией. Это эквивалентно тому, что вязкость среды уменьшилась во много раз. В результате сила сопротивления уменьшится во много раз, что тоже позволит подталкивать станцию значительно реже, чем это делается сейчас. Успехов Вам в творчестве!