

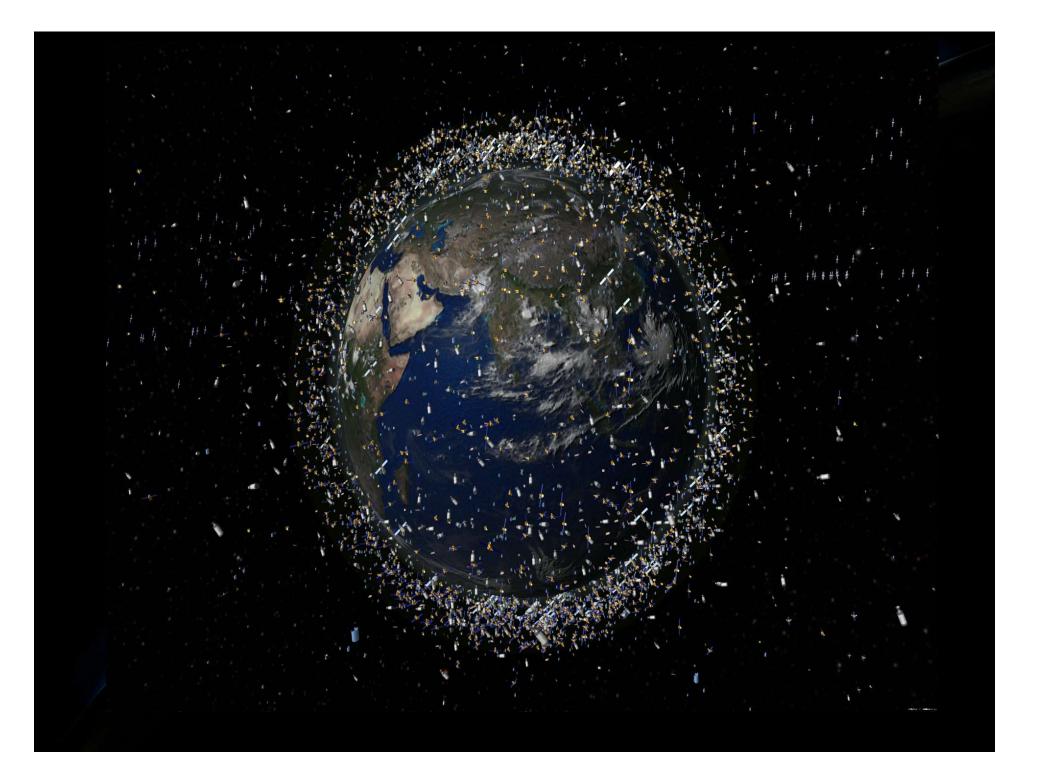




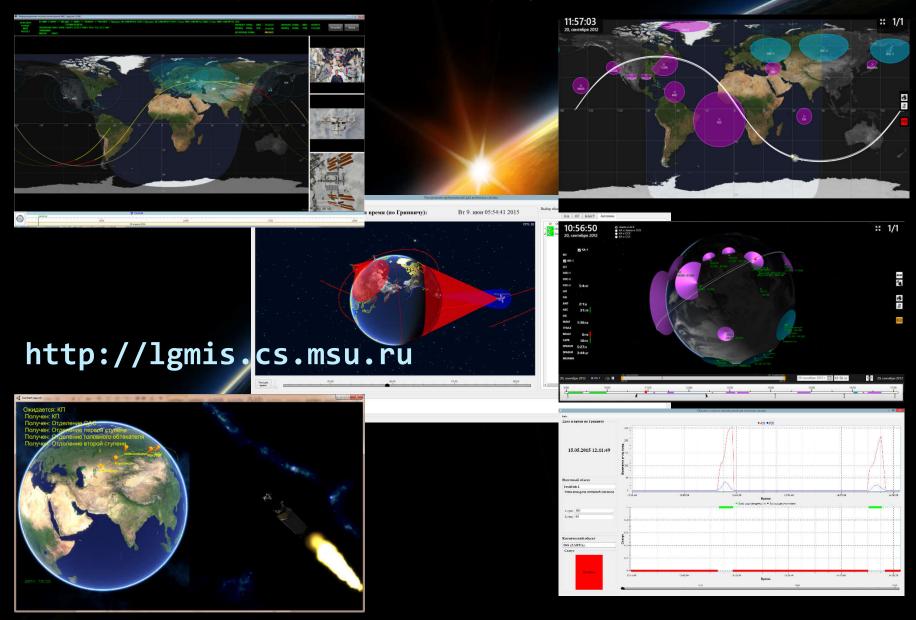
И.А.САМЫЛОВСКИЙ

ЛГМИС ВМК МГУ

ОСОБЕННОСТИ БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ



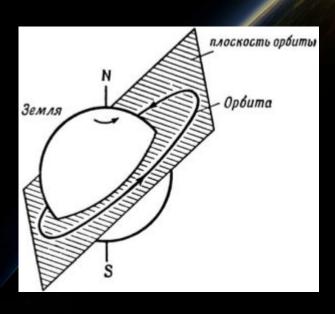
Группа геометрического моделирования и интерактивных систем факультета ВМК



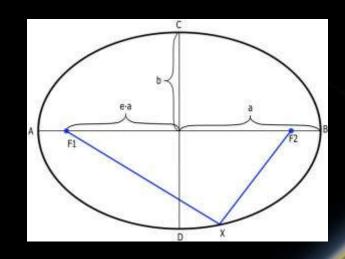
Законы Кеплера и типы орбит спутников

Из курса средней школы нам известно, что тело, движущееся по орбите вокруг другого тела, подчинено трём законам Кеплера. Нас будут интересовать только два из них - первый и третий.

Первый закон Кеплера в случае ИСЗ гласит: Тело, обращающееся вокруг Земли, движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится центр Земли



Законы Кеплера и типы орбит спутников



F1 и F2 - фокусы эллипса; "а" - большая полуось, b - малая полуось, е - эксцентриситет эллипса, который определяется следующим образом:

$$e^{-\frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a}}$$

Третий закон Кеплера в нашем случае формулируется так:

квадраты периодов обращения Т спутников относятся как кубы их больших полуосей а

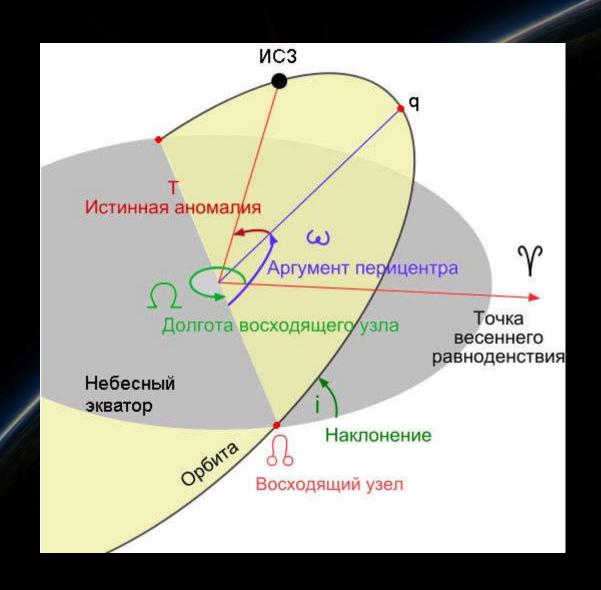
$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Элементы орбиты спутника

Для того, чтобы задать параметры и ориентацию орбиты ИСЗ в пространстве, требуется знание шести элементов орбиты:

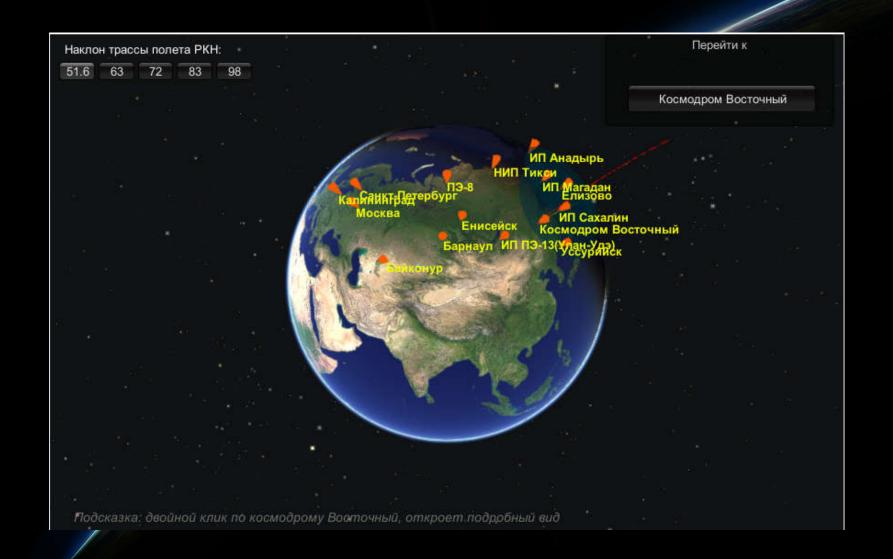
- Большая полуось "a". Равна среднему расстоянию ИСЗ от центра Земли.
- Эксцентриситет "е" (см. формулу 1) мера сплюснотости эллипса.
- Наклонение орбиты "i" к экваториальной плоскости Земли угол пересечения плоскости орбиты ИСЗ с плоскостью экватора Земли. Отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть со стороны восходящего узла орбиты. Измеряется от 0° до 180°. Если наклонение не более 90°, то движение спутника считается прямым, если более 90° то обратным.

Элементы орбиты спутника



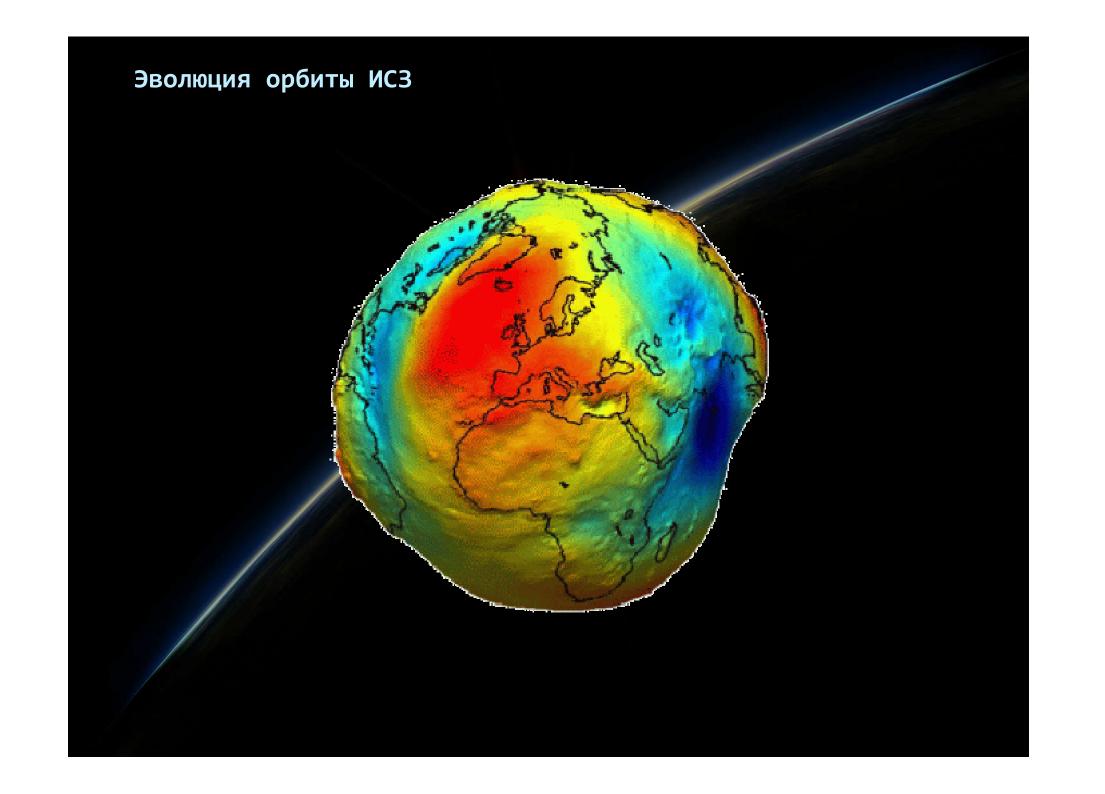
Элементы орбиты спутника

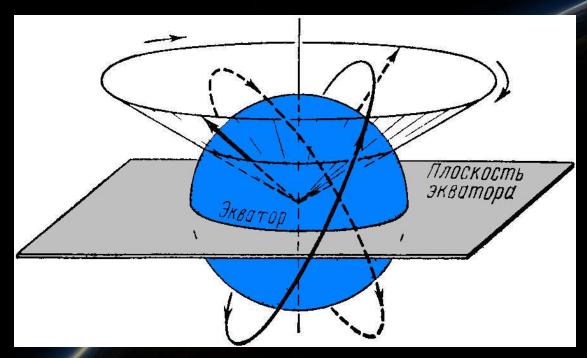
- Аргумент перигея (АП) ω угол, отсчитываемый в плоскости орбиты ИСЗ от восходящего узла орбиты до точки перигея (точка, где расстояние между ИСЗ и центром Земли наименьшее). Угол отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса мира. Линия, соединяющая восходящий и нисходящий узлы называется линией узлов.
- Долгота восходящего узла (ДВУ) Ω угол, отсчитываемый в плоскости земного экватора от восходящего узла до точки весеннего равноденствия. Угол отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса мира.
- Средняя аномалия (СА) МО угол, отсчитываемый в плоскости орбиты ИСЗ от перигея до ИСЗ на орбите. Угол отсчитывается против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса мира.



Прежде всего следует отметить следующее: если бы Земля имела форму идеального шара с равномерным распределением вещества, была лишена атмосферы, а Луна и Солнце отсутствовали бы, то ИСЗ вечно бы вращался по своей орбите, ориентация которой в пространстве не изменялась. Если бы спутник совершал 14 оборотов в сутки (при этом его период равен примерно 103 минуты), то за время одного витка ИСЗ Земля повернётся на 1/14 полного оборота (это примерно 26°). Это означает, что с каждым новым траектория ИСЗ смещалась к западу на 26° за каждый виток.

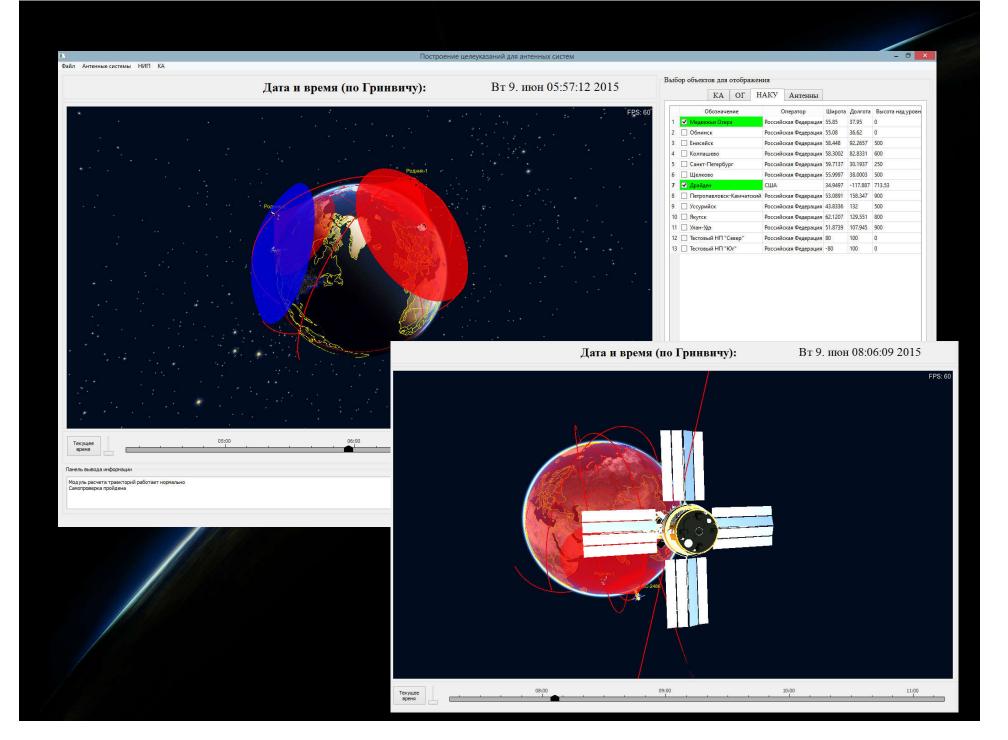
В реальности форма Земли - геоид, полярный радиус которого RП = 6356,8 км, а экваториальный - RЭ = 6378,2 км, т.е. экваториальный радиус больше полярного на 21,4 км. Земля имеет экваториальный "горб", который своей массой оказывает влияние на движение ИСЗ. Влияние это не такое уж явное - масса "горба" не вызывает изменения наклонения "i" орбиты за счёт притягивания плоскости орбиты к плоскости экватора, как можно было бы ожидать - плоскость орбиты медленно поворачивается вокруг земной оси в направлении, противоположном вращению ИСЗ

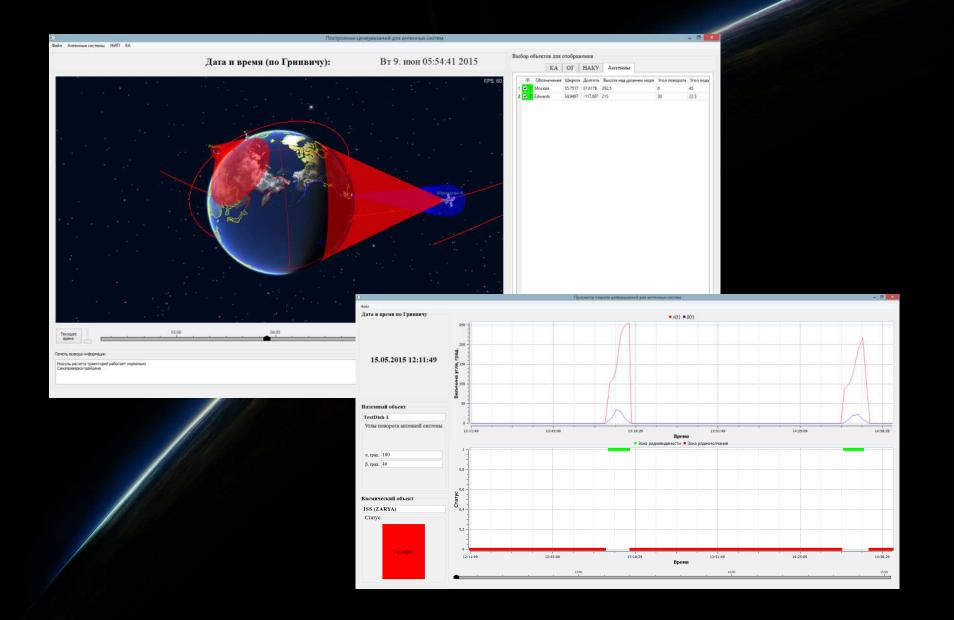




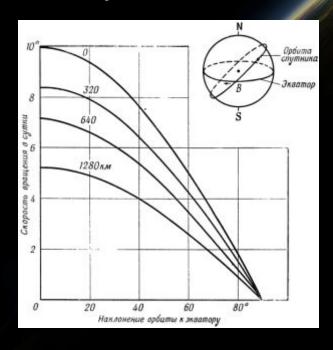
Этот процесс называется прецессией. Угол прецессии плоскости орбиты ИСЗ остаётся неизменным. Угловая скорость прецессии "X1" (градусов в сутки) определяется, в основном, наклонением орбиты:

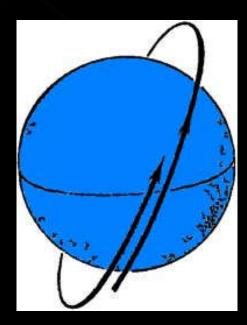
$$X_1(^{\circ}/\operatorname{cym\kappa u}) = 9.97 \cdot \left(\frac{R_{\odot}}{a}\right)^{3.5} \cdot \frac{\cos(i)}{(1-e^2)^2}$$

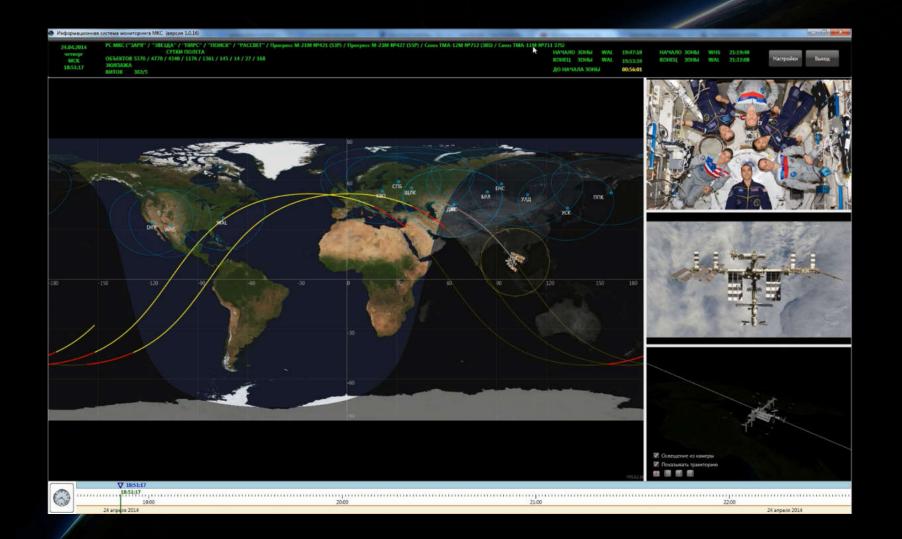




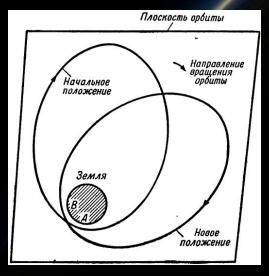
Здесь "i" - наклонение орбиты, "e" - эксцентриситет, RЭ - экваториальный радиус Земли, "a" - большая полуось орбиты ИСЗ. Если спутник движется в запада на восток, орбита поворачивается с востока на запад. Чем меньше наклонение ИСЗ, тем больше значение прецессии. Если спутник вращается с востока на запад (обратное движение ИСЗ), то прецессия орбиты происходит в обратную сторону. При этом линия узлов также поворачивается.







Следующим важным эффектом, влияющим на эволюцию орбиты ИСЗ, является поворот плоскости эллиптической орбиты. Эффект этот, как и предыдущий, обязан своим существованием экваториальному "горбу" Земли, но в отличие от прецессии, действует только на эллиптичные орбиты. Эффект заключается в том, что эллиптическая орбита постоянно поворачивается в своей плоскости вперёд для спутников с нулевым наклонением, и назад - для спутников с наклонением, близким к 90°. За счёт этого точки перигея движутся вперёд или назад по орбите.



$$X_2(^{\circ}/cym\kappa u) = 4.98 \cdot \left(\frac{R}{a}\right)^{3.5} \cdot \left(5 \cdot \cos^2 i - 1\right)$$

Прецессия орбиты и поворот её плоскости связаны с действием несферичности Земли. Но кроме этого Земля окружена атмосферой, которая прослеживается до 2000 км над её поверхностью. Из этого следует, что на движение ИСЗ, особенно на низких орбитах, влиянием атмосферы мы пренебрегать не можем. Атмосферное давление падает с высотой экспоненциально - на высоте 200 км оно составляет 10-12 мбар (на уровне моря атмосферное давление составляет 1013 мбар), а на высоте 900 км - уже только 10-42 мбар. Тем не менее, даже такая разреженная атмосфера может приводить к изменению орбиты ИСЗ.

Сила сопротивления движущемуся в атмосфере телу определяется выражением:

$$F_c = c_x \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

где "сх" - безразмерный коэффициент сопротивления, для верхней атмосферы равный 2-2,5; "S" - площадь максимального сечения спутника, перпендикулярного налетающему воздушному потоку; "v" - скорость ИСЗ, "р" - плотность атмосферы на высоте полёта ИСЗ. Торможение ИСЗ определяется его парусностью - чем больше площадь и меньше масса, тем больше торможение.



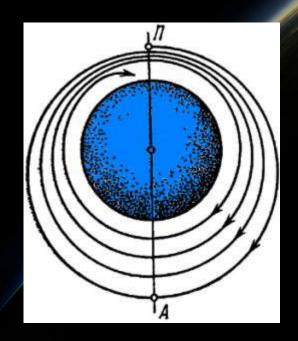


Для спутника, движущемся по круговой орбите, сопротивление атмосферы будет сказываться следующим образом: спутник будет медленно опускаться по спирали с постоянно увеличивающейся скоростью. Угол снижения спутника на круговой орбите можно оценить из выражения:

$$\alpha(^{\circ}) = \frac{360^{\circ} \cdot F_c}{\pi \cdot m \cdot g}$$

где "m" - масса ИСЗ, "g" - ускорение свободного падения. Снижение по спирали будет продолжаться до тех пор, пока спутник не опустится до высоты 160 км - ниже этой высоты сила сопротивления настолько велика, что спутник начинает резкое снижение и сгорит в атмосфере. На высоте 160 км период обращения равен примерно 88 минут - любой ИСЗ с меньшим периодом обречён.

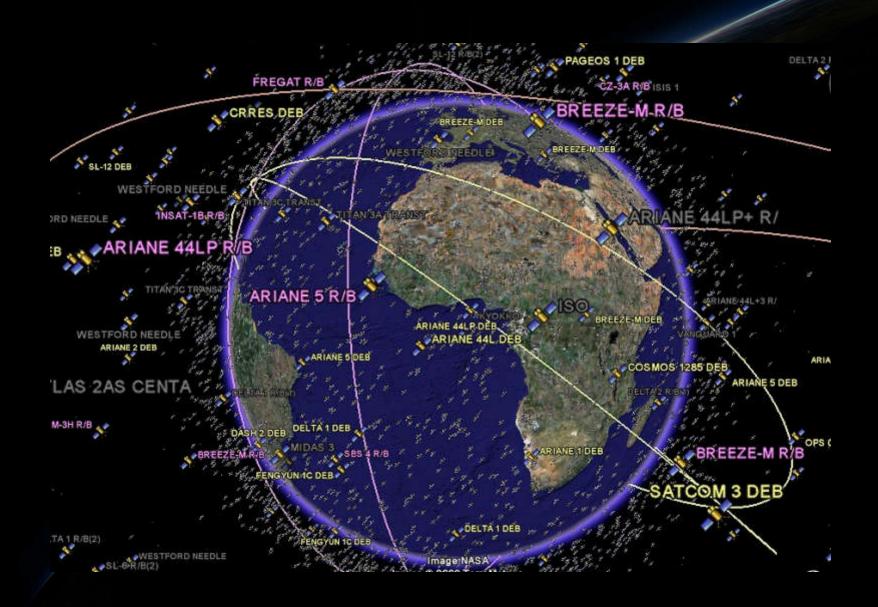
Если орбита эллиптическая, то результат действия сопротивления атмосферы будет следующим: т.к. сопротивление сильно уменьшается с высотой, то максимальное сопротивление ИСЗ будет испытывать в перигее, а минимальное - в апогее. Это слабо меняет высоту перигея, но уменьшает высоту апогея - в результате эллиптичность орбиты уменьшается и спутник начинает спуск по спирали



Оценить время жизни спутника можно из выражения:

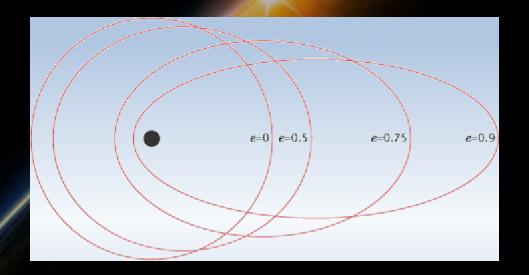
$$t_{tyle} = \frac{3}{4} \cdot \frac{e_0 \cdot T_0}{\Delta T}$$

Время существования ИСЗ массой 100 кг и диаметром 1 метр, сутки					
Высота перигея, км	Высота апогея, км				
	500	700	1000	1300	1600
200	9	18	37	58	82
230	25	52	102	165	237
260	53	116	238	370	535
300	114	260	545	890	1280
400	410	1120	2630	4450	6600



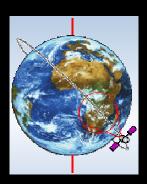
Классификация по эксцентриситету:

- Круговые
- Эллиптические

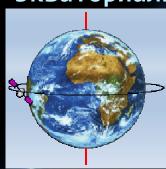


Классификация по наклонению:

• Общий случай: наклонение от 0 до 90 градусов



• Экваториальные и околоэкваториальные:



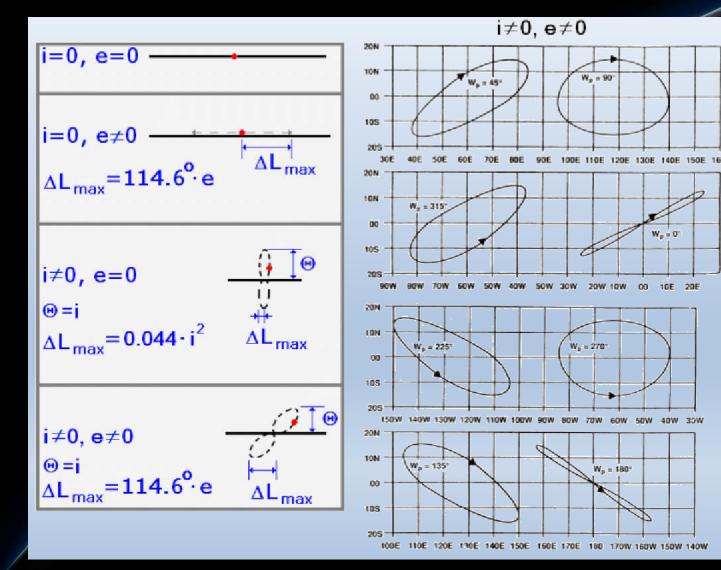
• Полярные



• Солнечно-синхронные:



Геостационарные и геосинхронные орбиты ИСЗ: Геостационарные ИСЗ (ГСС (рус.), или "GSO" - от англ. "Geosynchronous Orbit") считаются спутники, имеющие период обращение вокруг Земли, равный звёздным (сидерическим) суткам - 23ч 56м 4,09с. Если наклонение "i" орбиты нулевое, то такие орбиты называют геостационарными. Геостационарные ИСЗ летают на высоте 35786 км над поверхностью Земли. Т.к. их период обращение совпадает с периодом обращения Земли вокруг своей оси, то такие ИСЗ "висят" в небе на одном месте. Если наклонение "i" не равно нулю, то такие ИСЗ называются геосинхронными. В реальности многие геостационарные спутники имеют небольшое наклонение и подвержены возмущениям со стороны Луны и Солнца, в связи с чем они описывают на небе фигуры в виде "восьмёрок", вытянутых в направлении север-юг



 $W_0 = 180^{\circ}$

Спасибо за внимание!

PICEPAINA DUANICULAIR S