

УДК 521.35

В.И. Иванова

ГП «Конструкторское бюро «Южное» имени М.К. Янгеля», Днепро

## ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ СОЛНЦА НА ЭВОЛЮЦИЮ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННОЙ ОРБИТЫ

Исследуется влияние гравитационного поля Солнца на изменение параметров самого широкого класса низких околоземных орбит – околокруговых солнечно-синхронных (ССО). Показано, что кроме прямого влияния гравитационного поля Солнца на движение космического аппарата (КА) по ССО, имеет место опосредованное влияние через возмущение гравитационного поля Земли (приливные явления). Причем именно для ССО влияние этих факторов носит вековой характер и поэтому их учет обязателен при долгосрочном прогнозировании движения КА. Выведены аналитические соотношения для анализа и численной оценки влияния гравитационного поля Солнца на наклонение солнечно-синхронной орбиты как функции угла ориентации ее плоскости относительно Солнца.

**Ключевые слова:** солнечно-синхронная орбита, гравитационное поле Солнца, местное солнечное время восходящего узла, наклонение ССО.

### Введение

Объем запусков космических аппаратов (КА) на солнечно-синхронные орбиты (ССО) в настоящее время составляет ~60-70 % от общего числа запусков на низкие околоземные орбиты.

Основной функциональной особенностью невозмущенной ССО является постоянство ориентации ее плоскости относительно направления на Солнце – постоянство угла  $\chi$  (рис. 1), что обеспечивается соответствующим выбором наклона в зависимости от требуемой высоты орбиты КА [5].

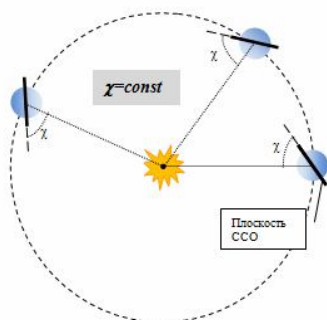


Рис. 1. К определению ССО

Для определения оптимальных начальных параметров ССО и прогнозирования их эволюции при проектировании миссий необходимы удобные для анализа соотношения влияния каждого возмущающего фактора. В теории космического полета [1],[2],[3] в полной мере разработаны модели влияния различных факторов на произвольную орбиту спутника Земли. Согласно общей теории, влияние гравитационных полей Луны и Солнца на низкие околокруговые орбиты (до 1000 км) периодически и на порядки меньше, чем от разряженной атмосферы и гравитационных аномалий Земли. Кроме того, в [3] оценено, что возмущающее ускорение от гравитационного поля Луны в среднем в 2,2 раза больше, чем ускоре-

ние от гравитационного поля Солнца. Исходя из этого, при начальном проектировании большинства миссий возмущающее влияние гравитационного поля Солнца не включается в модели движения КА. Но, как показала практика наблюдений за эволюцией параметров солнечно-синхронных орбит, такой подход является слишком грубым для формулирования и решения некоторых задач для этого класса орбит. В частности, задачи обеспечения максимальной стабильности функциональных характеристик ССО. Это и определяет актуальность исследования, основные результаты которого изложены в настоящей статье.

В статье показано, что, несмотря на малость, возмущающее влияние гравитационного поля Солнца на наклонение ССО и, соответственно, на нарушение «солнечно-синхронности», носит вековой характер, в отличие от периодического влияния гравитационного поля Луны. Откуда сделан вывод о необходимости включения модели этого влияния для любых высот ССО при оценке эволюции ССО на интервалах прогнозирования более года.

**Целью** исследования является вывод соотношений, удобных для анализа и получения качественных числовых оценок изменения параметров ССО под влиянием гравитационного поля Солнца - прямого и опосредованного.

В статье впервые выведены аналитические соотношения для учета влияния на эволюцию параметров ССО гравитационного поля Солнца как функции угла  $\chi$ . По выведенным соотношениям получены результаты, которые подтверждены наблюдениями за движением КА «Океан-О».

### Постановка задачи

Рассмотрим класс околокруговых ССО со средним радиусом  $r$  и начальными наклоном  $i_0$  в предположении пренебрежимо малого изменения среднего радиуса орбиты от действия верхней атмосферы

(что выполняется для типовых КА на типовых орбитах - высотой более 600 км). Необходимо получить соотношения для анализа и расчета векового изменения параметров ССО под действием гравитационного поля Солнца как функции угла  $\chi$  ориентации плоскости ССО относительно Солнца.

### Исследование прямого влияния гравитации Солнца на параметры солнечно-синхронной орбиты

На движение спутников Земли оказывает влияние гравитационные поля всех небесных тел, но в наибольшей степени – Луны и Солнца. Причем среднее возмущающее ускорение от гравитационного поля Луны в ~2,2 раза больше, чем Солнца, но по отношению к ССО определяющее значение имеет не величина, а направление ускорения. Так как Луна с течением времени оказывается по разные стороны от плоскости ССО, влияние ее гравитационного поля носит периодический характер, без вековой составляющей. Взаимное же положение Солнца и ССО почти не меняется, что определяет хоть и малое, но вековое возмущающее воздействие гравитации Солнца.

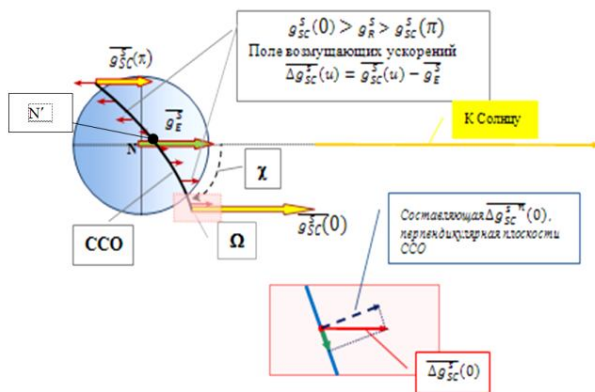


Рис. 2. Поле возмущающих орбиту ускорений от действия гравитационного поля Солнца

Рис. 2 иллюстрирует непосредственное (прямое) влияние гравитационного поля Солнца на движение КА, которое определяется разностью ускорений, сообщаемых Земле ( $\vec{g}_E^S$ ) и космическому аппарату ( $\vec{g}_{SC}^S$ ), проходящему в разных точках своей орбиты ( $u$ ) на разных расстояниях от Солнца. На рисунке схематично в проекции на плоскость земного экватора показано поле возмущающих ускорений  $\Delta \vec{g}_{SC}^S$  (маленькими стрелками) при некотором угле ориентации плоскости ССО относительно Солнца  $0^\circ < \chi < 90^\circ$ . Из построения на рисунке видно, что возмущающее ускорение максимально по величине и противоположно по направлению в окрестностях узлов ССО и близко к нулю в окрестностях максимально удаленных от узлов точек. При этом составляющая возмущающего ускорения в плоскости орбиты меняет знак на противоположный каждые полвитка, что вызывает только внутривитковые периодические изменения радиуса и эксцентриситета орбиты. А

составляющая, перпендикулярная плоскости орбиты ( $\vec{g}_{SC}^S$  на рис. 2), меняющая знак в максимально удаленных от узлов точках орбиты (при аргументе широты  $u=90^\circ$  и  $270^\circ$ ), означает наличие возмущающего момента. Таким образом, вектор среднего возмущающего момента  $\vec{M}_{cp}^S$  на каждом витке направлен из центра Земли вдоль линии, соединяющей самую северную и южную точки с аргументом широты  $u=90^\circ$  и  $270^\circ$  (на точку N на рис. 2). Учитывая малость  $\vec{M}_{cp}^S$  из теоремы об изменении кинетического момента материальной точки следует, что за виток (за период обращения КА по орбите - T) плоскость орбиты развернется на малый угол вокруг оси, перпендикулярной векторам начального кинетического  $\vec{K}$  и возмущающего  $\vec{M}_{cp}^S$  моментов, то есть вокруг линии узлов орбиты КА. Иными словами, под действием возмущающего момента наклонение ССО изменится за виток на малый угол  $\Delta i^S$ . Причем:

$$\Delta i^S = M_{cp}^S \cdot T / K \quad (1)$$

Распишем по составляющим соотношение (1).

Согласно закону всемирного тяготения ускорение, сообщаемое гравитацией Солнца Земле:

$$g_E^S = \mu_S / \rho_0^2, \quad (2)$$

где  $\mu_S$  – гравитационная постоянная Солнца,  $\rho_0$  – среднее расстояние Земля-Солнце.

Из общих соотношений для возмущающего ускорения от гравитационного поля Солнца [1], принимая во внимание, что  $i \approx 90^\circ$ , получаем ускорение, сообщаемое КА в каждой точке ССО радиуса  $r$  с аргументом широты  $u$ :

$$g_{SC}^S(u) = \mu_S / (\rho_0 - r \cdot \cos u \cdot \cos \chi)^2.$$

Учитывая, что  $r \cdot \cos u \cdot \cos \chi / \rho_0 \ll 1$ , используя соответствующее разложение в степенной ряд и удерживая члены первого малости, получим:

$$g_{SC}^S(u) = \frac{\mu_S}{\rho_0^2} \cdot \left( 1 + \frac{2r \cdot \cos u \cdot \cos \chi}{\rho_0} \right). \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует:

$$\Delta g_{SC}^S(u) = g_{SC}^S(u) - g_E^S = 2 \cdot \mu_S \cdot r \cdot \cos u \cdot \cos \chi / \rho_0^3.$$

Из построения рис. 2 возмущающий момент для любой точки на орбите с аргументом широты  $u$ :

$$M^S(u) = \Delta g_{SC}^S(u) \cdot r \cdot \sin \chi \cdot \sin i_0 = \mu_S \cdot r^2 \cdot \cos u \cdot \sin 2\chi \cdot \sin i_0 / \rho_0^3.$$

Осредненное на витке значение возмущающего момента равно:

$$M_{cp}^S = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M^S(u) du = \frac{2 \cdot \mu_S \cdot r^2 \cdot \sin 2\chi \cdot \sin i_0}{\pi \cdot \rho_0^3}.$$

Величина кинетического момента КА, движущегося по околокруговой орбите среднего радиуса  $r$ , на витке почти постоянна и равна  $K = r \cdot v = \sqrt{\mu \cdot r}$ ,

период обращения:  $T = 2\pi/\sqrt{\mu} \cdot r^{3/2}$ , где  $\mu$  – гравитационная постоянная Земли. Тогда, согласно (1), под действием возмущающего момента от гравитации Солнца за виток орбитального движения КА наклонение ССО измениться на величину:

$$\Delta i^S = 4 \cdot \mu_S \cdot r^3 \cdot \sin 2\chi \cdot \sin i_0 / (\mu \cdot \rho_0^3). \quad (4)$$

Как видно из полученного соотношения (4) знак векового изменения наклонения ССО -  $\Delta i^S$  - определяется знаком функции  $\sin 2\chi$ , иными словами, для диапазонов  $\chi \in (0^\circ; 90^\circ)$  и  $\chi \in (180^\circ; 270^\circ)$  начальное наклонение ССО будет увеличиваться от действия гравитационного поля Солнца, в остальном диапазоне – уменьшаться. Максимальное по модулю возмущение наклонения будет наблюдаться для  $\chi=45^\circ; 135^\circ; 225^\circ; 315^\circ$ , то есть для ССО с местным солнечным временем восходящего узла 9 ч; 15 ч; 21 ч и 3 ч. Для орбит высотой 600-900 км максимальное отклонение наклонения от начального значения составит 12-14 угл. мин. за 5 лет функционирования КА на ССО. При  $\chi=0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$  гравитационное поле Солнца не будет изменять положение плоскости ССО.

Изменение наклонения влияет на изменение скорости прецессии плоскости орбиты, следовательно, на нарушение солнечно-синхронности орбиты КА. Интегральный "вклад" приливных явлений выражается в отклонении местного солнечного времени восходящего узла. При максимальной эволюции наклонения уход местного солнечного времени за пять лет достигает примерно 70 минут, что в некоторых случаях существенно нарушает условия дистанционного зондирования Земли.

### Возмущение положения плоскости солнечно-синхронной орбиты за счет приливных явлений на Земле

Согласно теории приливов урвневная поверхность шарообразного небесного тела, вследствие действия гравитации другого небесного тела вытягивается в сторону последнего и превращается в эллипсоид. Тело приобретает эллипсоидальность как меридианной, так и в экваториальной плоскости, а большая ось эллипсоида располагается в окрестности направления на притягивающий возмущающий центр. При этом если большая полуось по отношению к радиусу шара увеличивается на величину  $\Delta a$ , то остальные две полуоси уменьшаются на величину  $\Delta a/2$ , а поверхность возмущенного и невозмущенного эллипсоидов пересекаются примерно на уровне широт  $54^\circ 40'$  и на таком же угловом расстоянии от большой оси эллипса в сечении, параллельном экватору (рис. 3).

Очевидно, что величина деформации урвневной поверхности Земли, а значит и возмущения ее гравитационного поля, прямо пропорциональна массе возмущающего гравитирующего тела и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него. Находясь существенно ближе к Земле, Луна вызывает более явные

приливные явления, чем Солнце, несмотря на меньшую массу. Однако, влиянием возмущения гравитационного поля Земли на движение КА по солнечно-синхронной орбите за счет притяжения Луны можно пренебречь не столько из-за его малости, сколько из-за периодичности – «вспухание» поверхности Земли будет следовать за Луной, оказываясь по разные стороны от плоскости ССО. Очевидно, что «вспухание» за счет гравитации Солнца все время будет перемещаться вместе с плоскостью ССО и, следовательно, будет направленно и постоянно возмущать ССО.

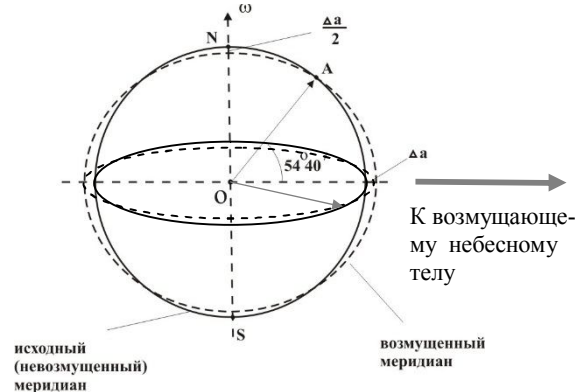


Рис. 3. Схема деформации Земли под действием гравитационного поля другого небесного тела

Таким образом, кроме непосредственного влияния гравитационное поле Солнца оказывает и опосредованное вековое влияние на движение КА по солнечно-синхронной орбите – через приливные явления на поверхности Земли. Получим приближенные аналитические соотношения для оценки величины отклоненных параметров ССО за счет этого фактора.

Примем, что Солнце находится в плоскости экватора, тогда дополнительное «вспухание» локализуется в экваториальной области. Деформациям такого рода соответствует модель гравитационного поля трехосного эллипсоида, поэтому для учета деформаций земного эллипсоида за счет солнечных приливных явлений обосновано можно использовать разложение возмущающего потенциала гравитационного поля Земли по сферическим функциям с учетом зональной и секториальной гармоник второго порядка, заменив долготу на угол  $\chi$  и вычислив соответствующие коэффициенты:

$$\Delta U_{пр} (r, \phi, \chi) = (\mu/r) \cdot (r_e/r)^2 \times \left[ \tilde{c}_{20} \cdot P_{20}(\sin \phi) + (\tilde{c}_{22} \cos 2\chi + \tilde{d}_{22} \sin 2\chi) P_{22}(\sin \phi) \right], \quad (5)$$

где  $r_e$  – экваториальный радиус Земли;  $\phi$  – геоцентрическая широта точки пространства;  $P_{20}, P_{22}$  – функции Лежандра;  $\tilde{c}_{20}, \tilde{c}_{22}, \tilde{d}_{22}$  – коэффициенты, учитывающие полярное и экваториальное сжатия земного эллипсоида.

Коэффициенты в разложении потенциала по сферическим функциям пропорциональны сжатию соответствующих эллипсов. В [3] коэффициент сжатия земного эллипсоида за счет солнечного прилив-

ного ефекта оцenen как  $6 \cdot 10^{-8}$ . Принимая во внимание, что коэффициент основного полюсного сжатия Земли  $\sim 1/300$ , а экваториального  $\sim 1/3000$ , и используя известные коэффициенты  $C_{20}$ ,  $c_{22}$ ,  $d_{22}$ [4], получаем коэффициенты для выражения (5):

$$\tilde{c}_{20} \approx 1,9 \cdot 10^{-8}; \tilde{c}_{22} \approx 1,03 \cdot 10^{-9}; \tilde{d}_{22} \approx 2,84 \cdot 10^{-10}.$$

Рассмотрим отдельно слагаемые выражения (5), содержащие зональные и секториальные гармоники.

Деформация земного эллипсоида в меридианных плоскостях, дающая возмущающий потенциал первого слагаемого выражения (5), влияет на параметры ССО аналогично основному сжатию Земного эллипсоида, т.е. вызывает периодическое внутривитковое изменение радиуса орбиты и вековое изменение долготы восходящего узла  $\Omega$  за виток [5] (схема поля возмущающих ускорений  $\Delta g_i$  возмущающего момента  $M_{pp}^{\Omega}$  - на рис. 4):

$$\Delta \Omega_{pp} = 3\pi \cdot (r_e/r)^2 \cdot \tilde{c}_{20} \cdot \cos i. \quad (6)$$

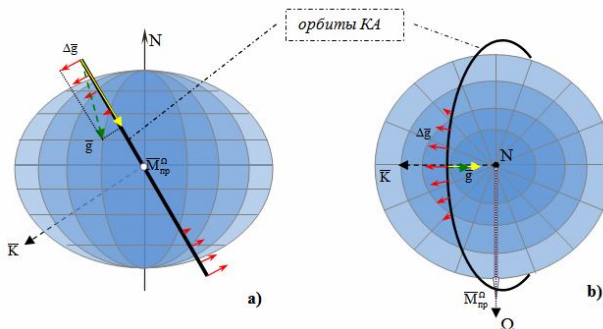


Рис. 4. Схема возмущающих орбиту КА ускорений от полюсного сжатия земного сфероида: а – в проекции на меридианную плоскость; б – в проекции на экваториальную плоскость

Таким образом, вековое изменение долготы восходящего узла не зависит от ориентации плоскости ССО относительно Солнца. В соответствии с (6) для околокруговых орбит высотой 600-900 км за 5 лет долгота сместится за счет рассматриваемого фактора не более, чем на  $0,034^\circ$ , что соответствует отклонению местного солнечного времени восходящего узла всего на  $\sim 8$  секунд. Следовательно, фактор полюсного сжатия земного сфероида за счет приливных явлений от гравитации Солнца практически не влияет на нарушение солнечно-синхронности.

Экваториальная деформация земного сфероида, определяющая возмущающий потенциал второго слагаемого выражения (5), как следует из иллюстрации на рис. 5, также приводит к периодическому изменению радиуса ССО и повороту ее плоскости за счет возмущающего момента  $M_{pp}^i$ . Средний момент на витке направлен вдоль направления, близкого к линии соединения самой северной и южной точек орбиты КА (аргумент широты  $u=90^\circ$  и  $270^\circ$ ). По теореме об изменении кинетического момента под действием момента  $M_{pp}^i$  плоскость ССО будет вращаться вокруг линии узлов, то есть будет изменяться накло-

нение. В виду того, что для ССО средний на витке возмущающий момент сохраняет квазипостоянную ориентацию, это изменение носит вековой характер.

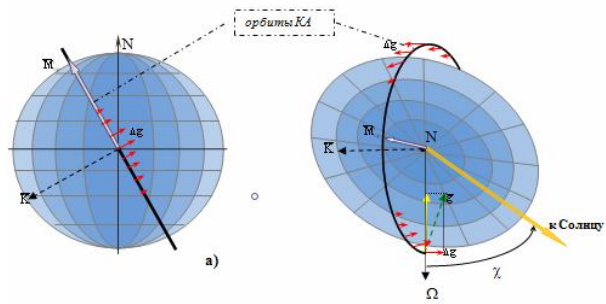


Рис. 5. Схема возмущающих орбиту КА ускорений от экваториального сжатия земного сфероида: а – в проекции на меридианную плоскость; б – в проекции на экваториальную плоскость

Для получения численных характеристик влияния на параметры ССО экваториального сжатия Земли за счет приливных явлений проанализируем выражение для возмущающего потенциала гравитационного поля Земли – второе слагаемое в (5):

$$\Delta U_{pp}^{22}(r, \phi, \chi) = (\mu/r) \cdot (r_e/r)^2 \times \times (\tilde{c}_{22} \cos 2\chi + \tilde{d}_{22} \sin 2\chi) \cdot P_{22}(\sin \phi),$$

Перпендикулярная плоскости орбиты КА составляющая возмущающего ускорения:

$$\Delta g_{pp}^w = \Delta g_m \frac{\cos i}{\cos \phi} - \Delta g_\chi \frac{\sin i \cdot \cos u}{\cos \phi},$$

где частные производные вдоль меридиана и параллели, соответственно:

$$\Delta g_m = \frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \phi}, \quad \Delta g_\chi = \frac{1}{r \cdot \cos \phi} \frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \chi}.$$

При наклонении близком  $90^\circ$  первое слагаемое в виду его малости можно отбросить, тогда:

$$\Delta g_{pp}^w = -\frac{\sin i \cdot \cos u}{r \cdot \cos^2 \phi} \cdot \frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \chi}, \quad P_{22}(\sin \phi) = 3 \cos^2 \phi,$$

следовательно, при фиксированном  $\chi$ :

$$\frac{\partial(\Delta U_{pp}^{22})}{\partial \chi} = \frac{6\mu}{r} \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \cdot (-\tilde{c}_{22} \sin 2\chi + \tilde{d}_{22} \cos 2\chi) \cdot \cos^2 \phi$$

Учитывая, что при наклонении близком  $90^\circ$  для околокруговых орбит  $u \approx \phi$ , получаем:

$$\Delta g_{pp}^w = \frac{6\mu}{r^2} \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \cdot \sin i \cdot (\tilde{c}_{22} \sin 2\chi - \tilde{d}_{22} \cos 2\chi) \cdot \cos u.$$

Следовательно, среднее на витке значение возмущающего момента:

$$M_{cp}^{pp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta g_{pp}^w(u) \cdot r \cos u \cdot du.$$

или после преобразования:

$$M_{cp}^{pp} = \frac{6\mu}{r} \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 \cdot \sin i \cdot (\tilde{c}_{22} \sin 2\chi - \tilde{d}_{22} \cos 2\chi),$$

откуда, согласно (1), под действием приливного возмущения гравитационного поля Земли от гравитации Солнца наклонение ССО измениться за виток:

$$\Delta i^{\text{пр}} = \frac{M_{\text{сп}}^{\text{пр}} \cdot T}{K} \approx \frac{37,7 \Gamma e^2}{r^2} \cdot (\tilde{c}_{22} \sin 2\chi - \tilde{d}_{22} \cos 2\chi). \quad (7)$$

В соответствии с полученным соотношением (6), к концу пятилетнего срока функционирования КА максимальное изменение наклона ССО составит ~3 угловых минут (для высоты орбиты 600 км). Отклонение местного солнечного времени восходящего узла только за счет этого фактора на пятилетнем интервале может достигать 20 минут, поэтому для задач точного прогнозирования эволюции ССО этим фактором пренебрегать нельзя.

## Выводы

1. В силу неизменной ориентации плоскости солнечно-синхронных орбит КА относительно направления Земля-Солнце гравитационное поле Солнца оказывает постоянное направленное влияние на эволюцию параметров этих орбит.

2. Влияние гравитации Солнца выражается как в прямом возмущении движения КА по ССО, так и опосредованном - через возмущение гравитационного поля Земли (приливный эффект). Причем как прямое, так и опосредованное влияние преимущественно выражается в вековом изменении наклона ССО, что на длительных временных интервалах приводит к нарушению солнечно-синхронности.

3. Полученные аналитические соотношения (5), (6), (7) представляют собой удобные для анализа и расчета зависимости векового изменения наклона и долготы восходящего узла от ориентации ССО относительно Солнца (угла  $\chi$ ).

4. С использованием соотношения (6) показано, что изменение долготы восходящего узла за счет приливных явлений пренебрежимо мало и может не

учитываться при решении задачи обеспечения максимальной стабильности ССО.

5. На основе соотношений (5) и (6) получено, что максимальное изменение наклона от прямого влияния гравитационного поля Солнца для орбит высотой 600-900 км составляет 12-14 угл. мин., Возмущение от приливных явлений примерно в 4 раза меньше, но для задач точного прогнозирования эволюции ССО необходимо учитывать оба эти фактора.

6. В дальнейшем необходимо исследовать особенности влияния на параметры ССО светового давления.

## Список литературы

1. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета ИСЗ. – М.: Наука, 1965.-540 с.
2. Vallado, D. A. *Fundamental of Astrodynamics and Applications*, vol. 2, McGraw-Hill, NewYork, 2001.
3. Сурдин В.Г. Пятая сила: - М. Библиотека «Математическое просвещение», 2002 – 40с.
4. Евтушенко Е.Г. Движение ИСЗ в гравитационном поле Земли, М. ВЦ АН СССР 1967 – 140 с.
5. Приложение теоремы об изменении кинетического момента к задаче о вековом движении плоскости солнечносинхронной орбиты/ А.Д. Шенгун, В.И. Иванова, И.В. Маштак // *Ракетная техника и вооружение*. – 2013 – №2 – С. 35-40.
6. Чернов, А.А., Чернявский, Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения [Текст]/ А.А. Чернов, Г.М. Чернявский - М.: Радио и связь, 2004. - 200 с.
7. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли, М., Физматгиз, 1963 г.
8. Митропольский Ю.А. Метод усреднения в нелинейной механике: - Киев, Наукова думка, 1971. – 440 с.
9. Пантелеев В.Л. Физика Земли и планет, курс лекций, МГУ, 2001

Надійшла до редколегії 25.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук В.Ф. Фролов, Державний університет телекомунікацій, Київ.

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ СОНЦЯ НА ЕВОЛЮЦІЮ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНО-СИНХРОННОЇ ОРБИТИ

В.І. Иванова

Досліджуються вплив гравітаційного поля Сонця на зміну параметрів самого широкого класу низьких навколосонячних орбіт – навколокругових сонячно-синхронних (ССО). Показано, що крім прямого впливу гравітаційного поля Сонця на рух космічного апарату (КА) по ССО, має місце опосередкований вплив через обурення гравітаційного поля Землі (приливні явища). Причому саме для ССО вплив цих факторів носить віковий характер і тому їх врахування обов'язкове при довгостроковому прогнозуванні руху КА. Виведено аналітичні співвідношення для аналізу і чисельної оцінки впливу гравітаційного поля Сонця на нахил сонячно-синхронної орбіти як функції кута орієнтації її площини відносно Сонця.

**Ключові слова:** сонячно-синхронна орбіта, гравітаційне поле Сонця, місцевий сонячний час висхідного вузла, нахил ССО.

## FEATURES OF THE INFLUENCE OF THE GRAVITATION FIELD OF THE SUN ON THE EVOLUTION OF SUNNY-SYNCHRON ORBIT PARAMETERS

V.I. Ivanova

The influence of the gravitational field of the Sun on the change in the parameters of the broadest class of low Earth-orbit solar-synchronous orbits (SSO) is investigated. It is shown that in addition to the direct influence of the gravitational field of the Sun on the motion of the spacecraft (SC) on the SSO, there is an indirect effect through the perturbation of the gravitational field of the Earth (tidal phenomena). Moreover, it is precisely for the SSO that the influence of these factors is of an age-old nature and therefore their account is obligatory for long-term forecasting of the movement of the spacecraft. The analytical relations for analyzing and numerical estimation of the influence of the gravitational field of the Sun on the inclination of the solar-synchronous orbit as a function of the angle of orientation of its plane relative to the Sun are derived.

**Keywords:** solar-synchronous orbit, gravitational field of the sun, local solar time of the ascending node, inclination of the SSO.