

УДК 521.1

В. П. Епишев, В. У. Климик, В. И. Кудак

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

ВОЗМУЩЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОТРАЖЁННОГО СОЛНЕЧНОГО И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ

Досліджуються періодичні та вікові зміни елементів орбіт геосинхронних супутників під дією відбитого Землею сонячного світла та ІЧ-випромінювання Землі. Визначено максимальні амплітуди періодичних змін і максимальні швидкості вікових змін. Аналіз проведено на основі обчислень, виконаних для 16 супутників, вибраних з російського каталогу.

Для вычисления изменения элементов орбит геосинхронных спутников (ГС) под действием отражённого земной поверхностью солнечного излучения или ИК-излучения Земли мы использовали формулу расчёта вектора ускорения объекта вследствие давления на него солнечного излучения из [2, 4]:

$$\mathbf{a} = -\gamma_1 C_R \frac{S}{m} P_0 \frac{r_c^2}{|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_{sp}|^2} \cdot \frac{\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_{sp}}{|\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_{sp}|} + \frac{S}{m} P_0 \frac{R^2}{r_{sp}^2} \cdot (\alpha + \beta \cdot \gamma_2) \cdot \left(\frac{\mathbf{r}_{sp}}{r_{sp}} \right),$$

давление света $P_0 = 0.00000465 \text{ Н/м}^2$. Так как в данном случае прямое солнечное излучение исключается, теневая функция γ_1 равна нулю. Второе слагаемое содержит величину α , определяющую поток ИК-излучения от Земли, и альбедо земной поверхности β . В рассматриваемой модели принимается $\alpha = 0.25 \cdot \cos^2 \varphi$, $\beta = 0.45 \cdot \sin(5/9\pi - \psi)$, где $\varphi = \arcsin(z_{sp}/r_{sp})$ — широта подспутниковой точки, $\psi = \arccos\{(x_c x + y_c y + z_c z)/(r_c r_{sp})\}$ — угол между направлением на Солнце и на спутник от Земли. Наблюдения показывают, что ошибка модели незначительна.

При вычислении ускорения от отражённого Землёй света принимаем $\alpha = 0$, а при вычислении ускорения от ИК-излучения Земли $\beta = 0$.

Вычисления в обоих случаях проводились на интервале нескольких суток и лет с шагом 0.001 сут для 16 объектов, выбранных из российского каталога ГС [6] таким образом, чтобы значения отношения эффективной площади к массе S/m по возможности равномерно охватывали всю область значений S/m каталожных объектов. Векторы ускорения использовались в уравнениях Лагранжа в форме Гаусса [1] для вычисления производных от элементов орбит. Изменение элементов орбит на данном часовом интервале определяли численным интегрированием.

Вид кривых изменения элементов орбит от прямого солнечного излучения [2, 5] не изменится, если исключить влияние излучения от Земли, т. е. положить $\alpha = 0$ и $\beta = 0$. В большинстве случаев им можно пренебречь. Но актуальными остаются две задачи: определение ошибок вычисления элементов орбит, обусловленных излучением от Земли (эта задача решается вычислением амплитуды долгопериодических изменений от земного излучения) и исследование возможности вековых возмущений в результате такого излучения.

ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ ОТ ОТРАЖЁННОГО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Изменения *большой полуоси* на небольших интервалах времени имеют периодическую негар-

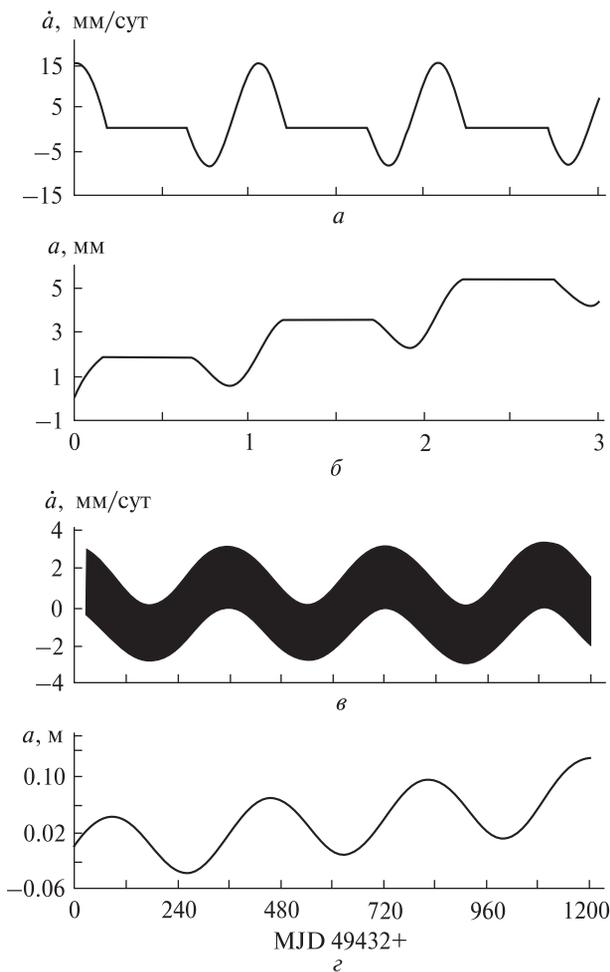


Рис. 1. Изменение производной \dot{a} (а) и большой полуоси a (б) ГС 84023А под воздействием на него отражённого Землёй солнечного света на интервале 3 сут; в, з — то же для ГС 89004F на интервале 3.3 года

моническую составляющую с периодом 1 сут. Негармоничность обусловлена прерывностью действия на ГС отражённого Землёй излучения. Кривые изменения полуоси a и её производной на рис. 1, а, б приведены для ГС 84023А, который в каталоге [6] имеет максимальное значение отношения S/m . Но и для такого спутника с большой парусностью амплитуда краткопериодических изменений a не превышает 2 мм.

Линейная составляющая изменения полуоси a (рис. 1, б) является отрезком кривой долгопериодических изменений a , которая имеет гармоническую составляющую с периодом 1 год

(рис. 1, з). Амплитуда A долгопериодических изменений небольшая, но у ГС с большим S/m она может достигать 0.4 м. Иногда A изменяется с периодом около 10 лет. Есть также линейная составляющая $a = kt + b$, что видно на рис. 1, з. Она определялась как линия регрессии для каждого из 16 ГО по вычисленным значениям a на интервале около 15 лет с шагом 0.001 сут. Линия регрессии проходит через начало координат ($b = 0$). Коэффициент k (м/сут), определяющий среднюю скорость изменения полуоси, всегда положительный и пропорциональный S/m ($\text{м}^2/\text{кг}$): $k = 0.0139 \cdot S/m$. Коэффициент корреляции $\rho = 0.993$.

При интегрировании уравнений Лагранжа использовали нулевые начальные условия. Поэтому a означает не большую полуось, а её изменение относительно начальной даты MJD 49432.

Для каталожных ГС ($0.0016 < S/m < 0.0370 \text{ м}^2/\text{кг}$) увеличение большой полуоси за 100 лет находится в пределах от 0.8 до 18.8 м. Это в три раза меньше уменьшения за 100 лет большой полуоси в результате прохождения ГО через тень Земли [3].

Средние квадратичные отклонения σ значений a от линий регрессии не превышают 0.15 м. Расчеты показывают, что амплитуду долгопериодических изменений можно оценить величиной $A = 1.5\sigma$, т. е. она в большинстве случаев не превышает 0.23 м.

Изменение производной большой полуоси на больших интервалах времени на графике (рис. 1, в) представляется синусоидальной полосой в результате слияний отдельных суточных колебаний (рис 1, а) в сплошную область. Амплитуда долгопериодических колебаний производной не сильно отличается от амплитуд суточных колебаний производной. Но суточные колебания полуоси очень слабые по сравнению с амплитудой долгопериодических изменений a . На рис. 1, з они не заметны.

Вид кривых изменения эксцентриситета, аргумента перигея и средней аномалии, а также их производных под воздействием отражённого Землёй излучения такой же, как соответствующие кривые для большой полуоси (рис. 1, б). Наклон орбиты и долгота восходящего узла практически не изменяются при воздействии на ГС

отражённого света или собственного ИК-излучения Земли. Их изменения на интервале нескольких суток определяются величинами порядка 10^{-20} (рис. 2). А за 100 лет наклон орбиты (например ГС 74017F) увеличится на $0.3 \cdot 10^{-16}$ град. Исследования таких малых изменений не представляют практического интереса.

Амплитуда долгопериодических изменений *эксцентриситета* (её период один год) не превышает $0.76 \cdot 10^{-6}$. Она пропорциональна отношению S/m : $A = (21.98 \cdot S/m - 0.0056) \cdot 10^{-6}$. Коэффициент корреляции $\rho = 0.991$.

Для определения линейной составляющей $e = kt + b$ изменения эксцентриситета использовали значения e на интервале около 15 лет. По вычислениям для 16 ГО скорость изменения эксцентриситета под воздействием отражённого Землёй излучения за сутки равна $k = (-0.000022 \pm \pm 0.000151) \cdot 10^{-6}$. За 100 лет значение e изменится на $\Delta e_{\text{в}} = (-0.8 \pm 5.5) \cdot 10^{-6}$. Эксцентриситет может увеличиться или уменьшиться. Вековыми изменениями в данном случае можно пренебречь.

Изменение *аргумента перигея* имеет годовую гармонику и слабо выраженную линейную составляющую. Амплитуда долгопериодических колебаний $A = 0.031 \pm 0.030^\circ$. С параметром S/m и эксцентриситетом она коррелирует слабо.

Линейные составляющие $\omega = kt + b$ определялись на интервале 15 лет. Для отдельных ГС этот интервал укорачивался, чтобы исключить области, где $e = 0$. По данным 16 ГС средняя скорость изменения аргумента перигея составляет $1.7 \pm \pm 6.2$ мкград/сут. За 100 лет ω изменится на $\Delta\omega = 0.06 \pm 0.22^\circ$. Можно считать, что и в этом случае вековых изменений нет.

Долгопериодические (период 1 год) изменения *средней аномалии* от отражённого Землёй солнечного излучения имеют сравнительно большую амплитуду. По результатам вычислений для 15 ГС средняя на 10-летнем интервале амплитуда $A = 0.047^\circ$. Но у ГС с малым эксцентриситетом она может достигать 0.24° .

С использованием того же массива значений M и метода наименьших квадратов вычислялся линейный тренд. Средняя скорость изменения аргумента перигея оказалась равной $1.01 \pm \pm 6.17$ мкград. Следовательно, за 100 лет M мо-

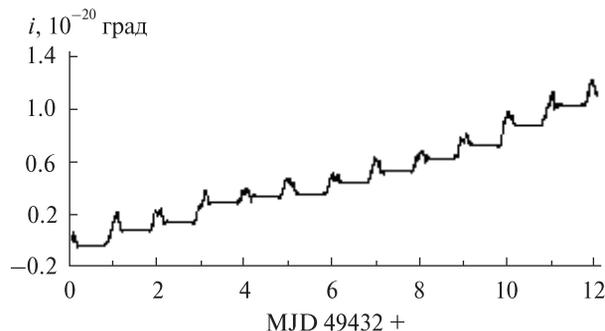


Рис. 2. Изменение наклона орбиты ГС 74017F под воздействием на него отражённого Землёй солнечного света на интервале 12 сут

жет измениться на $\Delta M = 0.037 \pm 0.225^\circ$ — величина такого же порядка, как и $\Delta\omega$.

ВЛИЯНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ НА ДВИЖЕНИЕ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ

Под действием ИК-излучения Земли изменение производной *большой полуоси* представляет собой гармоническое колебание с периодом 1 сут, а сама полуось является суммой двух составляющих: гармонической с периодом 1 сут и линейной (рис. 3, а). Эта линейная составляющая представляет собой вековые изменения, так как долгопериодических изменений не обнаружено (рис. 3, б). Линейная составляющая ($a = kt + b$) вычислялась для 16 ГС на интервале 15 лет. Коэффициент корреляции очень высокий: $\rho = 0.999994 \pm 0.000015$. Свободный член $b \approx 0$. Средняя скорость k изменения полуоси для 16 ГС пропорциональна парусности S/m : $k_i = 0.0189 \cdot S/m$ (коэффициент корреляции $\rho = 0.99989$). Вековые изменения полуоси от ИК-излучения Земли относительно большие: за 100 лет большая полуось у разных ГС увеличивается на 1.1—25.6 м.

Среднее квадратичное отклонение σ значений полуоси от линии регрессии обусловлено в основном краткопериодическими изменениями a . Оно очень малое: $\sigma = 0.7 \pm 0.4$ мм. Амплитуда периодических изменений не превышает 1.7 мм.

Изменение *эксцентриситета* ГС от ИК-излучения Земли имеет только суточную гармонику с очень малой амплитудой, которая с высоким

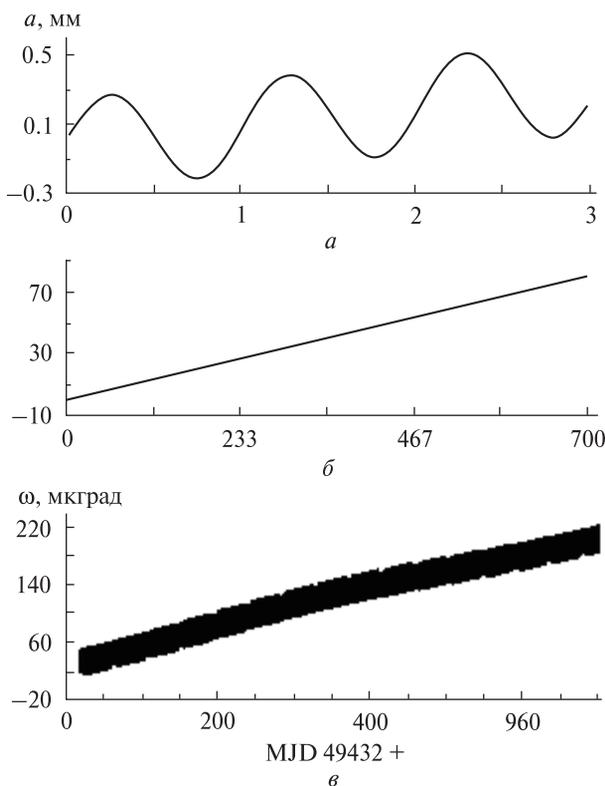


Рис. 3. Изменения под воздействием ИК-излучения Земли для ГС 89004F: *a*, *б* — большой оси *a* на интервале 3 сут и 2 лет, *в* — аргумента перигея ω на интервале 2 лет

значением коэффициента корреляции ($\rho = 0.994$) линейно зависит от S/m : $A = (0.115S/m) \cdot 10^{-6}$. Амплитуда суточных колебаний равна $(0.18 - 4.3) \cdot 10^{-9}$.

Можно полагать, что эксцентриситет e ГС под воздействием ИК-излучения Земли не имеет вековых изменений. Значения e вычислялись на интервале 15 лет. Определены линии регрессии изменения e от времени для 16 спутников. Средняя скорость изменения эксцентриситета за сутки составила $(-10 \pm 29) \cdot 10^{-14}$. За 100 лет e изменится на $\Delta e_i = (-0.004 \pm 0.011) \cdot 10^{-6}$. Он может увеличиться или уменьшиться.

Изменение аргумента перигея ГС от ИК-излучения Земли имеет только суточную гармонику с относительно большой амплитудой. На рис. 3, *в* суточные колебания сливаются в сплошную полосу. Определялись изменения ω 16 ГС на интервале 15 лет за исключением тех областей, где

$e < 0.0001$. Амплитуда A суточных изменений ω зависит от e : при изменении e от 0.02 до 0.0001 амплитуда увеличивается от 0.2 до 230 мкград. Среднее значение амплитуды суточных изменений $A = 81$ мкград.

Линии регрессии изменения аргумента перигея от ИК-излучения Земли вычислялись для всех 16 ГС. Средняя скорость изменения ω всегда положительная и равна 0.485 ± 0.461 мкград/сут. За 100 лет ω увеличится на $0.029 \pm 0.017^\circ$. Эта скорость сильно коррелирует с параметром S/m .

Кривая изменения средней аномалии M от инфракрасного излучения Земли является суммой гармоники с периодом 1 сутки и линейной составляющей. На больших интервалах времени она изменяется аналогично ω (рис. 5), но линейная составляющая убывает. Амплитуда A суточных изменений M сильно зависит от эксцентриситета. По вычислениям для 16 ГС среднее значение амплитуды $A_{cp} = 0.00045^\circ$, но при малых значениях эксцентриситета ($e = 0.000063$) она может составлять 0.003° .

Средняя скорость линейного изменения M для каждого ГС определялась на интервале 15 лет. Она с высоким коэффициентом корреляции ($\rho = -0.9994$) зависит от параметра S/m . По данным 16 ГС она равна -2.35 ± 1.37 мкград/сут. За 100 лет M уменьшится на $0.086 \pm 0.050^\circ$.

ВЫВОДЫ

Под воздействием отражённого Землёй солнечного излучения вековые изменения происходят только у большой полуоси, увеличение на несколько метров за 100 лет. Периоддолгопериодических изменений элементов орбит a , e , ω , M ГС равен одному году, амплитуды могут выходить за пределы точности элементов орбит, приведённых в каталогах ГС. Краткопериодическими изменениями можно пренебречь.

Долгота восходящего узла и наклон орбиты практически не изменяются под воздействием отражённого и ИК-излучения Земли.

ИК-излучение Земли приводит к вековым изменениям в a и e (увеличение), а также в M (уменьшение). Долгопериодических изменений нет. Амплитуда суточных колебаний в большинстве случаев относительно небольшая.

1. Арнольд Курт. Методы спутниковой геодезии. — М.: Недра, 1973. — 224 с.
2. Єпішев В. П., Клімик В. У., Кудак В. И. Возмущение геосинхронных спутников под действием давления солнечного излучения // *Околоземная астрономия-2009*. — М., 2009. — С. 42—48.
3. Єпішев В. П., Клімик В. У., Мотрунич І. І. Зміни в русі геосинхронних об'єктів внаслідок впливу на них випромінювання від землі та їх проходження через тінь землі // *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. фіз.* — 2010. — Вип. 28. — С. 157—164.
4. Клімик В. У., Єпішев В. П., Мотрунич І. І. та ін. Збурення в русі геосинхронних супутників під дією сонячного випромінювання // *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Сер. фіз.* — 2008. — Вип. 23. — С. 164—171. — (http://www.nbuu.gov.ua/portal/natura/Nvuu/Fiz/2008_23/Klim.pdf).
5. Кудак В. И. Клімик В. У. Єпішев В. П. Оценка возмущений от солнечного излучения в элементах орбит геосинхронных спутников методом гармоник // *Астрофиз. бюллетень*. — 2010. — 65, № 3. — С. 317—325. — (<http://w0.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Bulletin/Vol65/N3/p317.pdf>).
6. Сочилина А. С., Кіладзе Р. И., Григорьев К. В., Вершков А. Н. Каталог орбит геостационарных спутников. — С.-Петербург: ИТА РАН, 1996. — 104 с.

Надійшла до редакції 01.10.11

V. P. Yepishev, V. U. Klimyk, V. I. Kudak

DISTURBANCES IN MOTIONS OF GEOSYNCHRONOUS SATELLITES UNDER THE EFFECT OF REFLECTED SOLAR RADIATION AND INFRARED RADIATION OF THE EARTH

We investigate periodic and secular variations of orbital elements of geosynchronous satellites under the effect of the sunlight reflected by the Earth and of infrared radiation of the Earth. The maximum amplitudes of periodic changes and maximum velocities of secular variations are determined. The investigation is performed on the basis of calculations for 16 geosynchronous satellites from the Russian catalogue.