

УДК 521.31

УЧЕТ НЕГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ДВИЖЕНИИ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ¹

Чувашов И. Н.²

ACCOUNTING FOR NON-GRAVITATIONAL EFFECTS IN THE MOTION OF NEAR-EARTH OBJECTS

Chuvashov I. N.

The influence on near-Earth objects such effects as: the Poynting-Robertson effect, the Yarkovsky effect and the effects caused by the objects input and output from the shadow of the Earth and the Moon are considered. Magnitudes of effects for the move of system GPS and GLONASS objects have been estimated.

Keywords: Earth artificial satellites, Poynting-Robertson effect, Yarkovsky effect.

В настоящее время в численном моделировании движения околоземных объектов, как функционирующих космических аппаратов, так и частиц космического мусора, существует проблема учета негравитационных эффектов, связанных с потоком излучения, приходящим от Солнца. Моделирование этих возмущений осложняется отсутствием информации о форме и вращении объектов, которую приходится извлекать из больших рядов высокоточных наблюдений. В данной работе мы покажем, как можно решать эту задачу с использованием разработанной нами ранее и реализованной на кластере Томского университета Скиф Cyberia «Численной модели движения систем ИСЗ» [1].

Кроме этого, мы рассмотрим задачу исследования орбитальной эволюции малоразмерных частиц космического мусора в зоне ГЕО под действием негравитационных эффектов, в том числе эффекта Пойнтинга—Робертсона. Эта задача интересна тем, что она проливает свет на наблюдаемое явление скопления мелких частиц ниже зоны ГЕО [2].

1. Модель светового давления для навигационных спутников

Учет влияния светового давления и связанных с ним эффектов на движение около-

земных объектов можно записать как

$$\mathbf{P} = L \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|} - L \left(\frac{\dot{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{x}}{c |\mathbf{x}|} \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|} + \frac{\mathbf{x}}{c} \right), \quad (1.1)$$

$$L = \kappa \theta \frac{a_E^2}{|\mathbf{x}|^2} \frac{\sigma}{m},$$

где c — скорость света; $\kappa = 1367 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная [3]; θ — постоянная, характеризующая отражающие свойства спутника ($\theta = 1$ соответствует зеркальному отражению); a_E — большая полуось Земли; σ и m — площадь миделева сечения, отнесенная к плоскости, перпендикулярной гелиоцентрическому вектору положения, и масса исследуемого объекта соответственно. Первая часть в (1.1) отвечает за световое давление, вторая — за эффект Пойнтинга—Робертсона [4].

Моделирование сил светового давления является сложной задачей, в особенности, это касается навигационных спутников. Для высокоточного решения навигационных задач на Земле и в околоземном пространстве необходимо с высокой точностью моделировать положения объекта, поэтому без учета светового давления и связанных с ним эффектов не обойтись. В то же время формула (1.1) не подходит для высокоточного моделирования движения, поэтому мы будем

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (11-02-00918-а).

²Чувашов Иван Николаевич, младший научный сотрудник научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета; e-mail: chuvashovin@gmail.com.

Таблица 1. Точность определения орбиты навигационных спутников систем GPS/ГЛОНАСС на освещенном участке орбиты

Модель движения	3D RMS, см	
	GPS	ГЛОНАСС
Без учета светового давления	103,66	863,35
С учетом светового давления	3,32	4,75

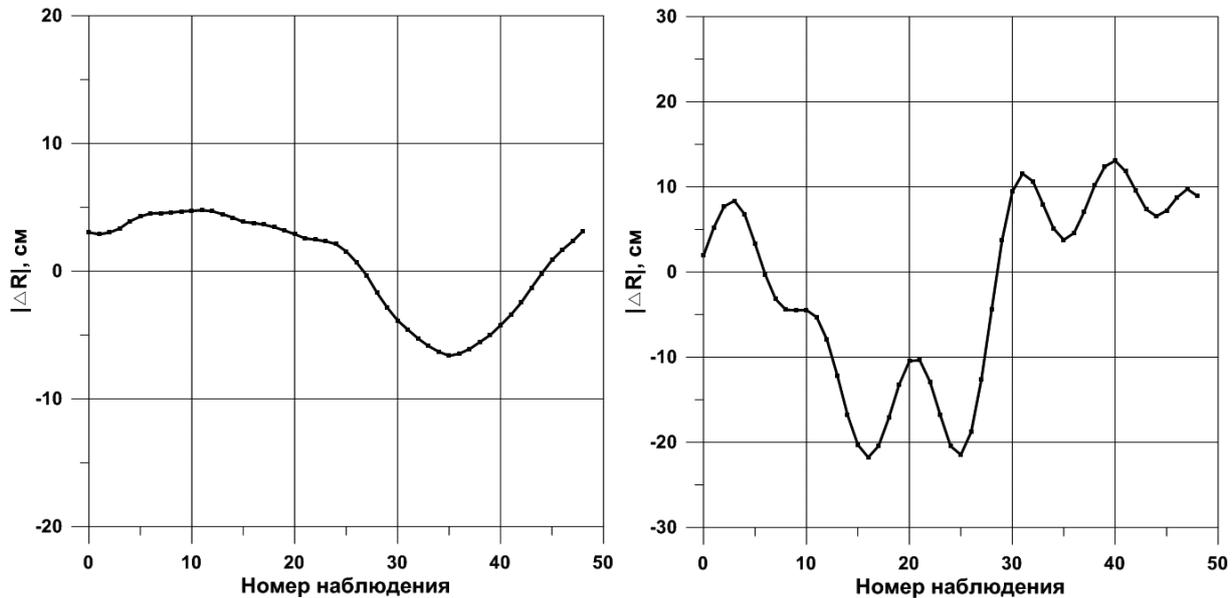


Рис. 1. Точность представления псевдонаблюдений, не участвовавших в улучшении орбит, для навигационных спутников системы GPS (а), ГЛОНАСС (б)

учитывать световое давление согласно [5]. Кроме того, для навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС будет учитываться инерционный эффект Ярковского и влияние отклонения солнечных панелей спутника от направления на Солнца при нахождении в тени Земли [5]. Что касается функции тени и особенностей ее использования, то здесь необходимо с высокой точностью определять момент входа/выхода объекта в тень Земли, находить поправки за искажения солнечного света в атмосфере и сжатие Земли [6], учитывать затмения от Луны и потемнения диска Солнца к краям при лунном затмении спутника [7].

Все выше сказанные негравитационные эффекты, связанные с навигационными спутниками, были нами внесены в численную модель движения систем ИСЗ. Псевдонаблюдения для навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС были взяты с сайта IGS [8], там же приведена точность предлагаемых эфемерид: для спутников GPS финальная

ошибка составляет 2,5 см, а для системы ГЛОНАСС — 3 см.

Для проверки численной модели, нами были получены среднеквадратические ошибки для освещенной части орбиты спутников систем GPS и ГЛОНАСС (табл. 1).

Результаты уточнения орбиты навигационных спутников на двух оборотах спутника с учетом разработанной модели светового давления показывают точность, сопоставимую с псевдонаблюдениями. Большое различие между среднеквадратическими ошибками наблюдений для спутников GPS и ГЛОНАСС объясняется тем, что световая модель изначально разрабатывалась для системы GPS, а нами эта модель была применена для спутников системы ГЛОНАСС.

Точность представления псевдонаблюдений на следующий оборот спутника с определенными параметрами светового давления представлена на рис. 1.

Точность решения на следующем обороте сохраняется на уровне 6 см — для GPS и 20 см — для ГЛОНАСС, что показывает ста-

Таблица 2. Точность определения орбиты навигационных спутников систем GPS/ГЛОНАСС пересекающих полутень/тьень Земли

3D RMS, см	
GPS	ГЛОНАСС
7,08	6,88

Таблица 3. Влияние тонких негравитационных эффектов на движение спутников систем GPS и ГЛОНАСС, пересекающих полутень/тьень Земли

Возмущающий фактор	Влияние на прогноз, см	Влияние на уточнение орбиты, см
Эффект Ярковского	8	5
Отклонение от ориентации на Солнце	16	2

бильность большинства определяемых параметров в модели светового давления.

Далее были получены среднеквадратические ошибки для объектов, пересекающие тень Земли (табл. 2). Спутники не были освещены 30 и 25 мин. соответственно. Видно, что среднеквадратическая ошибка увеличилась, но не значительно.

Так же были сделаны оценки влияния тонких эффектов, возникающих при входе (эффект Ярковского) или выходе объекта (изменение ориентации солнечных панелей) из тени Земли (табл. 3).

Все приведенные результаты позволяют, используя разработанную численную модель, в дальнейшем, детально для всех навигационных спутников изучить негравитационные эффекты и для навигационной системы ГЛОНАСС построить полную световую модель.

2. Эффект Пойнтинга—Робертсона

Исследование проводилось с помощью разработанного ранее программного комплекса для одновременного численного интегрирования систем уравнений n объектов [1]. При моделировании движения геостационарных объектов учитывались следующие возмущающие факторы: несферичность Земли до гармоник 10-го порядка и степени, приливные деформации, лунно-солнечные возмущения, эффект Пойнтинга—Робертсона и релятивистские эффекты.

В нашем исследовании мы рассматривали металлические пылевые частицы, имеющие размер от 1 нм до 10 мкм. Зная размер и принимая во внимание, что частицы имеют форму шара, мы легко определили массу

и площадь миделева сечения частицы. Нами было выбрано семь разных типов движения частиц: устойчивое движение с малой амплитудой либрации относительно точки 75° или точки 255° ; движение с большой амплитудой либрации относительно точки 75° или точки 255° ; либрационное движение относительно двух устойчивых точек 75° и 255° ; круговое движение и неустойчивое движение.

На рис. 2 показана эволюция пылевых частиц размером 1 нм в зависимости от типа движения. Так как эволюция частиц мало чем отличается друг от друга, мы увеличили график на небольшом временном интервале, чтобы показать близкие траектории движения этих частиц. Небольшие колебания связаны с периодом вращения объектов. Как видно из графика, характер движения не влияет на динамическую эволюцию движения частиц, а влияние эффекта Пойнтинга—Робертсона приводит к стремительной потере момента количества движения и падению частиц на Землю за 13 лет.

Так как поведение орбитальных характеристик для разных физических параметров объектов будет отличаться друг от друга, то время падения частиц на Землю будет увеличиваться с увеличением массы и, следовательно, размера частиц (рис. 3). Одновременное уменьшение значений большой полуоси и эксцентриситета говорит о том, что объекты снижаются по спирали.

Частицы, имеющие размер до 50 нм падают на Землю в течение 1000 лет. Другой характер движения наблюдается у частиц пыли, размер которых больше 10 мкм (рис. 4). Однако даже при таких физических характеристиках эффект Пойнтинга—Робертсона за 1000 лет изменяет орбитальные параметры

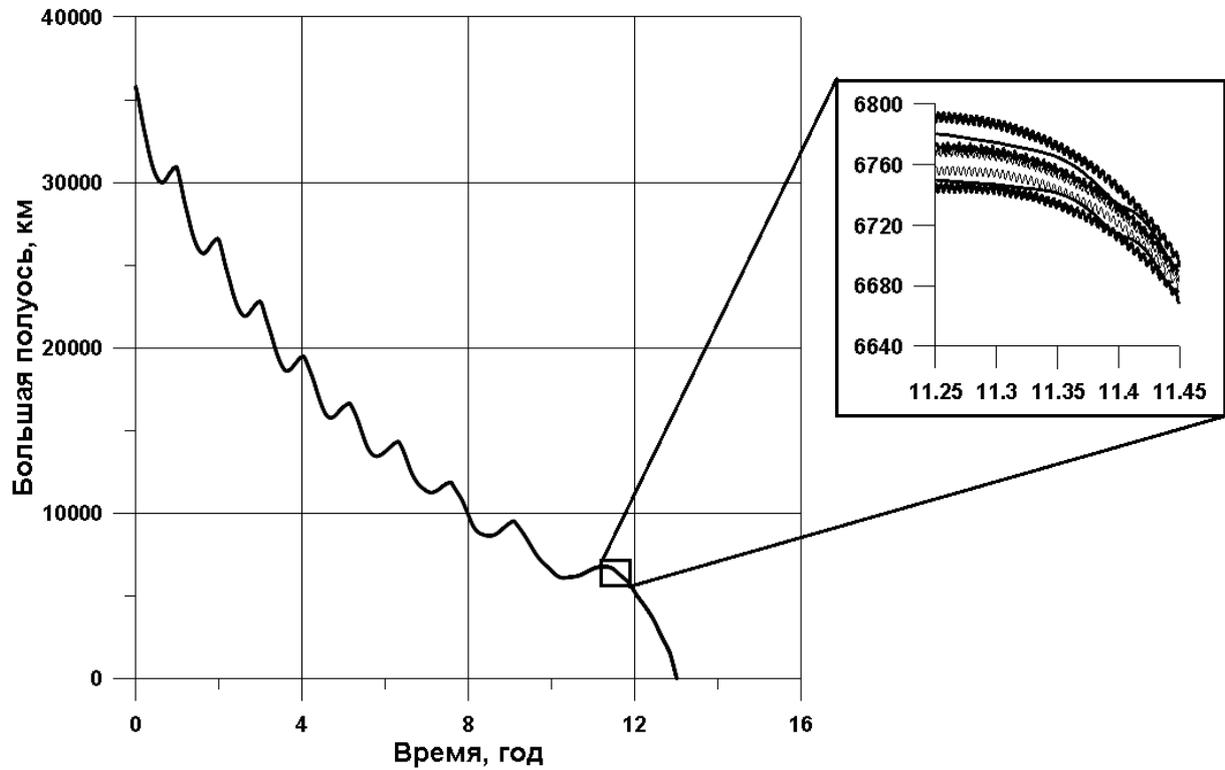
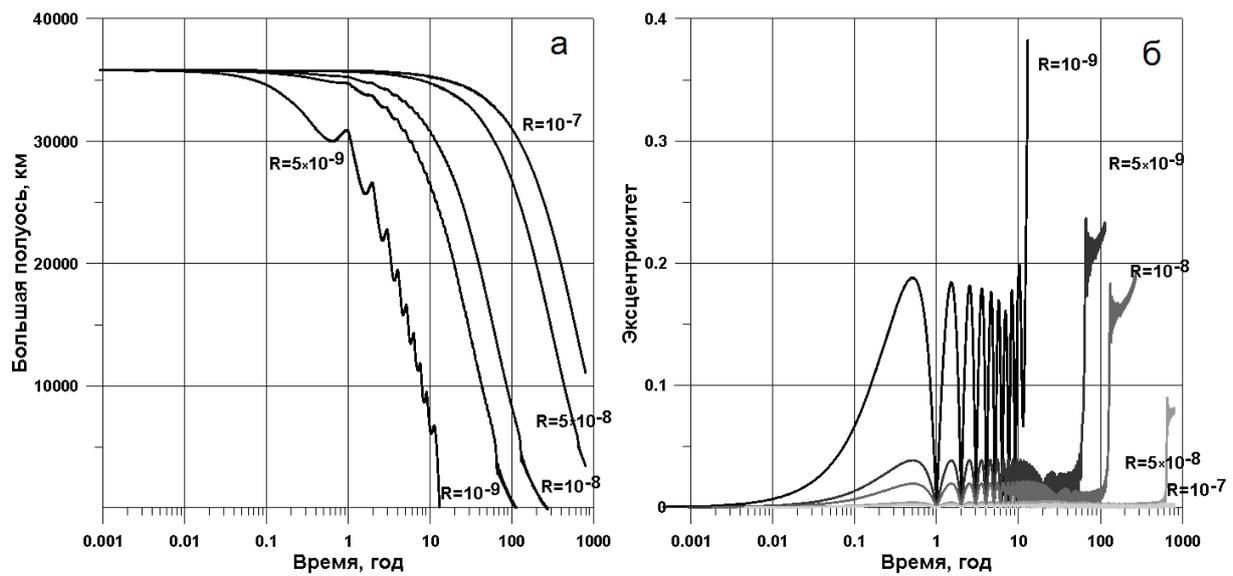


Рис. 2. Эволюция пылевых частиц

Рис. 3. Изменение орбитальных параметров мелких пылевых частиц в зависимости от размера (а — большая полуось, б — эксцентриситет), R — радиус частицы в метрах

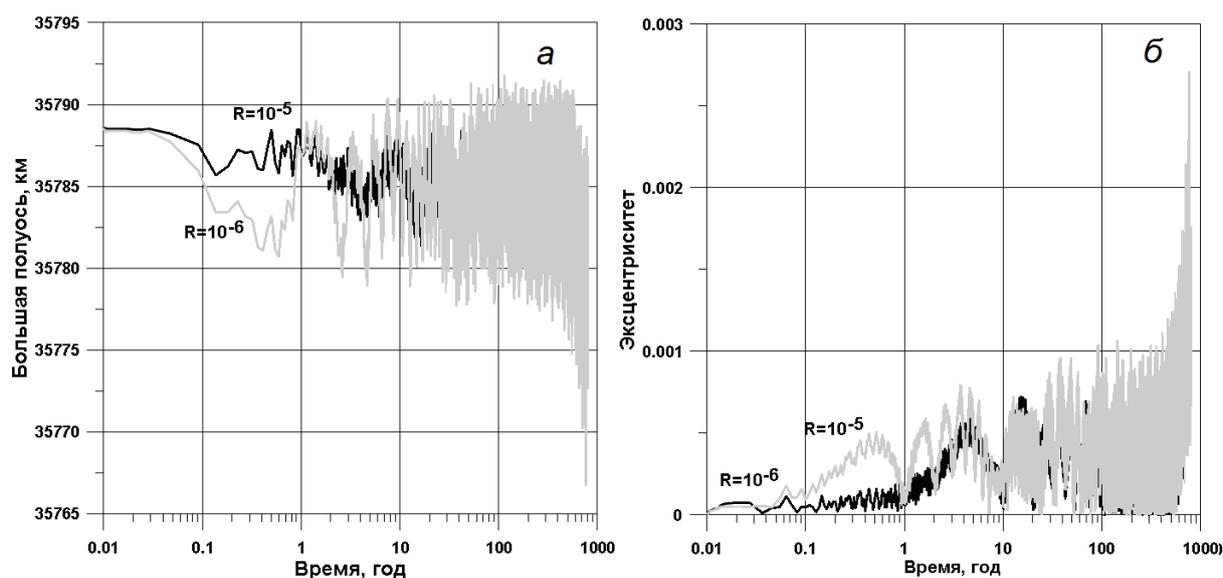


Рис. 4. Изменение орбитальных параметров крупных пылевых частиц в зависимости от размера (а — большая полуось, б — эксцентриситет), R — радиус частицы в метрах

объектов, что приводит к выходу частиц из геостационарной зоны и появлению пылевых облаков ниже геостационарной зоны.

Таким образом, результаты исследования эволюции частиц пыли, находящихся на геостационарной орбите, под действием эффекта Пойнтинга—Робертсона показали, что характер движения объектов не влияет на процесс изменения орбитальных характеристик этих объектов. Кроме того, выяснено, что металлические частицы, имеющие размер 1–50 нм, теряют момент количества движения и падают на Землю по спирали в течение 1000 лет. У частиц, имеющих размер больше 50 мкм, медленно изменяется большая полуось и эксцентриситет, но этого достаточно, чтобы частицы уходили из геостационарной зоны.

Заключение

В работе приведены результаты обработки высокоточных наблюдений навигационных спутников систем GPS и ГЛОНАСС, с использованием построенной для этих спутников световой моделью и данные по изучению тонких негравитационных эффектов, возникающих вследствие пересечения объектами области тени Земли. В дальнейшем планируется детально исследовать световую модель для всей совокупности спутников системы ГЛОНАСС и выработать рекомендации по учету светового давления для них.

Также в работе представлены результаты исследования эволюции частиц пыли, находящихся на геостационарной орбите, под действием эффекта Пойнтинга—Робертсона. Результаты показали, что характер движения объектов не влияет на процесс изменения орбитальных характеристик этих частиц. Кроме того, элементы орбиты частицы космического мусора под действием эффекта Пойнтинга—Робертсона изменяются таким образом, что это приводит к уменьшению высоты частицы, а для достаточно малых частиц и к сгоранию в атмосфере в течение тысячи лет.

Литература

1. Бордовицына Т.В и др. Численное моделирование движения систем ИСЗ в среде параллельных вычислений // Изв. вузов. Физика. 2009. № 12/2. С. 5–11.
2. Valk S., Delsate N., Lemaître A., Carletti T. Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // Advances in Space Research. 2009. V. 43. P. 1509–1526.
3. IERS Standarts. IERS Technical Note. Paris: Central Bureau of IERS. 1992. 150 p.
4. Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. 282 с.
5. Гаязов И.С. Эмпирические модели радиационного давления для спутников GPS и ГЛОНАСС. Труды ИПА РАН. 2000. Вып. 5. С. 93–102.

6. *Vokrouhlicky D., Farinella P., Mignard F.* Solar radiation pressure perturbations for Earth satellites .4. Effects of the Earth's polar flattening on the shadow structure and the penumbra transitions // *Astronomy and Astrophysics*. 1996. Vol. 307. No. 2. P. 635–644.
7. *Хелали Я. Э., Батраков Ю. В., Фоминов А. М.* Эффекты полутени Луны в движении спутника Земли при убывании яркости солнечного диска к краю. Труды ИПА РАН, 1999. Вып. 4. С. 300–309.
8. The International GNSS Service. 2013. Режим доступа: <http://igsb.jpl.nasa.gov/> (дата обращения: 09.11.2013).

Ключевые слова: искусственные спутники Земли, эффект Пойнтинга-Робертсона, эффект Ярковского.

Статья поступила 4 декабря 2013 г.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

© Чувашов И. Н., 2013