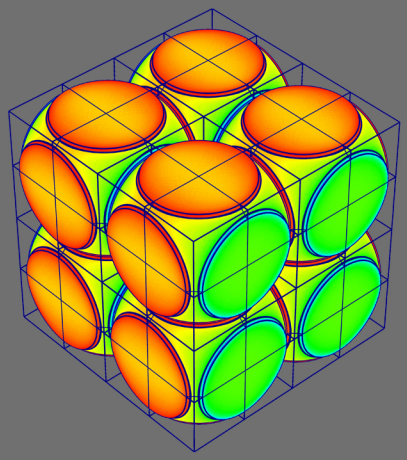
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Bazey A., Bazey N., Borovin G., Zolotov V., Kashuba V., Kashuba S., Kupriyanov V., Molotov I. Evolution of the orbit of a passive fragment with a large area of surface in high Earth orbit. Mathematical Modeling and Computational Methods, 2015, №1 (5), pp. 83-93

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/39/

Параметры загрузки:
IP: 3.41.188.32
17.11.2026 08:05:58

УДК 521.2; 521.3; 521.61

Эволюция орбиты пассивного фрагмента с большой площадью поверхности на высокой околоземной орбите

© А.А. Базей[1], Н.В. Базей[1], Г.К. Боровин[3], В.Е. Золотов[3], В.И. Кашуба[1], С.Г. Кашуба[1], В.В. Куприянов[2], И.Е. Молотов[3]

[1] НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова, Одесса, 65015, Украина

[2] ГАО РАН, Санкт-Петербург, 196140, Россия

[3] ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047, Россия

Выполнена обработка наблюдений искусственного небесного тела 43096, полученных в 2006–2012 годах в рамках проекта «Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений» — НСОИ АФН (ISON). Определены кеплеровы элементы орбиты, вектор состояния на 24.11.2006 г. 1 ч 55 мин 50,76 с UTC. Выполнено численное интегрирование уравнений движения с учетом возмущений со стороны полярного сжатия Земли, Луны, Солнца и давления солнечного излучения. Основываясь на численной модели движения в околоземном пространстве, учитывающей только наибольшие возмущения, предложен способ сведения искусственных небесных тел с высоких орбит.

Впервые по объектам с большим отношением площади поверхности к массе получено столь значительное число данных на длительных интервалах времени, которое позволило выявить их особенности.

Ключевые слова: *небесная механика, космический мусор, обработка наблюдений.*

В настоящее время в околоземном космическом пространстве находятся десятки тысяч небесных тел искусственного происхождения. Большая часть их относится к космическому мусору, — искусственным спутникам, выработавшим ресурс, или фрагментам искусственных спутников. Такие небесные тела на высоких орбитах могут находиться практически неограниченно долго. Их движение подвержено наибольшим возмущениям со стороны Луны, Солнца и асимметрии гравитационного поля Земли. Наблюдения высокоорбитальных объектов проводятся оптическими телескопами. Наибольший вклад в эту работу вносит Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений — НСОИ АФН (ISON) [1].

В данной статье выполнена обработка позиционных наблюдений одного из пассивных высокоорбитальных небесных тел. На основании полученных результатов предложен способ сведения выработавших свой ресурс искусственных спутников из геостационарной области околоземного пространства на низкие орбиты.

Выбран фрагмент 43096, открытый на метровом телескопе ESASDT (ESA Space Debris Telescope) на Тенерифе (Испания) командой Томаса Шильдкнехта в рамках сотрудничества с проектом

НСОИ АФН [2]. Обозначение фрагмента соответствует номеру в базе данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Этот фрагмент интересен большим отношением площади поверхности к массе (high area to mass ratio — HAMR). Помимо гравитационных возмущений для описания изменений его орбиты необходимо учитывать значительные возмущения со стороны светового давления. В случае светового давления Солнца возмущения обычно носят периодический характер.

Обработаны наблюдения фрагмента, полученные сетью НСОИ АФН в 2006−2012 годах в рамках программы ПулКОН следующими станциями: Тенерифе (Цейсс-1000), Циммервальд (ZIMLAT), КрАО (АТ-64), Научный (Цейсс-600), Монды (АЗТ-33ИК), Майданак (Цейсс-600), Маяки (РК-600), КрАО (РН-1), Гиссар (АЗТ-8), Терскол (Цейсс-2000), Абастумани (АС-32), Андрушевка (S-600), Уссурийск (ОРИ-50), Артём (ОРИ-25).

Всего обработано 226 серий наблюдений, выполненных в период с 18.11.2006 по 16.06.2012 г. Каждая серия состоит в среднем из 20–30 измерений топоцентрических прямых восхождений, склонений и времени по шкале UTC. По каждой серии методом Лапласа с последующим уточнением методом 6-параметрической итерации определены кеплеровы элементы орбиты. По невязкам между наблюдаемыми и вычисленными положениями фрагмента оценена точность элементов орбит. Методика расчетов подробно описана в [3, 4]. Наименьшие погрешности определения элементов орбиты удалось получить по сериям наблюдений.

На 24.11.2006 г. 1 ч 9 мин 56,87 с (Тенерифе):

$p = (6{,}4666 \pm 0{,}0002)$ экв. рад; $e = 0{,}06681 \pm 0{,}00002$;

$\omega = (261{,}16 \pm 0{,}02)°$; $e = (321{,}588 \pm 0{,}002)°$;

$i = (9{,}0212 \pm 0{,}0003)°$; $M_0 = (242{,}48 \pm 0{,}03)°$.

На 8.02.2008 г. 23 ч 35 мин 46,77 с (Тенерифе):

$p = (6{,}4816 \pm 0{,}0002)$ экв. рад; $e = 0{,}04697 \pm 0{,}00001$;

$\omega = (295{,}38 \pm 0{,}02)°$; $e = (319{,}765 \pm 0{,}001)°$;

$i = (8{,}2431 \pm 0{,}0002)°$; $M_0 = (240{,}16 \pm 0{,}02)°$.

На 24.11.2006 г. 1 ч 55 мин 50,76 с UTC был определен вектор состояния:

$x = -2{,}28181$ экв. рад; $y = 6{,}21066$ экв. рад; $z = 0{,}54755$ экв. рад;

$V_x = -0{,}0259860$ экв. рад/мин; $V_y = -0{,}0111238$ экв. рад/мин;

$V_z = -0{,}00394734$ экв. рад/мин.

Эти значения были приняты начальными условиями для интегрирования орбиты фрагмента.

Отношение площади поверхности к массе принято следующим: $S/m = 2{,}56$ м^2/кг [7]. Ускорение от прямого солнечного освещения оценивалось как

$$\mathbf{a} = C\frac{S}{m}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}_S}{r},$$

где $C = P_0(1+A)$; P_0 = 0,0000045606 Н/м^2 — давление солнечного излучения на расстоянии орбиты Земли; A — коэффициент отражения электромагнитной энергии ($0 < A < 1$); r_0 — средний радиус земной орбит; $\mathbf{r}$, $\mathbf{r}_S$ — положения фрагмента и Солнца в геоцентрической системе отсчета.

Поскольку фрагмент 43096 относится к высоким искусственным спутникам Земли, то возмущения движения от Луны и Солнца сравнимы с возмущениями от сжатия Земли [1, с. 38]. В свою очередь, возмущения от сжатия Земли существенно превышают возмущения от всех других асимметрий геопотенциала [5, с. 40]. По этой причине при интегрировании уравнений движения учтены возмущения от второй зональной гармоники земного гравитационного поля, Луны, Солнца и давления солнечного света. Положения Луны и Солнца заимствованы из численной теории DE405 [6]. Интегрирование выполнялось методом Рунге — Кутта 10-го порядка [7] на интервале с 24.11.2006 по 31.07.2012 г. Результаты приведены на рис. 1. Точками показаны значения элементов орбиты, определенные по наблюдениям, сплошная кривая получена в результате интегрирования.

На протяжении всего времени большая полуось орбиты не испытывает вековых возмущений. Эксцентриситет и аргумент перигея подвержены периодическим изменениям продолжительностью около 370 сут. Эксцентриситет изменяется от 0,017 до 0,071. Линия апсид покачивается с амплитудой около 80°, и медленно вращается со скоростью 0,020°/сут. Долгота восходящего узла и наклонение орбиты уменьшаются соответственно со скоростью 0,0028 и 0,0016°/сут на всем интервале наблюдений.

Таким образом, орбита фрагмента 43096, сохраняя размер, периодически изменяет форму и положение линии апсид. Кроме того, линия апсид, долгота восходящего узла и наклонение изменяются монотонно.

Численное интегрирование показывает, что периодические возмущения в эксцентриситете и аргументе перигея вызваны солнечным световым давлением: если положить $P_0 = 0$, то они исчезают. На рис. 2 показаны значения этих элементов орбиты, вычисленные по наблюдениям с наименьшими абсолютными погрешностями $\Delta e < 0{,}002$. Прерывистая линия представляет значения, вычисленные с учетом всех перечисленных возмущений. Сплошная линия — те же элементы орбиты, вычисленные без учета светового давления.

Этот факт может быть использован для целенаправленного изменения орбит объектов геостационарной области и сведения их на более низкие орбиты вплоть до ввода в атмосферу Земли.

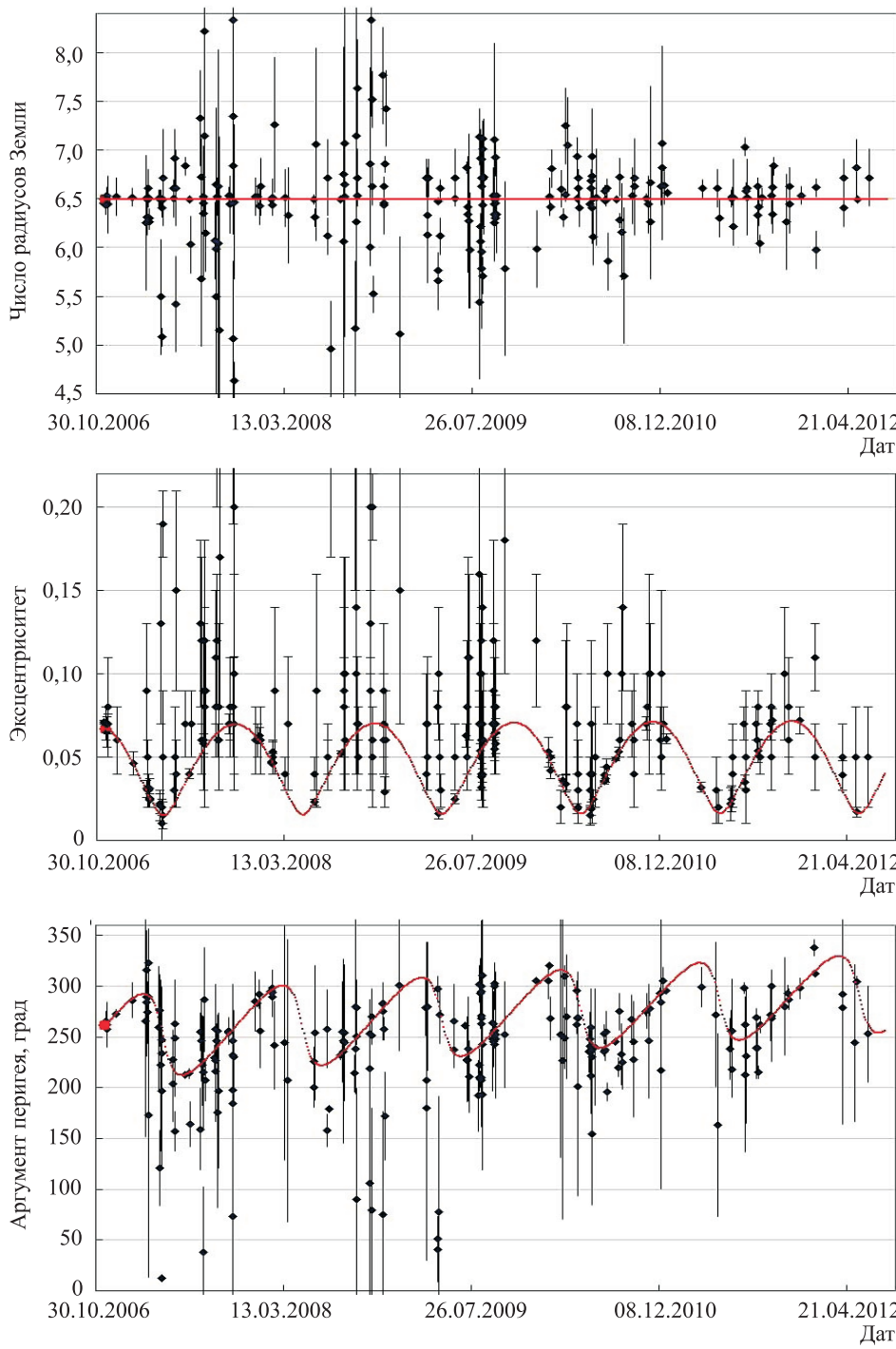


Рис. 1. Элементы орбиты фрагмента 43096 в 2006–2012 годах. Точками обозначены значения, полученные из наблюдений; линией показан результат численного моделирования (начало)

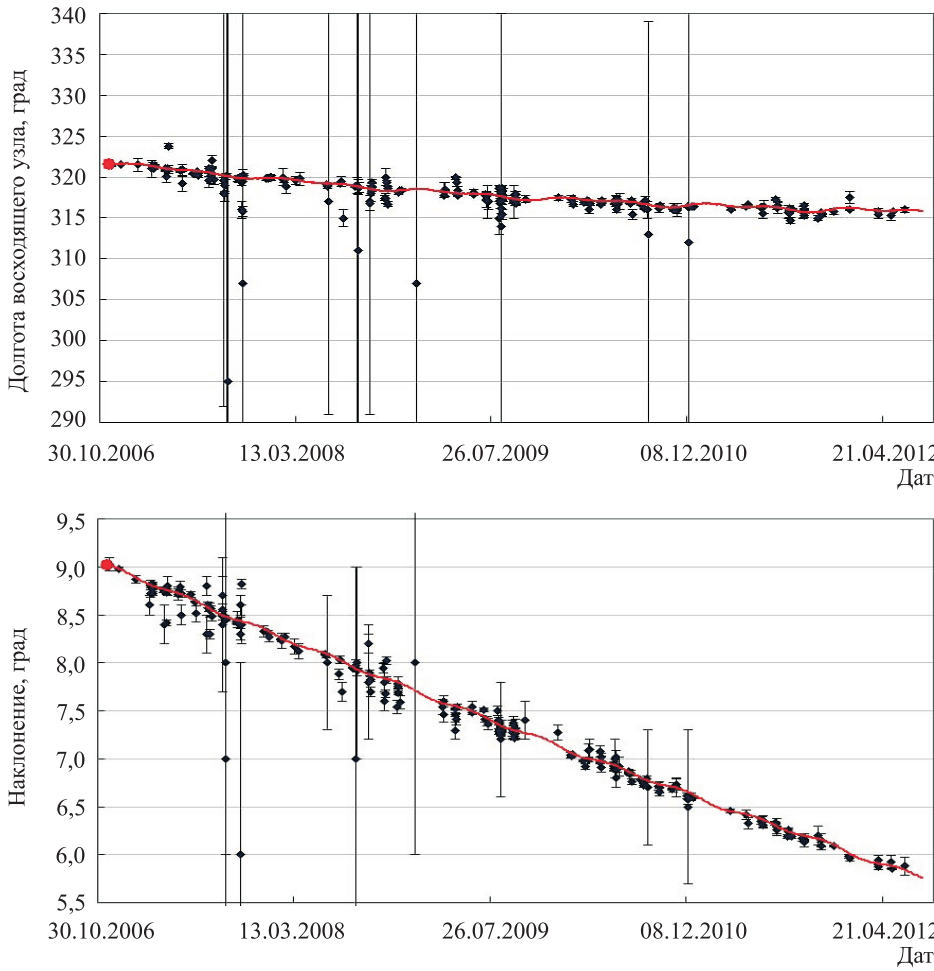


Рис. 1. (Окончание)

Поясним это на примере моделирования движения фрагмента 43096 (рис. 3). Из графика изменения эксцентриситета нетрудно определить, что приблизительно с 5.05.2007 до 13.11.2007, с 8.05.2008 до 19.11.2008, с 15.05.2009 до 26.11.2009, с 22.05.2010 до 3.12.2010, с 29.05.2011 до 4.12.2011 г. эксцентриситет возрастает. В это время при неизменной большой полуоси под действием светового давления уменьшается перигейное расстояние. С 13.11.2007 до 8.05.2008, с 19.11.2008 до 15.05.2009, с 26.11.2009 до 22.05.2010 и с 3.12.2010 до 29.05.2011 г. эксцентриситет уменьшается. Если в промежутках времени, когда эксцентриситет возрастает, сила светового давления будет больше, чем в промежутках уменьшения эксцентриситета, то в целом можно получить вековое увеличение эксцентриситета орбиты. Такого эффекта можно достичь, например увеличив отношение площади поверхности к массе фрагмента во время увеличения эксцентриситета.

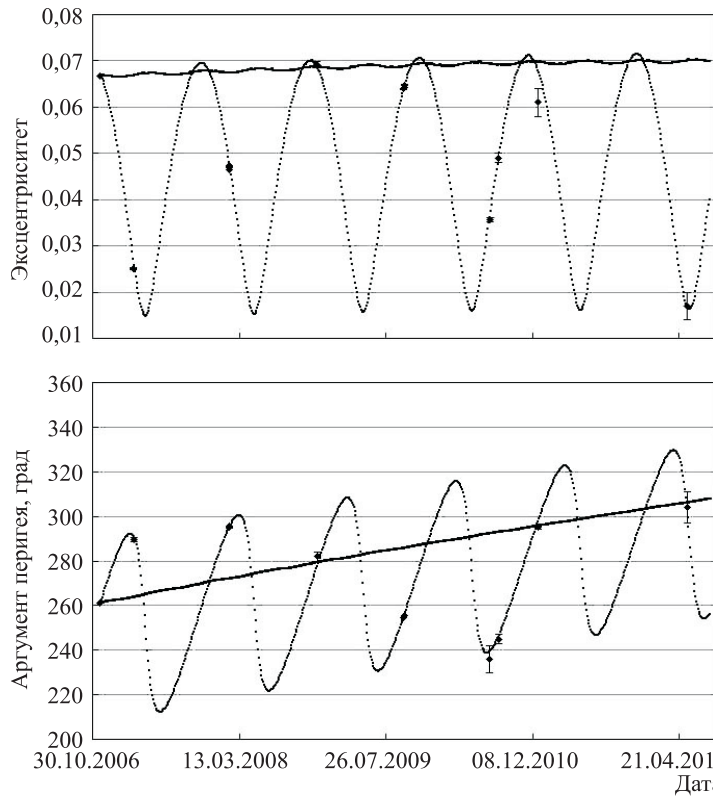


Рис. 2. Избранные элементы орбиты фрагмента 43096. Точками обозначены значения, для которых абсолютная погрешность определения эксцентриситета наименьшая (меньше 0,002). Непрерывная линия показывает изменения элементов орбиты, полученные в результате численного интегрирования уравнений движения без учета давления солнечного света; прерывистая — с учетом светового давления

Выполнен численный эксперимент по моделированию орбиты фрагмента 43096 с теми же начальными условиями на 24.11.2006 г. 1 ч 55 мин 50,76 с UTC, но с переменным значением силы светового давления. Во время роста эксцентриситета принималось P_0 = = 0,0000045606 Н/м^2, во время его уменьшения $P_0 = 0$. Результат показан на рис. 3. С 8.05.2007 г. эксцентриситет увеличивался с 0,02 до 0,30 31.07.2012 г. При этом большая полуось оставалась неизменной. В конце интервала интегрирования перигейное расстояние сократилось до 29 000 км (4,54 экв. рад Земли). Такого значительного изменения орбиты фрагмента удалось достичь только путем изменения силы солнечного светового давления 2 раза в году.

Обобщая полученный результат, надо сказать, что подобный способ изменения орбит небесных тел в околоземном пространстве можно применить для решения вопросов экологии ближнего космоса. Если предусмотреть техническую возможность управляемого изменения отношения площади поверхности к массе отработавших

свой ресурс спутников, то используя только давление света, можно решить задачу очищения околоземного космического пространства от космического мусора искусственного происхождения.

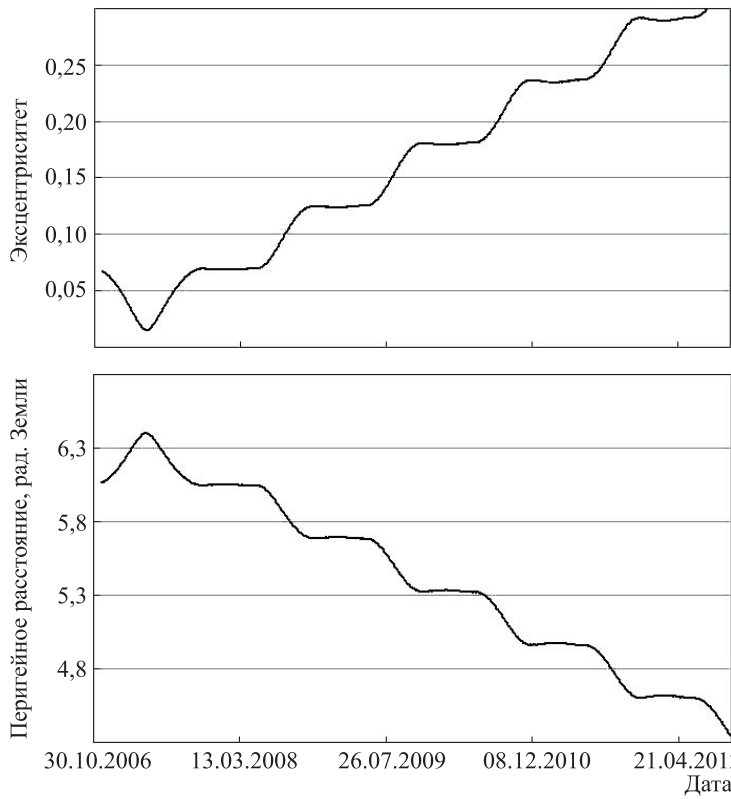


Рис. 3. Изменение элементов орбиты небесного тела, подверженного влиянию переменной силы светового давления

Таким образом, обработаны позиционные наблюдения искусственного небесного тела 43096, полученные в 2006−2012 годах сетью наблюдательных станций, участвующих в проекте НСОИ АФН. Найдены кеплеровы элементы орбиты для каждой серии наблюдений и оценены погрешности их определения. На момент 24.11.2006 г. 1 ч 55 мин 50,76 с UTC был определен вектор состояния 43096, значение которого послужило начальными условиями для интегрирования дифференциальных уравнений движения в декартовых координатах. При интегрировании учтены возмущения со стороны полярного сжатия Земли, Луны, Солнца и давления солнечного излучения. Полученное численное решение находится в хорошем согласии с данными наблюдений, демонстрирует периодический и вековой характер изменения орбиты в околоземном пространстве.

Основываясь на численной модели движения в околоземном пространстве, учитывающей только наибольшие возмущения, предложен способ сведения искусственных небесных тел с высоких орбит.

Впервые по объектам с большим отношением площади поверхности к массе получено столь значительное количество данных на длительных интервалах времени, которое позволило выявить и проанализировать их наблюдательные и орбитальные особенности. В целом база данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН содержит сейчас информацию по 247 объектам с большим отношением площади поверхности к массе на геостационарной и геопереходных орбитах и 23 объектам на высокоэллиптических орбитах (учитывались только объекты, по которым измерения были получены более чем за две наблюдательные ночи). Число обнаруженных относительно ярких объектов (ярче 15,5 звездной величины) непрерывно увеличивается, что является достаточно неожиданным фактом с учетом того, что непрерывные обзоры геостационарной области проводятся сетью НСОИ АФН уже несколько лет подряд. Каждый месяц открывается порядка 5−10 новых объектов, многие из которых пересекают защищаемую область геостационарной орбиты, увеличивая тем самым прогнозируемую опасность для работающих спутников. Очень важно открыть максимально большое количество космического мусора, чтобы обнаружить источники его происхождения. Ожидается, что в геостационарной области существует еще как минимум несколько сотен фрагментов космического мусора ярче 18-й звездной величины. Число более слабых (и соответственно меньших по размеру) объектов пока не может быть корректно оценено.

Авторы выражают благодарность директору НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета имени И.И. Мечникова профессору С.М. Андриевскому за сотрудничество при подготовке этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Молотов И.Е., Агапов В.М., Куприянов В.В. и др. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений. *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове*, 2009, № 219, вып. 1, с. 233−248.

[2] Вольвач А.Е., Румянцев В.В., Молотов И.Е. и др. Исследования фрагментов космического мусора в геостационарной области. *Космическая наука и технология*, 2006, т. 12, № 5/6, с. 50−57.

[3] Bazyey A.A., Sibiryakova E.S., Shulga A.V. The method for fast determination of Geostationary Earth Satellite orbit from angular coordinates measurements. *Odessa Astronomical Publications*, 2005, vol. 18, pp. 8−13.

[4] Эскобал П. Методы определения орбит. Москва, Мир, 1970.

[5] Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения искусственных спутников Земли. *Аналитические и численные методы*. Томск, Изд-во Томского ун-та, 2007.

[6] URL: ssd.jpl.nasa.gov

[7] Bazyey A.A., Kara I.V. Integration of differential equation for celestial bodies' motion by the Runge — Kutt method in the third order. *Odessa Astronomical Publications*, 2005, vol. 18, p. 14−17.

Статья поступила в редакцию 02.09.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Базей А.А., Базей Н.В., Боровин Г.К. и др. Эволюция орбиты пассивного фрагмента с большой площадью поверхности на высокой околоземной орбите. *Математическое моделирование и численные методы*, 2015, № 1, с. 83–93.

Базей Александр Анатольевич родился в 1966 г., окончил Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова. Канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова, автор 10 печатных работ.

Базей Наталья Викторовна родилась в 1966 г., окончила Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова. Научный сотрудник НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова, автор 6 научных публикаций.

Боровин Геннадий Константинович родился в 1940 г., окончил математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р физ.-мат. наук, зам. директора ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, профессор МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 180 научных публикаций. e-mail: borovin@keldysh.ru

Золотов Владимир Евлогиевич родился в 1963 г., окончил Московский авиационный институт. Научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Автор 5 статей.

Кашуба Владимир Иванович родился в 1962 г., окончил Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова. Научный сотрудник НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова. Автор более 10 научных публикаций.

Кашуба Светлана Григорьевна родилась в 1961 г., окончила физический факультет Одесского национального университета им. И. И. Мечникова. Учитель физики. Автор более 10 печатных работ.

Куприянов Владимир Викторович родился в 1974 г., окончил физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета. Канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник Лаборатории наблюдательной астрометрии Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН. Автор более 70 научных публикаций.

Молотов Игорь Евгеньевич родился в 1962 г., окончил факультет радиофизики и электроники Московского энергетического института. Ст. научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Автор более 100 научных публикаций.

Evolution of the orbit of a passive fragment with a large area of surface in high Earth orbit

© A.A. Bazey [1], N.V. Bazey [1], G.K. Borovin [3], V.E. Zolotov[3], V.I. Kashuba [1], S.G. Kashuba [1], V.V. Kupriyanov[2], I.E. Molotov [3]

[1] Scientific Research Institute “Astronomical Observatory” of Odessa Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, 65015

[2] The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, St.-Petersburg, 196140, Russia

We have analysed and presented observations of artificial celestial body 43096. We obtained the observations in 2006–2012 within the project "Scientific Network of Optic Instruments for Astrometric and Photometric Observations" (ISON). We have determined the Kepler orbit elements and state vector as of 1 hour 55 minutes 50,76 seconds, November 24, 2006 UTC (1:55:50,76 November 24,2006 UTC). We have performed numerical integration of the motion equations, taking into account the perturbations from the polar compression of the Earth, the Moon, the Sun and the solar radiation pressure. We propose a method for deorbiting artificial celestial bodies in high altitude orbits. The method is based on a numerical model of motion in circumterrestrial space, which takes into account only the largest perturbations. For the first time ever we have obtained such a great amount of data on objects with a large area of surface to mass ratio over long time spans. The data allowed us to study the objects and reveal their peculiar properties.

Keywords: *celestial mechanics, space debris, reduction of observations*

REFERENCES

[1] Molotov I.E., Agapov V.M., Kupriyanov V.V. et al. *Izvestiya Glavnoy Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove — Proceedings of the Central Astronomical Observatory of Russian Academy of Sciences at Pulkovo*, 2009, no. 2019, issue 1, pp. 233–248.

[2] Volvach A.E., Rumyantsev V.V., Molotov I.E. et al. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya — Space Science and Technology,* 2006, vol. 12, no. 5/6, pp. 50–57.

[3] Bazyey A.A., Sibiryakova E.S., Shulga A.V. The method for fast determination of Geostationary Earth Satellite orbit from angular coordinates measurements. *Odessa Astronomical Publications*, 2005, vol. 18, pp. 8−13.

[4] Eskobal P. *Metody Opredeleniya Orbit* [Methods of Determining Orbits], Moscow, Mir Publ., 1970 [in Russian].

[5] Borodovitsyna T.V., Avdyushev V.A. *Teoriya dvizheniya iskusstvennykh sputnikov Zemli* [Theory of Motion of Artificial Earth Satellites. Analytical and Numerical Methods]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2007.

[6] http://www.ssd.jpl.nasa.gov

[7] Bazyey A.A., Kara I.V. Integration of differential equation for celestial bodies' motion by the Runge — Kutt method in the third order. *Odessa Astronomical Publications*, 2005, vol. 18, pp. 14−17.

Bazey A.A. (b. 1966) graduated from Odessa Menchikov National University. Ph.D., research fellow of Scientific Research Institute "Astronomical Observatory" of Odessa Mechnikov National University. Author of 10 publications.

Bazey N.V. (b. 1966) graduated from Odessa Menchikov National University. Ph.D., research fellow of Scientific Research Institute "Astronomical Observatory" of Odessa Mechnikov National University. Author of 6 scientific publications.

Borovin G.K. (b. 1940) graduated from Lomonosov Moscow State University, Department of Mathematics. Dr. Sci. (Phys.&Math.), deputy director of Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, professor at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 180 scientific publications.
e-mail: borovin@keldysh.ru

Zolotov V.E. (b. 1963) graduated from Moscow Aviation Institute. Research fellow of Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences. Author of 5 articles.

Kashuba V.I. (b. 1962) graduated from Odessa Menchikov National University. research fellow of Scientific Research Institute "Astronomical Observatory" of Odessa Mechnikov National University. Author of more than 10 scientific publications.

Kashuba S.G. (b. 1961) graduated from Odessa Menchikov National University, Department of Phisics. Teacher of Phisics. Author of more than 10 publications.

Kupriyanov V.V. (b. in 1974) graduated from St.-Petersburg State University, Department of Physics. Ph.D., Senior staff scientist of the Observational Astronomy Laboratory of the Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo. Author of more than 70 scientific publications.

Molotov I.E. (b. 1962) graduated from Moscow Power Engineering Institute, Department of Radiophisics and Electronics. Senior staff scientist of Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences. Author of more than 100 scientific publications.