

УДК 629.7.086:681.5183:524.491

П. П. Сухов, Д. А. Юханов

НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета  
65014 Одесса, парк им. Шевченко

### Наблюдения высокоорбитальных космических объектов в Одесской астрономической обсерватории

*Описывается состояние проблемы наблюдений высокоорбитальных спутников и космического мусора. Приводятся характеристики телескопов Одесской астрономической обсерватории, используемые для позиционных и фотометрических наблюдений на геостационарной и высокоэллиптической орбитах. Даны некоторые результаты участия обсерватории в международном оптико-радиолокационном совместном сеансе наблюдения космического мусора на высоких орбитах.*

*СПОСТЕРЕЖЕННЯ ВИСОКООРБИТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В ОДЕСЬКІЙ АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ, Сухов П. П., Юханов Д. А. — Описується стан проблеми спостережень високоорбітальних супутників, космічного сміття. Приводяться характеристики телескопів Одеської астрономічної обсерваторії, що використовуються для позиційних та фотометричних спостережень на геостаціонарній і високоеліптичних орбітах. Приводяться деякі результати участі обсерваторії у міжнародному оптико-радіолокаційному спільному сеансі спостереження космічного сміття на високих орбітах.*

*HIGH-ORBITAL SPACE OBJECT OBSERVATIONS AT THE ODESSA ASTRONOMICAL OBSERVATORY, by Sukhov P. P., Yukhanov D. A. — The modern state of the problem of observations of high-orbital satellites and space debris is described. We present characteristics of telescopes of the Odessa Astronomical Observatory which are used for positional and photometrical observations of objects in geostationary and high-elliptic orbits. We give some results derived at the Odessa Astronomical Observatory during international optical-radar joint session of space debris observations in high orbits.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Основным источником информации об высокоорбитальных объектах является российская и американская сети контроля космического пространства.

Всего службами контроля космического пространства (ККП) России и США на январь 2004 г. зафиксировано и отслеживается более 11 000 объек-

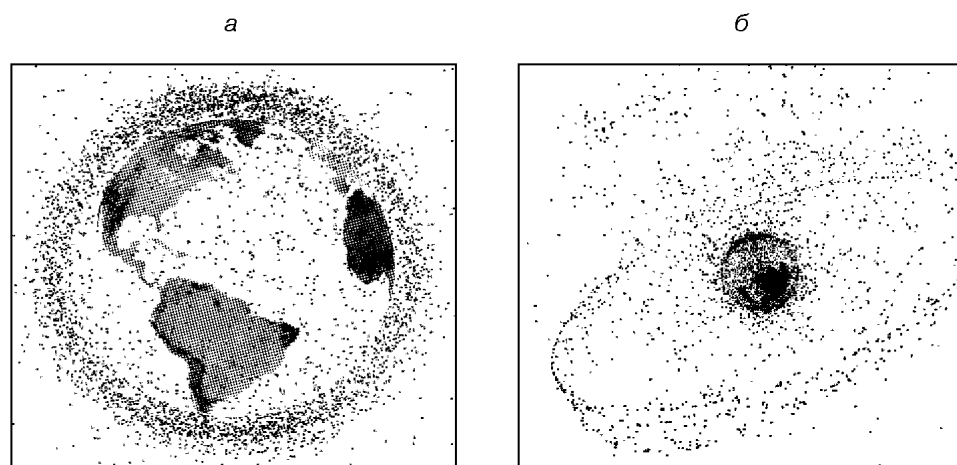


Рис. 1. Распределение космических объектов: *а* — для низких орбит ( $h < 2000$  км), *б* — для высокоэллиптических ( $h > 2000$  км) и геостационарных орбит ( $h \approx 36000$  км)

тов. Количество мелких частиц, вращающихся вокруг Земли, измеряется сотнями тысяч. Около 9 тыс. объектов занесены в официальные каталоги. Действующие «активные» спутники (более 600 объектов) составляют лишь незначительную часть общего числа каталогизированных объектов на околоземных орбитах. На декабрь 2001 г. каталог ESA содержит 906 геостационарных спутников (ГСС), а на декабрь 2003 г. — уже 1036, и более 140 геостационарных спутников США не занесены в каталог. Более 250 объектов, находящихся на высокоэллиптической орбите (НЭО), регулярно пересекают геостационарную область [7].

На рис. 1 представлены модели распределения космических объектов (КО) в околоземном пространстве, полученные Европейским космическим агентством (ESA): для низких орбит высотой до 2 000 км, для высокоэллиптических орбит с перигеем более 2 000 км и геостационарных орбит высотой около 36 000 км.

Низкоорбитальные КО сравнительно недолговечны; через некоторое время после запуска они сгорают в атмосфере Земли. Самоочищение низких орбит вызывается трением в атмосфере, которое приводит к изменению большой полуоси орбиты объекта, уменьшая ее, пока объект не войдет в плотные слои атмосферы и не сгорит в ней. На высоких орбитах процесс самоочищения не наблюдается, время жизни КО на этих орбитах миллионы лет. По истечению некоторого времени запущенные ГСС переходят в категорию «пассивных», т. е. превращаются в космический мусор (КМ), а их орбиты эволюционируют по законам небесной механики.

Термин «космический мусор» объединяет спутники, исчерпавшие свои энергетические ресурсы, верхние ступени ракет-носителей, операционные фрагменты, детали, сопутствующие запуску, и другие неуправляемые объекты искусственного происхождения.

Есть две причины, обуславливающие важность проблемы, наблюдений высокоорбитальных КО: опасность столкновения пилотируемых КО с космическим мусором, и опасность взрыва на орбите. Первое столкновение произошло 24 июля 1996 г. Французский спутник «Serise», запущенный в июле 1995 г. столкнулся с фрагментом третьей ступени ракеты «Ариан», выведенной на орбиту в 1986 г. Через 39 лет после запуска первого искусственного спутника Земли проблема столкновений в космосе стала реальной.

Пробные наблюдения фрагментов мусора на GEO в 1999 г. на телескопе Цейса ( $D = 1$  м) с применением ПЗС (4К×4К), проведенные ESA (Tenerife/Spain), зафиксировали сотни некаталогизированных фрагментов от 15 см и более. Обнаружены также облака обломков, вероятно, образовавшиеся после взрывов на геостационарной и высокоэллиптической орбитах [8]. Ежегодно на GEO происходит 5—8 спонтанных взрывов объектов, порождающие сотни космических осколков. Наблюдениями установлены три факта взрывов на геостационарной орбите. Однако эти же события можно выявить и по косвенным признакам: по внезапным изменениям элементов орбит спутников или скорости дрейфа наблюдаемого объекта.

Анализ суточного дрейфа около 400 неконтролируемых ГСС на интервале 2000 сут, проведенный А. С. Соколиной (Пулково, ГАО РАН) в 2002—2004 гг., показал, что более 100 объектов имели необъяснимые изменения суточного дрейфа от 0.0005 до 0.03 град/сут. Этот факт можно интерпретировать как встречу объекта с невидимыми небольшими фрагментами [5]. В Институте астрономии РАН проводилось сравнение значений большой полуоси орбит ракет-носителей на геостационарной орбите в момент запуска с их значениями в более поздние моменты времени. Всего было проанализировано около сотни орбит, из которых 19 показали значимые изменения большой полуоси. По-видимому, эти объекты претерпели взрыв или разрушение [4].

Для получения информации о характеристиках распределения КМ на орбитах в настоящее время есть единственный путь — моделирование некаталогизированных популяций. Такие модели созданы в США, России, ESA. Модели космического мусора представляют собой математическое описание распределения объектов в космосе, маршрутов их перемещения, потоков объектов и физических свойств объектов, например размеров, массы, отражательных свойств. Моделирование техногенного загрязнения околоземного пространства необходимо для решения следующих задач: а) оценка текущего уровня загрязнения объектами разных размеров, б) моделирование эволюции техногенного загрязнения, в) оценка степени риска, расчет вероятности столкновений работающих космических аппаратов с КМ.

Есть три основные модели «космического мусора». Модель ORDEM 2000 (NASA) определяет суммарные характеристики КМ в области низких орбит на высотах 200...2000 км. Рассматриваются объекты от 10 мкм до 1 м. Модель MASTER-99 (ESA) описывает потоки искусственного и естественного КМ относительно заданных орбит. Рассматриваются частицы размером более 1 мкм в области высот от 6500 км до GEO. Модель SDPA 2000 (Росавиакосмос) предназначена для КМ размером более 1 мкм в области низких орбит и GEO [3]. Истинное положение с засорением GEO неизвестно, так как американской и российской службами контроля космического пространства наблюдаются объекты размером 1 м и более.

В последнее десятилетие проблема космического мусора усиленно обсуждается и исследуется в научных кругах, занимающихся мониторингом околоземного космического пространства, в том числе МАС, КОСПАР. Созданный в конце 1990-х гг. Межагентский комитет по космическому мусору (IADC) в настоящее время проводит регулярные международные кампании по зондированию КМ на GEO. В Европе наблюдения КМ координируются ESA и проводятся в Швейцарии, Франции, Англии, Испании, Италии. Наблюдениями КМ начали активно заниматься в Китае, Японии. В США наблюдения КО на высоких орбитах проводятся службой слежения GEODSS, пункты наблюдения которой расположены вблизи экватора: о. Гавайи, о. Диего-Гарсиа и штат Нижняя Мексика.

В Украине позиционные оптические наблюдения КМ на высоких

орбитах начали проводиться в рамках темы Национального космического агентства Украины «Интерферометр» с 2003 г. Имеющиеся оптические телескопы на Украине, решающие задачи системы контроля и анализа космической обстановки (СКАКО) в рамках Национального космического агентства Украины, позволяют измерять координаты КО на GEO и НЕО, звездная величина которых ограничена  $15^m$ , т. е. размером более 1.5 м (Евпатория — 50 см, Дунаевцы — 50 см, Одесса — 30 см, Николаев — 28 см).

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА ОАО

В Одесской астрономической обсерватории (ОАО) для наблюдения КО на высоких орбитах временно используется телескоп с апертурой 30-см системы Ричи-Кретьена, (поле  $0.5^\circ$ , светосила 1:6) установленный на трубу 60-см телескопа. В фокусе 30-см телескопа установлена ТВ-трубка суперизокон ЛИ-804 (при освещенности  $10^{-6}$  лк ток сигнала 100 мкА). Оцифровка сигнала проводится 10-разрядным АЦП. Видеосигнал в виде отдельных кадров (.BMP), либо видеопотока (.AVI) в реальном масштабе времени записывается в память компьютера. Используется компьютер Pentium-4 3.0 GHz FSB 800M) DIMM 512M SVGA Radeon 128M VIVO HDD 180G TV tuner WinFast-10-bit. Для регистрации момента времени наблюдения используются кварцевые часы с термостабилизацией и часовым уходом 0.02 с. Привязка к среднесолнечному времени проводится по шести радиосигналам точного времени (радиостанция «Проминь», «Эра — Киев»). Исследования хода кварцевых часов с привязкой к шести радиосигналам показали, что ошибка временной привязки момента наблюдения не хуже 0.01 с. Приборное время в уровнях TTL «замешивается» в видеопоток (или в файл) в двоичном коде. Обработка изображения проводится пакетом прикладных программ, состоящим из двух модулей. Модуль GEOSAT предназначен для предварительной обработки кадра в виде файла в формате .BMP, (размер  $768 \times 576$  пкл), формирования модельного файла на момент наблюдения из изображения звезд и космического объекта, измерения фотометрических характеристик и координат центроидов в приборной системе. Модуль ATLAS предназначен для вычисления экваториальных координат наблюдаемого объекта на эпоху J2000 г. методом Тернера или Дейча. Для редукции применяется каталог «Tycho-2» [6].

Основные трудности наблюдений с помощью ТВ-трубок заключаются в том, что: а) определяются координаты подвижного космического объекта (угловая скорость 2—20 сд/с) относительно подвижных звезд (15 сд/с); б) телевизионный кадр имеет дисторсионные искажения, которые надо учитывать; в) рабочая температура фотокатода ТВ-трубки равна примерно  $40^\circ\text{C}$ , что приводит к растеканию заряда на мишени и размыванию изображения. Кроме того, ТВ-трубка сложна в настройке и довольно массивна. В то же время ТВ-трубка имеет уникальную чувствительность, на порядок выше, чем у любого ПЗС и при остановленном часовом ведении телескопа способна регистрировать опорные звезды до  $13^m$  и КО до  $15^m$  при отношении сигнал/шум 3—5 и времени накопления 0.16 с.

Внешняя средняя квадратичная ошибка наших измерений находится в пределах  $\pm 5''$ . На рис. 2 показано изменение средней квадратичной ошибки для всей ночи наблюдения по четырем объектам.

С 2003 г. ОАО, совместно с НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» и Главной астрономической обсерваторией Национальной академии наук Украины, участвует в международных (Китай, Россия, Казахстан, Украина, Италия и др.) координированных Пулковской обсерваторией,

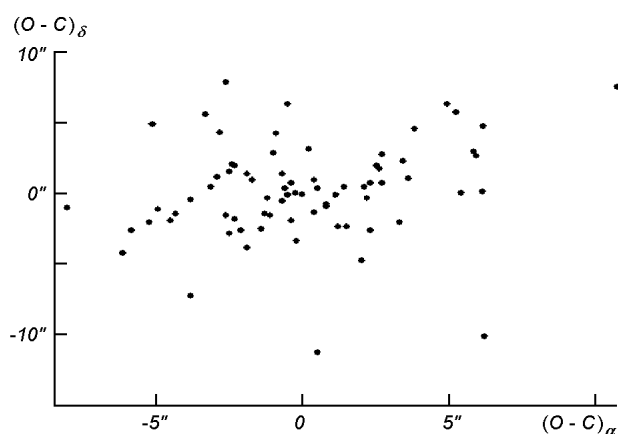


Рис. 2. Распределение внешних ошибок по двум координатам на протяжении ночи наблюдений (около 6 ч) по четырем объектам

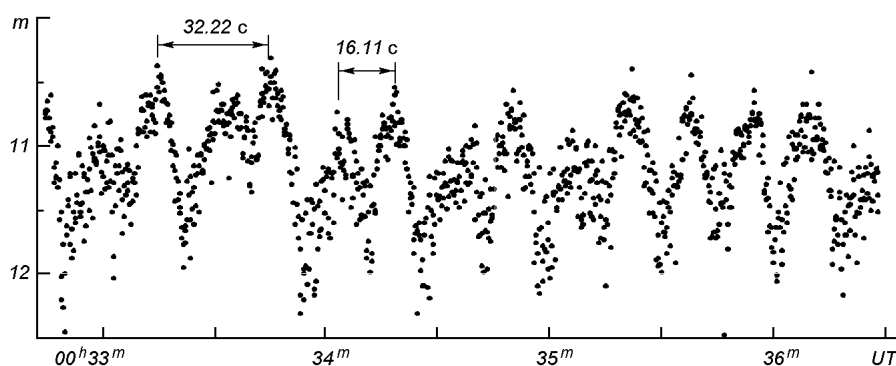


Рис. 3. Кривая изменения блеска для объекта № 95099 в интегральном спектре, полученная 14.09.04 в Маяках. По оси  $X$  дано время UT, по оси  $Y$  — звездная величина.  $P1 = 32.22$  с,  $P2 = 16.11$  с. Время накопления 0.2 с

совместных оптико-радиолокационных наблюдениях космического мусора на GEO и НЕО [2]. А с июля 2004 г. в Маяках, параллельно с позиционными наблюдениями, проводятся фотометрические наблюдения избранных GEO до  $13.5^m$  на 50-см телескопе оптической схемы Кассегрена в спектральных полосах  $B$ ,  $V$ ,  $R$ . Приемником излучения служит фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79. Время накопления может быть: 0.2 с, 1 с, 10 с. Оптико-механический блок и широкополосный усилитель разработаны и изготовлены в ОАО.

На рис. 3 приведен фрагмент кривой блеска объекта № 95099, полученный А. И. Мовчаном в интегральных лучах. Период изменения блеска вычислялся Л. В. Корнийчук и С. В. Страховой с помощью программных пакетов Spectr и Wregret, включающих анализ Фурье и используемые обычно для исследования быстроизменяющихся кривых блеска. На рис. 4 приведена кривая изменения мощности отраженного радиосигнала для этого же объекта. В качестве передатчика использовался радиотелескоп РТ-70 (Крым, Украина). Отраженный радиосигнал принимался в Медвежьих Озерах (Подмосковье, Россия). Обработка радиосигнала проводилась в НИИРФИ, Н. Новгород (Россия). Время накопления 0.016 с. Впервые для геостационарного объекта проведено сравнение кривых изменений блеска в оптическом диапазоне и мощности отраженного радиосигнала.

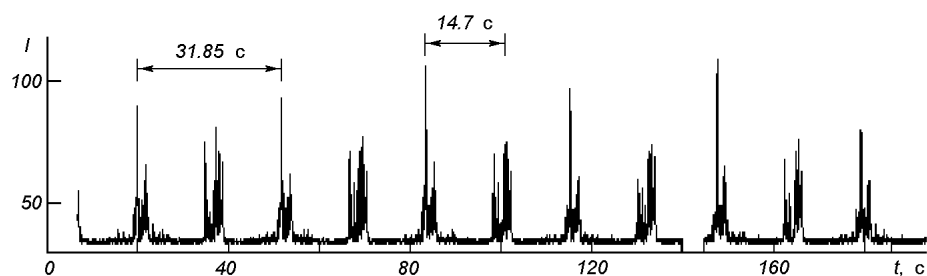


Рис. 4. Кривая изменения мощности отраженного радиосигнала для объекта № 95099, полученная 03.10.04 г в Медвежьих Озерах (Подмосковье). Время накопления 0.016 с. P1 = 31.85 с, P2 = 14.7 с.

Небольшие различия в периодах в оптическом и радиодиапазоне можно объяснить разным временем накопления сигнала и применением разных математических программ для определения периода. Следует также учитывать различие физической природы отраженного радиосигнала и рассеянного света. Радиосигнал имеет резкие пики, которые могут быть вызваны повышенной отражательной способностью сигнала от деталей спутника при малом времени накопления, а в оптическом диапазоне преобладает рассеянный свет от всей поверхности спутника. При локации могла сказываться и скважность наблюдений, а она может исказить полученные частоты.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для дальнейшего развития наблюдений высокоорбитальных КО в ОАО, имеется комплекс технических и информационно-программных средств.

Комплекс технических средств:

- телескоп с апертурой главного зеркала 30-см для позиционных наблюдений с проникающей способностью до  $15^m$  на ТВ-трубке ЛИ-804; 50-см телескоп системы Кассегрена для фотометрии с возможностью регистрации излучения КО до  $13.5^m$ ;
- изготовлена аппаратура для службы времени с погрешностью фиксации момента наблюдения менее 0.01 с;
- заканчивается модернизация главного 60-см зеркала системы Ричи-Кретьена. После модернизации расчетная проникающая способность  $16^m$  при экспозиции 0.04 с и  $16.5^m$  при экспозиции 0.16 с. При увеличении времени накопления до нескольких секунд и применении охлаждения фотокатода ТВ-трубки до  $0^\circ\text{C}$  реально повышение проникающей способности до  $17^m$  [1].

Информационно-программные средства:

- внешние ошибки положений, по оценке ИПМ им. Келдыша, имеют величину  $\pm 5''$  (или 1-2 пкл), что в 10 раз меньше диаграммы направленности радиотелескопа РТ-70 ( $45''$  на высоте 36 000 км).
- на основе программного обеспечения, разработанного А. С. Сочилиной, начаты вычисления круговых и эллиптических орбит КО;
- с 2003 г. в ОАО создается зональный каталог геостационарных объектов на основе позиционной, фотометрической и иной информации. На данный момент каталог содержит информацию по 200 объектам.

Авторы благодарны В. В. Прокофьевой за обсуждение работы и полезные замечания.

1. Абраменко А. Н., Агапов Е. С., Анисимов В. Ф. и др. Телевизионная астрономия / Под ред. В. Б. Никонова. — М.: Наука, 1984.—С. 92—96.

2. *Агапов В. М., Социлина А. С., Сухов П. П. и др.* Координированные оптические наблюдения околоземных космических объектов в поддержку сеансов РСДБ-локации // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга.—2004.—75.—С. 219.
3. *Назаренко А. И.* Моделирование техногенного загрязнения околоземного космического пространства. Краткий обзор решаемых задач и применяемых методов // Околоземная астрономия XXI века. — Звенигород: ИНАСАН, 2001.—С. 80—92.
4. *Рыхлова Л. В.* Засоренность околоземного пространства объектами техногенного происхождения // Околоземная астрономия-2003: Сб. тр. — М.: ИНАСАН, 2003.—Т. 2.—С. 11—19.
5. *Социлина А. С., Вершков А. Н., Григорьев К. В., Киладзе Р. И.* Моделирование взрывов на геостационарной орбите и анализ орбитальных данных // Околоземная астрономия XXI века. — Звенигород: ИНАСАН, 2001.—С. 107—117.
6. *Сухов П. П., Стрыгин Н. З., Карпенко Г. Ф., Корнийчук Л. В.* О внутрикадровой обработке изображений участков звездного неба при ТВ-наблюдениях ИСЗ // Околоземная астрономия-2003: Сб. тр. — М.: ИНАСАН, 2003.—Т. 2.—С. 193—198.
7. *Hernandez C., Jehn R.* Classification of geosynchronous objects. — Darmstadt: ESA/ESOC, 2004.—Issue 6.—110 p.
8. *Schildknecht T., Musci R., Ploner M., et al.* Optical observation of space debris in the geostationary ring // Proc. Third European Conf. on Space Debris, 19–21 March, Darmstadt, Germany, 2001. — Darmstadt: ESOC, 2001.—P. 89—93.

Поступила в редакцию 18.12.04