

УДК 521.2, 521.3, 521.61

Каталог геоцентрических векторов состояния геосинхронных космических объектов НИИ “НАО”

И.В. Кара¹, Е.С. Козырев², Е.С. Сибирякова², А.В. Шульга²

¹ Одесская астрономическая обсерватория, 65014, Одесса, ул. Маразлиевская, 1в
lionkiv@gmail.com

² НИИ “Николаевская астрономическая обсерватория”, 54030, Николаев, ул. Обсерваторная, 1
evg_sibir@mail.ru

Поступила в редакцию 04 января 2011 г.

Аннотация. В статье представлены результаты наблюдений геосинхронных космических объектов за 2008–2010 гг. с оценкой погрешности наблюдательных данных. В статье кратко описан процесс расчета векторов состояния, приведены погрешности вычисления эфемерид, а также результаты сравнения каталога НИИ “НАО” с каталогом NORAD.

NAO CATALOGUE OF GEOCENTRIC STATE VECTORS OF GEOSYNCHRONOUS OBJECTS, by *I. V. Kara, Ye. S. Kozryev, Ye. S. Sybiryakova, A. V. Shulga*. Results of observations of geosynchronous objects for the period 2008–2010 years are presented in the paper. Observation data error estimation is given. The process of object state vector calculation is briefly described. Ephemerides calculation errors are given. Results of comparison of NAO and NORAD orbit catalogues are presented.

Ключевые слова: геосинхронные космические объекты, вектор состояния, каталог, эфемериды

1 Введение

На январь 2010 г. на геосинхронных орбитах по данным каталога Европейского космического агентства “Классификация геосинхронных объектов” (Чок, Йен, 2010) зарегистрировано 1238 космических объектов (КО), из которых около 68 % является космическим мусором (КМ). По мере увеличения количества объектов КМ в геостационарной области становятся неизбежными их взаимные столкновения, могущие привести к лавинообразному увеличению количества малоразмерного КМ, который сложно обнаружить. Такое развитие событий со временем сделает невозможным использование геосинхронных орбит ввиду высокого риска столкновения активного искусственного спутника земли (ИСЗ) с объектом КМ. Именно из-за уникальности и важности геостационарной области необходимо постоянное сопровождение каталогизированных объектов КМ и поиск некаталогизированных. Для решения этой задачи необходимо создание и постоянное обновление каталога геоцентрических векторов состояния объектов КМ. На основе такого каталога возможна регулярная и оперативная оценка риска столкновений активных ИСЗ с КМ.

Представляемый в данной статье каталог геоцентрических векторов состояния сформирован на основе наблюдательных данных, полученных в НИИ “НАО” в 2008–2010 гг. на телескопе САК (D = 300 мм, F = 1500 мм) комбинированным методом ПЗС-наблюдений (Козырев и др., 2008). Для

вычисления параметров орбиты наблюдаемых объектов и эфемерид использовалось программно-математическое обеспечение (ПМО), разработанное сотрудниками Одесской и Николаевской астрономических обсерваторий.

2 Вычисление опорного вектора состояния и элементов орбит КО

В данной работе для вычисления вектора состояния и эфемерид КО применяется численная модель движения, разработанная в Одесской астрономической обсерватории. Вектор состояния КО включает компоненты геоцентрических декартовых координат и компоненты скорости в системе ICRS на эпоху J2000. Модель движения учитывает следующие возмущения:

- возмущение от гeопотенциала (разложение до 15 порядка);
- возмущения от Луны и Солнца (где положения рассчитываются с применением численной модели DE/LE 405);
- возмущение от приливов в твердой коре (модель Лява в виде добавочных коэффициентов ко второй и третьей зональной гармонике гeопотенциала);
- возмущение от светового давления.

Дифференциальные уравнения движения решаются классическим численным методом Эверхарта 15 порядка с автокоррекцией шага интегрирования, обеспечивая точность интегрирования на уровне 10^{-10} (Базей, Кара, 2009).

Исходными данными для расчета вектора состояния являются наблюдения – топоцентрические угловые координаты КО, полученные в результате оптических наблюдений. Наблюдения группируются в ряды, объединяющие данные, полученные на одном витке орбиты КО. Расчет вектора состояния осуществляется в два этапа: вычисление первичного вектора и уточнение. Первичный вектор вычисляется по одному опорному ряду наблюдений с использованием аналитического метода Лапласа (Эскобал, 1970). Уточнение вектора осуществляется по нескольким рядам наблюдений, что минимизирует погрешности его определения. Процесс уточнения итерационный, проводится методом дифференциальных поправок (Эскобал, 1970) до минимальной разности между полученными из наблюдений и вычисленными угловыми координатами КО (О–С). Остаточные (О–С) позволяют оценить качество наблюдений, а также оценить принадлежность измерений к одному КО.

Математическая модель движения КО реализована в программно-математическом обеспечении (ПМО) обработки наблюдений. Результаты работы ПМО-обработки наблюдений:

- вектор состояния КО, элементы орбиты;
- остаточные (О–С), полученные при расчете вектора состояния;
- эфемериды КО (целеуказания), а также (О–С) между наблюдениями, не участвовавшими в вычислении вектора состояния, и эфемеридой.

Элементы орбиты, вычисленные из вектора состояния, используются для сравнения с другими каталогами. Остаточные (О–С), полученные при определении вектора состояния, позволяют оценить случайную ошибку наблюдений, а также принадлежность измерений к одному КО. (О–С) между наблюдениями, не участвовавшими в вычислении вектора состояния, и эфемеридой позволяют оценить точность прогнозирования движения КО. Эфемериды КО используются для проведения новых наблюдений КО с целью уточнения вектора состояния.

3 Результаты наблюдений геосинхронных КО

С учетом зоны обзора и производительности телескопа САК был сформирован список наблюдаемых КО, в который вошло 73 геосинхронных КО со скоростью дрейфа по долготе менее $20^\circ/\text{день}$. Зона обзора телескопа САК по часовому углу составляет от -30° до $+60^\circ$ от меридиана, по склонению от -25° до $+70^\circ$. Производительность в среднем составляет 25 КО за ночь. Из каталога Европейского космического агентства “Классификация геосинхронных объектов” (Чок, Йен, 2010) в список наблюдаемых КО были отобраны:

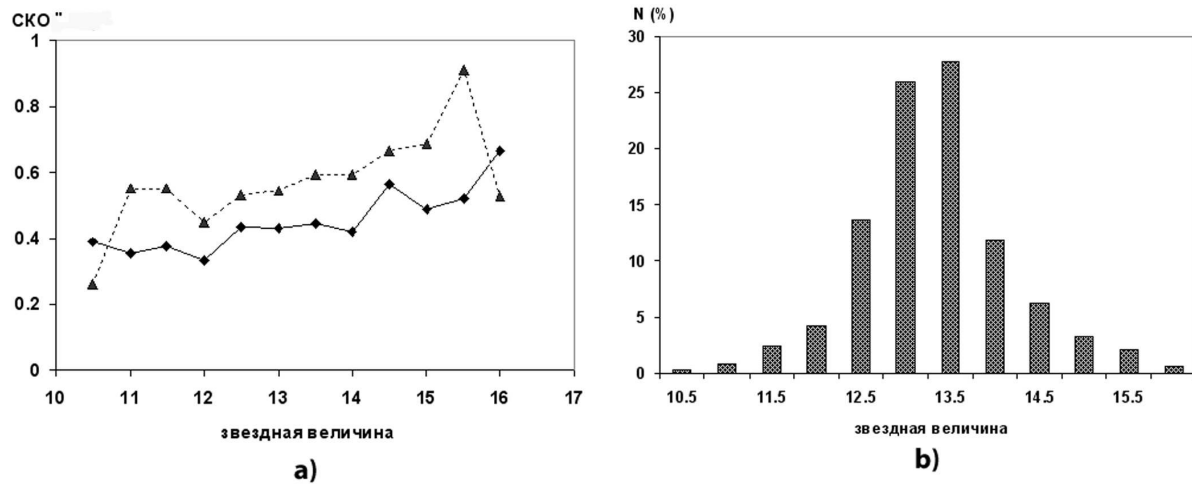


Рис. 1. а) зависимость внутренней точности вычислений геосинхронных координат КО от звездной величины; б) распределение КО по звездной величине, где N – количество положений объектов в процентах

- 38 объектов класса D (объекты на дрейфующих орбитах);
- 33 объекта класса L1 (объекты, движущиеся в режиме либрации относительно восточной устойчивой точки с долготой 75° в. д.);
- 2 объекта класса C2 (объекты с контролируемой долготой подспутниковой точки и наклоном более 0.3°).

Наблюдения проводились на телескопе САК с использованием предварительно рассчитанных эфемерид. Эфемериды формировались по элементам орбит каталога NORAD. Телескоп САК оснащен объективом системы Максудова ($D = 300$ мм, $F = 1500$ мм), ПЗС-камерой Alta U9000 (3056×3056 пикселей, 12×12 мк), установленной на поворотной платформе. Поле зрения телескопа – $83.2' \times 83.2'$, масштаб без бинирования – $1.63''/\text{пиксель}$. ПЗС-камера поддерживает два режима работы – режим накопления заряда и режим синхронного переноса заряда (РСПЗ) (time delay integration). Наблюдения проводились комбинированным методом с использованием поворотной платформы. Для записи опорных звезд использовался режим работы ПЗС-камеры – накопление. Для записи изображений геосинхронных КО – режим синхронного переноса заряда (time delay integration). Для редукации наблюдений применялась модифицированная модель редукации (Козырев и др., 2010).

По данным наблюдений за 2008–2010 гг. сформирован каталог 31883 положений 67 геосинхронных КО. Каталог представлен в виде текстового файла, который содержит название станции наблюдения, эпоху, на которую рассчитаны координаты, номер объекта в каталоге NORAD, дату (день, месяц, год), время (часы, минуты, секунды с точностью 4 знака после запятой), прямое восхождение (часы, минуты, секунды с точностью 4 знака после запятой), склонение (градусы, минуты, секунды с точностью 4 знака после запятой), внутреннюю точность вычислений, звездную величину.

Для оценки погрешности определения положений по наблюдениям, вошедшим в каталог, проведено вычисление (O–C) положений относительно вычисленной орбиты. (O–C) были сгруппированы по звездной величине КО, с шагом 0.5^m , после чего по данным каждой группы были получены SKO. Значение SKO положений КО находится в пределах от $\pm 0.33''$ до $\pm 0.66''$ по прямому восхождению и от $\pm 0.26''$ до $\pm 0.91''$ по склонению (рис. 1а), что соответствует внутренней точности отождествления опорных звезд с каталогом UCAC2. По звездной величине основная масса полученных из наблюдений КО находится в пределах 12.5^m – 14^m (рис. 1б).

Таблица 1. Среднеквадратическая ошибка наблюдений геосинхронных КО

Организация	Телескоп	СКО(″)
Терскольский филиал ИНАСАН (Андреев и др., 2008)	Цейс 2000	0.5
Терскольский филиал ИНАСАН (Сергеев и др., 2009)	Цейс 2000	0.3–0.4
Гиссарская обсерватория Таджикистан (Гулямов, Миникулов, 2008)	ВАУ	менее 2
Уральский государственный университет (Захарова и др., 2008)	SBG	1.5–3.5
Уральский государственный университет (Захарова и др., 2008)	АЗТ 3	менее 1
НИИ “НАО”	САК	0.26–0.91

В таблице 1 приведены значения СКО определения положений геосинхронных КО для разных наблюдательных станций. В КраО по результатам наблюдений на телескопе ЗТШ в работе (Бирюков и др., 2008) получены значения внутренней точности оценки положения лучше $0.5''$.

Исходя из приведенных данных, точность наблюдений на телескопе САК НИИ “НАО” соответствует лучшему уровню точности для подобных наблюдений.

4 Каталог геоцентрических векторов состояния геосинхронных КО

По данным каталога положений вычислены векторы состояний и элементы орбит КО. По результатам вычислений сформирован каталог геоцентрических векторов состояния геосинхронных КО, в него включены 179 орбит 65 геосинхронных КО. Формат каталога представлен в таблице 2, где № – номер в каталоге Norad; X, Y, Z – прямоугольные координаты КО в геоцентрической системе координат на эпоху J2000.0, выраженные в метрах; Vx, Vy, Vz – выраженные в метрах в секунду компоненты скорости КО.

Таблица 2. Формат каталога геоцентрических векторов состояния

№	MJD	X[м]	Y[м]	Z[м]	Vx[м/с]	Vy[м/с]	Vz[м/с]
7392	54924.00096	-20502272.0	-35713381.6	-9265188.3	2670.9	-1516.2	-60.6

Анализ качества векторов состояния может осуществляться в сравнении с другими каталогами параметров орбит, а также при оценке точности прогноза эфемерид. В данной работе ошибка прогноза определялась как разность между положениями, полученными из наблюдений и эфемеридами, рассчитанными по вектору состояния. Такое сравнение характеризует не только качество вычисленного вектора состояния, но и качество применяемой численной модели.

В процессе анализа данных сравнения была выявлена зависимость погрешности вычисления вектора состояния и, как следствие, эфемерид от количества витков наблюдений, принимавших участие в расчете вектора состояния. Оценка погрешности вычислений проводилась по наблюдениям КО 7392. По данным наблюдений в первом случае был вычислен вектор состояния с использованием наблюдений на одном витке, во втором случае – на двух витках. По этим векторам состояний были рассчитаны эфемериды на интервал времени до 4-х суток и получены разности между наблюдениями и эфемеридой (О–С). В первом случае (О–С) по прямому восхождению достигло $\pm 100''$,

по склонению $\pm 20''$. Во втором случае (О–С) по прямому восхождению не превышает $\pm 3''$, по склонению $\pm 5''$. Т. е. векторы состояний, вычисленные по данным наблюдений на одном витке, не могут использоваться при долгосрочном прогнозе, однако в случае поисковых наблюдений могут применяться для расчета эфемерид на интервал в 1–4 суток. Учитывая это, вычисление векторов состояний вошедших в каталог осуществлялось с применением наблюдений на 2-х и более витках наблюдений.

Таблица 3. Точность прогноза в зависимости от количества витков

Средняя разность эпох (сутки)	Среднее (О–С)			
	2 витка		3 витка	
	ra''	dec''	ra''	dec''
7	-0.63	-0.02	-0.41	-0.11
39	-8.62	0.88	-6.79	0.68
53	-36.76	-3.03	-34.82	-2.87
749	-454.97	4.99	-1457.9	3.71

При сравнении наблюдений с эфемеридой, полученной из векторов состояний, рассчитанных из наблюдений на двух и трех витках КО, результаты существенно не менялись. В таблице 3 приведены результаты сравнения наблюдений с эфемеридой для КО 15181. Эфемериды рассчитывались на интервалы времени до двух лет. В таблице указаны разности эпох между эпохой наблюдения и эпохой вектора состояния, по которому вычислялись эфемериды.

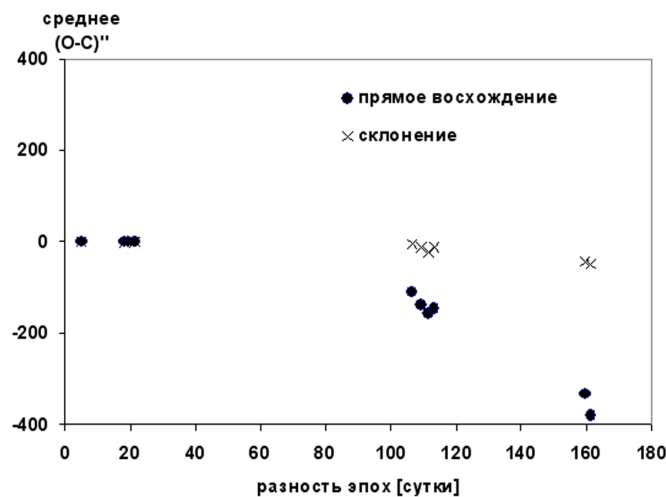


Рис. 2. Зависимость (О–С) от разности эпох для КО 7392

Также в данной работе исследовалась зависимость разности между наблюдениями и эфемеридой от интервала времени прогнозирования. На рис. 2 представлен график зависимости разности между данными наблюдений и эфемеридой с ростом интервала времени прогнозирования для КО 7392. Каждая точка на графике соответствует среднему значению (О–С) для ряда наблюдений, полученного на одном витке орбиты КО.

Из рис. 2 видно, что $(O-C)$ растет с ростом разности эпох. Причем по прямому восхождению величина $(O-C)$ в 7.7 раз выше, чем по склонению. Большое значение величины $(O-C)$ по прямому восхождению возможно обусловлено недостаточным учетом возмущающих факторов.

Также исследование зависимости разности между наблюдениями и эфемеридой от интервала времени прогнозирования было проведено для всех векторов состояния, вошедших в каталог. На рис. 3 приведена зависимость среднего $(O-C)$ от интервала времени прогнозирования. Каждая точка на графике соответствует ряду наблюдений на одном витке орбиты КО, что соответствует внутренней точности отождествления опорных звезд с каталогом UCAC2.

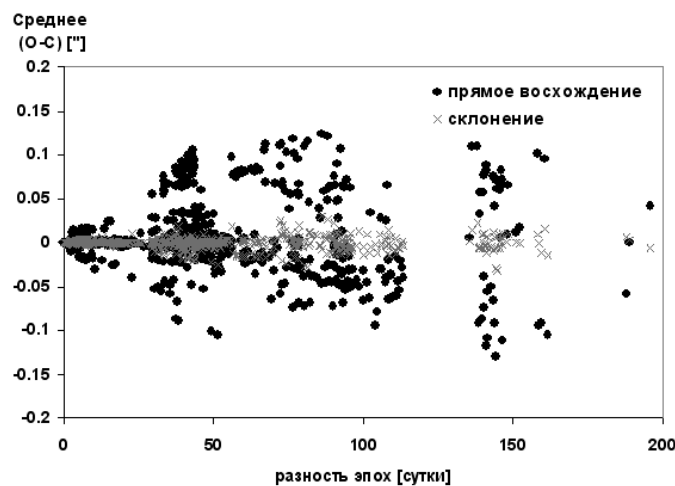


Рис. 3. Зависимость модуля среднего $(O-C)$ от разности эпох

Из рис. 3 видно, что погрешность вычисления эфемерид по прямому восхождению не превышает $\pm 0.15^\circ$, по склонению $\pm 0.05^\circ$. В работе Мусци и др. (2005) представлена теоретическая оценка погрешности эфемерид при прогнозе на 200 суток, которая составляет от 0° до 0.35° . При поле зрения телескопа САК в 1.3° такая величина погрешности позволяет проводить наблюдения КО, вошедших в каталог не чаще чем раз в 200 суток. Точность вычисления эфемерид, производительность телескопа САК и метеоусловия в г. Николаев позволяют обновлять векторы состояния 700 КО с периодичностью в полгода.

На интервале времени от 200 суток до 2-х лет погрешность вычисления эфемерид резко увеличивается по прямому восхождению. По прямому восхождению $(O-C)$ для 33 % орбит не превышает $\pm 0.2^\circ$, для 67 % орбит находится в пределах от $\pm 0.2^\circ$ до $\pm 1.2^\circ$. По склонению $(O-C)$ для 75 % орбит не превышает $\pm 0.05^\circ$, для 25 % находится в пределах от $\pm 0.05^\circ$ до $\pm 0.13^\circ$.

5 Выводы

1. Разработана численная модель движения КО и программно-математическое обеспечение обработки наблюдений, позволяющее вычислять вектор состояния КО, элементы орбиты, эфемериды, а также проводить оценку случайной ошибки наблюдений и точности прогноза.
2. Получено 31883 положения 67 геосинхронных КО в экваториальной системе координат, которые оформлены в виде каталога положений на эпоху J2000. Среднеквадратичная ошибка наблюдений КО 10–16 звездной величины составила от $\pm 0.33''$ до $\pm 0.66''$ по прямому восхождению и от $\pm 0.26''$ до $\pm 0.91''$ по склонению, что соответствует лучшему мировому уровню точности для наблюдений геосинхронных КО.

3. С использованием полученных наблюдаемых положений проведено вычисление 179 векторов состояния 67 геосинхронных КО. По полученным данным сформирован каталог векторов состояния геосинхронных КО.
4. С использованием полученных векторов состояния рассчитаны эфемериды на последующие эпохи наблюдений и оценена погрешность вычисления эфемерид. Погрешность вычисления эфемерид на интервале времени до 200 суток не превышает 0.15° по прямому восхождению и 0.05° по склонению, что соответствует мировому уровню точности моделирования движения геосинхронных КО.

Литература

- Андреев М.В., Бахтигараев Н.С., Крючков С.В. и др. // Радиотехн. тетр. 2008. №. 36. С. 16.
- Базей А.А., Кара И.В. // Вісник Астрон. школи. 2009. Т. 6. №. 2. С. 155.
- Бирюков В.В., Румянцев В.В., Борисов Г.В. // Радиотехн. тетр. 2008. №. 36. С. 28.
- Гулямов М.И., Миникулов Н.Х. // Радиотехн. тетр. 2008. №. 36. С. 32.
- Захарова П.Е., Кузнецов Э.Д., Гламазда Д.В. и др. // Международная конференция “Околоземная астрономия – 2007”. Нальчик. 2008. С. 314.
- Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Международная конференция “Околоземная астрономия – 2007”. Нальчик. 2008. С. 288.
- Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16. С. 71.
- Мусци и др. (Musci R., Schildknecht T., Flohrer T., Beutler G.) // Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris. ESA: ESOC. 2005. P. 601.
- Сергеев А.В., Тарадий В.К., Бахтигараев Н.С. и др. // Международная конференция “Околоземная астрономия 2009”. Москва. 2009. С. 105.
- Чок, Йен (Choc R., Jehn R.) // Classification of geosynchronous objects. 2010. №. 12. P. 127.
- Эскобал П. // Методы определения орбит. М: Мир. 1970. С. 472.