

УДК 521.9+523.44+519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ АСТЕРОИДА (367943) 2012 DA14 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБЛЮДЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В АО УРФУ¹

Галушина Т. Ю.², Кайзер Г. Т.³, Скрипниченко П. В.⁴

THE STUDY OF THE ASTEROID (367943) 2012 DA14 PROBABILISTIC ORBITAL EVOLUTION WITH THE OBSERVATIONS CARRIED OUT IN AO URFU

Galushina T. Yu, Kaiser G. T., Skripnichenko P. V.

The observation series of asteroid (367943) 2012 DA14 has been obtained in astronomical observatory of Ural Federal University at 17 February 2013. SBG-telescope has been used for these observations. With these observations the orbit has been improved and the probabilistic orbital evolution has been investigated.

Keywords: asteroids, CCD-observations, observation accuracy.

В истории наблюдений малых тел Солнечной системы выделяются несколько событий, так или иначе оказавших серьезное влияние на мировое научное сообщество и на общество в целом. Примером такого события может служить открытие астероида 99942 Апофис. Исследование элементов орбиты и физических свойств Апофиса, а также вычисление относительно высокой вероятности столкновения астероида с Землей предопределило необходимость серьезного научного подхода к проблеме астероидно-кометной опасности.

Еще одним важным событием было прохождение астероида (367943) 2012 DA14 вблизи Земли 15 февраля 2013 г. АСЗ (367943) 2012 DA14 был открыт 23 февраля 2012 года и до сближения наблюдался на довольно большой дуге, что позволило заблаговременно и достаточно точно оценить вероятность и характеристики его сближения с Землей.

С точки зрения организации наблюдений это событие оказалось, как минимум, незау-

рядным. За несколько ночей до прохождения минимального расстояния от Земли, в момент сближения, а также в течение нескольких ночей после сближения, во многих обсерваториях были проведены позиционные и фотометрические наблюдения этого астероида, собрано огромное количество информации.

В астрономической обсерватории Уральского федерального университета также выполнялись позиционные наблюдения астероида (367943) 2012 DA14. Полученные результаты наряду с результатами наблюдений других обсерваторий были использованы при небесно-механических исследованиях особенностей движения этого объекта.

1. Наблюдения АСЗ (367943) 2012 DA14 в АО УрФУ

В Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета наблюдения астероида (367943) 2012 DA14 проводились на телескопе СБГ (Шмидт,

¹Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ № 8.4859.2011 и при частичной финансовой поддержке в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007–2013 годы (ГК № 14.518.11.7064).

²Галушина Татьяна Юрьевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета; e-mail: volna@sibmail.com.

³Кайзер Галина Тимофеевна, канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией астрометрии Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета; e-mail: gal-kai@yandex.ru.

⁴Скрипниченко Павел Вадимович, аспирант кафедры астрономии и геодезии института естественных наук Уральского федерального университета; e-mail: savl-silverheart@rambler.ru.

$D = 420$ мм, $F = 780$ мм, CCD Apogee Alta U32) 17 февраля 2013 г. По оценкам, полученным из наблюдений, блеск астероида в этот период был равен примерно $16,5^m$.

На снимках, полученных в астрорежиме, с экспозициями 60 с, изображения астероида получились немного вытянутыми, что, очевидным образом, несколько снизило точность определения экваториальных координат объекта.

Астрометрическая обработка выполнялась с использованием программного комплекса Izmcdd [1] и применением традиционной методики обработки ПЗС-снимков, принятой в АО УрФУ. На 7-часовом интервале времени было получено 28 положений. Качество наблюдений анализировалось путем вычисления разностей координат (О–С) в моменты наблюдений и среднеквадратического отклонения одной разности (О–С) от среднего значения (О–С). Решение выполнялось в ПС ЭПОС [2], за начальные были приняты элементы орбиты (367943) 2012 DA14 на эпоху 2456400.5 из базы данных MPC. После исключения результатов наблюдений с большими значениями (О–С), которые статистическим методом классифицировались как промахи, осталось 21 наблюдение. Их среднеквадратическое отклонение одной разности координат (О–С) от ее среднего значения по прямому восхождению $\sigma_\alpha \cos \delta$ равно $0,51''$, по склонению $\sigma_\delta - 0,47''$. Эти наблюдения были переданы в международный центр малых планет (MPC), опубликованы в его циркуляре [3] и использовались в нашем дальнейшем исследовании.

Наблюдения 17 февраля проводились по эфемеридам, вычисленным на сайте MPC. Кроме того вычислялись эфемериды с использованием ПС ЭПОС и каталога элементов Е. Боуэлла [4]. Следует отметить, что при сравнении эфемерид, полученных по элементам из каталогов Е. Боуэлла и MPCORB.DAT, оказалось, что они существенно различаются между собой. Аналогичное расхождение наблюдалось и при сравнении (О–С). Одна из причин заключается в том, что элементы в каталоге Е. Боуэлла обновляются, по-видимому, не столь оперативно, как в каталоге MPC. Это необходимо учитывать при организации наблюдений тесных сближений астероидов с Землей. Другой причиной могут быть проблемы, связанные с улучшением орбит, чему посвящен следующий раздел.

2. Улучшение орбиты AC3 (367943) 2012 DA14

В базе данных центра малых планет представлено 1070 позиционных наблюдений астероида (по состоянию на октябрь 2013 года), из них 191 наблюдение получено во время первого появления (23.02.2012–12.05.2012) и 879 — во время второго (9.01.2013–21.02.2013). Нами была предпринята попытка улучшить орбиту данного объекта по всем имеющимся наблюдениям. В модель сил включено влияние больших планет, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатие Земли (вторая зональная гармоника), светового давления и релятивистских эффектов от Солнца. В качестве начальной эпохи выбран момент наилучшей обусловленности, который совпал с датой тесного сближения 15 февраля 2013 г.

Следует отметить, что процесс улучшения классическим методом Гаусса-Ньютона при использовании начальных данных, полученных по первому появлению, расходится. Одним из путей решения этой проблемы является использование демпфирующих множителей. В нашем случае при введении демпфирующего множителя $h = 0,1$ процесс улучшения сошелся примерно за 150 итераций.

Результаты улучшения представлены на рис. 1, который демонстрирует большие невязки наблюдений, полученных во время тесного сближения с Землей. Для объяснения этого результата была предпринята попытка уточнения модели сил, в частности учета третьей зональной гармоник. Однако данное исследование показало, что используемая модель является достаточной для изучения движения рассматриваемого объекта. Можно предположить, что большие невязки объясняются ошибками наблюдений, что связано с быстрым движением объекта по небесной сфере. Кроме того, необходимо отметить, что одинаковые разности вычисленных и наблюдаемых положений в пространстве могут давать разные значения в проекции на небесную сферу в зависимости от расстояния до объекта. Поэтому, несмотря на большие значения (О–С), наблюдения с небольшим топоцентрическим расстоянием в момент наблюдения ценны, и их необходимо учитывать при улучшении. Поэтому нами было принято решение включить их в процесс улучшения с использованием весовых коэффициентов.

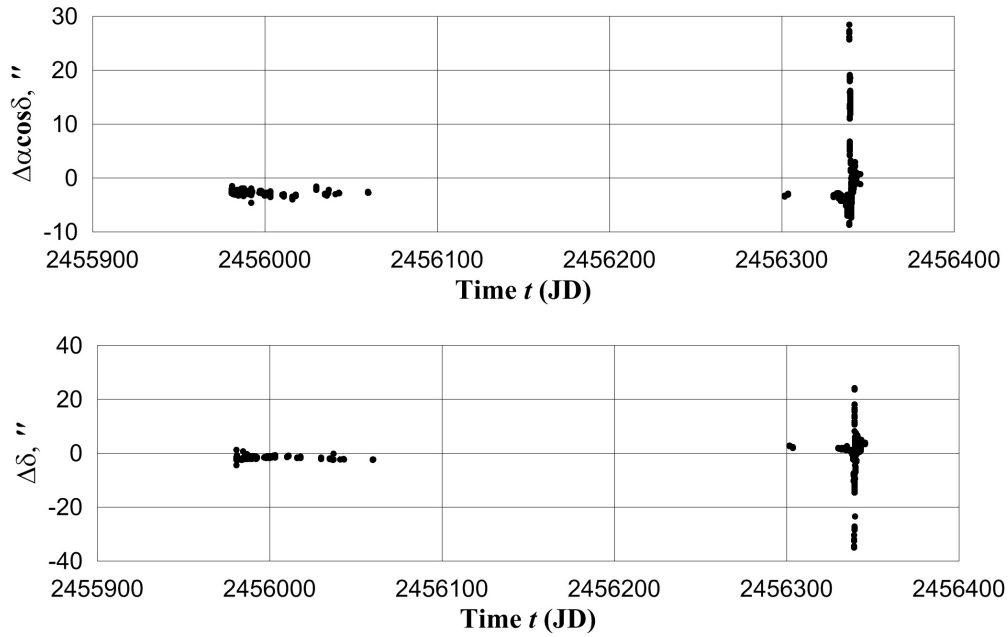


Рис. 1. Невязки наблюдений

В ходе исследования рассмотрены следующие варианты задания весов:

- учет всех наблюдений с единичным весом $p_i = 1$;
- исключение по правилу трех сигма

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{если } (o - c)_i < 3\sigma, \\ 0, & \text{если } (o - c)_i > 3\sigma; \end{cases}$$

- веса, обратные квадрату невязок наблюдений

$$p_i = 1/\Phi_i,$$

$$\Phi_i = ((o - c)_{i\alpha} \cos \delta)^2 + (o - c)_{i\delta}^2;$$

- веса, обратные квадрату невязок наблюдений, задаваемые не каждому наблюдению, а группе

$$p_j = \frac{2N}{\sum_{i=1}^N \Phi_i},$$

где N — число наблюдений в группе. При этом в общем случае группой считалась серия наблюдений, полученная в одной обсерватории за одну ночь;

- веса, обратные квадрату невязок наблюдений, умноженному на квадрат расстояния до объекта в момент наблюдений

$$p_i = \frac{1}{r_i^2 \Phi_i}.$$

Последний вариант позволяет учесть упомянутый выше факт зависимости величины невязок от топоцентрического расстояния до объекта, задавая больший вес наблюдениям, выполненным во время сближения. Во всех случаях предварительно было проведено улучшение по всем наблюдениям, веса назначались на основе полученных невязок. Для анализа результатов улучшения с использованием различных вариантов назначения весов применялись два метода — представление наблюдений, не участвовавших в улучшении, и оценка отношения объемов доверительных гиперэллипсоидов. Результаты данного исследования представлены в табл. 1 и на рис. 2.

В первом эксперименте исключены из процесса улучшения 90 наблюдений 18, 19 и 21 февраля, затем был осуществлен прогноз на моменты этих наблюдений, результаты представлены во втором столбце табл. 1. Результаты показали, что исключение наблюдений по правилу трех сигм слегка ухудшает прогноз, что говорит о том, что наблюдения в момент тесного сближения отбрасывать нельзя. Различные способы назначения весов показали близкие результаты. Использование весов, обратных квадратам невязок, представляет наилучший прогноз. Назначение весов по группам наблюдений дает близкий результат, однако процедура выделения групп значительно более трудоемкая.

Таблица 1. Сравнение результатов улучшения орбит с использованием различных весов

Метод задания весов	$\sigma, ''$	V/V_0
1. Все наблюдения	2,35	1
2. Исключение по 3 сигма	2,62	0,910
3. Веса, обратные квадратам невязок	1,90	$3,5 \cdot 10^{-3}$
4. Веса по группам	1,91	$4,2 \cdot 10^{-3}$
5. Веса с учетом расстояния до объекта	1,99	$2,8 \cdot 10^{-3}$

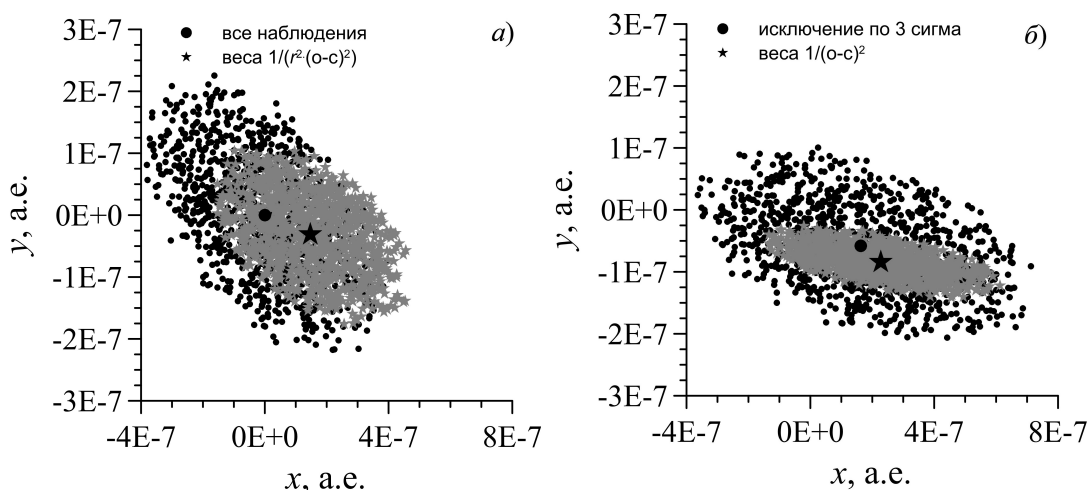


Рис. 2. Проекция начальных доверительных областей на плоскость экватора

Прежде чем приступить к построению начальной доверительной области, нами было проведено исследование нелинейности задачи оценивания начальных параметров. Нами получено, что коэффициент нелинейности в данном случае близок к критическому значению [5], поэтому в работе рассматривались линейные и нелинейные способы построения начальных доверительных областей. В качестве нелинейного метода использовался метод возмущенных оценок [6]. Результаты исследования показали, что области, построенные разными методами близки, поэтому для дальнейших расчетов использовались области, полученные линейным методом.

Далее в каждом из рассматриваемых случаев линейным методом на основе ковариационной матрицы были построены начальные доверительные области, на границах которых с помощью датчика случайных чисел выбрано 1000 тестовых частиц. На рис. 2 представлены проекции данных областей на плоскость экватора. Область, полученная с использованием весов по группам, практически совпала с областью, полученной с весами, обратными квадратам невязок, поэтому на графиках приведена только первая область.

Как показано в работе [7] для оценки отношения объемов доверительных областей может использоваться определитель ковариационной матрицы. В третьем столбце табл. 1 даны отношения объемов, вычисленные этим способом. Как видно из табл. 1 и рис. 2, использование весов значительно уменьшает объем доверительной области. Различные способы задания весов дают близкие значения объема, однако наименьший объем имеет область, построенная с использованием весов, обратных квадратам невязок наблюдений, умноженным на квадрат топосцентрического расстояния.

Таким образом, проведенные исследования показали, что назначение весов наблюдениям позволяет уменьшить объем доверительной области и улучшить прогноз. Различные способы задания весов в задаче улучшения орбиты дают близкие результаты. Ниже в качестве примера приведены результаты, полученные с использованием весов, обратных квадратам невязок наблюдений. Результаты улучшения приведены в табл. 2, где t_0 — начальная эпоха, $\mu(A)$ — число обусловленности матрицы нормальных уравнений, σ — среднеквадратическая ошибка представления наблюдений, Δr , Δv — среднеквадра-

Таблица 2. Результаты улучшения орбиты

Параметр	Значение	Параметр	Значение
t_0	15.02.2013	Δv , а.е./сут.	$1,4 \cdot 10^{-8}$
$\mu(A)$	$4,24 \cdot 10^5$	a , а.е.	1,00294741
σ , "	7,39	e	0,11033734
Δr , а.е.	$1,5 \cdot 10^{-8}$	i , °	10,57608874

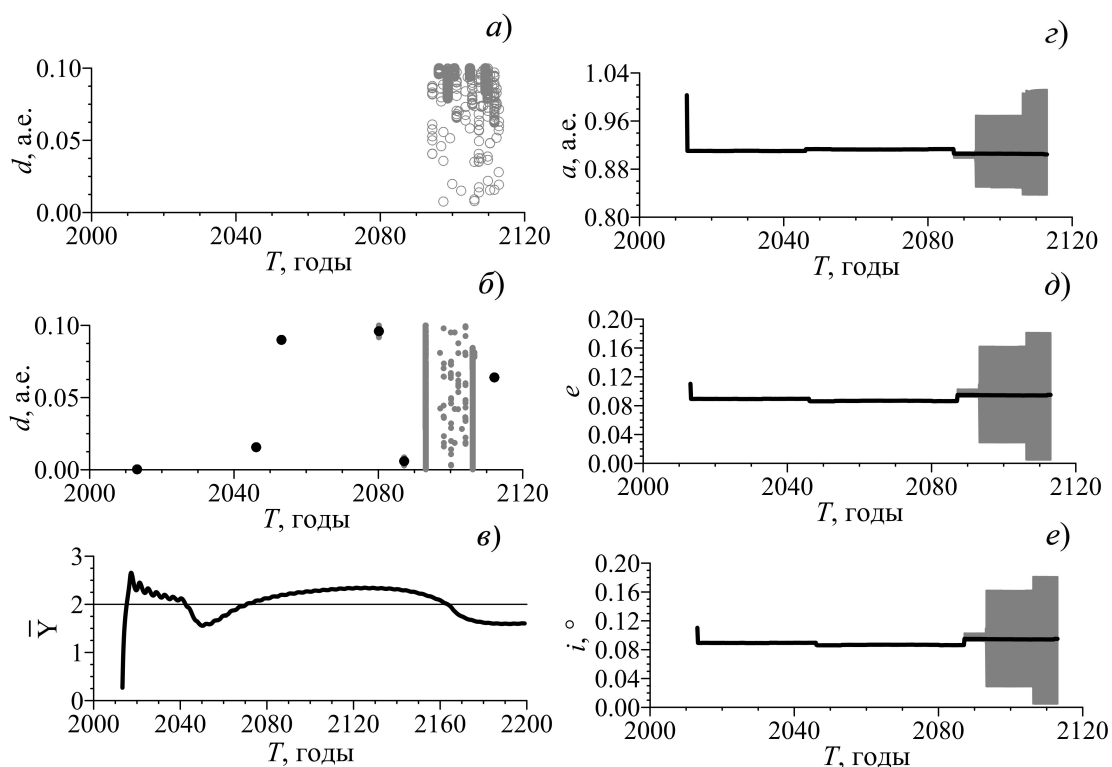


Рис. 3. Сближения с Венерой (а) и Землей (б), эволюция усредненного параметра MEGNO (в), большой полуоси (г), эксцентриситета (д) и наклона (е)

тическая ошибка вектора координат и скорости соответственно, a — большая полуось, e — эксцентриситет, i — наклонение плоскости орбиты к эклиптике. Из табл. 2 видно, что, несмотря на большое значение ошибки представления наблюдений, размеры начальной доверительной области относительно невелики.

3. Исследование вероятностной орбитальной эволюции

В пределах области начальных параметров на основе нормального распределения с помощью датчика случайных чисел было выбрано 100 тыс. тестовых частиц. Орбитальная эволюция этих частиц исследована на интервале времени порядка 100 лет. Результа-

ты исследования представлены на рис. 3 и в табл. 3.

На рис. 3 даны сближения с Венерой и Землей, эволюция усредненного параметра MEGNO [8] и элементов орбиты. На всех графиках номинальная орбита выделена черным цветом, ансамбль частиц показан серым фоном. В табл. 3 более подробно представлена информация о сближениях — на даты сближений номинального объекта с Землей дана информация о минимальном геоцентрическом расстоянии для номинальной орбиты и тестовых частиц. Сближения с Венерой были выявлены только для ансамбля частиц.

Из рис. 3 видно, что на всем интервале исследования параметр MEGNO колеблется около критического значения 2, что свидетельствует о прогнозируемости движения. Однако, несмотря на это под влиянием тесных сближений с Землей доверительная об-

Таблица 3. Сближения с Землей для номинальной орбиты и тестовых частиц

Дата	$d_{\min}$, а.е.	
	Номинальная орбита	100 тыс. частиц
15.02.2013	0,000228	0,000228
15.02.2046	0,015527	0,015418
19.02.2053	0,089947	0,088583
13.02.2080	0,095974	0,091789
16.02.2087	0,005882	0,002980
20.02.2112	0,063932	0,000029

ласть существенно увеличивается и в конце интервала исследования занимает практически всю орбиту.

Заключение

Астероид (367943) 2012 DA14 представляет собой интересный пример объекта, не только испытывавшего необычайно тесное сближение с Землей, но и активно наблюдавшегося в это время. Данное уникальное событие поставило перед специалистами целый ряд проблем, связанных как с наблюдениями таких сложных объектов, так и последующей обработкой и улучшением орбиты.

В данной работе приводятся результаты наблюдений, выполненных в АО УрФУ. Показано, что средняя ошибка этих наблюдений не больше средней ошибки наблюдений других обсерваторий. Продемонстрировано, что использование весов в процессе улучшения орбиты дает более достоверные результаты. Кроме того, приводятся результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции, которые показали, что доверительная область существенно увеличивается под влиянием тесных сближений с Землей. Полученные результаты могут использоваться при совершенствовании методик наблюдений и алгоритмов обработки результатов наблюдений опасных объектов.

Авторы выражают благодарность В. Н. Львову за помощь в анализе качества наших наблюдений, Ю. Д. Медведеву за цен-

ные замечания и А. М. Черницову за полезные консультации.

Литература

1. Izmailov I. S., Khovrichева M. L., Khovrichев M. Yu. et al. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory // *Astronomy Letters*. Vol. 36. Iss. 5. P. 349–354
2. Львов В. Н., Смежачева Р. И., Цежмейстер С. Д. ЭПОС – пакет программ для работ по изучению объектов Солнечной системы // Сб. тр. конф. «Околоземная астрономия XXI века», Звенигород, 21–25 мая 2001г. М.: Изд-во ГЕОС, 2001. С. 235–240.
3. Kaiser G., Wibe Y. Minor planet observations // *Minor Planet Circ.* 2013. №83282.
4. Bowell E., Muinonen K., Wasserman L. H. A public-domain asteroid data base. In *Asteroids, Comets, Meteors*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. 1994. P. 477–481.
5. Сюсина О. М., Черницов А. М., Тамаров В. А. Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 3. С. 209–222.
6. Авдошев В. А. Численное моделирование орбит. Томск. Изд-во НТЛ. 2010. 284 с.
7. Черницов А. М., Тамаров В. А., Дубас О. М. Влияние ошибок в задании весовых матриц на точность определения доверительных областей движения астероидов // *Физика*. 2007. № 12/2. С. 52–59.
8. Cincotta P. M., Girdano C. M., Simo C. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D*. 2003. Vol. 182. P. 151–178.

Ключевые слова: астероиды, ПЗС-наблюдения, точность наблюдений.

Статья поступила 11 декабря 2013 г.

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск

Коуровская астрономическая обсерватория К. А. Бархатовой Уральского федерального университета, Свердловская область, с. Слобода

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

© Галушина Т. Ю., Кайзер Г. Т., Скрипниченко П. В., 2013