

УДК 521.3

**А. В. Девяткин, Д. Л. Горшанов, В. Н. Львов,
С. Д. Цекмейстер, М. С. Чубей**

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук
Пулковское шоссе 65, Санкт-Петербург, Россия, 196140
adev@gao.spb.ru

Астрометрические базисные наблюдения тел Солнечной системы

Рассматриваются вопросы использования наземных и космических базисных наблюдений тел Солнечной системы. Базисные наблюдения дают возможность получать расстояния до наблюдаемых объектов, а в некоторых случаях и параметры их орбитального движения. Приводятся некоторые результаты базисных наблюдений АСЗ и модельные расчеты для случая наблюдений, выполненных с космических аппаратов.

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ БАЗИСНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, Девяткин А. В., Горшанов Д. Л., Львов В. Н., Цекмейстер С. Д., Чубей М. С. — Рассматриваются вопросы использования наземных и космических базисных наблюдений тел Солнечной системы. Базисные наблюдения дают возможность получать расстояния до наблюдаемых объектов, а в некоторых случаях и параметры их орбитального движения. Приводятся некоторые результаты базисных наблюдений АСЗ и модельные расчеты для случая наблюдений, выполненных с космических аппаратов.

ASTROMETRIC BASE-LINE OBSERVATIONS OF SOLAR SYSTEM BODIES, by Devyatkin A. V., Gorshanov D. L., L'vov V. N., Tsekmeister S. D., Chubey M. S. — The use of ground-based and space base-line observations is considered. The base-line observations allow determination of distance to the observable objects and (sometimes) parameters of their orbits. Some results of base-line observations of NEAs as well as results of simulations of spacecraft observations are presented.

Использование базисных астрономических наблюдений в прошлом. Базисные астрономические наблюдения — это одновременные наблюдения небесного тела из двух и более разнесенных в пространстве пунктов наблюдений с известными координатами. Такие наблюдения могут выполняться как с поверхности Земли, так и с космических аппаратов и других небесных тел. В большинстве случаев проводятся синхронные базисные наблюдения, которые предусматривают одновременное проведение наблюдений небесных тел в фиксированные моменты времени.

Базисные наблюдения имеют давнюю историю, и они привели к важным открытиям в астрономии. Первое определение размеров Земли как тела, имеющего форму шара, было получено александрийским астрономом и географом Эратосфеном Киренским в 240 г. до н. э. Используя значения зенитного расстояния Солнца в одно и то же время в двух пунктах наблюдений, он вычислил радиус земного шара, который оказался равным 6320 км (современное значение этой величины равно 6378 км).

Установление гелиоцентрической системы мира также требовало проведения базисных наблюдений. Обращение Земли вокруг Солнца приводит к параллаксу — смещению на небесной сфере более близких к Земле звезд относительно более далеких звезд. В. Струве (1837 г.), Ф. Бессель (1838 г.) и Т. Хендерсон (1838 г.) смогли, проведя высокоточные наблюдения, определить параллакс ближайших звезд. Определение параллакса звезд позволило определить масштаб нашей звездной системы.

Оценка масштаба Солнечной системы была связана с определением параллакса Солнца. Для определения параллакса использовались базисные наблюдения Марса, наблюдения прохождений внутренних планет по диску Солнца, а позднее и наблюдения астероидов.

Отметим также, что в метеорной астрономии базисные наблюдения играют очень важную роль. Наблюдения наземными приборами, разнесенными на десятки километров, позволяют построить трехмерную модель полета метеороида в земной атмосфере.

Объекты, сближающиеся с Землей. Уточнение прогноза движения потенциально опасных объектов является актуальной задачей. До сих пор самыми точными являются радарные наблюдения, с помощью которых можно получить топоцентрическое расстояние до объекта и его лучевую скорость. Ниже рассматриваются только более многочисленные оптические наблюдения малых тел Солнечной системы при сближении их с Землей.

При синхронных наблюдениях объекта из двух точек, положение которых известно, получают его наблюдателецентрические геоэкуаториальные прямые восхождения и склонения. Из комбинации этих величин можно получить гелиоцентрические прямоугольные координаты объекта [3]. Имея две пары синхронных наблюдений одного объекта, разделенных небольшим промежутком времени (порядка

5—10 мин), можно найти его прямоугольные координаты и скорости (а следовательно, и элементы оскулирующей орбиты) в средний момент наблюдений.

Астероид 2014 HQ124. В 2014 г. в Главную (Пулковскую) астрономическую обсерваторию Российской академии наук (ГАО РАН) поступило предложение из обсерватории Дрездена принять участие в синхронных наблюдениях астероида 2014 HQ124 с целью определения расстояний до него триангуляционным методом во время его сближения с Землей 10 июня 2014 г. Предполагалось, что в этой международной наблюдательной кампании примут участие шесть обсерваторий. Но из-за погодных условий провести наблюдения удалось лишь на Николаевской астрономической обсерватории, Киевской кометной станции и Горной астрономической станции ГАО РАН (телескоп МТМ-500М). Максимальная база составила около 1200 км. Расстояние до астероида в период наблюдений составляло около 3.5 млн км. Предварительные результаты этих наблюдений были опубликованы в работе [4].

В этой кампании была сделана попытка провести строго одновременные наблюдения. Для этого были назначены моменты времени, в которые нужно было делать экспозиции на всех обсерваториях. Помимо этого, снималось множество кадров и в другие произвольные моменты. Например, на телескопе МТМ-500М в течение четырех с половиной часов было получено 84 ПЗС-кадра с астероидом 2014 HQ124, из которых 18 сняты в назначенные моменты. Однако, как и предполагалось из опыта обычных наблюдений, анализ результатов показал, что строго одновременные наблюдения не обязательны, поскольку точки на видимой траектории астероида, построенной с помощью регрессии по плотной и достаточно длинной серии кадров, имеют лучшую точность, чем измерения по отдельным кадрам. Поэтому достаточно снимать плотные серии кадров в один и тот же промежуток времени на каждой обсерватории.

Главный вывод этой первой кампании состоит в том, что, получая одновременно информацию о положении астероида на небесной сфере и расстоянии до него (без использования радарных наблюдений), можно по наблюдениям одной ночи построить орбиту с точностью, сравнимой с точностью определения орбиты с помощью классических методов на более длительном интервале времени.

Кроме того, в устном варианте доклада [4] обсуждалась возможность проведения триангуляционных наблюдений с базой, состоящей из космического аппарата GAIA и наземных обсерваторий.

Астероид 2004 VL86. Принимая во внимание успех кампании по триангуляционным наблюдениям астероида 2014 HQ124, сотрудники ГАО РАН приняли решение организовать в 2015 г. подобную же кампанию по квазисинхронным наблюдениям астероида (357439) 2004 VL86 при его сближении с Землей 27 января 2015 г. Для этого мы постарались привлечь обсерватории, как можно более разнесенные по

земной поверхности. В наблюдениях приняли участие следующие обсерватории (с востока на запад):

Уссурийская астрофизическая обсерватория Дальневосточного отделения РАН,

Саянская солнечная обсерватория Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (п. Монды),

Тянь-Шанская астрономическая обсерватория АО «Национальный центр космических исследований и технологий НАК Республики Казахстан»,

Горная астрономическая станция Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН близ Кисловодска (телескоп МТМ-500М),

Астрофизическая обсерватория Кубанского государственного университета (г. Краснодар),

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (телескоп ЗА-320М),

Астрономическая обсерватория университета Валенсии (Испания).

Наблюдения продолжались с 27 января по 11 февраля 2015 г. Часть интервалов наблюдений на различных обсерваториях пересекаются. Максимальная база наблюдений составила около 7 тыс. км (Краснодар и Кисловодск — Уссурийск).

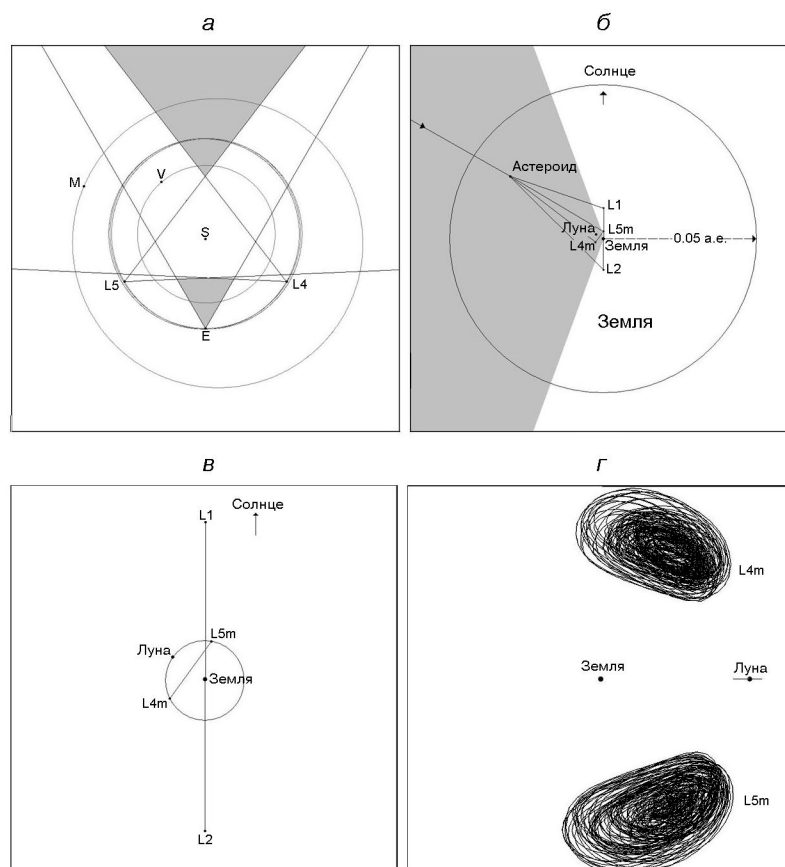
Топоцентрические величины прямого восхождения и склонения объекта на небольшом интервале времени можно аппроксимировать полиномом невысокой степени. Эти полиномы воспроизводят указанные величины с точностью, характерной для наблюдений на данной обсерватории. Поэтому, помимо того что желательно стремиться к максимально возможной точности, следует выбирать обсерватории, точность наблюдений которых близка. Вычисленные для одного выбранного момента времени величины топоцентрических прямого восхождения и склонения используются для определения гелиоцентрических прямоугольных координат объекта. Предварительные результаты обработки наблюдений обсерваторий С15 (Уссурийск) и С20 (Горная станция ГАО РАН, Кисловодск) показывают, что таким образом можно получить вполне «узнаваемую» орбиту, сравнимую с публикуемой в МРС. Однако этот метод плохо работает как для слишком далеких объектов (потеря точности из-за малого параллактического угла), так и для слишком близких объектов (большая угловая скорость и невозможность выбора больших баз).

Базисные наблюдения с космических аппаратов. Наземные обсерватории не могут обеспечить базисные наблюдения для достаточно далеких объектов. Поэтому весьма желательно перейти к наблюдениям, выполненным с помощью космических аппаратов (КА). Возможны несколько схем работы таких КА. В проекте «Орбитальная звездная стереоскопическая обсерватория (ОЗСО)» [2] предполагается размещение двух идентичных КА в окрестности треугольных точек

либрации L4, L5 системы «Солнце — барицентр системы Земля + Луна» (рисунок, фрагмент *а*). При этом база составит 259.1 млн км. Такая схема обеспечивает отслеживание «дневных» астероидов, т. е. проблемных для земных наблюдений объектов, которые приближаются изнутри орбиты Земли с малыми углами элонгации от Солнца. Кроме того, задолго до приближения к Земле возможно открытие и сопровождение потенциально опасных астероидов, которые находятся за Солнцем. Точность таких наблюдений по меньшей мере на порядок выше точности наземных наблюдений (в зависимости от конфигурации). Однако для наблюдений мелких объектов понадобится более светосильный, чем планируется, телескоп.

На фрагменте *б* показаны две другие схемы размещения КА, а именно в точках либрации L1, L2 системы «Солнце — барицентр системы Земля + Луна» (база около 3 млн км) и L4m, L5m системы «Земля — Луна» (база около 770 тыс. км). Серым цветом обозначен конус раствором около 70°, который включает наиболее вероятные направления приближения к Земле потенциально опасных объектов.

На фрагменте *в* центральная область вместе с орбитой Луны показана в увеличенном масштабе.



Схемы размещения КА в различных точках либрации

На фрагменте z показано движение КА в окрестности треугольных точек либрации системы «Земля — Луна» за 10 лет.

В любом случае обнаружение мелких объектов вблизи Земли на критическом расстоянии 0.05 а. е. проблематично. Особенно это касается объектов, приближающихся к Земле с околосолнечного направления. Однако при размещении на КА телескопов с диаметром главного зеркала 1.5—2.0 м обнаружение возможно, хотя и на несколько меньших расстояниях — тем меньших, чем больше угол фазы объекта.

Модельные расчеты для 2004 BL86. С помощью программы «Stereo», использующей среду программного пакета ЭПОС [1], были промоделированы сеансы, состоящие из двух синхронных наблюдений астероида 2004 BL86, выполненных за двое суток до сближения с Землей — 25 января 2015 г. в моменты ТТ 21^h05^m и 21^h15^m с двух КА, расположенных в окрестности следующих точек: L4(SE4), L5(SE5), L1(SE1), L2(SE2) системы «Солнце — Земля», L4(EM4) и L5(EM5) системы «Земля — Луна», а также с двух земных обсерваторий — 319 (Перт, Австралия) и 833 (Буэнос-Айрес, Аргентина). В это время астероид находился на расстоянии 0.011 а. е. от Земли.

Элементы оскулирующей орбиты астероида 2004 BL86

Обсерватория	M	, град	, град	i , град	e	a , а. е.
319-833	211.2341	311.4025	126.7469	23.1786	0.39599	1.487705
SE4-SE5	208.3816	311.3369	126.7061	23.8238	0.40232	1.501125
SE1-SE2	208.1374	311.4390	126.7094	23.7735	0.40248	1.502112
EM4-EM5	207.9183	311.5031	126.7092	23.7756	0.40272	1.503047
MPCORB	208.1120	311.4416	126.7092	23.7761	0.40252	1.502228

Из полученных на средний момент наблюдений величин гелиоцентрических прямоугольных координат и скоростей вычислены элементы оскулирующей орбиты, которые затем переведены на эпоху каталога MPCORB JD2457400.5. В таблице приведены элементы оскулирующей орбиты названного астероида, полученные из описанных выше базисных синхронных наблюдений: средняя аномалия M , аргумент перигелия ω , долгота восходящего узла Ω , наклон i , эксцентриситет e , большая полуось орбиты a . Угловые величины приведены в градусах, линейная — в а. е. Первая строка относится к базе между наземными обсерваториями, следующие три — к космическим базам между соответствующим точками либрации; в последней для сравнения указаны элементы орбиты астероида, приведенные в каталоге MPC.

Видно, что наземные наблюдения дают результат, отличающийся от результатов космических наблюдений. С увеличением расстояния объекта от Земли это отличие увеличивается.

Выводы. 1. Базисные наблюдения дают возможность получать расстояния до наблюдаемых объектов, а в некоторых случаях и параметры их орбитального движения.

2. Наземные оптические базисные наблюдения дают приемлемый результат только для достаточно близких объектов, когда параллактический угол превышает 10—15°.

3. Наилучшие результаты в отношении потенциально опасных объектов могут дать только наблюдения с помощью космических аппаратов, разнесенных на расстояния, значительно превышающие земной диаметр.

1. Львов В. Н., Цекмейстер С. Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // *Астрон. вестник*.—2012.—**46**, № 2.—С. 190—192.
2. Чубей М. С., Курьянов В. В., Львов В. Н. и др. Средства, возможности и методы решения задач астероидной и кометной опасности в проекте «Орбитальная звездная стереоскопическая обсерватория» // *Экологический вестник науч. центров ЧЭС*.—2013.—№ 4, вып. 2—С. 77—86.
3. Чубей М. С., Львов В. Н., Ягудин Л. И. Оценка точности астрометрических измерений в условиях космической стереоскопической обсерватории // *Четвертые Поляховские чтения: Изб. тр.* — СПб: Изд-во ВВМ, 2006.—С. 288—295.
4. Eggl S., Ivantsov A., Gerlach E., et al. GAIA-FUN-SSO: Triangulation Observations of 2014 HQ124 // *Proc. “GAIA-FUN-SSO 2014” Workshop (IMCCE/Paris Obs., Paris, 2014, Nov. 24—26)*. — Paris, 2015.—P. 71—75.

Статья поступила в редакцию 01.12.15