

УДК 523.64

**Е. С. Сибирякова, А. В. Шульга, В. С. Вовк,
Н. А. Куличенко, Е. С. Козырев**

Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»
ул. Обсерваторная 1, Николаев, 54030
evg_sibir@mail.ru

Позиционные наблюдения комет комбинированным методом

*Обсуждаются позиционные наблюдения комет с использованием комбинированного метода наблюдений и режима работы ПЗС-камеры *time delay and integration*. Приведен анализ результатов наблюдений за трехлетний период и точностные характеристики полученных положений.*

*ПОЗИЦІЙНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ КОМЕТ КОМБІНОВАНИМ МЕТОДОМ, Сибірякова Є. С., Шульга О. В., Вовк В. С., Куличенко М. О., Козырев Є. С. — Обговорюються позиційні спостереження комет з використанням комбінованого методу спостережень та режиму роботи ПЗЗ-камери *time delay and integration*. Наведено аналіз результатів спостережень за трьох річний період та точності отриманих положень.*

*POSITIONAL OBSERVATION OF COMET BY USING OF COMBINED METHOD, by Sybiryakova E. S., Shulga O. V., Vovk V. S., Kulichenko M. O., Koziryev E. S. — The positional observations of comets by using of combined method and *time delay and integration* mode are represented in the article. The analysis of the results of observations and precision of obtained positions are given.*

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на относительно небольшое количество комет, сближающихся с Землей, есть вероятность их столкновения с Землей [2]. Для вычисления вероятности столкновения кометы с Землей необходимо более точное определение орбит комет. Одним из факторов, влияющих на точность вычисления элементов орбит комет, являются негра-

витационные эффекты. Негравитационные эффекты проявляются в изменении элементов орбит, в первую очередь среднего движения [<http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/АКО/ch51.html#1>].

Для определения элементов орбит комет необходимы высокоточные позиционные наблюдения.

В Научно-исследовательском институте «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ НАО) проводятся наблюдения в моменты сближения комет с Землей. Для наблюдений быстро движущихся космических объектов в НИИ НАО разработан комбинированный метод. Метод успешно применяется для наблюдений астероидов, сближающихся с Землей, и искусственных космических объектов [4, 5]. С 2011 г. начато применение комбинированного метода для наблюдения комет.

НАБЛЮДЕНИЯ КОМЕТ

Для наблюдений отбирались кометы, сближающиеся с Землей на расстоянии менее 1.3 а. е., новые и короткопериодические кометы. Наблюдения проводились с использованием эфемерид Лаборатории реактивного движения США.

Наблюдения проводились на телескопе КТ-50 ($D = 50$ см, $F = 3$ м). Телескоп оснащен полнокадровой ПЗС-камерой Apogee Alta U9000 (3k 3k), размер пикселя 12 12 мкм (0.83 0.83). Стеклопленочный светофильтр ОС-14, который в сочетании с матрицей КАФ-09000 формирует фотометрическую полосу, близкую к полосе R стандартной фотометрической системы Бесселя. Наблюдения проводились с использованием комбинированного метода наблюдений и режима работы time delay and integration ПЗС-камеры (TDI) [1]. Использование режима TDI позволяет получать точечные изображения комет независимо от скорости их движения (скорость движения комет компенсируется за счет скорости переноса заряда по ПЗС-матрице). В процессе наблюдений формируется 10—20 серий наблюдений одной кометы. Серия кадров включает в себя два кадра с опорными звездами и кадр с объектом. Наблюдение серии кадров проводится на неподвижном телескопе, процесс наблюдений включает в себя следующие этапы:

- установка телескопа в точку встречи по заданным эфемеридам;
- поворот ПЗС-матрицы так, чтобы регистр был перпендикулярен к направлению движения кометы;
- формирование изображения опорных звезд с экспозицией 10 с;
- формирование изображения объекта, экспозиция устанавливается в зависимости от звездной величины;
- формирование изображения опорных звезд с экспозицией 10 с.

Таким образом, при накоплении изображений опорных звезд и кометы угол поворота ПЗС-камеры не изменяется. Наблюдения опорных звезд проводятся с малой экспозицией, чтобы избежать растягивания изображений звезд.

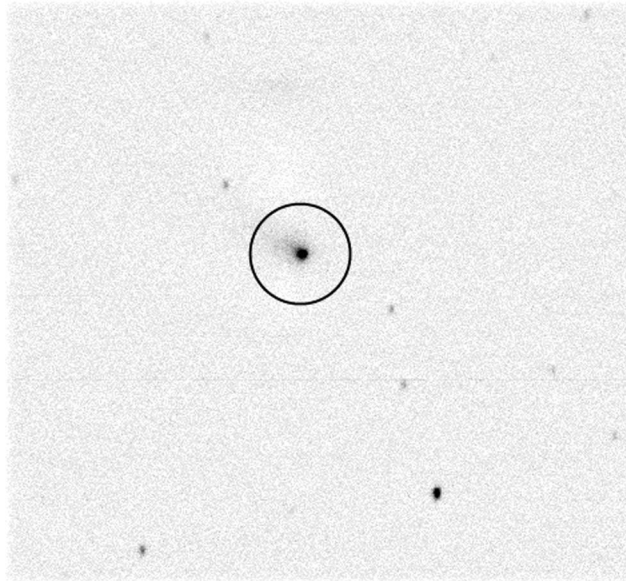


Рис. 1. Пример изображения кометы, сближающейся с Землей

Применение комбинированного метода наблюдений позволяет получать точечные изображения комет и звезд путем разделения процессов накопления изображений звезд и комет. На рис. 1 приведено изображение кометы 168P, которая на момент наблюдений находилась на расстоянии 0.43 а. е., видимое движение кометы на момент наблюдений составляло 3.24 /мин.

Условия, при которых проводились наблюдения комет, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Условия наблюдений комет

Имя	Звездная величина	Расстояние до Земли, а. е.	Расстояние до Солнца, а. е.
29P/Schwassmann-Wachmann	17.4 ^m	5.2	6.2
48P /Johnson	14.6	1.3	2.5
49P/Arend-Rigaux	17.3	1.4	2.2
63P/Wild	12.6	1.1	3.8
78P /Gehrels	12.1	1.3	2.1
98P/Takamizawa	14.7	0.9	4.1
168P/Hergenrother	13.7	0.4	2.4
175P/Hergenrother	17.0	1.13	3.4
213P/Van Ness	14.0	1.2	2.8
246P/NEAT	15.1	2.3	3.3
260P/McNaught	14.1	0.6	2.3
274P/Tombaugh-Tenagra	17.8	1.8	3.3
P/2012 NJ (La Sagra)	16.5	1.8	1.7
P/2012 B1 (PANSTARRS)	16.8	3.0	4.6
P/2013 J2 (McNaught)	16.0	1.3	4.7
C/2006 S3 (LONEOS)	15.3	4.7	5.1

Окончание табл. 1

Имя	Звездная величина	Расстояние до Земли, а. е.	Расстояние до Солнца, а. е.
C/2009 P1 (Garradd)	10.7	7.4	2.0
C/2009 Y1 (Catalina)	15.5	2.3	4.9
C/2010 G2 (Hill)	15.4	1.5	3.1
C/2010 S1 (LINEAR)	16.2	7.2	6.6
C/2011 F1 (LINEAR)	14.9	2.9	3.8
C/2011 J2 (LINEAR)	15.3	3.54	6.5
C/2011 UF305 (LINEAR)	14.8	2.5	2.5
C/2012 A2 (LINEAR)	17.8	3.7	4.1
C/2012 L2 (LINEAR)	13.8	1.8	5.0
C/2012 S1 (ISON)	15.8	4.0	8.0
C/2013 G6 (Lemmon)	17.2	1.2	5.5

ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка наблюдений включает в себя следующие этапы:

- первичная обработка изображений;
- вычисление прямоугольных координат комет в системе ПЗС-матрицы, определение прямоугольных координат звезд в системе ПЗС-матрицы, отождествление опорных звезд с каталогом и расчет редуцированных постоянных изображений с опорными звездами;
- вычисление экваториальных координат наблюдаемого объекта с использованием модифицированной модели редукции [1].

Учет неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы проводился путем постолбцового и построчного выравнивания фона изображения. При постолбцовом выравнивании изображения каждый столбец разбивается на несколько участков. В отдельно взятом участке столбца по каждому пикселю строится система уравнений вида

$$N(x, y) = N_0(x, y) + C(x),$$

где $N_0(x, y)$ — исходное значение сигнала, $C(x)$ — среднее значение амплитуды сигнала в столбце, $N(x, y)$ — значение сигнала после коррекции. Среднее значение амплитуды сигнала в столбце вычисляется по формуле

$$C(x) = \frac{1}{ns} \sum_y N_0(x, y),$$

где ns — количество строк изображения. Процесс вычисления итерационный, и продолжается до тех пор, пока есть пиксели с амплитудой, удовлетворяющей условию $|N(x, y) - C(x)| > 3 \cdot \sigma(x)$, где

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{y} \sum_y [N_0(x, y) - C(x)]^2 / (ns - 1)}.$$

Прямоугольные координаты комет в системе ПЗС-матрицы вычисляются как средневзвешенное значение выделенной группы пикселей:

$$X_0 = \frac{\sum_{i_2, j_2} X_{ij} I_{ij}}{\sum_{i, i_1, j, j_1} I_{ij}}, \quad Y_0 = \frac{\sum_{i_2, j_2} Y_{ij} I_{ij}}{\sum_{i, i_1, j, j_1} I_{ij}},$$

где I_{ij} — интенсивность пикселя, X_{ij}, Y_{ij} — прямоугольные координаты в системе ПЗС-матрицы.

Определение прямоугольных координат опорных звезд в системе ПЗС-матрицы, а также отождествление опорных звезд с каталогом и расчет редуцированных постоянных проводились программой *Astrometrica* с использованием каталога UCAC3. Для перехода от прямоугольных координат звезд в системе ПЗС-матрицы к экваториальным вычислялись идеальные координаты звезд.

Учитывая то, что при использовании комбинированного метода наблюдений изображения опорных звезд и комет получаются в разные моменты времени, вычисление экваториальных координат комет включает два этапа:

- интерполяция редуцированных постоянных и экваториальных координат центра изображения на время наблюдения объекта;
- вычисление экваториальных координат наблюдаемого объекта.

Для вычисления редуцированных постоянных и экваториальных координат центра кадра изображения кометы, проводится линейная регрессия редуцированных постоянных кадров с изображением опорных звезд на момент времени наблюдения кометы.

$$\begin{aligned} i_j &= a_j + b_j t_i, \\ i_j &= c_j + d_j t_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где t_i — время наблюдения i -го кадра опорных звезд на середину экспозиции, i_j — j -я редуцированная постоянная для i -го кадра по прямому восхождению, i_j — j -я редуцированная постоянная для i -го кадра по склонению, a_j, b_j, c_j, d_j — коэффициенты редукции (j — номер постоянной). Система уравнений решается методом наименьших квадратов.

С использованием коэффициентов редукции a_j, b_j, c_j, d_j и времени записи кадра с изображением кометы по формуле (1) вычисляются редуцированные постоянные кадра.

Таким же образом вычисляются экваториальные координаты центра кадров. Далее с использованием значений редуцированных постоянных кадра с изображением кометы и прямоугольных координат кометы определяются ее идеальные и сферические координаты.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Проведено сравнение положений, полученных из наблюдений, с эфемеридой Лаборатории реактивного движения США [3]. Результаты сравнения представлены в табл. 2. Сравнение проводилось 15 апреля 2015 г.

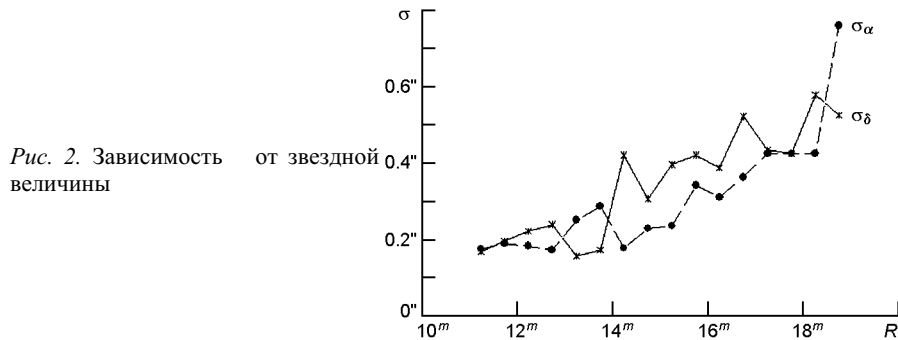
За 2011—2013 гг. получен каталог 549 положений 27 комет, все положения были отправлены в Международный центр малых планет. Средняя квадратичная погрешность наблюдений по результатам

Таблица 2. Точностные характеристики полученных положений комет

Имя	Дата	Экспозиция	К-во кадров	(O-C)	(O-C)		
29P/Schwassmann-Wachmann	2012-03-26	90	13	-0.29	-0.22	0.26	0.38
48P /Johnson	2011-08-08	10	8	0.63	-0.06	0.20	0.76
49P/Arend-Rigaux	2012-03-20	90	3	0.69	0.33	0.21	0.02
	2012-03-27	90	5	0.45	0.36	0.11	0.22
	2012-04-10	90	6	0.64	0.45	0.26	0.16
63P/Wild	2013-02-26	60	20	0.11	-0.18	0.09	0.10
	2013-02-27	60	15	0.22	-0.17	0.11	0.14
78P /Gehrels	2011-08-05	10	15	-0.28	-0.01	0.28	0.31
	2011-08-30	10	15	-0.35	-0.12	0.24	0.25
	2011-09-19	10	12	-0.04	-0.27	0.14	0.10
	2011-10-26	90	10	0.16	0.21	0.24	0.17
	2011-10-29	90	10	0.00	0.14	0.12	0.10
	2011-11-03	90	10	-0.10	0.23	0.19	0.12
	2011-11-18	90	9	-0.13	0.31	0.12	0.12
	2011-12-18	30	10	-0.46	-0.17	0.16	0.14
98P/Takamizawa	2013-07-25	120	6	-0.09	0.10	0.36	0.51
168P/Hergenrother	2012-09-13	120	8	1.36	0.13	0.07	0.25
175P/Hergenrother	2013-02-27	120	30	0.15	0.36	0.16	0.22
213P/Van Ness	2011-08-30	10	25	0.11	0.11	0.35	0.36
246P/NEAT	2012-03-21	60	7	0.48	0.23	0.18	0.19
	2012-03-26	90	12	0.32	0.15	0.15	0.14
	2012-04-10	60	11	0.43	0.06	0.20	0.19
	2012-04-12	60	4	0.61	0.0	0.13	0.40
260P/McNaught	2012-09-14	90	9	0.48	0.02	0.09	0.08
	2012-10-10	60	10	0.04	-0.02	0.04	0.06
274P/Tombaugh-Tenagra	2013-02-27	120	6	-0.54	0.45	0.30	0.32
P/2012 NJ (La Sagra)	2012-09-10	120	5	0.13	0.32	0.17	0.05
	2012-09-13	120	4	-0.03	0.04	0.03	0.08
P/2012 B1 (PANSTARRS)	2013-02-28	90	9	0.51	0.15	0.33	0.75
P/2013 J2 (McNaught)	2013-07-10	90	12	0.05	0.14	0.16	0.12
C/2006 S3 (LONEOS)	2012-04-11	40	9	0.67	0.69	0.41	0.19
C/2009 P1 (Garradd)	2011-08-04	10	14	0.13	0.10	0.15	0.19
	2011-08-30	10	15	0.30	0.16	0.05	0.04
	2011-09-14	10	12	0.17	0.25	0.09	0.07
	2011-11-03	90	9	0.06	0.12	0.08	0.06
	2012-03-26	30	14	-0.04	-0.18	0.05	0.08

Окончание табл. 1

Имя	Дата	Экспозиция	К-во кадров	(O-C)	(O-C)		
C/2009 Y1 (Catalina)	2011-08-08	10	9	0.11	0	0.23	0.43
C/2010 G2 (Hill)	2011-11-18	90	9	-0.09	-0.13	0.14	0.06
	2011-11-28	30	9	-0.34	-0.02	0.07	0.12
C/2010 S1 (LINEAR)	2011-12-18	90	4	-0.34	0.07	0.04	0.09
	2012-04-11	60	4	0.09	0.07	0.17	0.20
C/2011 F1 (LINEAR)	2012-03-21	40	12	0.50	-0.19	0.21	0.19
	2012-03-27	40	6	0.54	-0.22	0.09	0.06
C/2011 J2 (LINEAR)	2013-02-27	90	14	0.22	-0.21	0.15	0.20
C/2011 UF305 (LINEAR)	2012-03-21	60	36	-0.21	-0.13	0.28	0.21
	2012-04-11	90	4	-0.17	-0.21	0.07	0.01
	2013-02-27	90	10	-0.26	0.08	0.31	0.37
C/2012 A2 (LINEAR)	2012-04-11	90	6	0.22	0.05	0.15	0.27
C/2012 L2 (LINEAR)	2013-02-27	60	10	-0.83	-0.05	0.17	0.26
C/2012 S1 (ISON)	2012-02-27	90	15	-0.77	0.33	0.18	0.19
C/2013 G6 (Lemmon)	2013-05-08	120	9	0.28	-0.31	0.43	0.51
Всего			549				



сравнения с эфемеридой Лаборатории реактивного движения США находится в пределах 0.04—0.51 для комет, звездные величины которых попадают в интервал от 10.7 до 17.8^m. Зависимость от звездной величины представлена на рис. 2.

Повышенную невязку в прямом восхождении для кометы 168P можно объяснить недостаточной точностью вычисления элементов орбит, использованных для расчета эфемерид. Так, например, для кометы 78P сравнение с эфемеридой Лаборатории реактивного движения США проводилось дважды: сразу после обработки наблюдений в 2011 г. и в 2015 г. Для примера на рис. 3 приведены результаты сравнения на 4 ноября 2011 г. (для расчета эфемерид использовались элементы орбит с эпохой 9 марта 2006 г., 2066 положений) и 15 апреля 2015 г. (для расчета эфемерид использовались элементы орбит с эпохой 24 апреля 2014 г., 5476 положений).

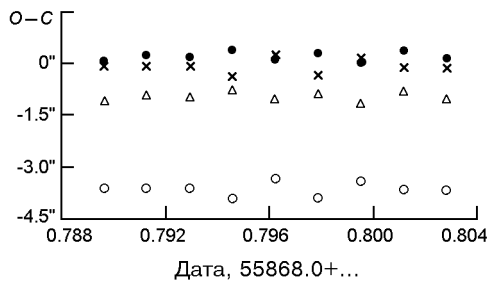


Рис. 3. Невязки координат кометы 78Р: кружки и треугольники — соответственно $(O - C)$ и $(O - C)$ для эпохи элементов орбит 9 марта 2006 г., косые крестики и точки — $(O - C)$ и $(O - C)$ для эпохи 24 апреля 2014 г.

Как видно из рис. 3, использование обновленных элементов орбит для вычисления эфемерид привело к существенному уменьшению невязки наблюдений по прямому восхождению.

ВЫВОДЫ

Для наблюдений комет апробировано применение комбинированного метода наблюдений, что позволило получать точечные изображения комет, сближающихся с Землей. Вычисление экваториальных координат комет проводилось с использованием модифицированного метода редукции.

Из наблюдений получен каталог 549 положений 27 комет. Средняя квадратичная погрешность наблюдений по результатам сравнения с эфемеридой Лаборатории реактивного движения США находится в пределах 0.04—0.51 для комет, звездные величины которых попадают в интервал от 10.7 до 17.8^m.

1. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений // Космічна наука і технологія.—2010.—**16**, № 5.—С. 71—76.
2. Fernandez J. A. Comets: Nature, dynamics, origin, and their cosmogonical relevance. — Springer, 2006.—383 p.
3. Giorgini J. D., Yeomans D. K., Camberlin A. B., et al. JPL's online Solar system data service // Bull. Amer. Astron. Soc.—1996.—**28**.—P. 1158.
4. Kara I. V., Kozoryev Y. S., Sybiryakova Y. S., et al. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects // Bull. Crim. Astrophys. Observatory.—2011.—**107**.—P. 98—102.
5. Sybiryakova Ye. S., Kozoryev Ye. S., Shulga A. V. The results of positional observations of Near Earth asteroids using the combined observation method // Bull. Crim. Astrophys. Observatory.—2013.—**109**.—P. 66—70.

Стаття надійшла до редакції 08.05.15