

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА И САТУРНА В 2004 г НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ В ПУЛКОВЕ.**

Т.П.Киселева, И.С.Измайлов, М.Ю.Ховричев, Е.В.Хруцкая.

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН.*

*Приводятся результаты ПЗС-наблюдений галилеевых спутников Юпитера и главных спутников Сатурна в марте-апреле 2004 г в Пулковской обсерватории на 26-дюймовом рефракторе. Всего получено 23 наблюдения в течение 10 ночей. По наблюдениям спутников определены координаты Сатурна с ошибкой менее 0.1". Сравнение наблюдений спутников с теориями движения L1 (для спутников Юпитера) и TASS1.7 (для спутников Сатурна) показало высокую точность пулковских наблюдений (около 0.01" по внутренней сходимости). Разработана новая методика астрометрической редукации ПЗС-измерений, позволившая существенно увеличить точность относительных положений спутников. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081.*

### **1. Введение.**

Данная работа представляет результаты ПЗС-наблюдений спутников Юпитера и Сатурна в рамках продолжающейся в Пулкове на автоматизированном 26-дюймовом рефракторе ( $D/F = 650/10413$  mm) программы наблюдений спутников планет, необходимых для уточнения теорий движения и предсказания покрытий, используемых для исследования физических параметров спутников, а также для поддержки космических исследований.

### **2. Наблюдения и обработка.**

Наблюдения представляют собой измерения в поле ПЗС (камера ST6, 375 x 242 пкс, 23 x 27 мкм) расстояний между спутниками, образующими пары с расстояниями не более 50" для Юпитера и не более 150" - для Сатурна. В 2004 г в марте-апреле удалось в течение 10 ночей наблюдать 16 пар галилеевых спутников Юпитера и 7 пар спутников Сатурна (спутники 3 - 8). Наблюдения выполнялись сериями, содержащими от 10 до 100 отдельных ПЗС-наблюдений, всего 330 отдельных наблюдений спутников Сатурна и 1035 - спутников Юпитера. Экспозиции при наблюдениях составляли от 0.1 - до 1 сек. для спутников Юпитера и от 2 сек до 45 сек. - для спутников Сатурна. Наблюдения выполнены вблизи оппозиции Юпитера (5 марта 2004) и после оппозиции Сатурна (31 декабря 2003 г). Зенитные расстояния Юпитера при наблюдениях изменялись от 51° до 61°, зенитные расстояния Сатурна - от 33° до 36°, часовые углы от -53min до + 76 min. В результате обработки ПЗС-наблюдений получены 23 относительных положений спутников. При обработке учитывался градиент яркости фона в поле ПЗС, обусловленный ореолом от планеты. Методика обработки измерений с целью определения центров изображений в поле ПЗС-кадра описана в ранее опубликованной работе [1].

### 3. Астрометрическая редукция измерений.

Астрометрическая редукция измерений выполнялась новым методом, разработанным И.С.Измайловым, использующим наблюдения в каждую ночь контрольных звезд из космического каталога Tycho-2 [2], расположенных по небу в непосредственной близости от наблюдаемых объектов. Для астрометрической редукции измерений была вновь проведена калибровка ПЗС-матрицы. Для этого в одну из ночей были проведены наблюдения 18 пар звезд из каталога Tycho-2, имеющие склонение от +15 до +88 градусов, при этом наблюдения велись близ кульминации данной пары. Измеренные координаты в системе ПЗС-матрицы, выраженные в пикселях сопоставлялись с экваториальными тангенциальными координатами, вычисленными на основании данных каталога, с помощью метода 6 постоянных. В результате были получены следующие значения параметров:

$$M_x = 0.457202 \pm 0.000059 \text{ ''/px},$$

$$M_y = 0.536476 \pm 0.000194 \text{ ''/px},$$

$$\theta = 4^{\circ}.030499 \pm 0^{\circ}.015946,$$

$$v = 0^{\circ}.055023 \pm 0^{\circ}.018574,$$

здесь  $M_x$ ,  $M_y$  - масштабы соответственно по  $X$  и по  $Y$ ,  $\theta$  - ориентировка,  $v$  - косоугольность. Ошибки единицы веса, при решении системы условных уравнений оказались равными:

$$\sigma_x = 0^{\circ}.059,$$

$$\sigma_y = 0^{\circ}.076.$$

Заметим, что при подобном методе калибровки, по нашему мнению, необходимо учитывать изменение ориентировки ПЗС-матрицы, связанной с несовпадением полюса мира и точки неба, в которую направлена полярная ось инструмента (полюс телескопа). Для учета этого эффекта использовалось соотношение [3]:

$$\theta = (\gamma_x \sin t + \gamma_y \cos t) \sec \delta$$

где  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$  – координаты полюса,  $t$  – часовой угол и склонение соответствующей пары звезд. При калибровке мы получили следующие значения:

$$\gamma_x = 0.154 \pm 0.095,$$

$$\gamma_y = 0.095 \pm 0.013.$$

В дальнейшем каждую ночь производились наблюдения двух - трех звездных пар для контроля ориентировки и масштаба, которые показали, что в пределах ошибок измерений (порядка 0.02 секунды дуги) ориентировка и масштаб не изменяются.

Имея в виду результаты калибровки, мы использовали следующую процедуру перехода от измеренных изображений объектов в поле ПЗС-матрицы к их относительным положениям на небесной сфере:

- 1) Преобразование матричных координат всех объектов в пикселях к тангенциальным координатам, выраженным в секундах, по формулам с шестью постоянными.
- 2) Учет ориентировки, зависящей от часового угла и склонения.
- 3) Редукция за дифференциальную рефракцию.

В предыдущие годы для астрометрической редукции ПЗС наблюдений использовался метод "след-масштаб", не использующий координат опорных звезд для редукции [4], который, однако, оказался недостаточно эффективным при обработке ПЗС-наблюдений ввиду малой точности определения угла ориентировки и ПЗС-масштаба в малых полях

ПЗС. Все наблюдения с помощью ПЗС, выполненные с 1995 по 2003 гг пришлось исправлять за ошибки масштаба и ориентировки [5]. Появление высокоточных космических каталогов, таким образом, позволило разрешить проблему ориентировки малых полей ПЗС-кадров. Кроме того, благодаря высокой плотности звезд в космических каталогах, в полях 26-дюймового рефрактора с ПЗС иногда наблюдаются звезды с высокой точность координат. В таких случаях появляется возможность по измерениям расстояний между этими звездами и спутниками определять точные координаты самой планеты, не измеряя ее изображения. Возможность таких определений описана нами в работе [6], где приводится и список положений Сатурна, полученных по фотографическим наблюдениям его спутников на 26-дюймовом рефракторе. В 2004 г при ПЗС-наблюдениях спутников Сатурна удалось получить три положения Сатурна по наблюдениям его спутников и по звездам из каталога UCAC-2.

#### 4. Результаты наблюдений.

Результаты наблюдений приведены в таблицах 1,2,3 (в системе экватора 2000.0). В таблице 1 даются результаты наблюдений спутников Юпитера. Приводятся моменты наблюдений по всемирному времени (UTC), номера спутников в парах, число ПЗС-кадров каждой серии, относительные координаты спутников:  $X = \Delta\alpha \cos\delta$ ,  $Y = \Delta\delta$ , а также  $(O-C)_X$  и  $(O-C)_Y$  - результат сравнения наблюдений с эфемеридами, вычисленными Н.В.Емельяновым (<http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/servicer.htm>) согласно теории L1 (V. Lainey in IMCCE) [7]. В таблице 2 даются результаты наблюдений спутников Сатурна, для сравнения наблюдений с теорией использовались эфемериды Н.В.Емельянова, вычисленные согласно теории TASS 1.7 [8]. Для Юпитера и Сатурна в этих теориях использована теория DE405. В таблице 3 приведены результаты определения координат Сатурна по наблюдениям его спутников. В ней приводятся номера спутников Сатурна и звезд, по которым определялись топоцентрические координаты планеты и  $(O-C)$  Сатурна по прямому восхождению и склонению. В данной задаче эфемерида спутников также TASS 1.7 и эфемерида Сатурна DE405.

Таблица 1. Результаты ПЗС-наблюдений галилеевых спутников Юпитера.

Дата		UTC			$S_i-S_j$	N	X (arcsec)		Y (arcsec)		$(O-C)_X$	$(O-C)_Y$
2004	h	m	s									
03	05	00	15	01.0	4-3	28	37.034	$\pm 0.044$	-28.863	$\pm 0.039$	-0.008	-0.007
03	05	00	42	25.0	1-2	31	29.342	0.035	-17.753	0.026	0.020	0.001
03	09	23	18	25.5	3-2	50	40.666	0.013	-23.324	0.015	-0.011	-0.003
03	10	22	28	10.5	4-2	100	5.980	0.015	19.036	0.021	0.019	0.041
03	10	22	28	10.5	3-2	100	10.613	0.013	-10.000	0.015	-0.009	-0.008
03	10	22	28	10.5	3-4	100	4.633	0.015	-29.036	0.022	-0.028	-0.049
03	19	22	28	22.6	1-2	100	20.880	0.006	-11.965	0.007	0.004	0.020
03	28	20	44	31.4	3-4	50	15.396	0.005	-14.813	0.012	-0.010	-0.027
03	28	20	44	31.4	1-4	50	40.407	0.009	-35.002	0.018	-0.029	-0.054
03	28	20	44	31.4	1-3	50	25.011	0.006	-20.190	0.016	-0.019	-0.028
04	04	20	40	31.8	1-3	50	-14.178	0.008	-1.369	0.005	-0.029	0.019
04	04	20	40	31.8	4-3	50	2.101	0.007	-25.225	0.007	-0.051	-0.044
04	04	20	40	31.8	4-1	50	16.279	0.009	-23.857	0.007	-0.032	-0.064
04	05	20	45	32.6	1-4	50	10.998	0.016	12.100	0.026	0.041	0.014
04	07	21	22	32.6	2-3	26	9.120	0.019	-1.130	0.016	-0.043	-0.012
05	07	20	07	34.2	2-1	50	25.991	0.014	-9.913	0.014	0.032	-0.037

Таблица 2. Результаты ПЗС наблюдений спутников Сатурна.

Дата	UTC	$S_i - S_j$	N	X (arcsec)	Y (arcsec)	$(O-C)_x$	$(O-C)_y$
2004	h m s						
03 04	18 50 30.3	8-6	30	31.478±0.002	75.789±0.002	0.009	0.109
03 09	17 49 45.2	3-5	10	44.667 0.004	13.687 0.003	0.016	-0.014
03 09	18 06 37.3	5-7	10	139.112 0.010	35.341 0.010	-0.247	0.340
03 13	16 56 47.0	5-4	50	2.394 0.004	28.517 0.006	0.045	0.023
03 13	16 56 47.0	3-4	50	12.933 0.004	1.726 0.003	-0.083	-0.018
03 13	16 56 47.0	3-5	50	10.539 0.004	-26.791 0.007	-0.052	-0.042
03 28	18 09 05.4	6-4	10	126.484 0.002	-13.875 0.004	-0.026	0.046

Таблица 3. Топоцентрические координаты Сатурна в системе экватора 2000.0, полученные по наблюдениям спутников.

	1	2	3
Дата 2004 и момент наблюдений (UTC)	м ч h m s 03 04 18 50 30.3	м ч h m s 03 09 18 06 37.3	м ч h m s 03 28 18 09 05.4
Спутники Сатурна	6, 8	5	4, 6
Звезды UCAC-2	3982148 11,52	39821465 13,83	39822139 13,28
№, зв.вел.		39821473 13,57 39821480 11,57	
$\alpha$ (h,m,s)	06 27 03.7659	06 27 03.0068	06 28 49.7134
$\delta$ (°, ', ")	+22 46 17.049	+22 47 03.831	+22 48 44.520
$(O-C)_\alpha^{(s)}$ , $(O-C)_\delta^{(")}$	+0.0102 +0.007	+0.0096 +0.048	+0.0035 -0.116

## 5. Анализ точности результатов.

Сравнение результатов с теориями движений позволило оценить точность полученных относительных координат спутников Юпитера и Сатурна. В таблице 4 приведены результаты этих оценок. Внутренние ошибки наблюдений ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ), приведенных в таблицах 1 и 2, получены по сходимости результатов в сериях ПЗС-наблюдений. Внешние ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) - по сходимости O-C в ряде наблюдений.

Таблица 4. Средние O-C, внутренние и внешние ошибки положений спутников Юпитера и Сатурна.

Система спутников	$(O-C)_x$	$(O-C)_y$	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	n
	arcsec						
Спутники Юпитера	-0.010	-0.015	±0.016	±0.017	±0.027	±0.030	16
Спутники Сатурна	-0.015	+0.017	0.005	0.006	0.047	0.055	6

Оценка точности координат Сатурна по наблюдениям его спутников дает следующие результаты. Средние O-C для Сатурна равны (в секундах дуги): +0.109, -0.020 по трем определениям. Среднеквадратичная ошибка одного положения Сатурна по O-C равна: ±0.052, ±0.085 (arcsec). Точность определения координат Сатурна таким

способом зависит от точности теории движения спутников, точности координат звезд в космических каталогах, точности измерений спутников и звезд. Сравняя координаты Сатурна, полученные по разным звездам и разным спутникам, можно оценить некоторые из этих ошибок. Так, по нашим оценкам, ошибка положения Сатурна, зависящая только от каталожного положения звезды и измерений, равна  $\pm 0.009''$  и  $\pm 0.031''$  (по прямому восхождению и склонению соответственно). К сожалению, ввиду малого числа наблюдений, невозможно оценить из наблюдений ошибку теории движения спутников, но по данным приведенным на сайте JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov>), ошибки современных эфемерид восьми главных спутников Сатурна не превышают  $0.083''$  (для Гипериона, а для остальных спутников - меньше). Следует напомнить, что координаты Сатурна, полученные таким образом, свободны от ошибок, связанных с фазой планеты, наличием колец и других ошибок, обусловленных фигурой планеты.

Таким образом, результат определения координат Сатурна по наблюдениям с ПЗС на 26-дюймовом рефракторе представляется перспективным в смысле дальнейших наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований гранты № 04-02-16157 и 04-07-90081.

Результаты, приведенные в данной работе будут включены в астрометрическую базу данных по фотографическим и ПЗС-наблюдениям тел Солнечной системы, создаваемую в лаборатории астрометрии и звездной астрономии ГАО РАН [9].

### **Литература**

1. И.С.Измайлов, А.А.Киселев, Т.П.Киселева, Е.В.Хруцкая., 1998, ПАЖ, т.24, №10, с.772-779.
2. Sinachopoulos D. et al, // Astron. Astrophys. Suppl. Ser., V. 136, p. 564, 1999.
3. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М. Наука, 1976.
4. А.А.Kisselev. Satellite astrometry with a long-focus astrograph. Galactic and Solar System Optical Astrometry. Proceedings of the Royal Greenwich Observatory and the Institute of Astronomy Workshop, Cambridge, 1993. p.325-328.
5. Т.П.Киселева. Анализ систематических ошибок масштаба и ориентировки при фотографических и ПЗС наблюдениях главных спутников Сатурна, полученных в Пулковке в 1995-2003 гг на 26-дюймовом рефракторе. Данный сборник Известий ГАО, 2004.
6. Т.П.Киселева, О.А.Калиниченко, М.А.Можаев. Фотографические наблюдения спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в 2001-2003 гг в Пулковке. Определение координат Сатурна по наблюдениям его спутников. Данный сборник Известий ГАО.
7. Lainey V., Vienne A., Duriez L. New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter. I. Numerical integration of elaborated equations of motion. Astronomy and Astrophysics, 2004, v. 420, p. 1171-1183.
8. A. Vienne, L.Duriez, 1995, Astronomy and Astrophysics, v.297, p.588.
9. Е.В.Хруцкая, М.Ю.Ховричев. Каталог Pul-3 SE как часть астрометрической базы данных Пулковской обсерватории. Труды международной астрономической конференции "Основные направления развития астрономии в России", Казань, 2004, стр 101-107.

**The results of CCD observations of Satellites of Jupiter and Saturn in 2004 at Pulkovo with the 26-inch refractor.**

T.P.Kiseleva, I.S.Izmailov, V.J.Khovrichev, E.V.Khrutskaya.

*The results of CCD observations of Galilean Satellites of Jupiter and the Main Satellites of Saturn during March-April 2004 at Pulkovo observatory with the 26-inch Refractor are presented. 23 observations during 10 nights have been carried out. The coordinates of Saturn by observations of their satellites with the error less 0.1" have been obtained. The comparison of observations with theories of motion L1 (for satellites of Jupiter) and TASS 1.7 (for Saturnian satellites) showed high accuracy of Pulkovo observations. The new method of astrometric reduction of CCD-observations has been worked out. It made possible the essential increasing of accuracy of satellites positions.*

*The works have been carried out with the support of RFBR (N 04-02-16157 and 04-07-90081).*