

Astrometric Observations of the Main Uranian Satellites in Pulkovo Observatory in 2007-2016

Ershova A. P., Roschina E. A., Ismailov I. S., Khovrichev M. Yu.

24 июня 2016 г.

Аннотация

1 Introduction

High-precision theories of motion of the major planets and their satellites are necessary for reserches of formation and evolution of the Solar System and for providing the ephemerides to future space missions. Elaboration of such theories requires an extensive observational material. N.V. Emel'anov in his article [6] have pointed that precision of ephemerides can be improved via extension of the observational span.

In the twentieth century photographic observations of Uranus were performed in the Pulkovo Observatory [8]. Coordinates of the planet were mesaured, uranian satellites were inaccessible for the photographic method.

Observations of uranian satellite's system with the CCD-camera have started in 2007. In CCD frames it is possible to receive siutable for mesaurements images of four main uranian satellites: Ariel (u1), Umbriel (u2), Titania (u3) and Oberon (u4). Precision of mesaurements for these satellites appears so good as in other works on the same subject.[2, 3]. The fifth main satellite of Uranus is Miranda (u5). It is at smal angular distant from the planet. Therefore its images in frames are cannot be separated from halo of Uranus.

The first results of observations of Uranus with CCD-camera and 26-inch refractor in Pulkovo were published in 2013 in article of Roschina et.al. [1]. Published observations covered 2007 – 2011 ptrioid. UCAC2 was the reference catalog. Volume of observational data in current paper is much bigger: observations cover period since August 2007 to Janiary 2016. The mesaurements were performed with UCAC4, thus there were more stars in the field of view.

2 Наблюдения и измерения

Наблюдения Урана в Пулковской обсерватории (код обсерватории – 084) в период с 2007 по 2016 год выполнялись с конца августа по начало января на 26-дюймовом рефракторе с ПЗС-камерой FLI Pro Line 09000 в качестве приёмника излучения. Координаты местоположения телескопа – $59^{\circ}46'15''$ с.ш., $30^{\circ}19'23''$ в.д, высота над уровнем моря около 85 м. Диаметр объектива телескопа равен 0.65 м. Фокусное расстояние – 10.5 м. Центральный масштаб в фокальной плоскости – $19''.80$ /мм. Поле зрения составляет $12' \times 12'$, масштаб – $0''.24$ /пиксель, 3056x3056 пикселей размером по 12 мкм каждый.

По результатам наблюдений за одну ночь получалось по одному нормальному месту каждого доступного наблюдениям спутника. Нормальные места вычислялись на основе измерений индивидуальных положений (как правило, пяти). В свою очередь, для каждого из таких измерений использовались несколько сложенных ПЗС-кадров, что позволяло снизить влияние шумов. Наблюдения выполнялись сериями: 30 сентября 2007 года – 20 кадров с экспозициями по 20 секунд (складывались по 4), 21 октября 2007 года 130 кадров с экспозициями по 3 секунды (складывались по 25), по 40 кадров с экспозициями 10 секунд (складывались по 8) во все остальные ночи. Перемещение спутников по небесной сфере за время наблюдения аппроксимировалось линейно, вычислялся средний момент для всей серии и нормальное место, соответствующее этому моменту.

Обработка наблюдений и измерения координат производились при помощи программного пакета izmcsd, разработанного И.С. Измайловым [5, 6]. В ситуации, когда влияние ореола от планеты на изображение спутника оказывалось значимым, производилось вычитание ореола: распределение яркости аппроксимировалось рядом обратных степеней по формуле (1). Коэффициенты a, b, c, d оцениваются

методом наименьших квадратов. r - расстояние до точки, координаты которой также подбираются минимизацией невязок.

$$I(r) = a + \frac{b}{r} + \frac{c}{r^2} + \frac{d}{r^3} \quad (1)$$

Координаты центров изображений спутников и опорных звёзд вычислялись при помощи аппроксимации профилей изображений функцией Лоренца (2).

$$I(x, y) = \frac{C}{(1 + AR)^\alpha} + D \quad (2)$$

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (1 + B)(y - y_0)^2 + E(x - x_0)(y - y_0)}$$

$I(x, y)$ – значение яркости в пикселе с координатами x и y

(x_0, y_0) – координаты центра изображения

α – определяет форму аппроксимирующей кривой, в рассматриваемом случае $\alpha = 1.4$

A, B, C, D, E – параметры модели:

A – задает размер изображения

B – вытянутость изображения по оси y

C – яркость изображения в центре

D – свободный член

E – вытянутость изображения в произвольном направлении

Параметры функции Лоренца определялись путём решения избыточной системы уравнений нелинейным методом наименьших квадратов. Затем определялись координаты центров изображений спутников и опорных звёзд в плоскости ПЗС-снимка. Астрометрическая редукция наблюдений производилась методом шести постоянных. При редукции также происходил учёт дифференциальной рефракции первого порядка. В качестве опорного каталога был взят UCAC4. На кадре удавалось выделить не менее 8 опорных звёзд. Большинство снимков были отождествлены более чем по 10 звёздам.

Погрешности измерений оценивались по стандартным формулам.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_k - x_{mean})^2}{N-1}}; \varepsilon_x = \sigma_x / \sqrt{N}$$

Если погрешность одного измерения превышала 0."3 для Ариэля и Умбриэля и 0."1 для Титании и Оберона, данные измерения выбрасывались из рассмотрения. Средние значения погрешностей нормальных мест, удовлетворяющих указанному критерию, приведены в таблице 1.

Таблица 1: Средние погрешности нормальных мест ε и средние погрешности одного измерения σ (угловые секунды)

	Ариэль	Умбриэль	Титания	Оберон
$\varepsilon_\alpha(\sigma_\alpha)$	0.06 (0.11)	0.05 (0.09)	0.02 (0.03)	0.02 (0.03)
$\varepsilon_\delta(\sigma_\delta)$	0.06 (0.11)	0.07 (0.11)	0.02 (0.03)	0.02 (0.04)

3 Результаты и сравнение с теорией

С 2007 по 2016 год было накоплено почти 7000 ПЗС-кадров с изображениями Урана. В таблице 2 указано, сколько ночей наблюдался каждый из четырёх спутников, что соответствует числу полученных за год нормальных мест, в скобках указано количество измеренных за весь год индивидуальных положений.

Полученные нормальные места неравномерно распределены по всему периоду наблюдений. Существует общая тенденция увеличения количества измеренных координат от 2007 к 2016 году. Этот эффект был отмечен в работе [2] и связан с изменением угла между картинной плоскостью и экваториальной плоскостью Урана. В начале рассматриваемого периода экваториальная плоскость планеты, а значит, и плоскости орбит спутников были почти перпендикулярны плоскости изображения. Вследствие

Таблица 2: Количество полученных за год нормальных мест и измеренных положений

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ариэль	0(0)	0(0)	3(15)	0 (0)	0(0)	2 (10)	2 (10)	2 (10)	7 (35)
Умбриэль	0(0)	2 (10)	4 (20)	4 (20)	4 (20)	4 (20)	14 (70)	8 (40)	11(55)
Титания	3 (13)	5 (25)	11 (55)	5 (25)	15 (75)	12 (60)	19 (91)	15 (74)	21 (105)
Оберон	4 (21)	7 (35)	11 (55)	5 (25)	18 (90)	13 (65)	18 (88)	19 (94)	21 (105)

Таблица 3: Средние значения разностей О-С в угловых секундах

	Ариэль	Умбриэль	Титания	Оберон
Среднее $(O - C)_\alpha$	0.043	0.025	-0.009	-0.001
Среднее $(O - C)_\delta$	-0.074	-0.069	-0.014	-0.019

этого, обращаясь по орбитам вокруг Урана, его спутники большую часть времени находились либо за планетой, либо непосредственно перед, то есть их координаты на ПЗС-снимке измерить было нельзя. По мере движения по орбите вокруг Солнца Уран разворачивается таким образом, что угол между его экваториальной плоскостью и картинной плоскостью уменьшается. Поэтому спутники с большей вероятностью окажутся на снимке на достаточном расстоянии от планеты, чтобы можно было измерить их координаты.

Продemonстрируем этот эффект, сосчитав коэффициент K – отношение числа полученных за наблюдательный сезон нормальных мест всех спутников к числу ночей, когда наблюдался Уран. Под наблюдательным сезоном подразумевается период с конца августа по начало января, при этом январские наблюдательные ночи приписываются предыдущему году. Рисунок (1) иллюстрирует рост этого соотношения.

Полученные координаты сравнивались с планетной теорией INPOP13c и теорией движения спутников Урана Lainey 2015. Эфемериды были предоставлены сервисом MULTI-SAT [7]. Ряды разностей О-С представлены на графиках, средние значения О-С приведены в таблице 3.

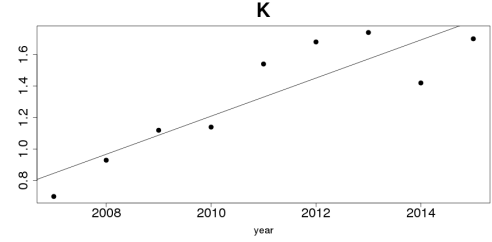
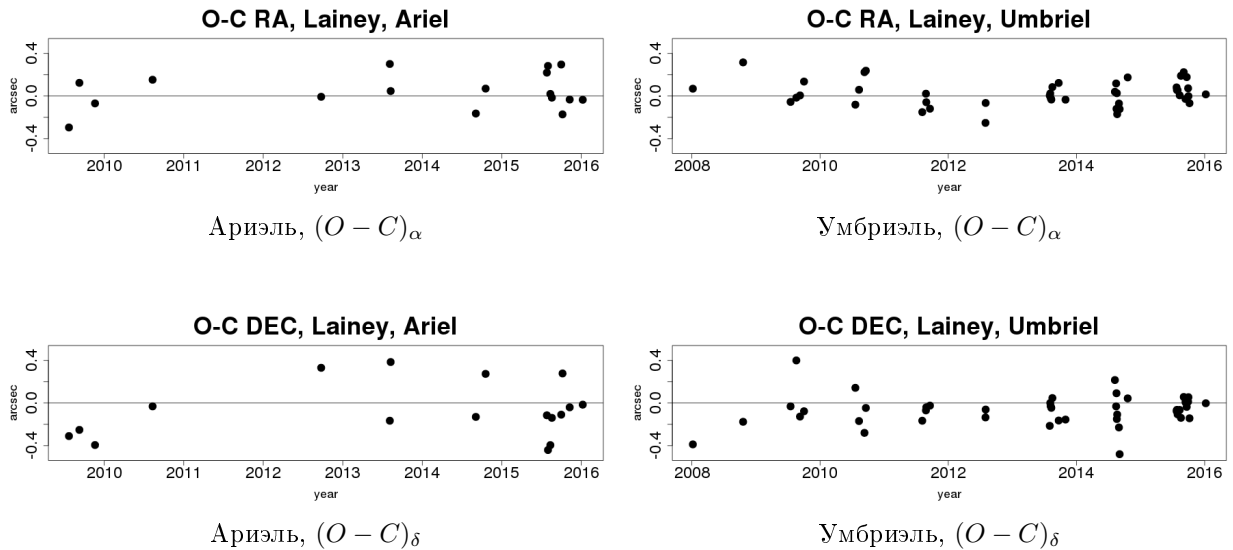
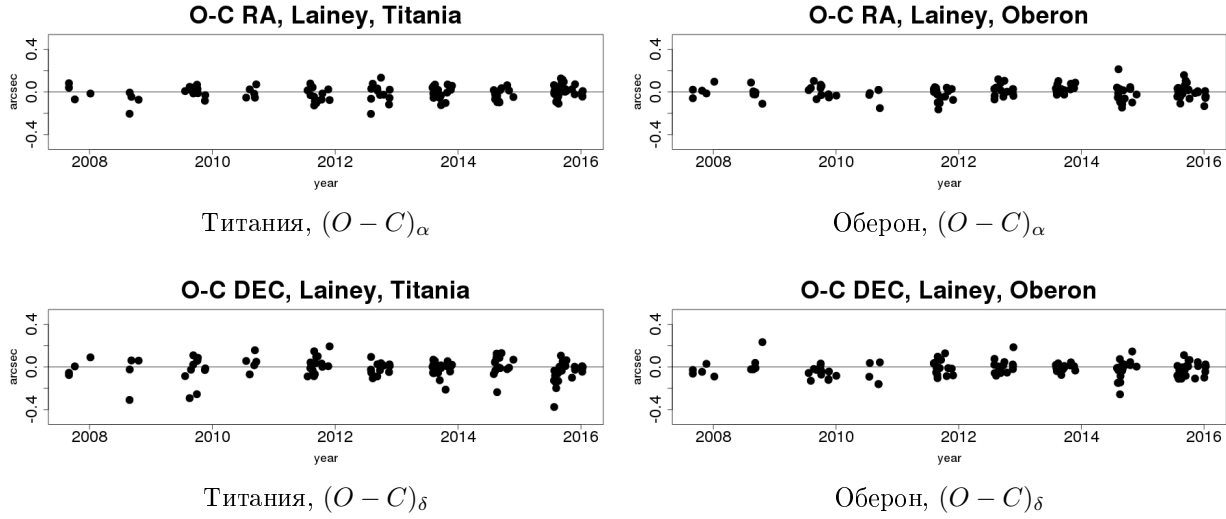


Рис. 1: Отношение полученных за сезон нормальных мест к числу наблюдательных ночей



Наблюдения показывают хорошее согласие с теорией.



4 Выводы

Представлены результаты наблюдений Урана и его спутников, проводившиеся в Пулковской обсерватории на 26-дюймовом рефракторе в период с августа 2007 по январь 2016 года. Анализ наблюдений показывает, что методы наблюдения и их обработки, в частности, метод вычитания ореола планеты, дают хорошие результаты и могут быть с успехом применены и в дальнейшем для подобных задач наблюдения спутников планет. Наблюдённые положения главных спутников Урана, как правило, близки к эфемеридным. Измеренные положения Урана и его спутников опубликованы в пулковских астрометрических базах данных и в базах данных CDS.

5 Благодарности

Список литературы

- [1] “Astrometric Observations of Satellites of Uranus Using 26-Inch Refractor in 2007–2011”, 2013, E. A. Roschina, I. S. Izmailov, T. P. Kiseleva
- [2] “Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations”, 2015, J.I.B. Camargo, F. P. Magalhaes, R. Vieira-Martins, M. Assafin, F. Braga-Ribas, A. Dias-Oliveira, G. Benedetti-Rossi, A. R. Gomes-Junior, A. H. Andrei and D. N. da Silva Neto
- [3] M.Yu. Khovrichiev, Astrometric observations of the Uranian satellites with the Faulkes telescope North in 2007 September, 2009
- [4] Izmailov I.S., Kiselev A.A., Kiseleva T.P., and Khrutskaya E.V., Using a CCD-camera in Pulkovo programs of observations of binary and multiple stars and satellites of major planets with the 26-inch refractor . Astron. Lett., 1998, vol. 24, no. 5, pp. 665-672.
- [5] Izmccd is a software packet for processing digital images of celestial objects, 2005, Izmailov, I.S., <http://www.izmccd.puldb.ru/>
- [6] “Precision of the ephemerides of outer planetary satellites”, Planetary and Space Science, 2009, Emelyanov N.V.
- [7] Emel’anov N/V/ and Arlot J.-E., The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT, Astron., Astrophis., 2008, vol. 487, pp. 759-765
- [8] Kiseleva T.P., Khrutskaya E.V., Pulkovo astrometric observations of bodies of the Solar System from 1898 to 2005: observational database, Solar. Syst. Res., 2007 vol. 41, no. 1, pp. 72-80

- [9] Zacharias, N.; Finch, C. T.; Girard, T. M.; Henden, A.; Bartlett, J. L.; Monet, D. G.; Zacharias, M. I., The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4), *The Astronomical Journal*, Volume 145, Issue 2, article id. 44, 14 pp. (2013)