

# Наблюдения спутников Урана на 26-дюймовом рефракторе в Пулковской обсерватории с 2007 по 2016 год

Ершова А.П., Рощина Е.А., Измайлов И.С., Ховричев М.Ю.

23 июня 2016 г.

## Аннотация

## 1 Введение

Для исследований динамики планетных систем и вопросов формирования и эволюции Солнечной системы, а также для обеспечения эфемеридами космических миссий необходимы высокоточные теории движения больших планет и их спутников. Построение таких теорий требует обширного наблюдательного материала. Н.В. Емельянов в своей работе [6] показал, что точность эфемерид может быть повышена за счёт увеличения интервала наблюдений.

В двадцатом веке в Пулковской обсерватории проводились фотографические наблюдения Урана. Координаты планеты относительно звёзд измерялись непосредственно, спутники Урана для фотографического метода были недоступны.

В 2007 году начались наблюдения системы Урана с ПЗС-камерой. На ПЗС-снимках удаётся получить пригодные для измерения изображения четырёх из пяти главных спутников Урана: Ариэля (u1), Умбриэля (u2), Титании (u3) и Оберона (u4). Для этих четырёх спутников точности измерений получились на уровне других аналогичных работ [2, 3]. Миранда (u5) находится на слишком малом угловом расстоянии от Урана, поэтому её изображение на снимках, используемых в данной работе, выделить нельзя.

Первые результаты наблюдений системы Урана с ПЗС на 26-дюймовом рефракторе в Пулково были опубликованы в 2013 году в работе Е.А. Рощиной и др. [1]. В качестве опорного каталога тогда был взят UCAC2. Были представлены результаты наблюдений, проводившихся в период 2007 – 2011. В настоящей работе объём наблюдательных данных значительно больше: наблюдения покрывают период с августа 2007 по январь 2015 года. Измерения проводились с каталогом UCAC4, что позволило получить в поле зрения больше опорных звёзд.

## 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. Центральная шкала в фокальной плоскости –  $19''.80$ /мм. Поле зрения составляет  $12' \times 12'$ , масштаб –  $0''.24$ /пиксель,  $3056 \times 3056$  пикселей размером по 12 мкм каждый.

По результатам наблюдений за одну ночь получалось по одному нормальному месту каждого доступного наблюдением 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

$\alpha$  – 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  $\varepsilon$  и средние погрешности одного измерения  $\sigma$  (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.

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

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 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.

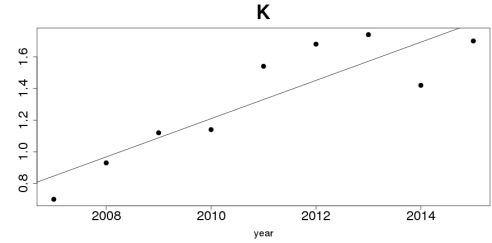
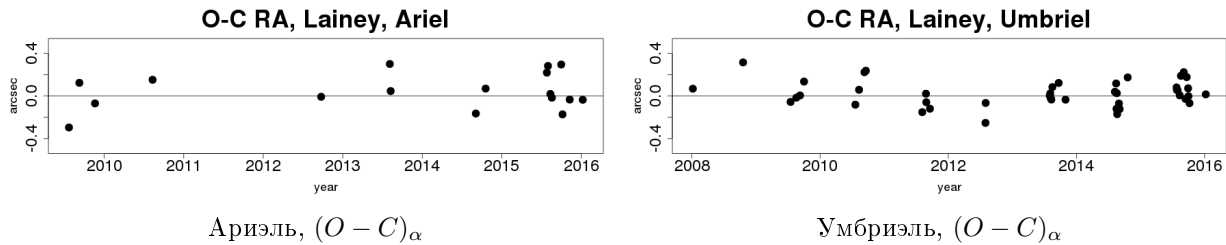


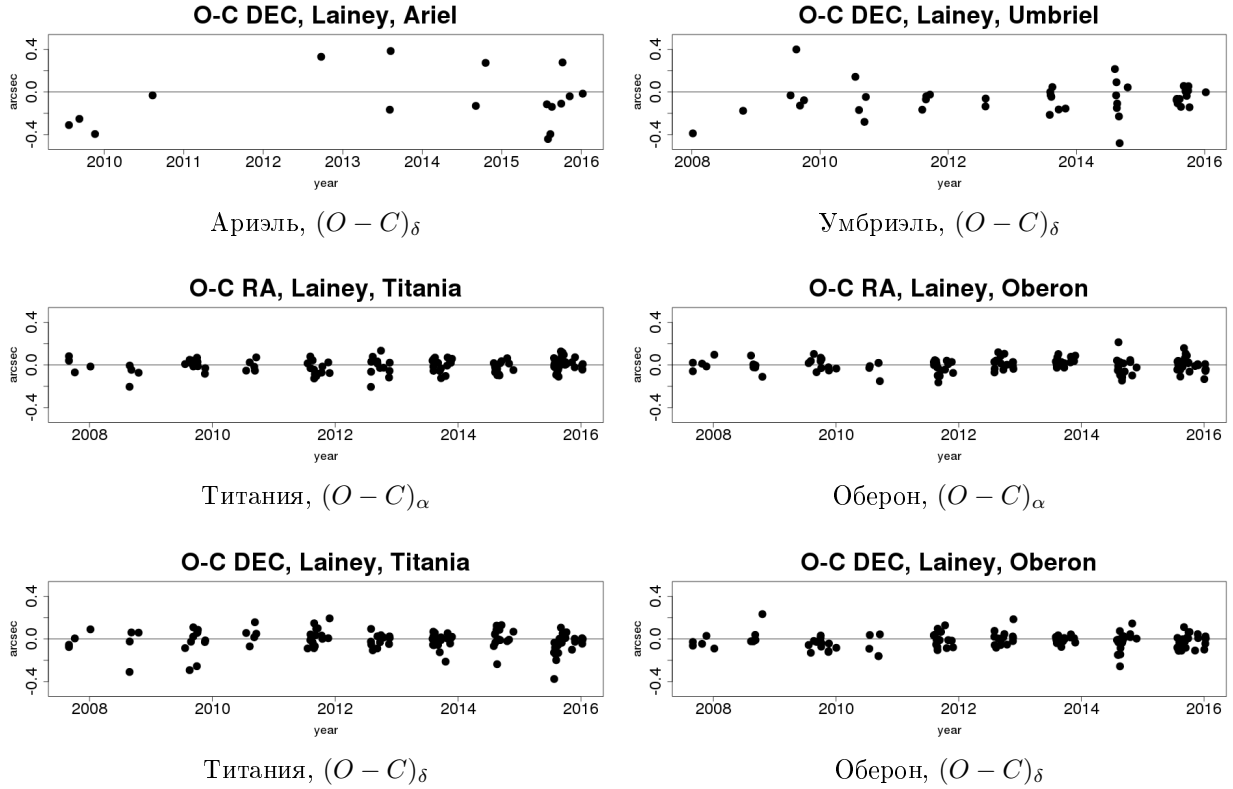
Рис. 1: Отношение полученных за сезон нормальных мест к числу наблюдательных ночей



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. Khovrichyev, 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