

Оценка точности теорий движения Урана и его главных спутников по наблюдениям на инструментах Пулковской обсерватории

Ершова Анастасия

13 апреля 2016 г.

Аннотация

1 Введение

Для фундаментальных исследований динамики планетных систем, а также вопросов формирования и эволюции Солнечной системы важны теории движения больших планет и их спутников. Кроме того, до сих пор Уран был обделён вниманием космических аппаратов (Только Вояджер 2 внёс свою лепту в наблюдения системы Урана), и координаты Урана и его спутников понадобятся при подготовке будущих космических миссий.

В данной работе рассматриваются теории движения четырёх из пяти главных спутников Урана. Теоретически предсказанные положения светил на небесной сфере сравниваются с измеренными координатами, полученными из наблюдений на инструментах Пулковской обсерватории. Речь идёт о снимках с 26-дюймового рефрактора и Нормального астрографа. В работе использован длинный ряд наблюдений, включающий в себя и данные с фотопластинок, самые старые из которых датируются 1953 годом, и новейшие наблюдения с ПЗС.

Уран является самой тусклой из планет, доступных для наблюдения невооружённым глазом. Он был открыт Уильямом Гершелем в 1781 году. Как и все большие планеты, Уран имеет систему колец и спутников, среди которых сейчас выделяют 5 главных, то есть ближайших к планете и имеющих наибольшие размеры. В порядке удаления орбиты спутника от планеты это — Миранда (u5), Ариэль (u1), Умбриэль (u2), Титания (u3) и Оберон (u4). История наблюдения самых крупных спутников — Титании и Оберона — начинается уже в 1787 году, Ариэль и Умбриэль были открыты в 1847, Миранда — в 1948. Хронологический порядок отражает трудоёмкость наблюдений этих объектов и точности теорий их движений. Измерить положение спутника на ПЗС-кадре тем сложнее, чем ближе спутник находится к планете и, соответственно, сильнее скрыт ореолом.

Можно оценить наибольшие угловые расстояния, на которые спутники могут отдаляться от планеты. Считая для оценки, что Земля и Уран в противостоянии, получим следующее.

Спутник	Максимальное удаление от Урана в секундах дуги
Оберон	44
Титания	33
Умбриэль	20
Ариэль	14
Миранда	9

На снимках, используемых в данной работе, изображение Миранды удавалось выделить в крайне редких случаях (около 5 ночей за весь ряд наблюдений). Даже в этих случаях измерений приемлемого качества не получалось. Поэтому в дальнейшем этот спутник из рассмотрения выбрасывается.

Ось вращения Урана составляет малый угол ($\approx 8^\circ$) с плоскостью его орбиты, в следствие чего при движении Урана вокруг Солнца изменяется угол, под которым с Земли видна плоскость орбит его спутников (Рис. 1). Когда экваториальная плоскость Урана видна с ребра, велика вероятность, что спутник

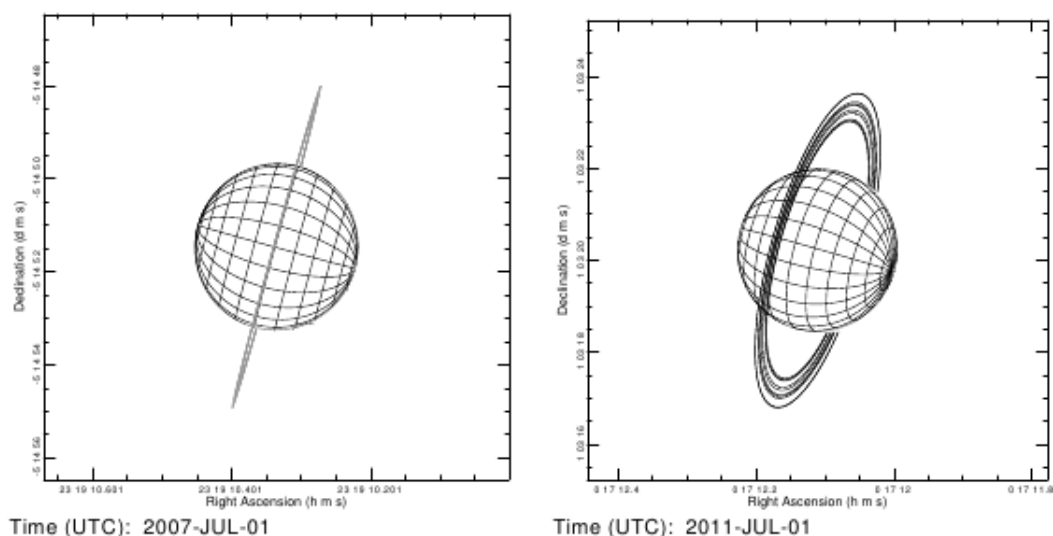


Рис. 1: Видимая с Земли ориентация Урана и орбит его спутников (“Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations”, J.I.B. Camargo и др., 2015)

на кадре окажется непосредственно перед планетой или за ней, то есть его координаты измерить будет нельзя. Поэтому количество измеренных нормальных мест распределено во времени не равномерно. Если рассматривать ряд наблюдений, представленный конкретно в этой работе, то замечен дефицит положений спутников, полученных по ПЗС-кадрам в 2007 – 2010 годах. Однако объясняется он, скорее, не ориентацией экваториальной плоскости Урана, а техническими причинами. В то же время, сопоставляя годы с 2011 по 2015, в которых количества ночей наблюдений сравнимы, можно заметить, что доля измерений, не отсеянных в процессе обработки (с небольшой дисперсией), росла от 2011 к 2015 году.

2011	— 0.617
2012	—
2013	—
2014	— 0.629
2015	— 0.759

Географические координаты Пулковской обсерватории $59^{\circ}46'18.2''$ с. ш., $30^{\circ}19'33.8''$ в. д., что в настоящее время позволяет проводить наблюдения Урана в период с конца августа по начало января. В 1950-ые годы большинство наблюдений проводилось в марте.

2 Теории движения Урана и его спутников

3 Наблюдения с ПЗС

Наблюдения системы Урана на ПЗС начались в августе 2007-го года, когда на 26"-рефрактор Пулковской обсерватории была установлена камера FLI Pro Line 09000, имеющая размеры 3056×3056 px, каждый пиксель по $12 \mu m$. Фокусное расстояние телескопа – 10413 мм, диаметр апертуры – 65 см. Поле зрения при этом составляет $12' \times 12'$, масштаб $0''.24/px$ [1].

В начале 2007 года было сделано несколько серий снимков с экспозициями 3 секунды, всего порядка 300 кадров. Эти кадры складывались по 25. В дальнейшем за одну наблюдательную ночь снималось 40 кадров с Ураном с экспозициями 10 секунд. При обработке наблюдений эти кадры складывались по 8. Такие экспозиции и сложение кадров позволили получить на изображении достаточное число опорных звёзд и хорошее отношение сигнала к шуму.

Таким образом, к 2015 году было накоплено около 6500 ПЗС-кадров с изображениями Урана. В таблице 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.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ариэль	0(0)	0(0)	3(15)	1 (5)	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)

Обработка наблюдений, в том числе, сложение кадров и измерение координат производилось в программе `izmssd` [4]. Программа позволяет вычитать в выбранной области вокруг спутника вычитать ореол планеты, аппроксимируя распределение яркости многочленом второй степени. После вычитания ореола изображение спутника оказывается на равномерном фоне, что позволяет в дальнейшем получить неискажённые координаты. Координаты центров изображений спутников и опорных звёзд вычислялись при помощи аппроксимации профилей изображений функцией Лоренца.

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

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

$I(x, y)$ – 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, определяемые при измерениях, при этом

A – задает размер изображения

B – вытянутость изображения по оси y

C – яркость изображения в центре

D – свободный член

E – вытянутость изображения в произвольном направлении

Редукция наблюдений (вычисление экваториальных координат) производилось методом шести постоянных. В качестве опорного каталога взят UCAC4. На измеряемом снимке, как правило, удавалось выделить от 10 до 20 опорных звёзд.

Поскольку разности О-С сами по себе значительно превышают расхождение теорий, для демонстрации результатов достаточно привести графики разностей наблюждённых координат только с одной теорией.

3.1 Ариэль

(2) (3)

3.2 Умбриэль

(3.2) (3.2)

3.3 Титания

(3.3) (3.3)

3.4 Оберон

(3.4) (3.4)

4 Фотографические наблюдения

Наблюдения Урана с фотопластинками проводились на Нормальном астрографе. Такая техника не позволяла выделить на снимке изображения спутников, поскольку спутники Урана имеют видимые звёздные величины далеко за пределами обнаружения фотографического метода. При обработке данных наблюдений измерялись координаты центра изображения самой планеты. Процесс получения координат Урана состоит из следующих этапов.

1. Оцифровка фотопластинки производится с помощью специальной установки, состоящей из камеры Canon ..., предметного столика и подсвечивающего экрана. Для учёта аберраций объектива используется шаблон, ранее оцифрованный на Профили изображений, как меток шаблона, так и изображений светил на пластинке аппроксимируются функцией Мофата.

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

Параметры функции Мофата (2) аналогичны параметрам функции Лоренца (1).

2. Измерение меток шаблона, а также опорных звёзд и объекта. На этом этапе получают координаты, выраженные в пикселях.
3. По снимку шаблона производится калибровка кадра. Результаты калибровки используются для перевода координат в миллиметры. На этом этапе координаты освобождаются от аберраций.
4. Отождествление опорных звёзд производится вручную. Экваториальные координаты объекта вычисляются по опорным звёздам. Астрометрическая редукция производится методом 8 постоянных.

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] “Ephemerides of the main Uranian Satellites”, 2013, N. V. Emelyanov, D. V. Nikonchuk
- [3] “Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations”, J.I.B. Camargo и др., 2015
- [4] “Izmccd is a software packet for processing digital images of celestial objects”, 2005, Izmailov, I.S., <http://www.izmccd.puldb.ru/>

5 Заметки на будущее

Добавить в таблицу долю хороших измерений в 2012 и 2013 годах
 выяснить, где оцифровывали шаблон, найти статью, на которую сослаться уточнить название камеры
 вставить формулу астрометрической редукции с восемью постоянными

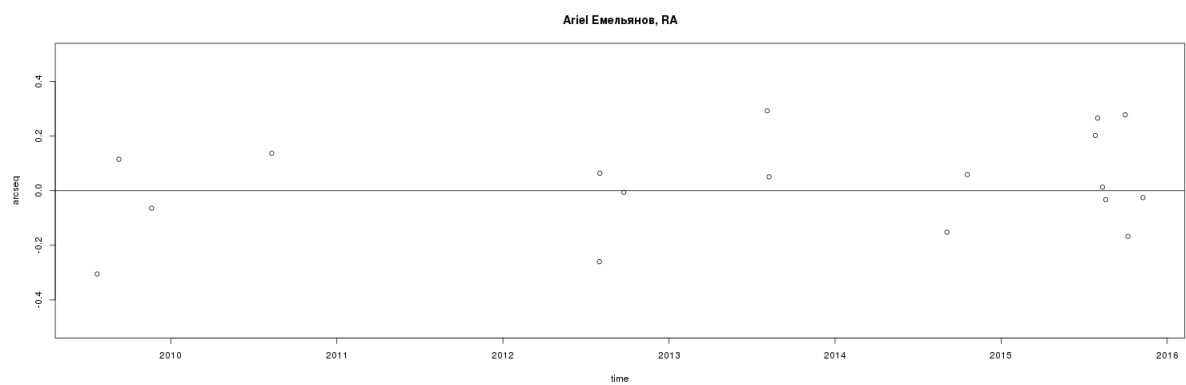


Рис. 2: О-С Ариэль, прямое восхождение

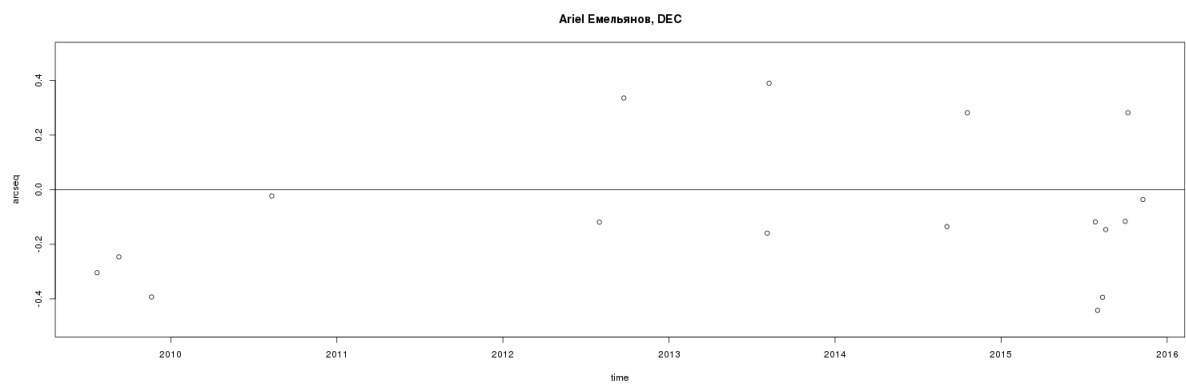


Рис. 3: О-С Ариэль, склонение

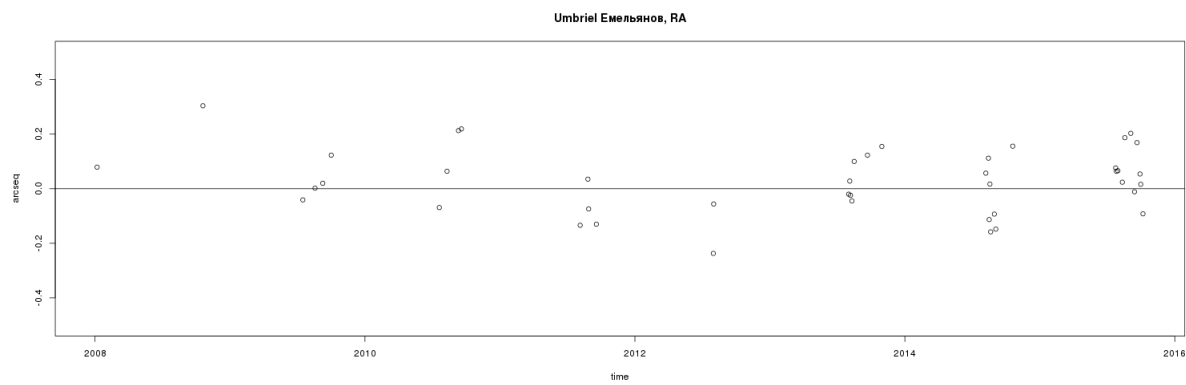


Рис. 4: О-С Умбриэль, прямое восхождение

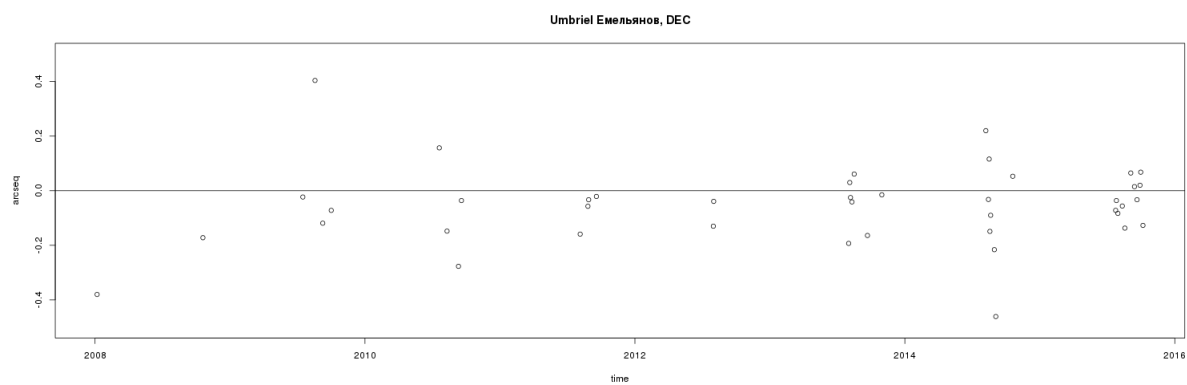


Рис. 5: О-С Умбриэль, склонение

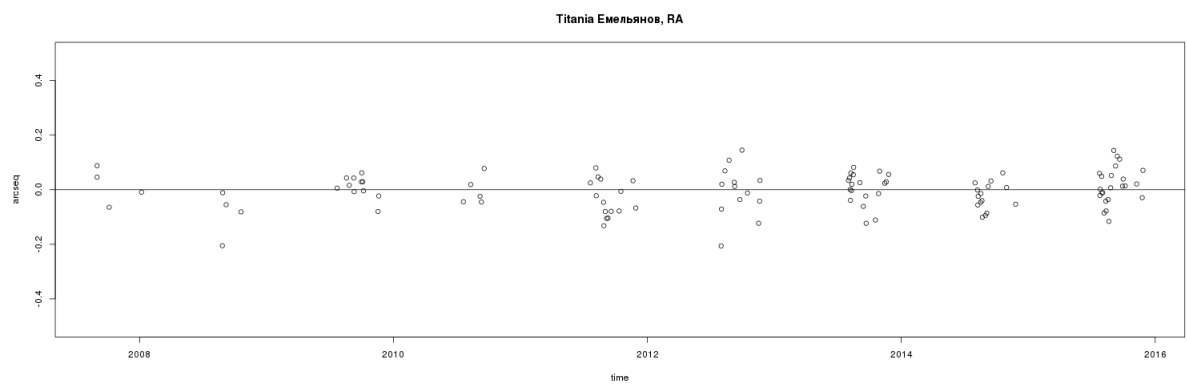


Рис. 6: О-С Титания, прямое восхождение

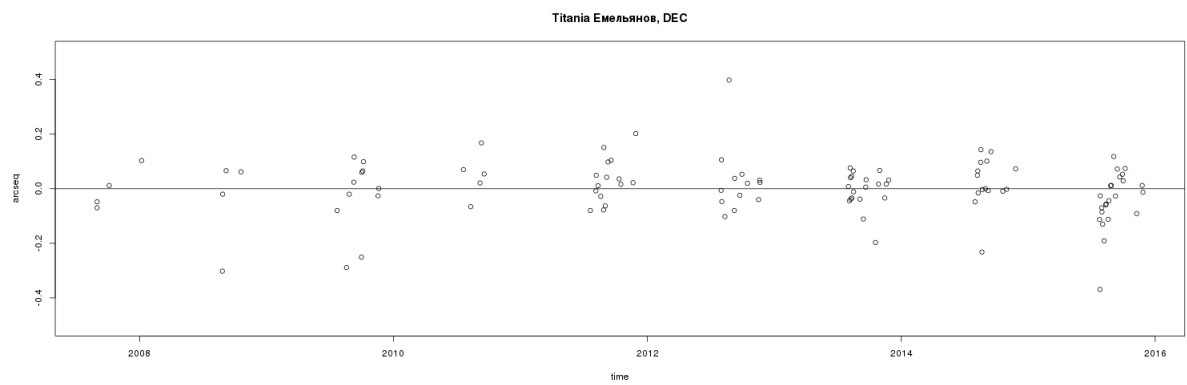


Рис. 7: О-С Титания, склонение

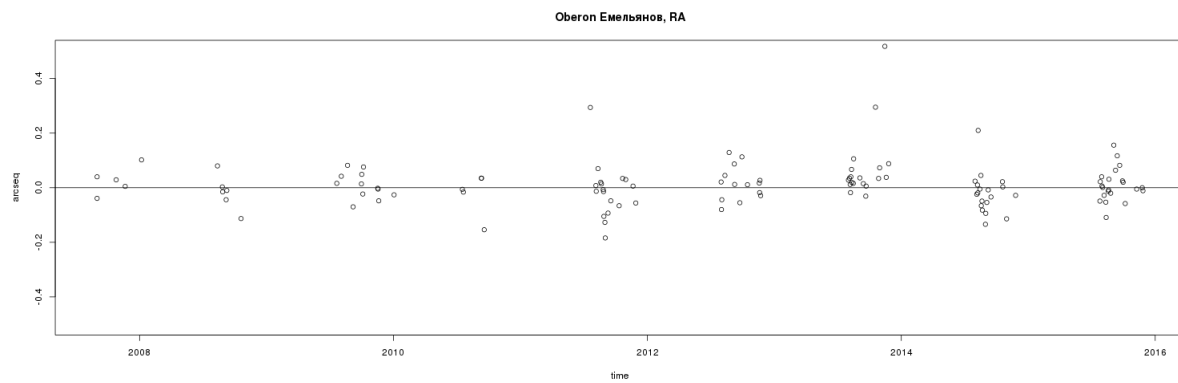


Рис. 8: О-С Оберон, прямое восхождение

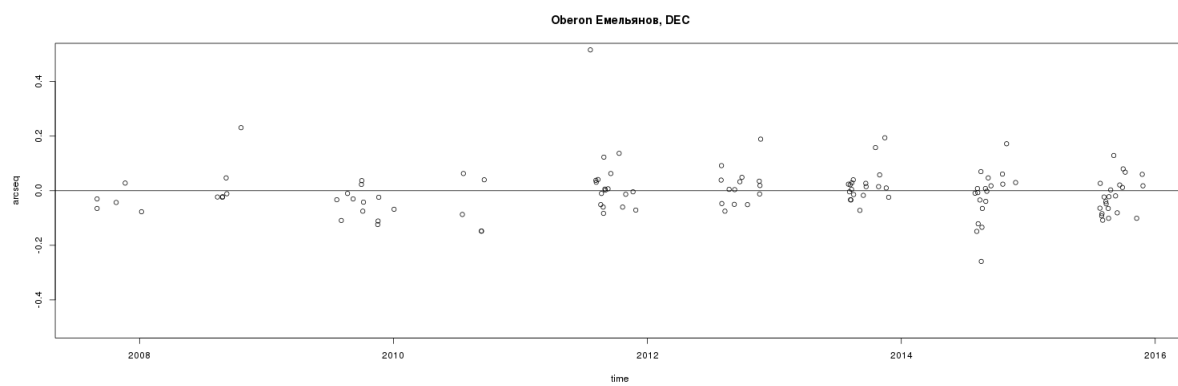


Рис. 9: О-С Оберон, склонение