

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

Ершова Анастасия

28 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 планеты и 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

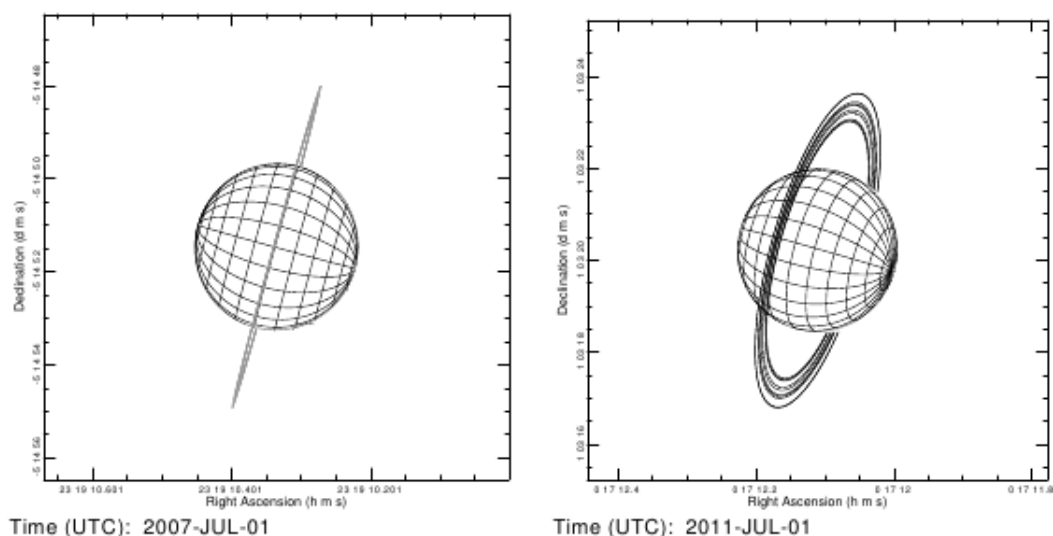


Рис. 1: Видимая с Земли ориентация Урана и орбит его спутников (“Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations”, J.I.B. Camargo и др., 2015)

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

Отличия теорий движения обусловлены, главным образом, тем, какие возмущающие факторы учитываются в уравнениях движения, а также набором наблюдательных данных, которые использовались для оценки величин, входящих в уравнения. При описании движения в системе главных спутников Урана наибольшим возмущающим фактором выступает гравитационное взаимодействие спутников. Влияние Солнца и несимметричность гравитационного поля планеты оказываются на несколько порядков меньше. В частности, при больших возмущениях со стороны Солнца система Урана, наклонённая к эклиптике почти на 90° , могла оказаться неустойчивой и распасться под действием эффекта Лидова-Кодзаи. Этого не случилось, поскольку орбита Урана пролегает достаточно далеко от Солнца, и имеет место экваториальное сжатие планеты, достаточное, чтобы удерживать спутники на орбитах вблизи экваториальной плоскости.

В 1986-1987 годах были созданы аналитические эфемериды GUST86 (General Uranus Satellite Theory [3]). При её создании использовались данные наземных наблюдений, накопленные в период с 1911 по 1986 год, а также оптические и радио-данные, переданные космическим аппаратом “Вояджер-2”. Для построения этой теории учитывались взаимодействия спутников, сжатие планеты, короткопериодические члены первого порядка и резонансные члены второго порядка, так же обусловленные взаимодействием.

ем спутников между собой, но не учитывались никакие другие возмущения. В 2008 году свою теорию представил Lainey. Он использовал в своей теории наблюдения, выполненные между 1948 и 2006 годом, теория строилась на численном интегрировании уравнений движения. Правые части уравнений включали вторую и четвёртую зональные гармоники представления гравитационного потенциала Урана, взаимное притяжения спутников и влияние со стороны Солнца. В 2015 году теория была дополнена автором с использованием новейших наблюдений. В 2013 году была разработана теория Емельянова и Никончука, так же основанная на численном интегрировании уравнений движения. При создании этой теории использовались наблюдения Урана и его спутников, полученные за всё время, прошедшее с момента открытия каждого спутника по момент создания теории. В Теории Емельянова и Никончука в правых частях уравнений движения учитывались гравитационные взаимодействия спутников, экваториальное сжатие планеты (вторая и четвёртая гармоники) и возмущение со стороны Солнца.

Выше упомянутые теории использовались в данной работе в качестве *calculatum*. Существуют и другие теории движения спутников Урана. В Jet Propulsion Laboratory были разработаны эфемериды в 1996 году. Кроме того, в 1998 году вышла теория, которую разработал D.B. Taylor, используя данные короткого периода наблюдений с 1997 по 1995 год. Эфемериды JPL и теория Тейлора не рассматриваются в данной работе.

Сравним эфемериды на период 2007 – 2016 года, построенные на основе теорий Емельянова и Никончука, GUST86, Lainey.

Laskar – Lainey		
Спутник	Разница по α	Разница по δ
Ариэль	$\leq 30 \text{ mas}$	$\leq 10 \text{ mas}$
Умбриэль	$\leq 30 \text{ mas}$	$\leq 40 \text{ mas}$, средние разности эфемеридных склонений возрастают от 2007 к 2016 году примерно в 1.5 раза
Титания Оберон		

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 3056x3056 px, каждый пиксель по $12 \mu\text{m}$. Фокусное расстояние телескопа – 10413 мм, диаметр апертуры – 65 см. Поле зрения при этом составляет $12' \times 12'$, масштаб $0''.24/\text{px}$ [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 *izmscd* [5]. 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 измеряемой 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 наблюденных 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)

Визуальный анализ графиков О-С для Титании и Оберона при варьировании масштаба временной оси позволил предположить существование периодической компоненты рядах О-С по обеим координатам с периодом примерно 8-10 лет. Для анализа рядов разностей О-С был применён модифицированный алгоритм CLEAN [6]. Статистически значимых пиков на периодограмме не обнаружено.

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. Как правило, на одной пластинке делалось две экспозиции, что позволило по двум индивидуальным положениям получать одно нормальное место планеты на небесной сфере в средний момент времени. Процесс получения координат Урана состоял из следующих этапов.

1. Оцифровка фотопластинки производилась на специальной установке, состоящей из подсвечивающего экрана, предметного столика и цифровой камеры Canon EOS 5D Mark II с длиннофокусным объективом "Юпитер 21М". Для учёта аббераций объектива используется шаблон, ранее оцифрованный на бельгийском высокоточном сканере ROB Digitizer.

2. При измерении меток шаблона, а также опорных звёзд и объекта изображения аппроксимировались функцией Мофата.

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

Параметры функции Мофата (2) аналогичны параметрам функции Лоренца (1). На этом этапе получаются координаты, выраженные в пикселях.

3. По снимку шаблона производится калибровка кадра. Результаты калибровки использовались для перевода координат в миллиметры. На этом этапе координаты освобождались от аберраций, измерения 4 снимков одной пластинки усреднялись для каждой экспозиции отдельно.
4. Отождествление опорных звёзд производилось вручную. Экваториальные координаты объекта вычислялись по не менее, чем 8 опорным звёздам. Астрометрическая редукция производилась 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] “GUST86 - An analytical ephemeris of the Uranian satellites ”, 1987, Laskar J., Jacobson, R.A.
- [4] “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-Júnior, A. H. Andrei and D. N. da Silva Neto
- [5] “Izmccd is a software packet for processing digital images of celestial objects”, 2005, Izmailov, I.S., <http://www.izmccd.puldb.ru/>
- [6] “Анализ неравномерных временных рядов”, 2001, Витязев В.В.
- [7] “Фотографические наблюдения визуально-двойных звёзд в Пулковке: оцифровка, измерения и калибровка”, 2015, И.С. Измайлов, Е.А. Рощина, А.А. Киселёв, Т.П. Киселёва, О. А. Калиниченко, О. П. Быков, О. В. Кияева, Л. Г. Романенко, Н. А. Шахт, К. Л. Масленников, Т. А. Васильева

5 Заметки на будущее

Добавить в таблицу долю хороших измерений в 2012 и 2013 годах
вставить формулу астрометрической редукции с восемью постоянными
перевести слово *secular* и адекватно написать про теории, найти новую статью *Lainey*

Стоит ли упоминать о теориях, с которыми не происходит сравнения?

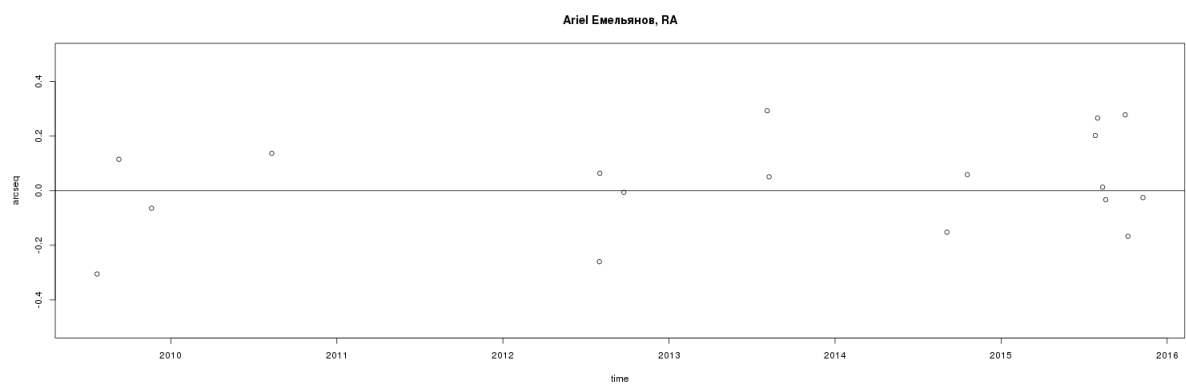


Рис. 2: О-С Ариэль, прямое восхождение

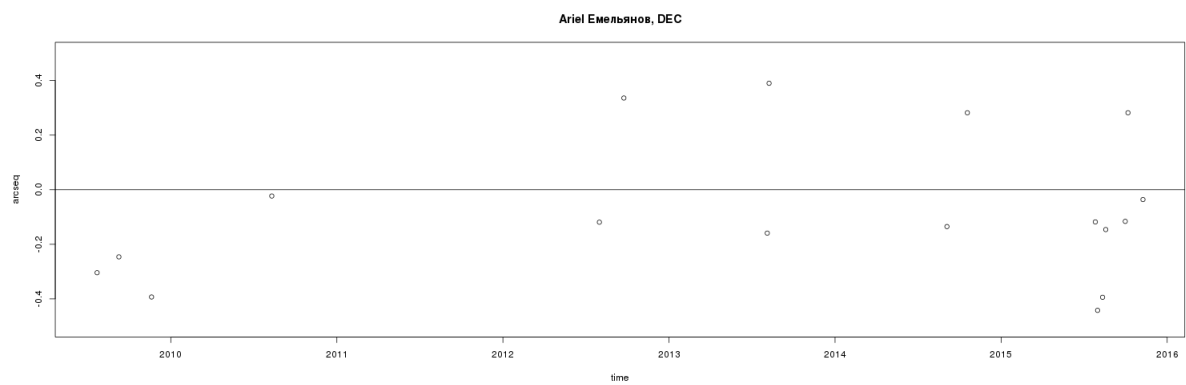


Рис. 3: О-С Ариэль, склонение

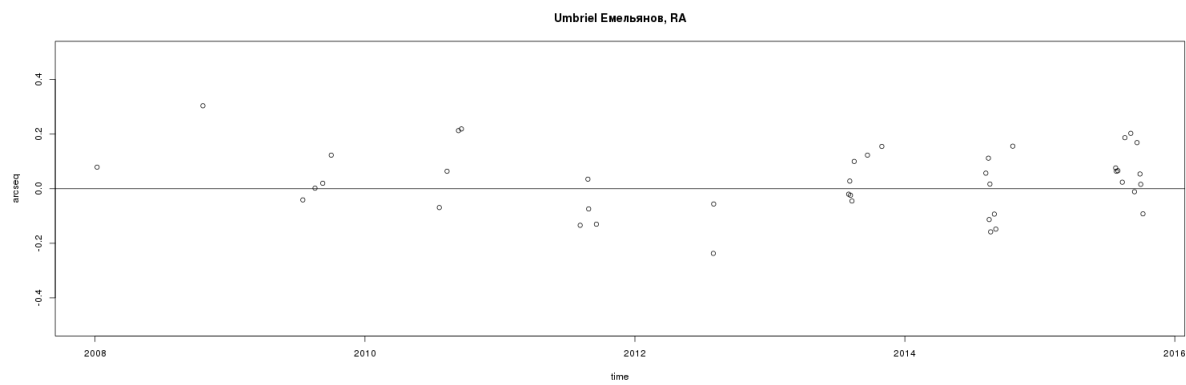


Рис. 4: О-С Умбриэль, прямое восхождение

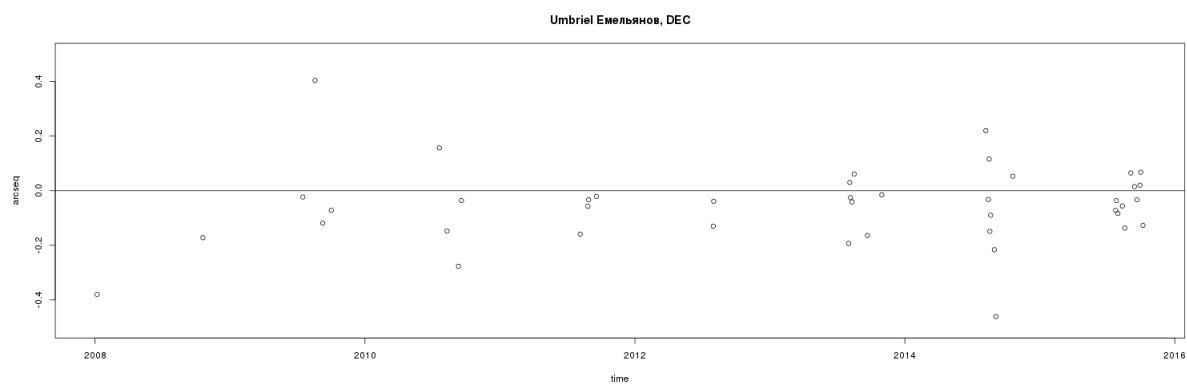


Рис. 5: О-С Умбриэль, склонение

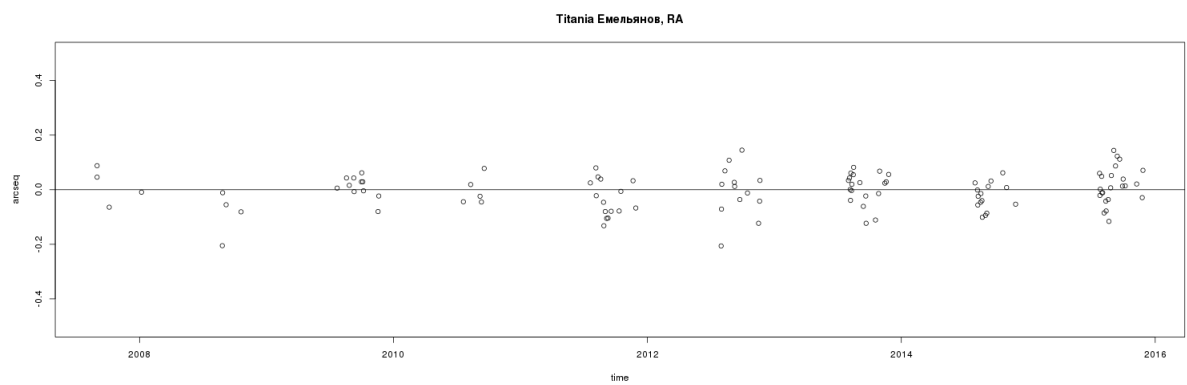


Рис. 6: О-С Титания, прямое восхождение

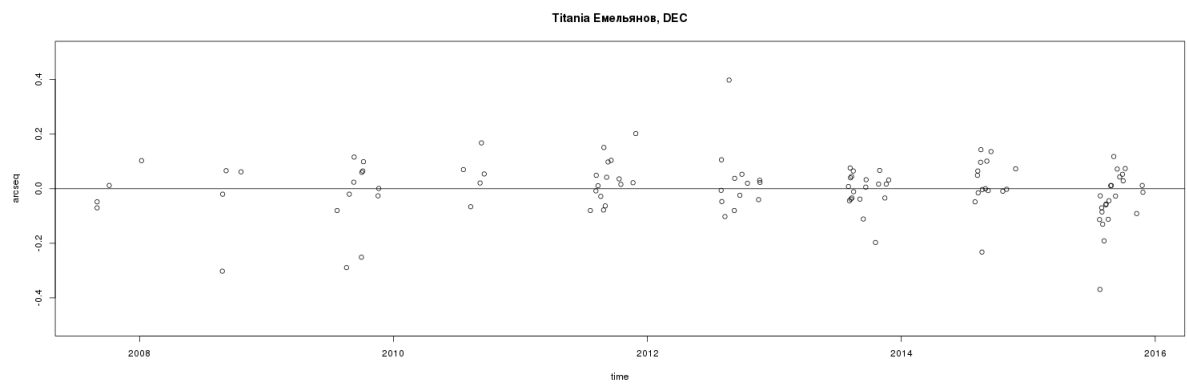


Рис. 7: О-С Титания, склонение

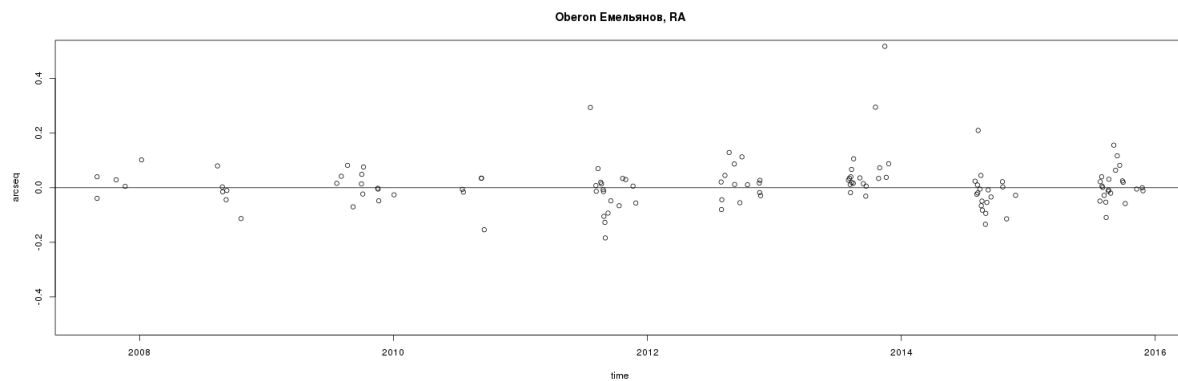


Рис. 8: О-С Оберон, прямое восхождение

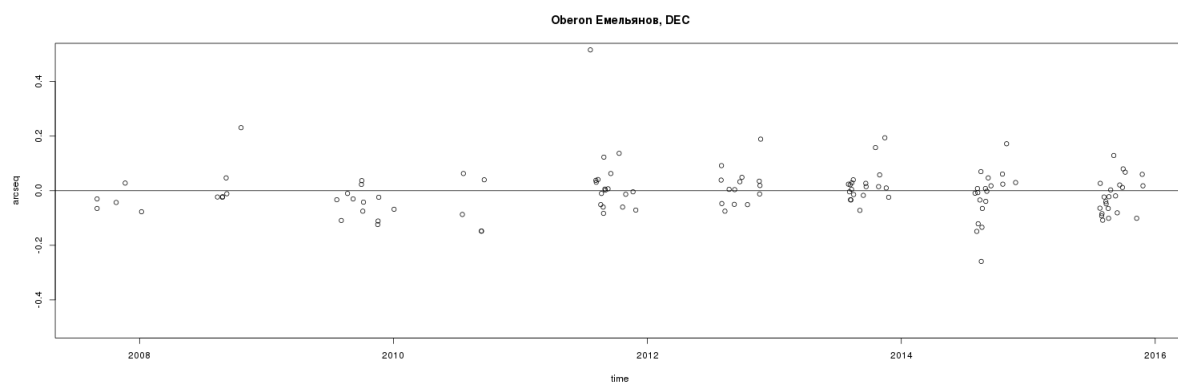


Рис. 9: О-С Оберон, склонение