

АСТРОМЕТРИЯ СПУТНИКОВ САТУРНА НА ОСНОВЕ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ И ПЗС-НАБЛЮДЕНИЙ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ в 1995 –2000 гг.

Т.П.Киселева, И.С.Измайлов, О.А.Калиниченко.

В работе представлены результаты исследования параллельных фотографических и ПЗС наблюдений в период 1995 - 2000 гг. Описана методика вычисления разностей координат спутников Сатурна (“спутник – спутник”), определенных из наблюдений фото и ПЗС методом “след-масштаб”. Всего получено 74 ПЗС-наблюдения и 292 фотографических наблюдения пар спутников Сатурна. Исследована внутренняя точность ПЗС и фото наблюдений. Среднеквадратические ошибки одного наблюдения оказались равными $\pm 0.015''$ и $\pm 0.014''$ для ПЗС наблюдений и $\pm 0.054''$ и $\pm 0.058''$ для фотографических наблюдений. Произведено сравнение наблюдений с эфемеридами Н.В.Емельянова, вычисленными на основе теории движения Харпера и Тэйлора. Вычислены средние разности (О-С) и их дисперсии, которые отражают как ошибки наблюдений, так и ошибки теории. Приводится таблица сравнения этих величин для ПЗС и фото-наблюдений. Дисперсии (О-С), характеризующие внешнюю точность наблюдений, равны $\pm 0.146''$ и $\pm 0.069''$ для ПЗС –наблюдений тесных пар спутников ($X < 50''$), $\pm 0.120''$ и $\pm 0.120''$ - для фотографических наблюдений по X и Y соответственно. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант N 01-02-17018).

1. ВВЕДЕНИЕ.

Измерения расстояний внутри систем спутников планет всегда были актуальными и привлекали внимание астрономов с давних времен, поскольку давали исходный материал для динамических исследований в Солнечной системе.

Астрометрические исследования системы спутников Сатурна, включающие восемь первых спутников, проводятся в Пулковской обсерватории с начала XX столетия. В послевоенное время в Пулкове эти исследования начались с 1973 г [Т.П.Киселева, Г.В.Панова, О.А.Калиниченко, 1977]. До 1995 г исследования базировались исключительно на фотографических наблюдениях на 26-дюймовом рефракторе, нормальном астрографе и АКД [С.В.Толбин, 1991], с 1995 г наряду с фотографией в качестве приемника при наблюдениях на 26-дюймовом рефракторе ($D/F = 650/10410$ mm) используется ПЗС-матрица ST6 (количество пиксел: 242 x 375, размер поля зрения: 170" x 129", размер пиксел в угловых единицах: 0.46" x 0.53") [И.С.Измайлов, 1998]. При фотографических наблюдениях до 1995 г применялись фотографические пластинки ORWO NP-27 размером 13 x 18 см, покрывающие поле зрения, равное 40 x 60 угловых минут, в последние пять лет применяются пластинки того же сорта эмульсии, но с размером 9 x 12 см, покрывающие поле диаметром 20 x 30 угловых минут.

Целью астрометрических исследований является определение взаимных расстояний между спутниками, а также расстояний между спутниками и планетой на основе длительных и регулярных рядов наблюдений на длиннофокусном рефракторе, каковым является 26-дюймовый рефрактор. Результаты этих наблюдений создают основу для улучшения теорий движения спутников Сатурна. Кроме того, наблюдения спутников позволяют определять положения Сатурна, не измеряя его изображений на фотопластинках, как правило, отягощенных искажениями вследствие влияния колец, атмосферы и пр.

Фотографические наблюдения позволяют измерять на одной фотографии взаимные расстояния между всеми спутниками одновременно, в то время, как ПЗС-наблюдения дают расстояния только в системе 2-х, 3-х спутников - вследствие малого поля ПЗС-матрицы. Таким образом, фото и ПЗС наблюдения взаимно дополняют друг друга.

Пятилетний опыт работы с ПЗС-матрицей ST-6 показал существенное повышение внутренней точности наблюдений по сравнению с фотографическими наблюдениями. Кроме того, с применением ПЗС-приемника существенно увеличилась проникающая сила телескопа, так что удалось наблюдать слабый спутник Сатурна – Гиперион, который при фотографических наблюдениях на 26-дюймовом рефракторе при отсутствии высокочувствительных фотопластинок – недоступен.

В задачу исследования входило также исследование внутренней и внешней точности полученных результатов на основе сравнения наблюдений с новейшей теорией движения спутников Сатурна Харпера и Тэйлора [Harper D. and Taylor D.B.,1993], а также сравнение результатов фотографических и ПЗС-наблюдений, и сравнение с результатами других авторов.

Разработка и совершенствование методики наблюдений и их обработки занимает значительную часть в астрометрических исследованиях, поскольку от нее зависит точность результатов и возможность ее повышения. Опыт многолетних фотографических наблюдений и пятилетний опыт работы по наблюдениям с ПЗС-матрицей показал большое сходство методики наблюдений и астрометрической редукции этих двух видов наблюдений.

Применение ПЗС-матрицы на 26-дюймовом рефракторе позволило производить фотометрические и астрометрические наблюдения взаимных покрытий и затмений в системах спутников планет [И.С.Измайлов и др., 1998, Известия ГАО, N213]. Всего за пятилетний период параллельных фотографических и ПЗС-наблюдений в результате применения оригинальной методики обработки и астрометрической редукции, разработанной в Пулкове [А.А.Киселев,1989], получено 74 относительных положений спутников Сатурна (“спутник – спутник”) по ПЗС-наблюдениям и свыше 500 относительных положений (“спутник – спутник” и “спутник – Сатурн”) – по фотографическим наблюдениям. Результаты опубликованы в Известиях ГАО N 214 [Т.П.Киселева, И.С.Измайлов, 2000 г; Т.П.Киселева,О.А.Калиниченко,2000г] и помещены в Банк данных Института небесной механики в Париже.

2. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ.

При фотографических наблюдениях на 26-дюймовом рефракторе для получения относительных координат спутников (“спутник – спутник” и “спутник – планета”) в качестве основного использовался метод “след-масштаб”[А.А.Киселев, 1989]. При этом методе на фотопластинке получается цепочка изображений системы спутников (5 – 10 изображений) с экспозициями в 2 минуты, так что изображения 1 – 6 и 8-го спутников Сатурна получаются четкими, хорошо измеримыми. До и после наблюдений цепочки изображений фотографируются восточный и западный следы, состоящие из двух изображений Сатурна и спутников на одной суточной параллели. Обычно для измерения длины следа использовались изображения Титана. Как правило, длина следа равнялась 900 “(или 45 мм). Изображения следов при избранном методе наблюдений необходимы для определения ориентировки измеряемых расстояний в системе спутников относительно принятой системы экваториальных координат. Основными формулами астрометрической редукции с учетом дифференциальной рефракции в”методе след-масштаб”являются следующие:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha \cos\delta &= \Delta\xi = M_0[1 + \beta(1+k_1^2)] X + (2\beta k_1 k_2 \pm \gamma) M_0 Y \\ \Delta\delta = \Delta\eta &= M_0[1 + \beta(1+k_2^2)] Y \pm \gamma M_0 X \\ \gamma &= \sin\delta \operatorname{tg} t/2 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь X , Y – измеренные относительные координаты спутников, M_0 – геометрический масштаб телескопа, β – коэффициент рефракции, k_1 , k_2 – тангенциальные координаты зенита на пластинке на момент наблюдений, t – угловая длина следа, γ – угол ориентировки (малый угол, учитывающий наклон несимметричного следа относительно касательной к суточной параллели). Редукция выполняется по двум следам независимо, в конце оба результата усредняются. Наличие двух результатов, ориентированных по двум независимым следам, западному и восточному, дает возможность оценить ошибку ориентировки и ошибку результата, обусловленную неточностью ориентировки. В нашем случае при фотографических наблюдениях ошибка ориентировки достигала величины 0.014° . Неточность ориентировки главным образом сказывается на координате $\Delta\delta$ и зависит от расстояния между спутниками. Так, при расстоянии между спутниками в $200''$, ошибка в координате $\Delta\delta$ может достигать $0.05''$. Масштаб телескопа известен с высокой точностью из специальных определений и равен: $M_0 = 19''.8078 \pm 0''.0004 / \text{mm}$. Внутренняя точность относительных координат спутников планет при фотографических наблюдениях оценивалась по сходимости результатов по нескольким изображениям на одной пластинке. Вычислялись среднеквадратические ошибки относительных координат спутников, определенных по одному изображению и по среднему результату для всей пластинки. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Внутренняя точность фотографических наблюдений.

Вид ошибки	$\epsilon_{\Delta\alpha}$	$\epsilon_{\Delta\delta}$	N
С.К.О. одной экспозиции	0.120''	0.130''	1220
С.К.О. среднего места	0.054''	0.058''	244

Результаты фотографических наблюдений опубликованы в трех работах: (Т.П.Киселева и др., 1996, 1998, 2000).

3. ПЗС-НАБЛЮДЕНИЯ.

После установки на 26-дюймовом рефракторе ПЗС-матрицы ST-6 программа наблюдений практически не претерпела изменений: наблюдения спутников планет с целью определения точных относительных координат, наблюдения взаимных покрытий и затмений в системах спутников планет, а также сближений и покрытий звезд астероидами, наблюдения избранных астероидов и комет. Поле ПЗС-матрицы очень маленькое: всего 3 x 2 угловых минуты. В таком малом поле практически невозможно использовать опорные звезды высокоточных каталогов HIPPARCOS и TYCHO. Поэтому оказалось целесообразным наблюдать пары (или несколько) спутников и определять их относительные координаты без опорных звезд, методом “след-масштаб”, т.е. так же, как и в случае фотографических наблюдений, с той разницей, что на фотографиях получается вся система Сатурна, а в поле ПЗС обычно наблюдаются два – три спутника и определяются их взаимные положения.

Определение координат самого Сатурна с помощью ПЗС пока не освоены.

Наблюдения производятся сериями по 10 – 100 кадров с экспозициями не менее 15 секунд (для усреднения рефракционных аномалий) в зависимости от яркости объекта. Наблюдаются спутники с 1-го по 8-й, в том числе 7-й спутник Гиперион, который был

недоступен для фотографических наблюдений вследствие его малой яркости (14.5 зв. вел.). После каждой серии наблюдаются следы Титана, какого-нибудь другого спутника или звезды - для определения ориентировки ПЗС-кадров относительно суточной параллели. При наблюдениях с 1999 г стали использовать два совмещенных светофильтра - желтый и синий, дающие полосу пропускания в видимой части спектра (V), и отсекающие красную часть спектра в изображениях спутника и планеты. Это позволило более эффективно наблюдать близкие к Сатурну спутники Мимас и Энцелад. При обработке учитывался градиент фона от яркой планеты. В результате обработки измерений на ПЗС-кадрах определялись взаимные расстояния между спутниками ($X = \Delta x \cos \delta$, $Y = \Delta \delta$) внутри каждого кадра и их среднеквадратичные ошибки. Затем эти результаты усреднялись по каждой серии кадров.

Важнейшим этапом обработки ПЗС-изображений является определение их центра. Эта процедура существенно отличается от определения центров фотографических изображений на фотопластинке, когда центр находится глазом как фотометрический центр тяжести симметричного изображения (при визуальных измерениях). При ПЗС-наблюдениях оцифрованное в результате компьютерной обработки изображение аппроксимируется какой-нибудь, наиболее подходящей для данного комплекса "телескоп + ПЗС" модельной кривой. В нашем случае наиболее подходящей моделью, представляющей форму ПЗС-изображений, оказалась модифицированная модель Моффата [И.С.Измайлов, А.А.Киселев и др., 1998]:

$$I(x,y) - I_F = [1 / A(x - x_0)^2 + B(y - y_0)^2 + C] + D \quad (2)$$

Здесь $I(x,y)$ – отсчеты интенсивности – числа, пропорциональные суммарному заряду, накопленному в данном пикселе с координатами x, y , I_F – средняя интенсивность фона для данной матрицы; x_0, y_0 – координаты центра изображения; A, B, C, D – параметры модели.

Определение точных взаимных расстояний между спутниками в поле ПЗС невозможно без калибровки ПЗС-матрицы, параметрами которой являются масштаб и ориентировка. Эта задача в нашей практике решалась с привлечением фотографических наблюдений, а именно, с помощью близких по времени (в одну ночь) наблюдений шарового скопления М3 на фотопластинке и на ПЗС-матрице. Фотопластинка была измерена на измерительном приборе "Аскорекорд". Измеренные координаты 12 звезд скопления на фотопластинке сопоставлялись с измеренными координатами в поле ПЗС с помощью 12 условных уравнений линейного вида. В результате были определены параметры ориентировки: масштаб - M_x, M_y , ориентировка - θ , косоугольность осей ПЗС-матрицы - ϕ :

$$\begin{aligned} M_x &= 0.022943 \pm 0.000008 \text{ mm/px} \\ M_y &= 0.026942 \pm 0.000024 \text{ mm/px} \\ \theta &= 2^\circ.289 \pm 0.044 \\ \phi &= 0^\circ.184 \pm 0.050 \end{aligned} \quad (3)$$

Астрометрическая редукция выполнялась методом "след-масштаб" по формулам, аналогичным тем, которые применялись при обработке фотографических наблюдений, причем ориентировка определялась для каждой серии ПЗС-кадров по измерениям следов звезд или спутников, которые получались путем пропускания изображения спутника или звезды через поле ПЗС-матрицы при остановленном часовом механизме телескопа. Так же, как при фотографических наблюдениях, производился учет дифференциальной рефракции. Определяемые в конечном итоге относительные

координаты спутников (“спутник – спутник”) в нашем случае, при расстояниях не более 100 угловых секунд практически совпадают с тангенциальными координатами.

По сходимости результатов наблюдений внутри одной серии получены оценки внутренней точности разностей координат спутников. Среднеквадратичные ошибки одной разности координат, вычисленной как среднее по всей серии, оказались равными: $\epsilon_x = \pm 0.015''$, $\epsilon_y = \pm 0.014''$. Величины внутренних ошибок наблюдений отражают качество изображений, аномалии рефракции и не зависят от ошибок редукции и теории.

4. СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ САТУРНА С ТЕОРИЕЙ ДВИЖЕНИЯ.

Результаты фотографических и ПЗС-наблюдений сравнивались с эфемеридами, вычисленными Н.В.Емельяновым(ГАИШ) на основе теории движения спутников Сатурна, разработанной Д.Харпером и Д.Б.Тэйлором (Harper D. And Taylor D.B., 1993). В таблице 2 приводятся средние значения $(O-C)_X$, $(O-C)_Y$, где X, Y – относительные координаты спутников: $X = \Delta\alpha\cos\delta$, $Y = \Delta\delta$; σ_X , σ_Y – дисперсии (O-C); ϵ_X , ϵ_Y – внутренние среднеквадратичные ошибки измерений расстояний между спутниками, средних по ПЗС-серии или по пластинке (в случае фотографических наблюдений). Все величины даются в единицах секунды дуги.

Таблица 2. Результаты сравнения наблюдений с эфемеридами.

Вид координат	$(O-C)_X$	$(O-C)_Y$	$\sigma_X(“)$	$\sigma_Y(“)$	$\epsilon_X(“)$	$\epsilon_Y(“)$
Спутник-Сатурн Фото	+0.040	-0.400	± 0.160	± 0.210	± 0.070	± 0.080
Спутник-спутник Фото	-0.015	-0.001	0.120	0.120	0.054	0.058
Спутник –спутник ПЗС (без 7-го сп.)	+0.105	+0.044	0.211	0.255	0.015	0.014
Спутник-спутник ПЗС, $X < 50''$	-0.055	+0.016	0.146	0.069	0.015	0.014

Как видно из таблицы, внутренняя точность координат достаточно высокая для фотографических, так и для ПЗС-наблюдений, хотя в случае ПЗС наблюдений она в 4 раза выше. Даже в случае измерений фотографических сатурноцентрических координат внутренняя ошибка меньше 0.1”. Этот факт характеризует хорошее соответствие 26-дюймового рефрактора данной задаче. Внешняя точность результатов, характеризуемая дисперсией (O-C), для фотографических наблюдений оказалась выше, чем для ПЗС наблюдений, поскольку точность ориентировки ПЗС-измерений существенно ниже точности ориентировки астрофотографий. Так точность определения позиционных углов при фотографических наблюдениях равна в среднем по всему материалу 0.014 градуса, в то время, как при ПЗС-измерениях – 0.13 градуса. Этот недостаток ПЗС –измерений является следствием малой ширины поля ПЗС-матрицы (в 15 раз меньшей ширины поля фотографической пластинки), что исключает использование необходимой базы для определения ориентировки по суточному следу с нужной точностью. Большая ошибка начальной ориентировки проявляется в росте дисперсии σ для (O-C) при увеличении расстояния между измеряемыми спутниками. Сопоставление дисперсий для (O-C) ПЗС—измерений разностей координат спутников (две последние стрки в таблице 2) иллюстрирует этот

недостаток ПЗС-измерений разностей координат спутников планет. В последней строке таблицы 2 приведены средние результаты ПЗС-измерений пар спутников, расстояния между которыми не превышают 50 секунд дуги. Внешняя точность этих наблюдений втрое выше точности всей совокупности ПЗС-измерений пар спутников.

ПЗС-наблюдения 7-го спутника – Гипериона обнаружили довольно большие $(O-C)_x$, достигающие иногда 1" и более. Поскольку ошибки наблюдений значительно меньше этих величин, большие $(O-C)$ свидетельствуют о неточности теории движения этого спутника.

Абсолютная величина средних разностей $(O-C)$ отражает систематические ошибки как наблюдений, так и теории. Данные таблицы 2 показывают отсутствие систематических ошибок в разностях "спутник – спутник", полученных фотографическими и ПЗС измерениями. Однако разности "спутник – Сатурн" показывают систематическую ошибку величиной $-0.40''$ по δ , т.е. наблюдаемое изображение Сатурна как бы смещено к северу относительно эфемеридного положения. Отрицательная величина $(O-C)_y$ для сатурноцентрических координат спутников, полученных на 26-дюймовом рефракторе, повторяется на протяжении всего наблюдательного периода Сатурна (1973-1984, 1994 – 2000) [Т.П.Киселева и др., 1996; С.В.Толбин, 1991]. Причиной этого систематического смещения наблюдаемого центра изображений Сатурна является, повидимому, уравнение блеска, усиленное влиянием колец Сатурна, накладывающихся на изображения его диска. К сожалению, учесть этот фактор невозможно. Поэтому в последнее время наблюдения нацелены в основном на определении взаимных расстояний пар спутников. Тем не менее, положения Сатурна возможно определять по фотографиям его системы спутников, полученных на 26-дюймовом рефракторе, непосредственно не измеряя изображения. Для этого необходимо иметь в поле астрофотографии одну или несколько звезд из высокоточного каталога. Измерения расстояний между звездой и спутниками в методе "след-масштаб" при наличии достаточно точных эфемерид сатурноцентрических координат спутников (не хуже 0.1") позволяют решить эту задачу с достаточно высокой точностью (Т.П.Киселева, 1996, Изв.ГАО, N 210, стр 11-43).

Точность теории движения спутников Сатурна, использованной нами для сравнения с наблюдениями, по нашим оценкам находится на уровне 0.1".

Полученные результаты позволяют заключить о целесообразности продолжения фотографических наблюдений спутников Сатурна, пока имеются для этого фотографические пластинки.

ПЗС-наблюдения на 26-дюймовом рефракторе показали их высокую эффективность как по значительно более высокой (в 4 раза) внутренней точности измерений в системах спутников планет, так и по более высокой проникающей силе телескопа с ПЗС-матрицей (на 4-5 зв. величин). Успешность применения ПЗС с необходимостью требует установки на рефракторе более мощной и большей по размеру матрицы, с большим полем, что с очевидностью должно привести к повышению точности наблюдений.

Литература.

1. Т.П.Киселева, Г.В.Панова, О.А.Калиниченко. Позиционные фотографические наблюдения Сатурна и его спутников в 1971-1974 гг в Пулкове.//Известия ГАО, N 195, 1977, с.49-66.
2. С.В.Толбин. Результаты позиционных фотографических наблюдений системы Сатурна, выполненных в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе за период 1975-1984 гг.//ГАО АН СССР, Л-д, 1991, 20 с., Деп.ВИНИТИ, 18.07.91, N3077-

- В91.С.В.Толбин. Результаты позиционных фотографических наблюдений системы Сатурна, выполненных в Пулковке на нормальном астрографе в 1975-1984 гг.// ГАО АН СССР. Л-д, 1991, 17 с., Деп.ВИНИТИ, 18.07.91, N 3078-В91.
3. И.С.Измайлов, А.А.Киселев, Т.П.Киселева, Е.В.Хруцкая. Применение ПЗС-камеры в пулковских программах наблюдений двойных и кратных звезд и спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе. // ПАЖ, т.24, N 10, 1998, с.772-779.
 4. Harper D. and Taylor D.B.// Astron. And Astrophys., 1993, v.68, N 1, p.326
 5. И.С.Измайлов, А.А.Киселев, Т.П.Киселева, Е.В.Хруцкая. ПЗС-наблюдения сближений звезд с малыми планетами на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке. // Известия ГАО, 1998, N 213, с.171-175.
 6. А.А.Киселев Теоретические основания фотографической астрометрии// 1998, Москва, Наука, 260 с.
 7. Т.П.Киселева, И.С.Измайлов. Результаты ПЗС-наблюдений спутников Юпитера и Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке.// Известия ГАО, N 214, 2000, с.333-343.
 8. Т.П.Киселева, О.А.Калиниченко. Результаты фотографических наблюдений спутников Сатурна в Пулковке в 1994-1998 гг. // Известия ГАО, 2000, N 214, с.344-355.
 9. Т.П.Киселева, А.А.Киселев, Е.В.Хруцкая, И.С.Измайлов, О.А.Калиниченко. Результаты фотографических и ПЗС-наблюдений системы спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке в 1995 г. // Известия ГАО, 1996, N 210, с.76-94.
 10. Т.П.Киселева, О.А.Калиниченко. Фотографические наблюдения спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе в Пулковской обсерватории в 1996 г. // Известия ГАО, 1998, N 213, с.122-128.
 - 11 Т.П.Киселева. Астрометрические наблюдения галилеевых спутников Юпитера в Пулковке на 26-дюймовом рефракторе.// Известия ГАО , N 210, 1996, с.11 - 43.

Astrometry of Saturnian Satellites on the basis of Photografic and CCD observations with 26-inch Refractor at Pulkovo Observatory in 1995 – 2000.

Т.П. Kiseleva , I.S.Izmailov, O.A. Kalinichenko.

Summary

The results of parallel photografic and CCD observations of Saturnian Satellites in 1995-2000 are presented. The reductions technique for coordinates residuals determination of Saturnian Satellites is described in detail. Totality of 74 CCD and 292 photo observations of satellites relative positions have been obtained. The inner accuracy of CCD and photo observations was investigated. The m.s.e. of single CCD observation is $\pm 0.''015$ in AR direction and $\pm 0.''014$ in Decl., the corresponding errors for photo observations are: $\pm 0.''054$ and $0.''058$. The comparison of observation with ephemerides of N.V. Emelianov as calculated on the basis of Harper-Taylor's theory of Saturnian Satellites were made. The average residuals (O-C) and standard deviations were obtained. The table with results of comparison of CCD and photo observations are given. The standard deviations of (O-C) characterize the external accuracy of observations and equal $\pm 0.146''$ and $\pm 0.069''$ for CCD observations of close satellites ($X < 50''$) and $\pm 0.120''$ and $\pm 0.120''$ for photo observations in X and Y correspondingly.