



Определение точных положений Сатурна и относительных положений его спутников по оцифрованным астронегативам фотографических наблюдений 1972 – 1974 гг. и оценка точности современных теорий движения спутников

Т. П. Киселева, Т. А. Васильева, Е. А. Рощина, И. С. Измайлов

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия.

Abstract. В работе представлены результаты новой редукции старых фотографических наблюдений в Пулковской обсерватории 1972-74 гг. по оцифрованным фотопластинкам системы спутников Сатурна, полученным на 26-дюймовом рефракторе и Нормальном астрографе. Получены точные положения 2 - 6-го и 8-го спутников и Сатурна, координаты которого вычислены по измерениям положений спутников 4 - 6 без измерений изображений самой планеты. Полученные экваториальные координаты спутников и Сатурна размещены в Пулковской базе данных наблюдений тел Солнечной системы и доступны по адресу www.puldb.ru. С помощью сервиса MULTISAT выполнено сравнение результатов старой и новой редукции с новейшими эфемеридами спутников Сатурна. На основе этого сравнения выполнен анализ точности результатов наблюдений, сделана оценка точности современных теорий движения спутников. Точность результатов наблюдений в новой редукции оказалась в 3 раза выше точности координат спутников в старой редукции, выполненной с использованием опорного каталога AGK3. Точность современных эфемерид спутников Сатурна по результатам наблюдений на 26-дюймовом рефракторе оказалась на уровне 50 - 60 mas. Показано преимущество новой редукции по точности по сравнению со старой редукцией по визуальным измерениям и старым звездным каталогам. Делается вывод о целесообразности переработки большого массива старых наблюдений спутников планет по оцифрованным пластинкам в системе новых современных каталогов опорных звезд с целью повышения точности координат спутников и Сатурна. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-02-000675-а.

Введение

Построение и уточнение теорий движения систем спутников больших планет требует проведения длительных и регулярных наблюдений астрономических наблюдений на больших интервалах времени. Этой проблеме посвящена пулковская программа позиционных наблюдений тел Солнечной системы, начиная с 60-х годов прошлого века по настоящее время.

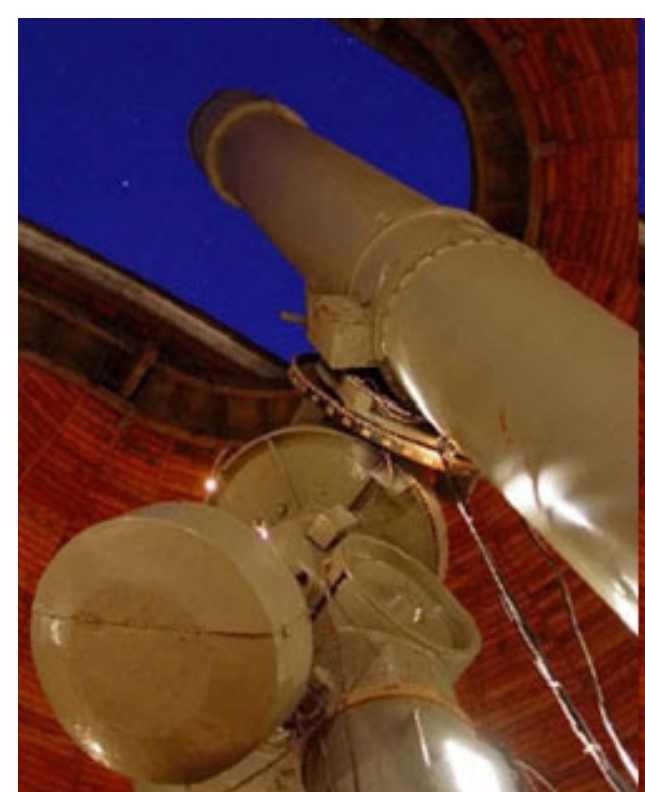
В стеклянной библиотеке Пулковской обсерватории собраны более 6500 астронегативов с наблюдениями тел Солнечной системы, из них около 1300 пластинок с изображениями системы Сатурна. Большая часть этого материала обработана, получены точные положения относительно опорных звезд из каталогов AGK3 и PPM. Результаты, их анализ и методика обработки представлены в публикациях (Киселева, 1998; Киселева, Панова, Калининченко, 1977; Толбин, 1991а, 1991б; Киселева, Калининченко, Измайлов, Васильева, 2010) и в Пулковской базе данных наблюдений тел Солнечной системы www.puldb.ru (Киселева, Хруцкая, 2007). Однако точность этих наблюдений, основанных на старых звездных каталогах в настоящее время недостаточна для уточнения современных теорий движения и выявления тонких эффектов в движениях спутников.

Поэтому повышение точности выполненных в прошлом длительных рядов наблюдений является актуальной задачей. Настоящая работа посвящена выяснению возможности повышения точности старых фотографических наблюдений с помощью современных методов астрометрической обработки на основе оцифровки и редукции в единой системе ICRS, обеспеченной новейшими опорными каталогами TYCHO-2, UCAC2, UCAC3.

Данная работа представляет первый этап проекта по оцифровке и новой редукции фотографических наблюдений с целью выяснить возможность повышения точности результатов Пулковских рядов наблюдений.

Наблюдательный материал

В качестве первого этапа переработки старых фотографических наблюдений на основе новой методики оцифровки и переизмерений были взяты наблюдения Сатурна и его первых восьми спутников 1972-1974 гг. на 26-дюймовом рефракторе и Нормальном астрографе Пулковской обсерватории.



26-дюймовый рефрактор



Нормальный Астрограф

D=65 см
F=10413 мм
M=19.80 "/mm
поле 40x60 угл. мин.

D=33 см
F=3460 мм
M=59 "/mm
поле 2x2 градуса

Всего отобрано около 150 пластинок, которые были оцифрованы с помощью мобильного цифрового устройства MDD (Mobile Device to Digitize) с цифровой камерой Canon EOS 5D Mark II. Ранее эти фотопластинки были измерены в 1970-е годы на полуавтоматическом измерительном приборе с визуальным наведением - Аскорекорд. Астрометрическая редукция выполнялась с помощью звездного каталога AGK3.

Результаты в виде экваториальных координат приведены в статье в Известиях ГАО в Пулкове (Киселева, Панова, Калининченко, 1977) и в Базе данных Пулковской обсерватории по наблюдениям тел Солнечной системы www.puldb.ru. Однако в той работе не было выполнено сравнение наблюдений с эфемеридами ввиду отсутствия в то время высокоточных эфемерид спутников планет. Сравнение результатов старой редукции с современными эфемеридами сделано в настоящей работе.

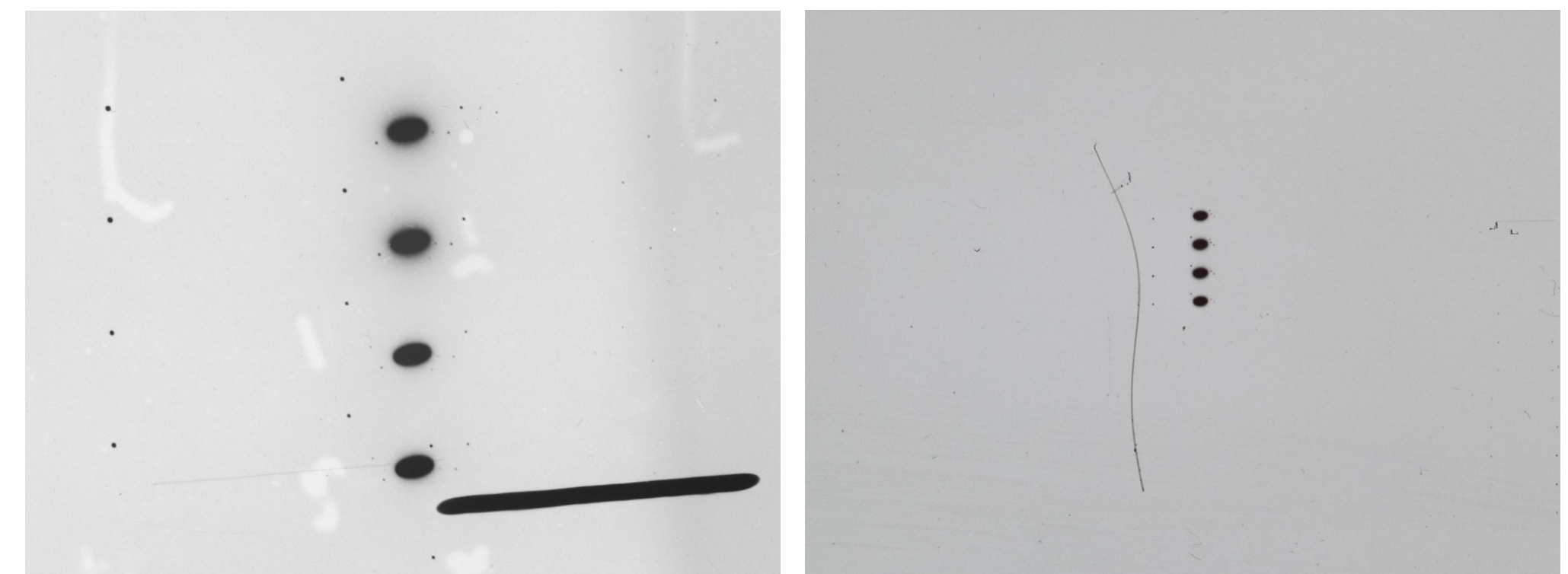
В новой редукции была поставлена задача: получить новые значения положений спутников - абсолютных (звездных) и относительных (взаимных), а также определить координаты Сатурна по спутникам без измерения изображений планеты; сравнить полученные координаты с эфемеридными, вычисленными по современным теориям движений спутников и Сатурна, сравнить результаты старой и новой редукции, выполнить оценку точности наблюдений и современных теорий движения Сатурна и его спутников и сделать вывод о целесообразности подобных переизмерений и редукции всех имеющихся рядов наблюдений с целью повышения точности наблюдений.

Оцифровка, измерения и астрометрическая редукция

Оцифровка производилась с помощью устройства MDD - Mobile Device to Digitize с цифровой камерой Canon EOS Mark II, использующей сенсор КМОП размером 36 x 24 мм с эффективным разрешением 21.1 млн пикселей (Grosheva, Izmailov, Khrutskaya, 2012). В процессе оцифровки при перефотографировании фотопластинок вносятся искажения за счет аббераций объектива и особенностей матрицы. Для устранения этих искажений была проведена калибровка камеры с помощью специального шаблона, представляющего собой фотографическую пластинку, на которой фотографическим методом нанесены около 200 звездообразных меток размером 250 - 300 микрон. Шаблон был предварительно оцифрован на высокоточном бельгийском сканере ROB Digitizer (De Cuyper, Winter, 2006)

Таким образом были выявлены и учтены систематические ошибки измерений, возникающие при оцифровке. Для калибровки перед съемкой каждой серии пластинок, шаблон заново фотографируется.

Фрагменты фотопластинок, оцифрованных с одинаковым разрешением:



пл. 6757
26"-рефрактор, 8.01.1974

пл. 9853
Норм.астрограф, 5.10.1972

Измерения оцифрованных пластинок выполнялись с помощью программного пакета IZMCCD, разработанного И.С. Измайловым (Измайлов, 2005). Центры изображений звезд и спутников определялись с помощью профиля Лоренца (Franz, 1973). Сатурн на фотопластинках не измерялся. В качестве опорных звезд выбирались 6-20 звезд из каталогов TYCHO-2, UCAC2, UCAC3. Преимущество отдавалось каталогу TYCHO-2, поскольку он ближе по средней эпохе его наблюдений (1990-е годы) к средней эпохе наших наблюдений (1973 г.), чем другие, более поздние современные каталоги. Астрометрическая редукция выполнялась методом Тернера (метод 6-ти постоянных). Учитывалась дифференциальная рефракция первого порядка. Определялись экваториальные координаты - прямое восхождение и склонение спутников и Сатурна, а также относительные (взаимные) координаты спутников вида «спутник минус спутник». При обработке наблюдений на 26-дюймовом рефракторе каждая экспозиция системы спутников на пластинке редуцировалась отдельно, без усреднения серии изображений, на пластинках Нормального астрографа определялись нормальные места - средние положения спутников из четырех изображений системы на пластинках.

Оценка точности результатов новой редукции. Сравнение с результатами старой редукции

Наблюденные положения спутников и Сатурна на соответствующие моменты времени сравнивались с эфемеридными значениями с помощью программного комплекса MULTI-SAT (Емельянов, Арло, 2008). Полученные разности (О-С) позволяют оценить внешнюю точность результатов. В Таблице 1 приводятся средние значения (О-С) для спутников 4 - 6 по всему периоду наблюдений, а также среднеквадратические ошибки одного наблюдения (внешняя точность): $\sigma_{\text{O-C}} \cos \delta$, $\sigma_{\text{O-C}}$ - как для новой редукции наблюдений по оцифрованным пластинкам, так и для старой редукции.

Таблица 1. Внешняя точность результатов наблюдений спутников Сатурна 1972-1974 гг.

Телескоп	(O-C) _{cosδ} arcsec	(O-C) _δ arcsec	$\sigma_{\text{(O-C)}_{\text{cos} \delta}}$ arcsec	$\sigma_{\text{(O-C)}_{\delta}}$ arcsec	Число наблюдений
Новая редукция					
26"R	-0.0152	-0.0119	±0.0892	±0.0798	302
NA	-0.0324	-0.0277	±0.1555	±0.1848	109
Старая редукция					
26"R	0.0127	-0.1279	±0.1482	±0.1762	120
NA	0.0413	-0.0445	±0.2140	±0.1941	63

Таблица 2. Ошибки измерений, редукции и вычисленные ошибки наблюдений спутников Сатурна.

Телескоп	ϵ_{mX} arcsec	ϵ_{mY} arcsec	$\epsilon_{\text{R}a}$ arcsec	$\epsilon_{\text{R}b}$ arcsec	$\sigma_{\text{a}} \cos \delta$ arcsec	σ_{b} arcsec	N
Новая редукция							
26"R	±0.057	±0.057	±0.036	±0.038	±0.068	±0.068	302
NA	0.138	0.131	0.060	0.090	0.150	0.159	109
Старая редукция							
26"R	0.110	0.100	0.170	0.150	0.202	0.180	120
NA	0.130	0.150	0.180	0.180	0.222	0.234	63

Примечание: ϵ_{mX} , ϵ_{mY} - ошибки измерений, вычисленные по нескольким наблюдениям в одну ночь; $\epsilon_{\text{R}a}$, $\epsilon_{\text{R}b}$ - ошибки редукции в методе 6-ти постоянных; $\sigma_{\text{a}} \cos \delta$, σ_{b} - вычисленные ошибки наблюдаемых положений спутников.

Литература

Киселева А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии // Москва, Наука, 1998, 260 с.
Киселева Т.П., Панова Г.В., Калининченко О.А. Позиционные фотографические наблюдения Сатурна и его спутников в 1971-1974 гг в Пулкове. // Известия ГАО в Пулкове, 1977, № 195, С. 49-66.
Киселева Т.П., Хруцкая Е.В. Астрометрические наблюдения тел Солнечной системы в Пулкове с 1898 по 2005 гг. База данных результатов наблюдений. // Астр. Вестник, 2007, т.41, № 1, С. 77-85.
Киселева Т.П., И.С. Измайлов, О.А.Калининченко, Т.А. Васильева. Астрометрические исследования рядов фотографических и ПЗС наблюдений системы Сатурна на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории в период 1995-2007 гг. // Астрономический вестник, 2010, т.44, № 1, с. 65-73.
Толбин С.В. Результаты позиционных наблюдений системы Сатурна, выполненных в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе за период 1975-1982 гг. // 1991. ГАО АН СССР, Деп ВИНТИ 18 июля 1991 г., № 3077-В91. 20 с.
Толбин С.В. Результаты позиционных наблюдений системы Сатурна, выполненных в Пулкове на нормальном астрографе за период 1975-1984 гг. // 1991. ГАО АН СССР, Деп ВИНТИ 18 июля 1991 г., № 3078-В91. 17 с.

De Cuyper, J.-P., Winter, L. The D4A Digitiser. // 2006. ASP Conf. Series. V.351. P.587
Emelianov N.V., Arlot J.E. The natural satellites ephemerides facility MULTI-SAT // A & A, 2008, 487, 759-765.
Fienga A., Laskar J., Kuchynka P., Manche H., Desvignes G., Gastineau M., Cognard I., Theureau G. The INPOP10a planetary ephemeris and its applications in fundamental physics. // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2011. Volume 111, Issue 3, pp.363-385
Franz O.G., Observational Procedures for Visual Double-Star Work. // J. Roy. Astron. Soc. Can. 1973, vol. 67, p.81.
Grosheva E.A., Izmailov I.S., Khrutskaya E.V. «Mobile Device to Digitize the photographic plates: first results» // NAROO-GAIA workshop, Paris Observatory, 20-22 June 2012.
Izmailov I.S. IZMCCD Software Package for Astrometric Processing of Digital Images of Celestial Bodies, 2005, Available from: <http://izmccd.puldb.ru/index2.htm>.
E. Khrutskaya, J.-P. De Cuyper, S.I. Kalinin, A. Bereznoj, J. De Decker. The Results of New Reduction of Pulkovo Photographic Plates with Select Asteroids and Pluto Using the Damian Digitizer. // "Astronomical Research: from Near - Earth Space to the Galaxy". International conf. Abstract Book. 2011. P. 30-31.

Внешняя точность положений спутников Сатурна в новой редукции примерно в 3 раза выше точности положений в старой редукции. Она зависит не только от ошибок наблюдаемых положений, но и от ошибок теории. Ошибки положений, свободную от ошибок теории, зависящую только от наблюдений и измерений можно вычислить по известным ошибкам измерений и ошибок редукции, которые определяются в процессе обработки наблюдений. В следующей Таблице 2 приводятся значения ошибок измерений, ошибок редукции и вычисленные ошибки наблюдаемых положений спутников по всему наблюдательному материалу.

Таким образом, данные Таблицы 2 свидетельствуют о более высокой точности - в 3 раза - результатов новой редукции по оцифрованным пластинкам 26-дюймового рефрактора по сравнению со старой редукцией этих же пластинок. Для Нормального астрографа это различие не столь велико.

Кроме того, результаты новой редукции показали, что, во-первых, ошибки редукции очень малы, что говорит о высокой точности положений опорных звезд в современных каталогах, и, во-вторых, ошибки измерений объектов становятся источником главных ошибок положений спутников. В старой редукции этих же пластинок соотношение ошибок редукции и измерений обратное.

Оценка точности теорий движения спутников Сатурна

Сопоставление вычисленных из наблюдений ошибок положений спутников с ошибками положений, вычисленными по (О-С), дает возможность оценить ошибки теории движения, на основании которой вычисляются положения спутников с помощью сервера MULTI-SAT (теория V.Laineu, 2011).

Используя значения $\sigma_{\text{(O-C)}_{\text{cos} \delta}}$ и $\sigma_{\text{O-C} \delta}$ из таблиц 1 и 2, получаем оценку точности теории движения, приведенную в Таблице 3.

Таким образом, в случае наблюдений на 26-дюймовом рефракторе точность теории движения спутников сопоставима с точностью наблюдаемых положений. По наблюдениям на Нормальном астрографе результаты наблюдений примерно втрое менее точны, чем теория.

Таблица 3. Оценка точности теории движения спутников Сатурна по наблюдениям 1972-1974 гг. на 26-дюймовом рефракторе и Нормальном астрографе в новой редукции.

Телескоп	$\sigma_{\text{a}} \cos \delta$, arcsec	σ_{b} , arcsec
26"R	± 0.058	± 0.041
NA	± 0.041	± 0.095

Определение положений Сатурна по наблюдениям спутников и относительных положений спутников вида «спутник минус спутник»

Положения Сатурна определены по наблюдаемым экваториальным координатам спутников 4, 5, 6, 8 и теоретическим сатурноцентрическим координатам этих спутников, вычисленным с помощью программного комплекса MULTISAT по теории V.Laineu 2011. Результаты определения по всем четырем спутникам усреднены. В таблице 4 приведены средние значения (О-С) за весь период наблюдений с использованием теории INPOP10 и среднеквадратические ошибки положений Сатурна. (Fienga A, Laskar J, et al., 1973).

Были определены также относительные координаты спутников вида "спутник - спутник" (взаимные координаты). Сравнение с теоретическими относительными координатами (также теория V.Laineu 2011) дает значения средних (О-С) и ошибок относительных положений спутников, приведенные в Таблице 5.

Таблица 4. Средние разности (О-С) и среднеквадратические ошибки положений Сатурна.

Телескоп	(O-C) _a cosδ arcsec	(O-C) _b arcsec	$\sigma_{\text{a}} \cos \delta$ arcsec	σ_{b} arcsec	Число наблюдений
26"R	-0.0152 ±0.0094	-0.0119 ±0.0074	± 0.0897	± 0.0703	91
NA	-0.0324 ±0.0208	-0.0277 ±0.0246	± 0.1139	± 0.1349	30

Таблица 5. Относительные координаты спутников Сатурна "спутник - спутник". Средние (О-С) и среднеквадратические ошибки относительных положений.

Телескоп	(O-C) _a cosδ arcsec	(O-C) _b arcsec	$\sigma_{\text{a}} \cos \delta$ arcsec	σ_{b} arcsec	Число положений
26"R	- 0.0178	0.0193	± 0.1358	± 0.1118	532
NA	- 0.0150	0.0043	± 0.1946	± 0.1847	157

Заключение

На основе старых фотографических наблюдений прошлого века в Пулкове получены новые, более точные положения 2 - 6-го, 8-го спутников Сатурна с применением новой методики оцифровки и измерений и астрометрической редукции.

Точность новых положений спутников превосходит точность старых положений примерно в 3 раза в случае наблюдений на 26-дюймовом рефракторе за счет уменьшения ошибок измерений и ошибок редукции.

При сравнении результатов новой редукции с новейшими эфемеридами систематических ошибок не обнаружено. Таким образом, опыт новой редукции по оцифрованным пластинкам открывает возможность переработки большого массива фотографических наблюдений с целью увеличения их точности, необходимой для улучшения теорий движения спутников планет.

Новые результаты в Пулковской базе данных по наблюдениям тел Солнечной системы и доступны в Интернете по адресу: www.puldb.ru. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-02-000675-а.