

УДК 520.8; 521.35; 523.4-42; 523.45/.48

ПУЛКОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ, ИХ СПУТНИКОВ И ПЛУТОНА

© 2025 г. Е. В. Питьева^{а, *}, Д. А. Павлов^б

^а *Институт прикладной астрономии РАН,
Санкт-Петербург, Россия*

^б *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

** e-mail: evp@iaaras.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2024 г.

После доработки 07.11.2024 г.

Принята к публикации 06.12.2024 г.

Приведены результаты обработки позиционных наблюдений Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и их спутников, а также Плутона, выполненных в Пулковской обсерватории, а также в Горной астрономической станции ГАО РАН (ГАС ГАО) и в Абастуманской астрофизической обсерватории с начала XX в. по 2018 г. Наблюдения были взяты из базы данных ГАО РАН, за исключением двух групп наблюдений, взятых из базы данных VizieR. Обработка проводилась с использованием разработанных в ИПА РАН планетных эфемерид ЕРМ, а также эфемерид галилеевых спутников и спутников Нептуна и аналитических теорий спутников Сатурна и Урана. В ходе обработки были учтены поправки при переходе от одних звездных каталогов к другим, более точным современным каталогам, к которым были редуцированы наблюдения. Представлены результаты сравнительного анализа точности определения орбит планет с использованием пулковских наблюдений и без них.

Ключевые слова: спутники внешних планет, оптическая астрометрия, эфемериды

DOI: 10.31857/S0320930X25020042, EDN: KXJAHY

ВВЕДЕНИЕ

Пулковская обсерватория (включающая и ГАС ГАО в г. Kislovodsk) в течение многих лет является единственным в России источником оптических астрометрических наблюдений планет Солнечной системы и их спутников. Данные наблюдения используются для построения планетных эфемерид, в том числе российских эфемерид ЕРМ, применяющихся при выпуске изданий, содержащих эфемериды (“Астрономический ежегодник”, “Морской астрономический ежегодник”, “Морской астрономический альманах”) и используемых в отечественных космических программах, а также являющихся основой научных исследований, связанных с динамикой тел Солнечной системы. Несмотря на то, что при построении эфемерид используются все доступные мировые наблюдения,

важно поддерживать отечественные астрометрические инструменты. Настоящая работа посвящена анализу роли пулковских наблюдений в контексте современных эфемерид ЕРМ.

Пулковские наблюдения больших планет и их спутников начались в XIX веке на Нормальном астрографе; в 1954 г. был установлен новый инструмент — 26-дюймовый рефрактор — и наблюдения стали проводиться и на нем. В 1997 г. был введен в строй Зеркальный астрограф, используемый преимущественно для наблюдения астероидов, но в 1999–2006 гг. на этом инструменте наблюдалась система Плутон–Харон. С годами улучшались методика наблюдений и инструментальное оснащение. Так, в период 2006–2007 гг. на обоих инструментах перешли от использования фотопластинок к наблюдениям с ПЗС-приемниками. Как будет показано ниже, эти улучшения позволили достигнуть значительного

прогресса в точности наблюдений. Кроме того, в период с 1983 по 1994 гг. сотрудниками Пулковской обсерватории проводились наблюдения на двойном астрографе Цейсса в Абастуманской астрофизической обсерватории, а с 2008 г. проводились регулярные наблюдения на телескопе МТМ-500М (с ПЗС-приемником) в ГАС ГАО.

В настоящей работе представлены результаты астрометрической редукции пулковских наблюдений больших планет и их спутников, опубликованных к настоящему моменту в базе данных ГАО РАН (puldb.ru/db2/sdb.php), а также в некоторых других опубликованных источниках. Выполнен анализ точности орбит планет и улучшения этой точности в результате обработки пулковских наблюдений по методике, аналогичной использованной в (Pitjeva, 2015) и других подобных работах.

В указанной базе данных не приведены звездные каталоги, к которым отнесены наблюдения, и не для всех наблюдений приведены ссылки на первоначальные публикации. Выполнена работа по восстановлению этой информации. Некоторые из этих наблюдений были впоследствии обработаны с использованием данных из более поздних звездных каталогов. Важность звездных каталогов для достижения высокой точности эфемерид внешних планет отмечалась в (Fienga, 2012).

В качестве планетных эфемерид при астрометрических редукциях использовались эфемериды EPM2021 (Pitjeva и др., 2021). В качестве эфемерид галилеевых спутников Юпитера и спутников Нептуна использовались численные эфемериды, разработанные в ИПА РАН. Для обработки наблюдений спутников Сатурна использовалась аналитическая теория TASS (Vienne, Duriez, 1995; 1997). Для обработки наблюдений спутников Урана использовалась аналитическая теория GUST (Laskar, Jacobson, 1987).

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ В ТАБЛИЦАХ

В табл. 1–5 приняты следующие обозначения:

- J – Юпитер, J1 – Ио, J2 – Европа, J3 – Ганимед, J4 – Каллисто;
- S – Сатурн, S1 – Мимас, S2 – Энцелад, S3 – Тефия, S4 – Диона, S5 – Рея, S6 – Титан, S7 – Гиперион, S8 – Япет;
- U – Уран, U3 – Титания, U4 – Оберон;
- N – Нептун, N1 – Тритон;
- P – Плутон;

- PNA – Нормальный астрограф;
- P26 – 26-дюймовый рефрактор;
- ZDA – двойной астрограф Цейсса;
- ZA-320M – Зеркальный астрограф (модернизированный);
- PNT – наблюдения зарегистрированы на фотопластинках (без указания метода оцифровки);
- MDD – наблюдения зарегистрированы на фотопластинках и оцифрованы с помощью мобильной системы оцифровки;
- CCD – наблюдения зарегистрированы ПЗС-приемником;
- SBIG – модель ПЗС-приемника фирмы SBIG;
- AGK3 (Astronomische Gesellschaft Katalog) – звездный каталог, выпущенный в 1975 г. и реализующий систему координат FK4;
- FOCAT-S – звездный каталог, выпущенный в 1994 г. и реализующий систему координат FK5;
- PPM (Positions and Proper Motions Star Catalogue) – звездный каталог, выпущенный в 1991 г. и реализующий систему координат FK5;
- UCAC2, UCAC3 и UCAC4 (USNO CCD Astrograph Catalog) – звездные каталоги, выпущенные в 2003, 2009 и 2012 гг. соответственно и реализующие систему координат ICRS;
- Hipparcos, Tycho-1 – звездные каталоги, выпущенные в 1997 г. и реализующие систему координат ICRS;
- Tycho 2 – звездный каталог, выпущенный в 2000 г. и реализующий систему координат ICRS;
- ACT (Astrographic Catalog/Tycho) – звездный каталог, выпущенный в 1998 г. и реализующий систему координат ICRS;
- Gaia DR1, DR2 (Data Release 1/2) – звездные каталоги, выпущенные в 2016 и 2018 гг. и реализующие систему координат ICRS;
- O–C – разность между модельным и измеренным значением;
- RA – прямое восхождение;
- Dec – склонение.

В табл. 6 приняты следующие обозначения:

- a – большая полуось;
- e – эксцентриситет;
- i – наклонение;
- ω – долгота перицентра;
- Ω – долгота восходящего узла;
- λ – средняя долгота.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ

Результаты обработки наблюдений Юпитера и его спутников приведены в табл. 1. Наблюдения последней группы (Нарижная и др., 2019) отсутствуют в базе данных ГАО РАН и были взяты из базы данных VizieR. Следует отметить постепенное улучшение точности наблюдений благодаря переходу на наблюдения с ПЗС-приемником, использованию все более точных звездных каталогов и улучшению методики обработки снимков. Среднеквадратические ошибки наблюдений двух последних групп (2016–2018 гг.) не превышают 0.1" по склонению и прямому восхождению.

Результаты обработки наблюдений спутников Сатурна приведены в табл. 2. Все фотопластинки с наблюдениями спутников Сатурна, полученные на Нормальном астрографе, 26-дюймовом рефракторе и двойном астрографе Цейсса в Абастумани, были переобработаны (Khovrichiev и др., 2021) и приведены к каталогу Gaia DR2, что позволило достичь показателей точности, сравнимых с последующими наблюдениями на ПЗС-приемник. Эти наблюдения также были взяты из базы данных VizieR, так как они отсутствуют в базе данных ГАО РАН. Следует также отметить, что улучшение эфемерид спутников Сатурна в данной работе не проводилось; истинная точность наблюдений может превосходить приведенные в табл. 2 значения, в особенности для Гипериона.

Результаты обработки наблюдений Урана, Титании и Оберона приведены в табл. 3. Вновь можно отметить, что приведенные показатели еще могут улучшиться, во-первых, после переобработки фотопластинок за 1919–1974 гг. и привязки к одному из современных звездных каталогов (например, Gaia DR2), и, во-вторых, после уточнения эфемерид спутников Урана с использованием этих наблюдений.

Результаты обработки наблюдений Нептуна и Тритона приведены в табл. 4. Наблюдения 1899–1955 гг. отнесены к звездному каталогу "Yale Bright Star Catalogue". Вероятно, переобработка исходных фотопластинок с привязкой к более современному каталогу позволит повысить показатели точности.

Результаты обработки наблюдений Плутона приведены в табл. 5. Можно отметить хорошую точность наблюдений, сделанных в ГАС ГАО; видимо, благодаря лучшим атмосферным условиям. Наблюдения в Пулкове начались на Нормальном астрографе сразу после открытия

Плутона в 1930 г. Фотопластинки за 1930–1960 гг. были переобработаны (Khrutskaya и др., 2013) и привязаны к звездному каталогу UCAC4. К сожалению, эта работа не была продолжена для последующих наблюдений Плутона (авторство Е.В. Хруцкой в этой работе является посмертным). Результаты обработки фотопластинок, выполненной Рыльковым, представленные в работе (Rylkov и др., 1995), включающие и обработку пластинок из предыдущей группы наблюдений, приведены в форме вторичных данных, непригодных для непосредственных расчетов. В базе данных ГАО РАН эти наблюдения отсутствуют. Исходные данные удалось найти в базе данных VizieR в приложении к статье (Holman, Payne, 2016). Вместе с тем известно о дальнейшей работе (Рыльков, 2012), в которой эти наблюдения были привязаны к каталогу UCAC3, но соответствующих данных найти не удалось ни в базе данных ГАО РАН, ни в других источниках; по-видимому, эти данные, к сожалению, утрачены.

РЕЗУЛЬТАТЫ УТОЧНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ ПЛАНЕТ И ПЛУТОНА

В табл. 6 представлены результаты сравнительного анализа точности определения орбит планет с использованием пулковских наблюдений и без них. Отметим, что обе оценки точности получены с использованием всех доступных наблюдений, не только оптических, но и радиотехнических. Тем не менее использование пулковских наблюдений спутников Юпитера вносит заметное улучшение точности в определение орбиты Юпитера, несмотря на высокоточные данные радиотехнической дальнометрии космического аппарата Juno (четыре нормальные точки). Также использование пулковских наблюдений позволяет с заметно большей точностью уточнить параметры орбиты Урана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вклад пулковских наблюдений в точность эфемерид ЕРМ на фоне всех прочих наблюдений, используемых в ЕРМ, включая радиотехнические, оценивается на уровне 2–4% для орбиты Юпитера и 1–3% для орбиты Урана.

Точность лучших доступных на настоящий момент пулковских наблюдений составляет около 0.06" (по склонению и прямому восхождению).

Таблица 1. Результаты обработки наблюдений Юпитера и галилеевых спутников

Объект	Публикация	Инструмент	Оцифровка	Период наблюдений, годы	Каталог	Кол-во	O–C RA rms, угл. с	O–C Dec rms, угл. с
J	Киселева, 1979	PNA	PHT	1974–1979	AGK3	76	0.55	0.47
J1						109	0.46	0.36
J2						120	0.39	0.35
J3						113	0.42	0.38
J4						106	0.39	0.34
J	Киселева и др., 2012	ZDA	PHT	1985–1994	PPM, ACT, Tycho1, Tycho2, UCAC2	68	0.16	0.16
J1						54	0.25	0.21
J2						69	0.21	0.21
J3						76	0.19	0.25
J4						70	0.20	0.26
J1	Нарижная, 2015	PNA	CCD	2009–2011	UCAC4	37	0.17	0.17
J2						38	0.19	0.17
J3						37	0.19	0.18
J4						28	0.23	0.16
J	Рощина и др., 2013	P26	CCD	2012–2013	UCAC2	15	0.13	0.07
J1						10	0.07	0.07
J2						12	0.08	0.06
J3						14	0.12	0.08
J4						10	0.11	0.10
J1	Рощина, 2014 (*)	P26	CCD	2013–2014	UCAC2	20	0.06	0.08
J2						26	0.07	0.06
J3						25	0.09	0.07
J4						10	0.08	0.06
J	Нарижная, 2016	PNA	CCD SBIG	2013–2015	UCAC4	47	0.06	0.08
J1						37	0.08	0.11
J2						37	0.08	0.08
J3						37	0.10	0.09
J4						43	0.06	0.11
J1	Нарижная и др., 2018	PNA	CCD SBIG	2016–2017	Gaia DR1	146	0.08	0.07
J2						180	0.08	0.07
J3						180	0.08	0.10
J4						255	0.08	0.07
J1	Нарижная и др., 2019	PNA	CCD	2018	Gaia DR1	100	0.07	0.06
J2						102	0.08	0.06
J3						131	0.07	0.07
J4						119	0.08	0.09

Примечание: публикаций о наблюдениях, выполненных в 2013–2014 гг. на 26-дюймовом рефракторе, обнаружено не было.

(*) – Приведены отметки об авторстве в базе данных ГАО РАН.

Таблица 2. Результаты обработки наблюдений крупнейших спутников Сатурна

Объект	Публикация	Инструмент	Оцифровка	Период наблюдений, годы	Каталог	Кол-во	O—C RA rms, угл. с	O—C Dec rms, угл. с
S1	Khovrichev и др., 2021	P26	MDD	1972—2007	Gaia DR2	54	0.20	0.18
S2						413	0.16	0.13
S3						634	0.14	0.13
S4						781	0.11	0.14
S5						803	0.10	0.10
S6						769	0.10	0.09
S7						138	0.21	0.20
S8						856	0.11	0.12
S3		PNA		1972—1977		102	0.20	0.15
S4						251	0.17	0.15
S5						549	0.15	0.14
S6						582	0.14	0.13
S7						16	0.26	0.24
S8						402	0.17	0.15
S4	Khovrichev и др., 2021	ZDA	MDD	1984	Gaia DR2	10	0.22	0.18
S5						19	0.17	0.11
S6						55	0.10	0.12
S8						48	0.17	0.12
S	Грошева и др., 2011	P26	CCD	2007—2009	UCAC2	34	0.09	0.07
S2						13	0.22	0.10
S3						22	0.11	0.08
S4						23	0.09	0.14
S5						33	0.09	0.08
S6						34	0.09	0.09
S7						30	0.32	0.29
S8						23	0.06	0.09
S3	Ховричев, 2014 (*)	PNA	CCD	2009—2011	HCRF, UCAC4	9	0.13	0.11
S4						8	0.16	0.07
S5						22	0.11	0.05
S6						26	0.13	0.06
S8						20	0.39	0.44
S3	Рощина и др., 2012	P26	CCD	2012	UCAC2	9	0.15	0.11
S4						17	0.16	0.14
S5						20	0.09	0.12
S6						23	0.08	0.19
S7						16	0.39	0.44
S8						8	0.20	0.11
S2	Рощина, 2014 (*)	P26	CCD	2010—2011, 2013—2014	UCAC4	5	0.16	0.10
S3						19	0.13	0.06
S4						26	0.11	0.12
S5						45	0.07	0.06
S6						45	0.06	0.10
S7						28	0.39	0.28
S8						20	0.13	0.07

Примечание: публикаций о наблюдениях, выполненных в 2009–2011 гг. на Нормальном астрографе и в 2010–2011, 2013–2014 гг. на 26-дюймовом рефракторе, обнаружено не было. (*) – Приведены отметки об авторстве в базе данных ГАО РАН.

Таблица 3. Результаты обработки наблюдений Урана, Титании и Оберона

Объект	Публикация	Инструмент	Оцифровка	Период наблюдений, годы	Каталог	Кол-во	O–C RA rms, угл. с	O–C Dec rms, угл. с
U	Лавдовский, 1971	PNA	PHT	1919–1974	FOCAT-S	132	0.52	0.34
U	Киселева и др., 2012	ZDA	PHT	1983–1994	PPM, ACT, Tycho1, Tycho2, UCAC2	106	0.23	0.30
U3						104	0.40	0.62
U4						103	0.45	0.62
U	Бронникова, Васильева, 2006	PNA	PHT	2002–2004	Tycho-2	41	0.35	0.38
U	Дементьева, 2015	PNA	CCD	2006–2011	UCAC3	47	0.31	0.12
U3						26	0.33	0.45
U4						36	0.17	0.40

Примечание: жирным шрифтом отмечены значения СКО, превышающие 0.6" (соответствующие группы наблюдений исключены из дальнейшей обработки).

Таблица 4. Результаты обработки наблюдений Нептуна и Тритона

Объект	Публикация	Инструмент	Оцифровка	Период наблюдений, годы	Каталог	Кол-во	O–C RA rms, угл. с	O–C Dec rms, угл. с
N	Лавдовский, 1974	PNA	PHT	1899–1955	Yale	87	0.29	0.82
N	Киселева и др., 2012	ZDA	PHT	1985–1993	Tycho-1	66	0.13	0.41
N1						54	0.43	0.50

Примечание: жирным шрифтом отмечено значение СКО, превышающее 0.6" (соответствующая группа наблюдений исключена из дальнейшей обработки).

Таблица 5. Результаты обработки наблюдений Плутона

Объект	Публикация	Инструмент	Оцифровка	Период наблюдений, годы	Каталог	Кол-во	O–C RA rms, угл. с	O–C Dec rms, угл. с
P	Khrutskaya и др., 2013	PNA	PHT	1930–1960	UCAC4	63	0.25	0.17
P	Rylkov и др., 1995	PNA	PHT	1930–1992	FOCAT-S	53	0.21	0.30
P	Slesarenko и др., 2016	3A-320M	CCD	1999–2006	UCAC4	130	0.23	0.35
		MTM-500M	CCD	2008–2010	UCAC4	227	0.11	0.13

Таблица 6. Формальные ошибки лагранжевых элементов орбиты в двух планетных решениях

Объект	$\sigma(a)$, м	$\sigma(e \cos \varpi)$, "	$\sigma(e \sin \varpi)$, "	$\sigma(\sin i \cos \Omega)$, "	$\sigma(\sin i \sin \Omega)$, "	$\sigma(\lambda)$, "
Полное планетное решение без пулковских наблюдений						
Юпитер	3.58	1.33	0.694	0.0102	0.00940	0.125
Сатурн	1.68	0.104	0.0804	0.00201	0.00154	0.0176
Уран	1630	0.920	0.822	0.870	2.40	4.10
Нептун	6006	2.33	1.85	2.55	8.35	11.4
Плутон	11332	0.679	2.28	10.3	6.90	15.9
Полное планетное решение с пулковскими наблюдениями						
Юпитер	3.45	1.24	0.658	0.0101	0.00931	0.121
Сатурн	1.67	0.103	0.0799	0.00200	0.00153	0.0175
Уран	1588	0.908	0.802	0.859	2.34	3.98
Нептун	5968	2.32	1.84	2.53	8.30	11.3
Плутон	11227	0.675	2.26	10.2	6.84	15.8

Примечание: жирным выделены формальные ошибки планетного решения с пулковскими наблюдениями, которые более чем на 1% меньше формальных ошибок планетного решения без пулковских наблюдений.

Не полностью исчерпан потенциал хранящихся в ГАО РАН фотопластинок; многие из них не были обработаны с приведением к современному звездному каталогу, в частности, это фотопластинки Нептуна, Урана и Плутона (для Плутона результаты такой обработки были утрачены). Кроме того, оценки точности пулковских наблюдений спутников Сатурна и Урана могут быть еще улучшены за счет более новых и точных эфемерид данных спутниковых систем.

Наземные оптические инструменты остаются одним из немногих независимых средств уточнения эфемерид больших планет и их спутников для исследований и будущих космических миссий. Наряду с развитием средств высокоточной астрометрии необходимо продолжать оптические наблюдения имеющимися средствами и помещать эти наблюдения в базы данных.

Авторы благодарны анонимным рецензентам за ценные комментарии.

Работа Д.А. Павлова поддержана грантом РНФ (проект № 24-22-00391).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронникова Н.М., Васильева Т.А. Фотографические позиционные наблюдения Урана в 2004 году на Нормальном астрографе в Пулкове // Изв. ГАО в Пулкове. 2006. № 218. С. 57–58.
2. Грошева Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П. Астрометрические наблюдения главных спутников Сатурна на 26-дюймовом рефракторе // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. № 6. С. 537–541. (E.A. Grosheva, I.S. Izmailov, T.P. Kiseleva. Astrometric observations of major satellites of Saturn with a 26-inch refractor // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. P. 523–528.)
3. Дементьева А.А. Астрометрические наблюдения Урана и его главных спутников на нормальном астрографе в Пулкове. Новая редукция // Сб. тезисов Всероссийской астрометрической конференции “Пулково-2015”. 2015. С. 13.
4. Киселева Т.П. The positional photographic observations of Jupiter and Galilean satellites at Pulko-vo with the help of the “Carteduciel” astrograph in 1974–1976 // Бюл. Ин-та теоретич. астрон. 1979. Т. 14. № 8. С. 490–498.
5. Киселева Т.П., Чантурия С.М., Васильева Т.А., Калинин О.А. Астрометрические наблюдения спутников планет в Абастуманской астрофизической обсерватории в 1983–1994 гг.: оценки точности // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 6. С. 474–479. (T.P. Kiseleva, S.M. Chanturiya, T.A. Vasil'eva, O.A. Kalinichenko. Astrometric observations of planetary satellites at the Abastumani Astrophysical Observatory // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. P. 436–441. <https://doi.org/10.1134/S0038094612050048>).
6. Лавдовский В.В. Точные положения Урана за 1919–1969 гг. по фотографическим наблюдениям в Пулкове и Ташкенте // Изв. ГАО. 1971. № 189–190. С. 140–143.

7. Лавдовский В.В. Точные положения Нептуна за 1899–1955 гг. по фотографическим наблюдениям в Пулковке и Ташкенте // Изв. ГАО. 1974. № 192. С. 33–45.
8. Наризжная Н.В. Результаты наблюдений галилеевых спутников Юпитера на пулковском Нормальном астрографе в период 2009–2011 гг. // Астрон. вестн. 2015. Т. 49. № 6. С. 420–427.
<https://doi.org/10.7868/S0320930X15060043> (N.V. Narizhnaya. Observations of the Galilean satellites of Jupiter with Pulkovo Normal Astrograph during 2009–2011 // Sol. Syst. Res. 2016. Vol. 49. Pp. 383–390.
<https://doi.org/10.1134/S0038094615060040>).
9. Наризжная Н.В. Наблюдения галилеевых спутников Юпитера в 2013–2015 гг. в Пулковке // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 5. С. 364–371.
<https://doi.org/10.7868/S0320930X16050030> (N.V. Narizhnaya. Observations of the Galilean moons of Jupiter in 2013–2015 at Pulkovo // Sol. Syst. Res. 2016. V. 50. P. 344–351.
<https://doi.org/10.1134/S0038094616050038>).
10. Наризжная Н.В., Ховричев М.Ю., Анетян А.А., Биколова Д.А., Ершова А.П., Баляев И.А., Куликова А.М., Оськина К.И., Максимова Л.А. Астрометрические наблюдения галилеевых спутников Юпитера на Пулковском нормальном астрографе в 2016–2017 гг. // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 4. С. 316–323.
<https://doi.org/10.1134/S0320930X18040023> (N.V. Narizhnaya, M.Yu. Khovrichiev, A.A. Apetyan, D.A. Bikulova, A.P. Ershova, I.A. Balyaev, A.M. Kulikova, K.I. Os'kina, L.A. Maksimova. Astrometric Observations of the Galilean Moons of Jupiter at the Pulkovo Normal Astrograph in 2016–2017 // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. P. 312–319.
<https://doi.org/10.1134/S0038094618040020>).
11. Наризжная Н.В., Ховричев М.Ю., Биколова Д.А. Наблюдения галилеевых спутников Юпитера в 2018 г. в Пулковке // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 5. С. 386–393.
<https://doi.org/10.1134/S0320930X19040066> (N.V. Narizhnaya, M.Yu. Khovrichiev, D.A. Bikulova. Observations of the Galilean Moons of Jupiter at Pulkovo in 2018 // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. P. 368–375.
<https://doi.org/10.1134/S0038094619040063>).
12. Рощина Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П. ПЗС-наблюдения спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке // Изв. ГАО в Пулковке. 2012. № 220. С. 311–316.
13. Рощина Е.А., Измайлов И.С., Киселева Т.П. Астрометрические наблюдения галилеевых спутников Юпитера на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке // Сб. тезисов ВАК-2013. 2013.
14. Рыльков В.П. Плутон — все положения, полученные в Пулковке за 1930–1996 гг. // Изв. ГАО в Пулковке. 2012. № 220. С. 317–322.
15. Fienga A. How GAIA can improve planetary ephemerides? // Planet. and Space Sci. 2012. V. 73. P. 44–46.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.06.016>
16. Holman M.J., Payne M.J. Observational constraints on Planet Nine: Astrometry of Pluto and other trans-Neptunian objects // Astron. J. 2016. V. 152. № 4. Id. 80.
<https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/4/80>
17. Khovritchev M.Yu., Robert V., Narizhnaya N.V., Vasilyeva T. A., Apetyan A. A., Bikulova D. A. Astrometric measurement and reduction of Pulkovo photographic observations of the main Saturnian satellites from 1972 to 2007 in the Gaia reference frame // Astron. and Astrophys. 2021. V. 645. Id. A76.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039119>
18. Khrutskaya E.V., De Cuyper J.-P., Kalinin S.I., Berezhnoy A.A., de Decker G. Positions of Pluto extracted from digitized Pulkovo photographic plates taken in 1930–1960 // 2013. arXiv:1310.7502.
19. Laskar J., Jacobson R.A. GUST86 — an analytical ephemeris of the Uranian satellites // Astron. and Astrophys. 1987. V. 188. № 1. P. 212–224.
20. Pitjeva E.V. Evolution of ephemerides EPM of IAA RAS // Proc. Journées 2014 “Systèmes de Référence Spatio-Temporels”. Pulkovo observatory. 2015. P. 92–95.
21. Pitjeva E., Pavlov D., Aksim A., Kan M. Planetary and lunar ephemeris EPM2021 and its significance for Solar system research // Proc. Int. Astron. Union. 2021. V. 15. Symp. S364: Multi-scale (Time and Mass) Dynamics of Space Objects. P. 220–225.
<https://doi.org/10.1017/S1743921321001447>
22. Rylkov V.P., Vityazev V.V., Dementieva A.A. Pluto: An analysis of photographic positions obtained with the Pulkovo normal astrograph in 1930–1992 // Astron. and Astrophys. Transact. 1995. V. 6. Iss. 4. P. 265–281.
<https://doi.org/10.1080/10556799508232072>
23. Slesarenko V.Yu., Bashakova E.A., Devyatkin A.V. Astrometrical observations of Pluto–Charon system with the automated telescopes of Pulkovo observatory // Planet. and Space Sci. 2016. V. 122. P. 66–69.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.01.012>
24. Vienne A., Duriez L. TASSI.6: Ephemerides of the major Saturnian satellites // Astron. and Astrophys. 1995. V. 297. P. 588–605.
25. Vienne A., Duriez L. Theory of motion and ephemerides of Hyperion // Astron. and Astrophys. 1997. V. 324. P. 366–380.