

Обновленные версии численных эфемерид главных спутников Сатурна

© Г. А. Космодамианский

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

С использованием метода численного интегрирования построены новые версии эфемерид восьми главных спутников Сатурна (Мимаса, Энцелада, Тефии, Дионы, Реи, Титана, Гипериона и Япета).

Модель движения спутников учитывает несферичность Сатурна, взаимные возмущения спутников и возмущения от Солнца и больших планет. Начальные значения параметров движения спутников уточнены по всем доступным рядам наземных оптических наблюдений (1874–2015 гг.). В результате получены коэффициенты разложения координат и скоростей спутников в ряды по полиномам Чебышева на интервале 1870–2025 гг. Приведены среднеквадратические ошибки наблюдений и графики сравнения построенных эфемерид как с наблюдениями, так и с эфемеридами V. Lainey. Построенные эфемериды размещены в открытом доступе.

Ключевые слова: построение эфемерид спутников, оптические наблюдения, точность эфемерид, численное интегрирование.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.77-86>

Введение

Разработка численных теорий движения естественных спутников планет в ИПА РАН ведется с 2007 г. с целью включения эфемерид этих объектов в приложения к «Астрономическому ежегоднику» [1]. Кроме того, наличие собственных независимых эфемерид дает возможность их последующего уточнения на основе новых наблюдений и дальнейшего использования для уточнения орбит их центральных планет. Цель данной работы — создание численных эфемерид восьми главных спутников Сатурна (Мимаса, Энцелада, Тефии, Дионы, Реи, Титана, Гипериона, Япета), построенных на основе всех доступных наземных астрометрических наблюдений спутников, путем добавления обширного набора новых данных к уже существующим.

Новая версия эфемерид создана при использовании программного пакета ЭРА-7 [2].

Модель

Новые версии численных эфемерид восьми главных спутников Сатурна построены на интервале 1870–2025 гг. методом дифференциального уточнения параметров несколькими последовательными итерациями, на каждой из которых проводилось численное интегрирование дифференциальных уравнений движения спутников методом Эверхарта 19-го порядка. Уточнение параметров проведено методом наименьших квадратов по результатам сравнения с наблюдениями. В результате интегрирования получены разложения координат и скоростей спутников в ряды по полиномам Чебышева. Уравнения движения спутников и условные уравнения подробно описаны в работе [3].

Модель движения спутников учитывает влияние Солнца и планет, взаимное влияние спутников, а также несферичность центральной планеты (J_2 , J_4). При вычислении возмущений от Солнца и планет использована отечественная эфемерида EPM2015 [4]. Гравитационные параметры спутниковых систем, такие как гравитационные массы и зональные гармоники, взяты с официального сайта JPL [5].

Наблюдения

Всего для уточнения параметров движения спутников Сатурна было использовано 62414 наблюдений. Результаты описаны в одной из ранее опубликованных работ [6]. При построении новой версии численных эфемерид спутников Сатурна был использован обширный набор наблюдений, включающий как старые — из каталога Харпера и Тейлора [7] — так и современные, выполненные в обсерватории Шешан [8], а также результаты, полученные с помощью космического телескопа «Хаббл» [9]. Наблюдения были взяты из обширного каталога COSS08 [10], в котором содержатся все доступные на момент публикации сведения о главных спутниках Сатурна. Также в набор были добавлены наблюдения, выполненные в Пулковской обсерватории в 2010–2014 гг. Они были получены из базы Пулковской обсерватории [11]. Кроме этого, добавлены наблюдения взаимных явлений, выполненные в рамках кампании PHESAT2009 на разных станциях в 2008–2010 гг. (результаты взяты на сайте Службы естественных спутников планет (NSDB) [12]), и данные, полученные при помощи космического аппарата Hipparcos [13]. Сводные данные по этим наблюдениям представлены в табл. 1, где для каждой обсерватории указаны временной период, количество, номера спутников и точность.

Среднеквадратические ошибки (СКО) остаточных невязок абсолютных наблюдений приведены в табл. 2, для дифференциальных наблюдений спутника относительно Сатурна — в табл. 3, для наблюдений взаимных явлений — в табл. 4, и для дифференциальных наблюдений спутника относительно другого спутника — в табл. 5. В таблицах для каждого спутника и каждой

Таблица 1

Добавленные наблюдения

Источник наблюдений	Период и количество наблюдений	Спутники	Точность, "
Каталог Harper&Taylor	1894–1922 (7557)	I–VIII	0.1–0.5
Hubble Space Telescope	1996–2005 (1096)	I–VII	0.014–0.02
Hipparcos	1990–1992 (70)	VI, VIII	0.010–0.10
Pulkovo	2010–2014 (657)	I–VIII	0.07–0.10
Sheshan	1998–2000 (1254)	I–IV, VI–VIII	0.08
PHESAT 2009	2008–2010 (28)	I–V	0.02–0.04

Таблица 2

СКО остаточных невязок абсолютных наблюдений

	Годы	Мимас		Энцелад		Тефия		Диона	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
USNO	1974–1998	0.20	0.21	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09
USNO	1998–2015	—	—	—	—	0.20	0.17	0.12	0.16
Николаев	1973–1997	—	—	—	—	0.30	0.20	0.24	0.20
La Palma	1992–1997	—	—	—	—	—	—	—	—
Bordeaux	1966–1993	—	—	—	—	0.89	0.55	0.70	0.55
Bordeaux	1981–2007	—	—	—	—	0.90	0.56	0.62	0.39
Пулково	1973–1984	0.35	0.32	0.38	0.31	0.25	0.27	0.23	0.25
Пулково	2004–2014	0.08	0.20	0.18	0.09	0.13	0.09	0.11	0.11
T. Mount.	1971–2003	0.28	0.17	0.47	0.17	0.17	0.16	0.10	0.07
Киев	1961–1984	0.39	0.32	0.47	0.32	0.43	0.24	0.36	0.28
Hipparcos	1990–1992	—	—	—	—	—	—	—	—
		Рея		Титан		Гиперион		Япет	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
USNO	1974–1998	0.10	0.09	0.09	0.09	0.12	0.13	0.10	0.08
USNO	1998–2015	0.10	0.10	0.11	0.12	0.18	0.19	0.10	0.11
Николаев	1973–1997	0.19	0.14	0.14	0.14	—	—	0.18	0.19
La Palma	1992–1997	—	—	0.19	0.19	0.41	0.31	0.19	0.16
Bordeaux	1966–1993	0.78	0.52	0.43	0.43	0.76	0.54	0.54	0.43
Bordeaux	1981–2007	0.48	0.22	0.18	0.23	0.11	0.16	0.16	0.13
Пулково	1973–1984	0.21	0.20	0.22	0.22	0.21	0.20	0.20	0.20
Пулково	2004–2014	0.09	0.08	0.10	0.10	0.19	0.28	0.12	0.09
T. Mount.	1971–2003	0.06	0.08	0.07	0.08	0.09	0.06	0.05	0.05
Киев	1961–1984	0.34	0.22	0.26	0.24	0.37	0.25	0.38	0.33
Hipparcos	1990–1992	—	—	0.09	0.06	0.08	0.06	—	—

Таблица 3

СКО остаточных невязок дифференциальных наблюдений спутника относительно планеты

	Годы	Мимас		Энцелад		Тефия		Диона	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
USNO	1874–1895	11.85	8.25	0.45	0.45	0.96	0.81	0.25	0.20
Lick Obs	1898–1901	—	—	0.24	0.34	0.62	0.42	0.36	0.29
Пулково	1886–1892	—	—	—	—	—	—	—	—
Пулково	1908–1922	—	—	0.32	0.35	0.51	0.39	0.26	0.26
Пулково	1994–1996	0.22	0.15	0.19	0.42	0.13	0.43	0.14	0.50
Пулково	1976–1982	0.27	0.24	0.19	0.28	0.11	0.25	0.10	0.24
Yunnan	2002–2006	0.13	0.10	0.12	0.06	0.12	0.05	0.12	0.05
Tokyo	1970–1972	—	—	0.30	0.32	0.22	0.24	0.17	0.16
HST	1996–2005	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
	Годы	Рея		Титан		Гиперион		Япет	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
USNO	1874–1895	0.29	0.25	0.31	0.27	0.57	0.46	0.48	0.45
Lick Obs	1898–1901	0.36	0.31	0.40	0.34	0.76	0.73	—	—
Пулково	1886–1892	—	—	—	—	0.24	0.41	0.34	0.17
Пулково	1908–1922	0.28	0.28	0.28	0.28	—	—	0.25	0.32
Пулково	1994–1996	0.11	0.51	0.12	0.49	—	—	0.12	0.56
Пулково	1976–1982	0.10	0.24	0.08	0.26	—	—	0.14	0.35
Yunnan	2002–2006	0.13	0.05	0.12	0.06	—	—	—	—
Tokyo	1970–1972	0.18	0.11	0.19	0.15	0.39	0.33	0.26	0.24
HST	1996–2005	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	—	—

обсерватории приведены значения СКО по прямому восхождению и склонению. Также для каждой обсерватории приведен общий период используемых наблюдений. В целом, полученные значения СКО в большинстве случаев отражают точность наблюдений. Однако, значения СКО, полученные для старых наблюдений Мимаса (табл. 3 и 5), никак нельзя считать удовлетворительными, т. к. они совершенно не согласуются с точностью новых наблюдений.

Таблица 4

СКО остаточных невязок дифференциальных наблюдений спутника относительно спутника

	Годы	Мимас		Энцелад		Тефия		Диона	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
USNO	1884–1947	—	—	—	—	0.47	0.41	0.34	0.24
Berlin	1916–1923	4.02	2.81	0.26	0.30	0.32	0.31	0.15	0.29
Yerks Obs	1928	—	—	0.46	0.34	—	—	—	—
Johannesburg	1926–1928	8.25	5.69	0.41	0.31	0.55	0.35	0.10	0.11
Пулково	1886–1892	8.38	5.52	0.59	0.46	0.59	0.43	0.11	0.09
Lick Obs	1896–1907	4.08	3.16	0.53	0.39	0.54	0.38	0.33	0.23

Таблица 4 (продолжение)

	Годы	Мимас		Энцелад		Тефия		Диона	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
Yerks Obs	1906–1922	4.05	3.31	0.20	0.17	0.31	0.23	0.14	0.16
McCormick	1894–1905	—	—	—	—	0.45	0.33	0.38	0.29
Пулково	1995–2007	0.19	0.12	0.13	0.12	0.12	0.13	0.11	0.12
Пулково	2005–2009	0.08	0.26	0.09	0.14	0.09	0.10	0.09	0.09
Пулково	2010–2014	—	—	0.14	0.12	0.08	0.10	0.10	0.11
Bucharest	1995	—	—	0.23	0.24	0.26	0.22	0.25	0.26
Бюракан	1990	—	—	0.50	0.26	0.77	0.36	0.71	0.29
Itajuba	1982–1999	0.12	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.08	0.07
Yunnan	1996–2000	0.10	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
Sheshan	1998–2000	0.16	0.09	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	0.07
	Годы	Рея		Титан		Гиперион		Япет	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
USNO	1884–1947	0.20	0.17	0.15	0.13	0.30	0.26	0.21	0.18
Berlin	1916–1923	0.22	0.62	—	—	0.26	0.32	0.24	0.33
Yerks Obs	1928	—	—	—	—	—	—	—	—
Johannesburg	1926–1928	0.31	0.37	—	—	—	—	—	—
Пулково	1886–1892	—	—	—	—	0.22	0.24	0.07	0.08
Lick Obs	1896–1907	0.37	0.28	—	—	0.42	0.40	—	—
Yerks Obs	1906–1922	0.16	0.17	—	—	0.31	0.33	0.23	0.18
McCormick	1894–1905	0.34	0.26	0.59	0.40	0.58	0.55	0.83	0.76
Пулково	1995–2007	0.11	0.12	0.12	0.14	0.19	0.18	0.13	0.17
Пулково	2005–2009	0.09	0.09	0.09	0.11	0.12	0.10	0.09	0.10
Пулково	2010–2014	0.08	0.09	0.08	0.11	0.12	0.28	0.08	0.11
Bucharest	1995	0.21	0.20	—	—	0.17	0.25	0.24	0.14
Бюракан	1990	0.75	0.35	—	—	—	—	0.60	0.39
Itajuba	1982–1999	0.22	0.18	0.10	0.08	0.15	0.13	0.10	0.09
Yunnan	1996–2000	0.04	0.05	—	—	0.07	0.07	0.05	0.04
Sheshan	1998–2000	—	—	0.08	0.08	0.11	0.05	0.08	0.13

Таблица 5

СКО остаточных невязок наблюдений взаимных явлений

	Годы	Мимас		Энцелад		Тефия		Диона	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
Затмения	1980–2009	0.15	0.07	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03
Покрытия	1980–2009	0.13	0.08	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.04
	Годы	Рея		Титан		Гиперион		Япет	
		$\Delta\alpha\cos\delta, ''$	$\Delta\delta, ''$						
Затмения	1980–2009	0.05	0.04	0.01	0.03	—	—	—	—
Покрытия	1980–2009	0.02	0.05	—	—	—	—	—	—

Оценки точности

Было проведено сравнение построенных эфемерид как с наблюдениями, так и с численной эфемеридой Lainey, которая доступна на сервере эфемерид MULTY-SAT [14] Службы естественных спутников планет (NSDC) [12]. Графики (рис. 1–8) показывают разность наблюдаемых и вычисленных значений ($O - C$) после уточнения параметров эфемерид. Видно, что в целом построенные нами эфемериды согласуются с эфемеридой Lainey в пределах точности наблюдений, за исключением Мимаса, для которого согласие между эфемеридами наблюдается только на интервале времени, обеспеченном точными наблюдениями. Такое расхождение между эфемеридами на интервалах времени, не обеспеченных наблюдениями, может быть связано с тем, что Мимас, из-за своей близости к Сатурну, как правило, наблюдается вблизи элонгаций, где для земного наблюдателя он почти неподвижен. Использование только таких наблюдений не позволяет достаточно точно определить положения и скорость спутника вдоль всей орбиты, что, вероятно, и приводит к расхождению между эфемеридами. Для уточнения параметров движения Мимаса необходимо как можно большее количество наблюдений вдоль всей его орбиты. Между сравниваемыми эфемеридами на интервале 1900–1960 гг. для Тефии также присутствует заметное расхождение (рис. 3), вызванное, вероятно, влиянием Мимаса, с которым Тефия находится в резонансе.

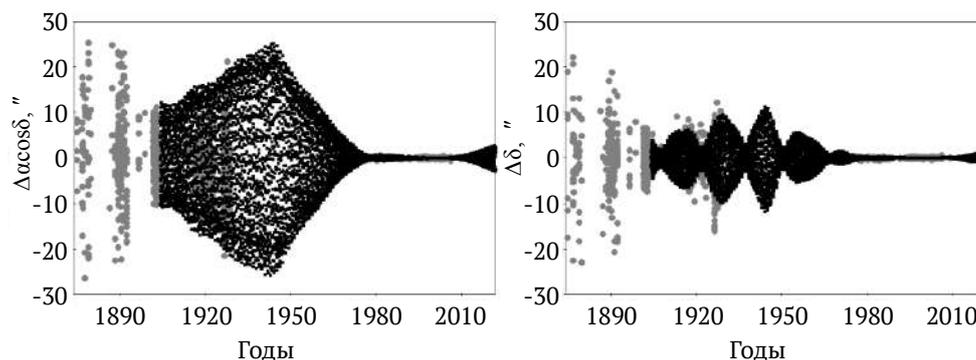


Рис. 1. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainey по прямому восхождению и склонению для Мимаса

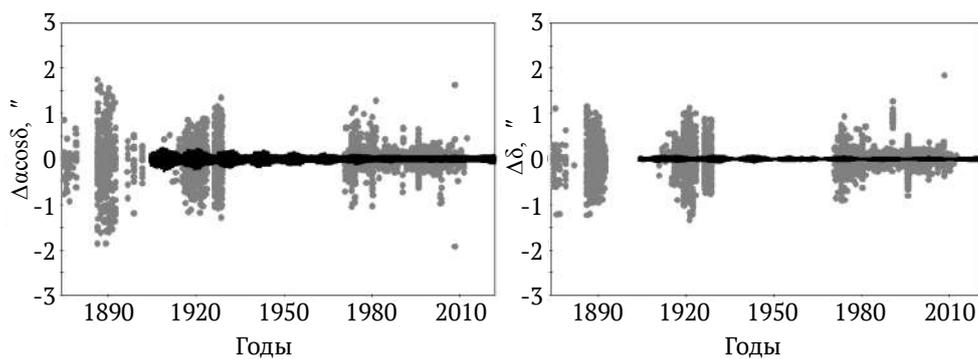


Рис. 2. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainez по прямому восхождению и склонению для Энцелада

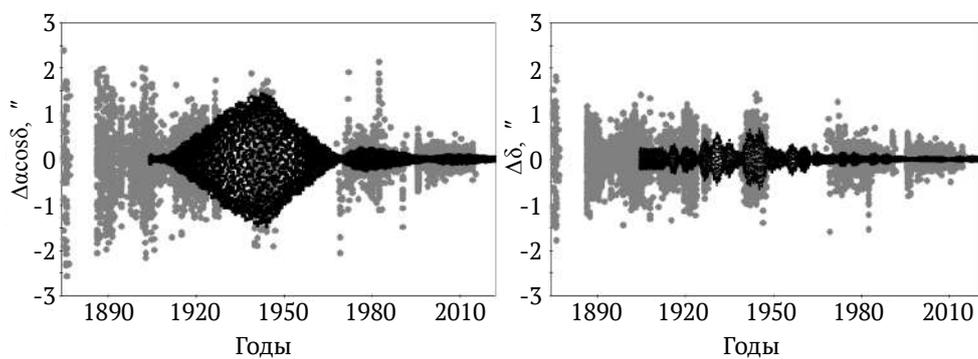


Рис. 3. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainez по прямому восхождению и склонению для Тетии

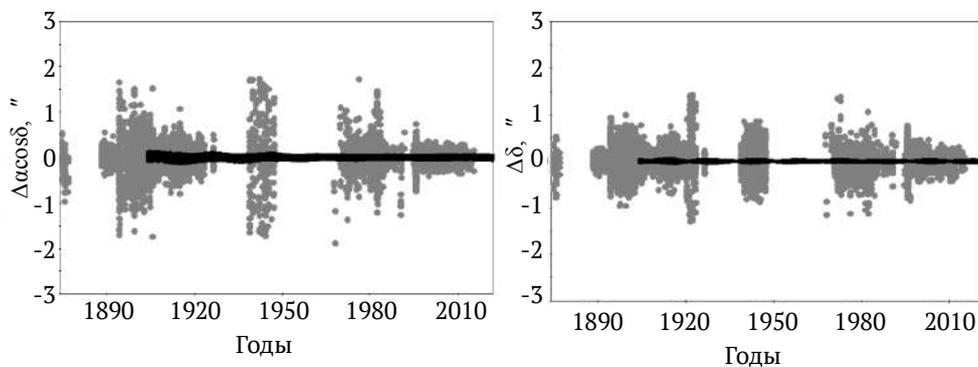


Рис. 4. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainez по прямому восхождению и склонению для Дионы

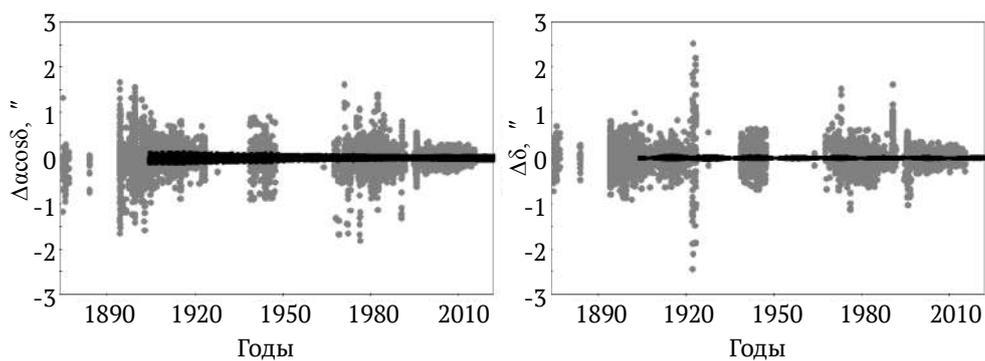


Рис. 5. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainey по прямому восхождению и склонению для Реи

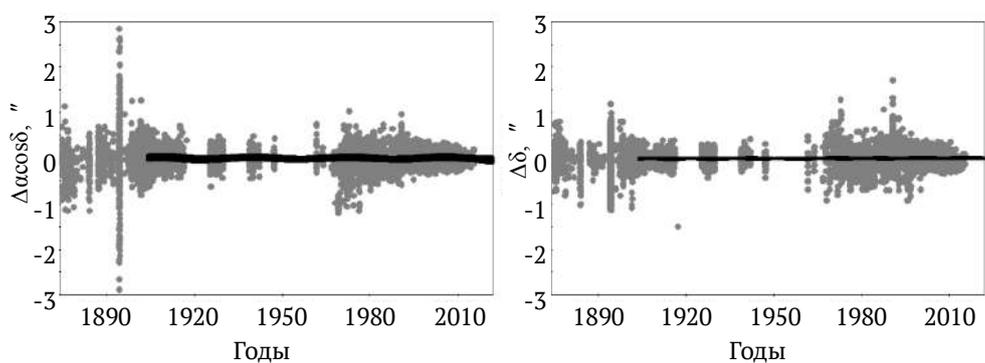


Рис. 6. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainey по прямому восхождению и склонению для Титана

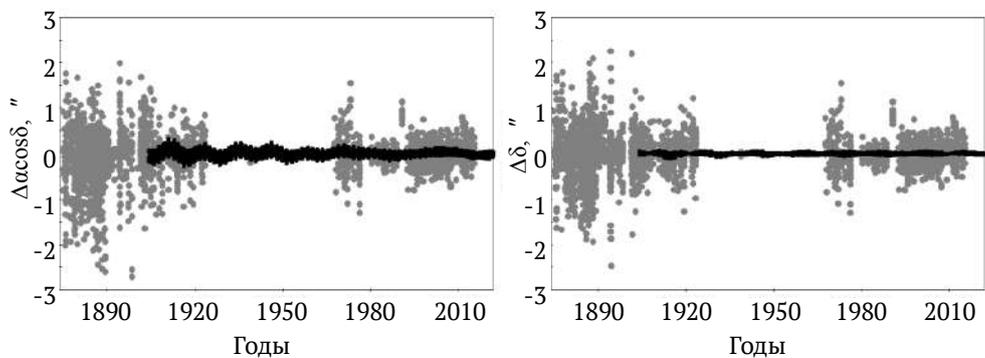


Рис. 7. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainey по прямому восхождению и склонению для Гипериона

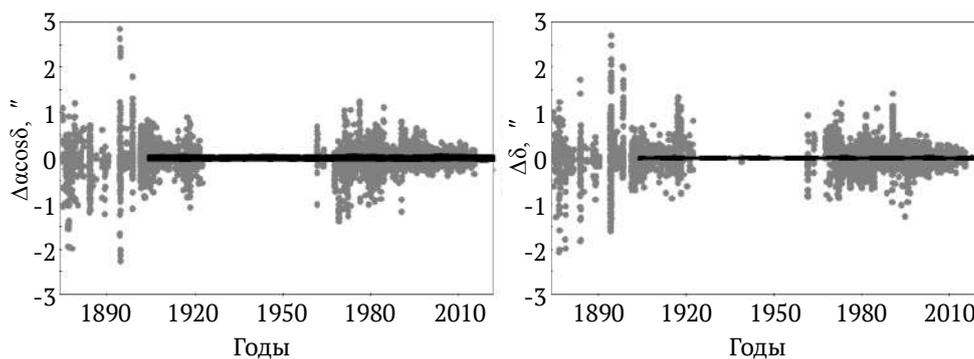


Рис. 8. Сравнение с наблюдениями и эфемеридой Lainey по прямому восхождению и склонению для Япета

Заключение

Построены новые версии численных эфемерид восьми главных спутников Сатурна на интервале 1870–2025 гг. на основе всех доступных наземных астрометрических наблюдений. В дальнейшем планируется обработка наблюдений, выполненных с борта космических аппаратов, в частности КА Cassini. ИПА РАН предоставляет доступ к данным с помощью Интерактивной службы расчета эфемерид с возможностью получения эфемеридных таблиц в различных единицах изменения и системах координат через ресурс <http://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>.

Литература

1. Астрономический ежегодник на 2018 год. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — 686 с.
2. *Krasinsky G. A., Vasilyev M. V.* ERA: knowledge base for ephemeris and dynamical astronomy // Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies. Proc. IAU Coll. N 165 // ed. by I. M. Wyrzyszczyk, J. H. Lieske, R. A. Feldman. — Kluwer Academic Publishers, 1997. — P. 239–244.
3. *Космодамианский Г. А.* Численная теория движения галилеевых спутников Юпитера // Астрономический вестник. — М.: ИКЦ «Академ книга», 2009. — Т. 43. — № 6. — С. 483–492.
4. *Питьева Е. В., Павлов Д. А.* Новая версия эфемерид планет и Луны — EPM2015 // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 43. — С. 42–52.
5. JPL Solar System Dynamics [Электронный ресурс]. — URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov> (дата обращения: 15.08.2018.).
6. *Космодамианский Г. А., Порошина А. Л.* Результаты построения численных теорий главных спутников больших планет // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 39. — С. 54–59.
7. *Harper D., Taylor B.* Analysis of ground-based observations of the satellites of Saturn 1874–1988 // A&AS. — 1994. — Vol. 284. — P. 619.
8. *Qiao R. C., Shen K. X., Liu J. R., Harper D.* 1994–1996 CCD astrometric observations of Saturn's satellites and comparison with theories. // A&AS. — 1999. — Vol. 137. — n. 1. — P. 1–5.

9. French R. G., McGhee C. A., Frey M. et al. Astrometry of Saturn's Satellites from the Hubble Space Telescope WFPC2. // *PASP*. — 2006. — Vol. 118. — P. 246.

10. Desmars J., Vienne A., Arlot J.-E. A new catalogue of observations of the eight major satellites of Saturn (1874–2007) // *A&A*. — 2009. — Vol. 493. — P. 1183–1195.

11. Pulkovo database of observations of Solar System bodies [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.puldb.ru/db/sdb.php> (дата обращения: 10.08.2018).

12. Natural Satellites Data Center. Центр данных естественных спутников планет. Наблюдения [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.sai.msu.ru/neb/nss/obsindhr.htm> (дата обращения: 18.08.2018).

13. The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200. — The Netherlands: ESA Publications Division, 1997. — 299 p.

14. Emelyanov N. V. The Natural Satellites ephemerides facility MULTI-SAT // *A&A*. — 2008. — Vol. 487. — P. 759–765.

Updated Versions of Major Saturn`s Satellite Numerical Ephemerides

G. A. Kosmodamiansky

Numerical ephemerides of eight Saturn`s major satellites (Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion and Iapetus) are constructed for the period from 1870 to 2025. The satellite motion theories are based on the method of differential correction and numerical integration. The dynamical model includes mutual perturbations of the satellites, the Sun, the major planets, and Saturn`s oblateness. The coordinate and velocity initial values of the satellites are adjusted using a set of all available optical observational data (from 1874 to 2015). The residuals, their root-mean-square and comparison of our ephemerides with those produced by V. Lainey are given. The ephemerides are publicly available.

Keywords: ephemerides of satellites, optical observations, accuracy of ephemerides, numerical integration.