

Новая версия эфемерид планет и Луны — EPM2015

© Е. В. Питьева, Д. А. Павлов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Эфемериды планет и Луны (EPM) создаются с 70-х годов прошлого века. В 2016 г. была построена новая версия EPM2015, доступная на сайте ИПА РАН <http://iaaras.ru/dept/ephemeris/epm/>. Эта версия была построена с помощью переработанной версии программного комплекса ЭРА (ЭРА–8). В EPM2015 была реализована модель орбитально-вращательного движения Луны, основанная на уравнениях, использованных для построения лунной части эфемерид JPL DE430 в совокупности с современными астрономическими, геодинамическими и селенодинамическими моделями. Луна рассматривается как эластичное тело, имеющее вращающееся жидкое ядро. В динамическую модель эфемерид EPM2015 был добавлен учет возмущений от двумерного кольца астероидов и 30 транснептуновых объектов (ТНО). Эфемериды улучшены по более чем 140000 наблюдений и их нормальных мест, включая новые данные от космических аппаратов Cassini и MESSENGER.

Ключевые слова: построение эфемерид планет и Луны, оптические наблюдения, радиотехнические наблюдения, наблюдения лазерной локации, точность эфемерид.

Введение

Отечественные эфемериды планет и Луны (Ephemerides of Planets and the Moon — EPM) создавались под руководством Г. А. Красинского и В. А. Брумберга с 70-х годов прошлого века в Институте теоретической астрономии (ИТА АН СССР) для поддержки космических полетов. После создания ИПА РАН в 1987 году работа по уточнению эфемерид EPM продолжалась в его стенах. Некоторые из основных вариантов эфемерид EPM доступны на сайте ИПА РАН: EPM2004, EPM2008, EPM2011/m, EPM2015.

Необходимость создания отечественных эфемерид обусловлена проблемами, связанными с использованием зарубежных эфемерид

(лицензионные ограничения, закрытость программного обеспечения, задержка в доступе к новым эфемеридам, проблема ответственности).

Версия EPM2015 создавалась с помощью программного комплекса ЭРА–8 [1], который представляет собой переработанную версию программного пакета ЭРА–7 [2]. Программный комплекс ЭРА–8 основан на платформе Racket и использует SQLite для обслуживания табличных данных. Большая часть численных алгоритмов комплекса ЭРА–8 реализована на языке C.

Эфемериды EPM2015 построены в соответствии с резолюцией В2 XXVIII Генеральной ассамблеи МАС, в которой рекомендуется использовать фиксированное значение для астрономической единицы, а гравитационную постоянную Солнца определять из наблюдений.

Эфемериды EPM2015 содержат барицентрические координаты и скорости Солнца, 9 планет (включая Плутон), трех крупнейших астероидов (Ceres, Pallas, Vesta) и 4 транснептуновых объектов (ТНО) (Eris, Haumea, Makemake, Sedna), а также параметры лунной либрации и разность шкал времени TT-TDB. В дополнение к собственным форматам ИПА РАН (двоичному и текстовому) было добавлено представление эфемерид в SPK/PSK форматах [1], что сделало эфемериды EPM2015 легко доступными для пользователей программных библиотек CALCEPH и SPICE.

Интерактивная служба расчёта эфемерид, разработанная в Лаборатории эфемеридной астрономии ИПА РАН (<http://iaaras.ru/dept/ephemeris/epm>), предоставляет доступ к различным эфемеридам, включая EPM, с возможностью получения эфемеридных таблиц в различных единицах измерения и системах координат.

Динамические модели эфемерид EPM2015

Все серии эфемерид EPM основаны на Общей теории относительности (ОТО): релятивистских уравнениях движения небесных тел и световых/радио лучей и релятивистских шкалах времени. Численное интегрирование уравнений движения небесных тел выполнялось в параметризованной постньютоновской метрике N тел для ОТО в шкале TDB. Эфемериды EPM2015 вычислялись в барицентрической системе координат — BCRS, на интервале более 400 лет (1787–2214), как и EPM2011.

Для прошлых версий эфемерид EPM Г. А. Красинский построил динамическую модель движения Луны, в которой принимались во внимание приливные возмущения [3]. Эта модель была реализована группой Красинского и развивалась как эфемериды Луны EPM-ERA [4].

Для EPM2015 была реализована модель орбитально-вращательного движения Луны [5], подобная используемой в эфемеридах DE430 [16]. Кроме того, в ней были реализованы современные модели, участвующие в уравнениях движения Луны: модель гравитационного потенциала Земли (EGM2008), модель гравитационного потенциала Луны (GL660b), модели вариаций гравитационного потенциала Земли от приливных возмущений Луны и Солнца.

По сравнению с эфемеридами EPM2011 [6] в динамическую модель эфемерид EPM2015 добавлены возмущения от двумерного (вместо одномерного) кольца астероидов и 30 ТНО.

Динамическая модель эфемерид включает [7]:

- взаимные возмущения планет, Солнца и Луны;
- возмущения от 301 большого астероида и 30 наибольших ТНО;
- возмущения от двумерного кольца остальных астероидов с оцениваемой массой и радиусами $R_1 = 2.06$ а. е., $R_2 = 3.27$ а. е.;
- возмущения от одномерного кольца остальных ТНО с оцениваемой массой и радиусом $R = 43$ а. е.;
- релятивистские возмущения;
- возмущения от динамического сжатия Солнца.

Точность оценки массы двумерного кольца астероидов, как и оценки общей массы астероидов главного пояса астероидов, увеличилась в 6.3 раза по сравнению с предыдущей оценкой, полученной с использованием в динамической модели возмущений от одномерного астероидного кольца.

Включение 30 больших и очень далеких ТНО в совместное интегрирование вызвало значительное изменение положения барицентра Солнечной системы. Соответственно изменились и барицентрические положения Солнца и всех других тел, но относительные гелиоцентрические и геоцентрические координаты тел сохранились. Таким образом, только сравнение относительных координат показывает реальные различия разных эфемерид. Кроме того, т. к. разность шкал времени TT-TDB зависит от координат и масс всех тел, включенных в соответствующие эфемериды, разность TT-TDB для EPM2015 отличается от TT-TDB для DE430 линейным членом около 15 нс в столетие. Это объясняется, по большей части, влиянием 30 наибольших ТНО.

Наблюдения, параметры эфемерид ЕРМ

Количество наблюдений разных типов, использованных для уточнения эфемерид ЕРМ2015, увеличилось более чем на порядок по сравнению с ЕРМ2000 и превысило 800000 на интервале с 1913 по 2014 гг. Большая часть наблюдений была взята из базы данных JPL (https://ssd.jpl.nasa.gov/?eph_data). Однако, количество реально использованных для улучшения эфемерид наблюдений значительно меньше — около 140000, т. к. большинство данных времен запаздывания КА было объединено У. Фолкнером (JPL) и другими авторами в нормальные точки по одной на каждом обороте КА вокруг планеты. При разработке ЕРМ2015 были использованы новые наблюдения, полученные в 2010–2014 гг. для КА Odyssey, Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), Mars Express (MEX) и Venus Express (VEX), а также РСДБ данные 2011–2014 гг. для VEX, Odyssey, MRO и Cassini. Эти новые данные были любезно предоставлены У. Фолкнером (JPL) и А. Фиенгой (IMCCE). Кроме того, в базу данных были добавлены новые ПЗС-наблюдения, полученные в 2012–2013 гг. в обсерваториях Флагстафф и ТМО, наблюдения 1950–2013 гг. в Пулковской обсерватории [8–9], наблюдения 1995–2013 гг. в обсерватории Pico dos Dias (Бразилия) [10], а также заново измеренные и проанализированные данные фотопластинок, полученных с 1931 г. по 1951 г. в обсерватории Lowell [11]. Особо ценным дополнением базы данных наблюдений стали ряды времен запаздывания 2004–2014 гг. для КА Cassini [12] и 2011–2014 гг. для КА MESSENGER [13]. Благодаря этим данным, параметры орбит Сатурна и Меркурия были определены значительно точнее, чем в эфемеридах ЕРМ2011.

Для уточнения параметров орбит внешних планет использовались как наблюдения самих планет, так и позиционные наблюдения основных спутников этих планет. Для обработки наблюдений применялись эфемериды основных спутников внешних планет, которые были созданы в ИПА РАН [14].

База данных, по которым улучшались эфемериды ЕРМ2015, включала 20480 светолокационных наблюдений Луны, полученных на 7 станциях с 1970 по 2013 гг., 53724 нормальных мест радиотехнических наблюдений с 1961 по 2014 гг. и 72929 оптических наблюдений внешних планет и их спутников с 1913 по 2013 гг.

Радарные наблюдения были редуцированы за запаздывание радиосигнала в гравитационных полях Солнца, Юпитера, Сатурна (эффект Шапиро), переход от координатного времени эфемерид к соб-

ственному времени наблюдателя, а также за запаздывание сигнала в тропосфере Земли и солнечной короне. Кроме того, радарные наблюдения были скорректированы с учетом рельефа отражающей поверхности лоцируемых планет: Меркурия, Венеры и Марса.

Основная редукция оптических наблюдений включала поправку за дополнительный эффект фазы, поправку за перевод наблюдений к системе ICRF (Международная небесная система координат) и релятивистскую коррекцию за отклонение светового луча.

Эфемериды EPM2015 были привязаны к системе ICRF2 с точностью лучшей, чем 0.2 mas, посредством включения в общее решение 296 РСДБ-измерений КА Magellan, Phobos, MGS, Odyssey, VEX, MRO, Cassini, полученных в 1989–2014 гг. по наблюдениям этих КА на фоне квазаров.

Около 300 параметров определялись в процессе улучшения эфемерид EPM2015 по наблюдениям. Они могут быть разделены на несколько групп.

Параметры Луны:

- положение и скорость Луны в начальную эпоху;
- углы физической либрации и скорости их изменения в начальную эпоху;
- отношения моментов инерции Луны;
- коэффициент сжатия жидкого ядра;
- коэффициент трения ядра о кору;
- угловая скорость жидкого ядра;
- задержка приливных деформаций;
- число Лява h_2 .

Параметры Солнечной системы:

- элементы орбит планет и 16 спутников внешних планет в начальную эпоху;
- гравитационные постоянные Солнца, Земли, Луны и 31 астероида;
- углы ориентации эфемерид относительно небесной системы координат ICRF2;
- 13 параметров вращения Марса;
- 8 коэффициентов топографии Меркурия;
- средние плотности астероидов таксономических типов C, S, M;
- гравитационные постоянные главного пояса астероидов и ТНО.

Коэффициент сжатия Солнца J_2_\odot при разработке EPM2015 не определялся, а был взят из [13], [15].

Редукционные параметры:

- поправки к уровненным поверхностям Венеры, Меркурия и Марса;
- координаты трёх посадочных аппаратов (ПА) на Марсе;
- параметры солнечной короны для соединений планет с Солнцем;
- поправки к запаздываниям сигнала;
- 5 коэффициентов для дополнительного фазового эффекта внешних планет;
- положения лунных отражателей и станций лазерной локации.

В табл. 1 приведены гравитационные постоянные Солнца, Луны и систем планета-спутники (кроме Земли) в единицах 10^{-15} а. е.³/сут² в шкале TDB. Гравитационные постоянные Солнца, Луны и Земли были уточнены при построении эфемерид EPM2015 по радарным наблюдениям планет и лазерным наблюдениям Луны. Остальные гравитационные постоянные в табл. 1 соответствуют аналогичным параметрам эфемериды DE432.

Таблица 1

Гравитационные постоянные Солнца, Луны и систем планета-спутники (кроме Земли) в единицах 10^{-15} а. е.³/сут² в шкале TDB

Объект	GM_i	Объект	GM_i
Солнце	295912208310.4427	Юпитер	282534582.5972
Меркурий	49124.8045	Сатурн	84597060.7325
Венера	724345.2333	Уран	12920265.7963
Луна	10931.8946	Нептун	15243573.4789
Земля	888769.2466	Плутон	2175.0991
Марс	95495.4870		

В табл. 2 приведены гравитационные постоянные 46 астероидов со значениями ошибок, равными утроенной формальной ошибке определения данного параметра методом наименьших квадратов (с теми же ошибками даны и другие параметры в данной статье). Массы 31 астероида получены по радарным наблюдениям планет. Для 13 астероидов, отмеченных знаком *, массы не определялись, т. к. это двойные астероиды или астероиды, имеющие спутники. В этом случае приводится суммарная гравитационная постоянная всех тел системы соответствующих астероидов. Два астероида Vesta (4) и Eros (433) были изучены с помощью КА, их массы были измерены с высокой точно-

стью и не уточнялись: $GM_{Vesta} = (38.54748 \pm 0.00045) \cdot 10^{-15}$ а. е.³/сут², $GM_{Eros} = (0.0009949 \pm 0.0000013) \cdot 10^{-15}$ а. е.³/сут². Массы ТНО были взяты из открытых источников.

Таблица 2

Гравитационные постоянные астероидов в 10^{-15} а. е.³/сут² в шкале TDB и ошибки их определения; * отмечены астероиды, массы которых известны и не определялись при построении эфемерид EPM2015

Астероид	Масса	Астероид	Масса
(1) Ceres	138.238 ± 0.352	(52) Europa	1.233 ± 0.931
(2) Pallas	30.568 ± 0.352	(65) Cybele	0.891 ± 0.858
(3) Juno	3.882 ± 0.127	(87) Sylvia*	2.200 ± 0.027
(4) Vesta*	38.547481	(88) Thisbe	1.746 ± 0.219
(6) Hebe	1.313 ± 0.209	(90) Antiope*	0.124 ± 0.009
(7) Iris	1.942 ± 0.119	(93) Minerva*	0.521 ± 0.179
(8) Flora	0.899 ± 0.047	(96) Aegle	1.459 ± 0.403
(9) Metis	0.255 ± 0.104	(105) Artemis	0.252 ± 0.148
(10) Hygiea	12.237 ± 2.428	(107) Camilla*	1.667 ± 0.134
(11) Parthenope	0.742 ± 0.249	(121) Hermione*	0.740 ± 0.147
(13) Egeria	1.380 ± 0.215	(130) Electra*	0.982 ± 0.179
(14) Irene	0.841 ± 0.079	(139) Juewa	0.514 ± 0.189
(15) Eunomia	5.025 ± 0.110	(216) Kleopatra*	0.691 ± 0.009
(16) Psyche	5.087 ± 0.304	(283) Emma*	0.205 ± 0.013
(19) Fortune	1.287 ± 0.053	(324) Bamberg	1.693 ± 0.045
(20) Massalia	0.092 ± 0.361	(423) Diotima	2.785 ± 0.777
(22) Kalliope*	1.185 ± 0.138	(433) Eros*	0.000994903
(23) Thalia	0.254 ± 0.060	(451) Patientia	0.338 ± 1.252
(29) Amphitrite	1.888 ± 0.168	(511) Davida	4.731 ± 0.865
(31) Euphrosyne	3.448 ± 0.945	(532) Herculina	1.265 ± 0.351
(41) Daphne*	0.939 ± 0.049	(702) Alauda*	0.901 ± 0.161
(45) Eugeria*	0.862 ± 0.062	(704) Interamni	2.158 ± 0.565
(48) Doris	2.676 ± 1.168	(762) Pulkova*	0.208 ± 0.045

Значения некоторых других параметров:

- $2.0321572 \cdot 10^{-4}$ — динамический фактор формы Луны;
- $6.310230 \cdot 10^{-4}$ — характеристика моментов инерции Луны β ;
- $2.277332 \cdot 10^{-4}$ — характеристика моментов инерции Луны γ ;
- $2.42 \cdot 10^{-2}$ — число Лява k_2 для Луны;
- $9.7 \cdot 10^{-2}$ суток — приливное запаздывание Луны;

— $(24.94 \pm 3.79) \cdot 10^{-15}$ а. е.³/сут² — гравитационная постоянная двумерного кольца астероидов с радиусами $R_1=2.06$ а. е. и $R_2=3.27$ а. е.;

— $(11242 \pm 3853) \cdot 10^{-15}$ а. е.³/сут² — гравитационная постоянная кольца ТНО с радиусом $R = 0.43$ а. е.

Точность эфемерид EPM

Применялось несколько методов оценки точности эфемерид EPM2015:

- сравнение с наблюдениями;
- оценка формальных ошибок определяемых параметров;
- сравнение EPM2015 с эфемеридами серий DE и INPOP.

На рис. 1 показаны остаточные невязки дальности, измеренной по наблюдениям КА MESSENGER (слева) и Cassini (справа), и приведены среднеквадратические значения невязок (WRMS). Благодаря этим данным, параметры орбит Меркурия и Сатурна были значительно уточнены, а формальные ошибки определения орбитальных элементов уменьшились в несколько раз.

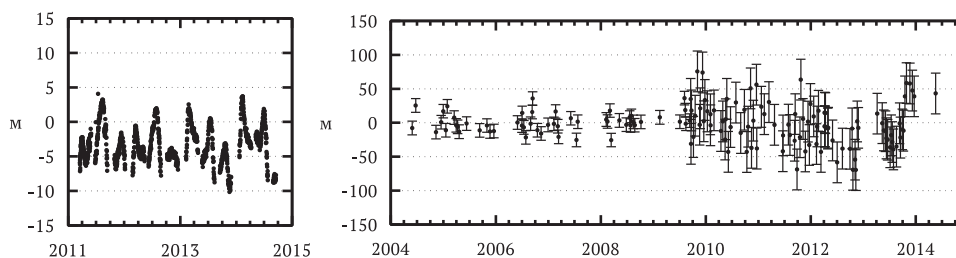


Рис. 1. Остаточные невязки дальности КА MESSENGER (WRMS = 4.2 м) и Cassini (WRMS = 18.5 м)

На рис. 2 приведены остаточные невязки светолокационных наблюдений Луны, полученных в обсерваториях CERGA (Лазурный берег, Франция) — слева и Apache Point (Нью-Мексико, США) — справа. WRMS невязок наблюдений примерно равны при использовании всех трех современных высокоточных эфемерид Луны: EPM, DE и INPOP.

Из-за отличия распределения остаточных невязок наблюдений от нормального закона формальные оценки точности определения параметров, полученные методом наименьших квадратов (МНК), могут быть не совсем корректны. Однако, эти формальные ошибки могут быть использованы для иллюстрации прогресса при определении некоторых параметров на основе нарастающей выборки наблюдений.

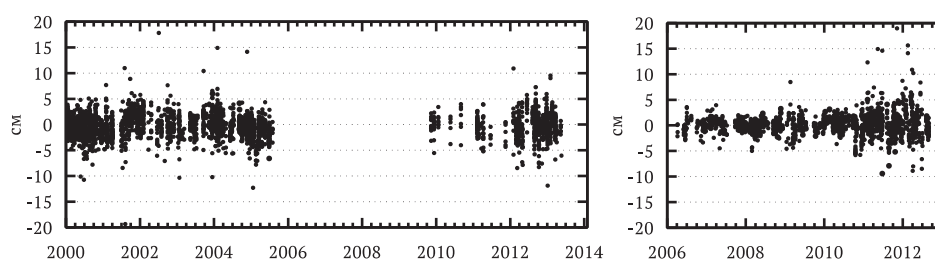


Рис. 2. Остаточные невязки светолокационных наблюдений Луны в обсерваториях CERGA (WRMS = 2.1 см) и Apache Point (WRMS = 1.4 см)

Как пример, в табл. 3 приводятся оценки углов ориентации эфемерид EPM2015 относительно ICRF2 (последняя строка) и такие же оценки для предшествующих версий эфемерид EPM. Виден значительный прогресс в определении ориентации эфемерид EPM.

Таблица 3

Оценка значений углов ориентации эфемерид EPM относительно ICRF2

Интервал	Число наблюд.	ε_x , mas	ε_y , mas	ε_z , mas
1989–1994	20	2.0 ± 1.5	0.1 ± 1.0	-0.1 ± 0.8
1989–2003	62	0.4 ± 0.2	-0.3 ± 0.3	-0.7 ± 0.2
1989–2007	123	0.294 ± 0.099	0.083 ± 0.140	0.089 ± 0.073
1989–2010	222	-0.000 ± 0.072	-0.005 ± 0.089	0.004 ± 0.051
1989–2014	296	0.002 ± 0.064	0.001 ± 0.062	0.000 ± 0.036

Наконец, сравнение с гелиоцентрическими эфемеридами DE430 (JPL) [16] и INPOP13c (IMCCE) показало, что ошибки современных эфемерид планет и Луны сопоставимы и составляют: метры в расстояниях Земля-планета для внутренних планет и Сатурна, хорошо обеспеченных радарными наблюдениями; ошибки положения Луны на орбите не превосходят 1 м; ошибки в расстоянии Земля-Луна менее 5 см; ошибки положения точек на поверхности Луны из-за либрации не превосходят 0.4 м.

Заключение

В ИПА РАН на основе улучшенных динамических моделей движения планет и орбитально-вращательного движения Луны, а также расширения интервалов наблюдений планет и Луны построена новая

версия эфемерид EPM2015. Точность эфемерид EPM2015 сопоставима с точностью эфемерид DE430 (JPL) и INPOP13c (IMCCE).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН П-7, подпрограмма «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд».

Литература

1. Pavlov D., Skripnichenko V. Rework of the ERA software system: ERA-8 // Proc. Conf. Journées-2014 «Systèmes de référence spatio-temporels» / eds.: Z. Malkin, N. Capitaine. — St. Petersburg, 2015. — P. 243–246.

2. Krasinsky G. A., Vasilyev M. V. ERA: knowledge base for ephemeris and dynamical astronomy // Proc. IAU Coll. N 165 “Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies” / eds. I. M. Wytrzyszczak, J. H. Lieske, R. A. Feldman. — Kluwer Academic Publishers, 1997. — P. 239–244.

3. Krasinsky G. A. Tidal effects in the Earth-Moon system and the Earth rotation // *Celes. Mech. Dyn. Astr.*, 1999. — Vol. 75, Is. 1. — P. 39–66.

4. Васильев М. В., Ягудина Э. И. Российская эфемерида Луны EPM-ERA 2013 // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2014. — Вып. 31. — С. 11–17.

5. Pavlov D. A., Williams J. G., Suvorkin V. V. Determining parameters of Moon’s orbital and rotational motion from LLR observations using GRAIL and IERS-recommended models // *Celes. Mech. Dyn. Astr.*, 2016. — Vol. 126, Is. 1–3. — P. 61–88.

6. Путьева Е. В. EPM2011 — обновленные планетные эфемериды ИПА РАН и их использование для научных исследований // *Астрон. вестник* — М.: Наука, 2013. — Т. 47, № 5. — С. 419–435.

7. Pitjeva E. V., Pitjev N. P. Development of planetary ephemerides EPM and their applications // *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 2014. — Vol. 119. — P. 237–256.

8. Деметьева А. А. Астрометрические наблюдения Урана на Пулковском нормальном астрографе // *Астрон. вестник*, 2014. — Т. 48, № 3. — С. 211–218.

9. Рощина Е. А., Измайлов И. С., Киселева Т. П. Астрометрические наблюдения на 26-дюймовом рефракторе в 2007–2011 гг. // *Астрон. вестник*, 2015. — Т. 49, № 3, — С. 190–194.

10. Benedetti-Rossi G., Vieira Martins R., et al. Pluto: improved astrometry from 19 years of observations / Benedetti-Rossi G., Vieira Martins R., Camargo J. I. B., Assafin M., Braga-Ribas F. // *Astron. Astrophys.*, 2014. — Vol. 570. — Id. A86. — 12 p.

11. Buie M., Folkner W. M. Astrometry of Pluto from 1930-1951. Observations: the Lampl and Plate Collection // *Astron. J.*, 2015. — Vol. 149, Is. 1. — Id. 22. — 13 p.

12. Hees A., Folkner W. M., et al. Constraints on modified Newtonian dynamics theories from radio tracking data of the Cassini spacecraft / Hees A., Folkner W. M.,

Jacobson R. A., Park R. S // *Physical Review D*, 2014. — Vol. 89, Is. 10. — Id. 102002.

13. *Park R. S., Folkner W. M., et al.* Precession of Mercury's Perihelion from Ranging to the MESSENGER Spacecraft / *Park R. S., Folkner W. M., Konopliv A. S., Williams J. G., Smith D. E., Zuber M. T.* // *Astron. J.*, 2017. — Vol. 153, Is. 3. — Id. 121. — 7 p.

14. *Космодамианский Г. А., Порошина А. Л.* Результаты построения численных теорий главных спутников больших планет. // *Труды ИПА РАН*, 2014. — Вып. 31. — С. 39–48.

15. *Fienga A., Laskar J., et al.* Numerical estimation of the sensitivity of INPOP ephemerides to general relativity parameters / *Fienga A., Laskar J., Exertier P., Manche H., Gastineau M.* // *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 2015. — Vol. 123, Is. 3. — P. 325–349.

16. *Folkner W. M., Williams J. G., et al.* The Planetary and Lunar Ephemeris DE430 and DE431 / *Folkner W. M., Williams J. G., Boggs D. H., Park R. S., Kuchynka P.* // *The Interplanetary Network Progress Report*, 2014. — 42–196. — 81 p.

EPM2015: the New IAA RAS Version of the Ephemerides of Planets and the Moon

E. V. Pitjeva, D. A. Pavlov

EPM (Ephemerides of Planets and the Moon) are being constantly developed since 1970s. The new EPM2015 version was published in 2016. It is available publicly at <http://iaaras.ru/dept/ephemeris/epm>. This version is built using the ERA (Ephemeris Research in Astronomy) software, Version 8. EPM2015 includes the updated model of the orbital and rotational motion of the Moon based on the JPL DE430 lunar model and other up-to-date astronomical, geodynamical, geophysical and selenophysical models. The Moon is considered an elastic body with a molten core. The planetary part of the EPM2015 has been improved by adding the two-dimension asteroid annulus and 30 trans-Neptunian objects (TNO) into the dynamical equations. More than 140000 observations and normal points have been used to refine the parameters of the model, including the recent data from the Cassini and MESSENGER spacecrafts.

Keywords: construction of ephemerides of planets and the Moon, optical observations, radio technical observations, lunar laser ranging, accuracy of ephemerides.