

## Анализ уточнённой лунной части эфемерид ЕРМ

© Д. А. Павлов, Э. И. Ягудина

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Анализируется эфемерида Луны, построенная в рамках фундаментальных эфемерид ЕРМ на основе уравнений движения, принятых в теории JPL DE430, и наблюдений лазерной локации Луны (LLR). Рассмотрено влияние моделей приливных вариаций геопотенциала, моделей океанической и атмосферной нагрузок на точность решения.

Модель движения Луны DE430, наряду с физическими уравнениями, содержит и немоделируемые параметры, такие как дополнительная либрация в долготе и модифицированные коэффициенты гравитационного потенциала. Тем не менее, в остаточных разностях наблюдений обнаруживаются систематические ошибки, что свидетельствует о недостаточной точности земных или лунных моделей.

Проведено сравнение эфемерид ЕРМ и DE430. Проведена оценка ошибок поправок к параметрам вращения Луны и Земли по LLR-наблюдениям.

**Ключевые слова:** лазерная локация Луны, эфемерида Луны, модель вращения Луны, геодинамические модели, Всемирное время.

### Введение

Лазерная локация лунных ретрорефлекторов (далее — лазерная локация Луны, LLR) является проверенным инструментом для решения ряда задач фундаментальной и прикладной астрономии:

- прогноз орбиты Луны для последующего моделирования возмущения движения искусственного спутника Земли (ИСЗ) Луной;
- связь лунной и земной систем координат между собой и с небесной системой координат;
- анализ долговременных геодинамических и геофизических эффектов;

— проверка сильного принципа эквивалентности и ОТО.

Регулярные LLR-наблюдения проводятся с 1970 г. На сегодняшний день доступны данные наблюдений пяти обсерваторий, две из которых активно продолжают работу: Apache Point (США) и Обсерватория Лазурного берега (ОСА, Франция). Менее интенсивно проводят LLR-наблюдения обсерватории Matera (Италия) и McDonald (США). Планируется введение в строй LLR-инструментов в России и ЮАР.

Уточнение не только орбиты, но и вращения Луны возможно благодаря наличию пяти ретрорефлекторных панелей, расположенных в различных частях лунного диска: три панели размещены участниками экспедиций Apollo 11, 14 и 15, и два закреплены на советских аппаратах Луноход-1 (локация проводится с 2010 г.) и Луноход-2. Разрабатываются проекты новых отражателей на Луне, включая крупные одиночные отражатели.

Обработка современных LLR-наблюдений требует наличия модели орбитально-вращательного движения Луны, учитывающей приливную и вращательную диссипацию в Луне и жидкое ядро Луны [1], модели гравитационного потенциала Земли [2] и Луны [3], приливные вариации геопотенциала [4], смещения инструментов, тропосферную задержку [5]. При обработке учитываются и некоторые немоделируемые долговременные эффекты путём ввода поправок: амплитуд гармонических вариаций физической либрации Луны в долготе, сдвигов и прочих эмпирических параметров.

Движение Луны наиболее точно описывает модель DE430 [9]. Эта модель была реализована [6, 7] в рамках эфемерид EPM [8]. В данной работе достигнутые результаты расширены с учётом наблюдений до 2016 г. включительно и моделей океанической и атмосферной нагрузок.

### **Результаты обработки наблюдений**

Взвешенные средние квадратические отклонения (СКО) остаточных разностей LLR-наблюдений (в см в дальности в одну сторону), обработанных совместно в четырёх различных решениях, приведены в таблице. Новый тип LLR-наблюдений — инфракрасные (IR, длина волны 1064 нм), в отличие от традиционных наблюдений (длина волны 532 нм) — появился в ОСА в 2015 г. Решение А — основное, с вариациями геопотенциала по модели DE430, океанической нагрузкой, представленной в виде HARPOS-файлов, рассчитанных по модели FES2012 и атмосферной нагрузкой, рассчитанной для станций по данным чис-

ленной модели атмосферы GEOS-FPIT [10]. Решение В — аналогично А, но с моделью приливных вариаций геопотенциала IERS2010 [5]. Решение С — аналогично А, но без учёта океанической нагрузки. Решение D — без учёта атмосферной нагрузки.

Модель приливных вариаций геопотенциала IERS2010 показывает худшие результаты при обработке LLR-наблюдений, чем модель DE430 [4], что было уже показано в [7] (но на меньшем количестве наблюдений и с некоторыми ошибками в обработке).

Применение модели океанической нагрузки устраняет некоторые систематические ошибки в остаточных разностях, хотя и незначительные. Учёт атмосферной нагрузки не оказывает никакого эффекта на представление наблюдений, но, возможно, уменьшает систематические ошибки определяемых параметров. Среднеквадратическое значение изменения дальности от применения атмосферной нагрузки составляет около 2 мм.

Таблица

Статистика LLR-наблюдений и их остаточных разностей

Станция	Период наблюдений	Число нормальных точек	Использовано	Отброшено	СКО, см			
					А	В	С	D
McDonald	1969–1985	3604	3552	52	19.7	20.1	19.7	19.7
MLRS1	1983–1988	631	587	44	11.1	11.7	11.1	11.1
MLRS2	1988–2015	3670	3211	459	3.5	3.9	3.5	3.5
Haleakala	1984–1990	770	746	24	5.5	5.9	5.7	5.5
OCA (Ruby)	1984–1986	1188	1109	79	16.9	17.5	16.9	16.9
OCA (YAG)	1987–2005	8324	8218	106	2.0	2.3	2.0	2.0
OCA (MeO)	2009–2016	1732	1713	19	1.41	1.60	1.40	1.41
OCA (IR)	2015–2016	1626	1606	20	1.25	1.29	1.28	1.25
Apache Pt	2006–2016	2648	2606	42	1.34	1.66	1.43	1.34
Matera	2003–2015	118	103	15	4.0	4.0	4.0	4.0

Наиболее качественные результаты при крайне малом количестве выбросов дают инфракрасные (IR) наблюдения обсерватории OCA.

### Уточнение параметров вращения Земли и Луны

Локация различных отражателей в течение нескольких часов позволяет устранить систематические ошибки сеанса. На рис. 1 и 2 изображены результаты обработки сеансов, для которых определялись

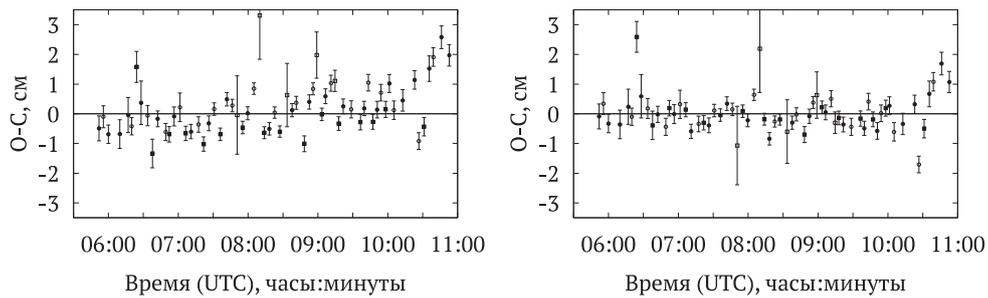


Рис. 1. Остаточные разности и ошибки ( $1\sigma$ ) наблюдений в обсерватории Apache Point 15 апреля 2014 г. при лунном затмении (64 нормальные точки, среднеквадратическое значение  $1\sigma$  4.3 мм). Слева: без поправок к ПВЗ, ПВЛ и дальности. Справа: с поправками

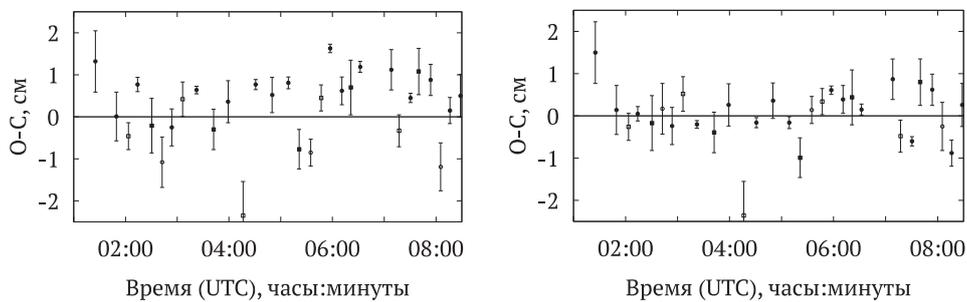


Рис. 2. Остаточные разности и ошибки ( $1\sigma$ ) инфракрасных наблюдений в обсерватории OCA 21 октября 2016 г. (30 нормальных точек, среднеквадратическое значение  $1\sigma$  4.5 мм). Слева: без поправок к ПВЗ, ПВЛ и дальности. Справа: с поправками

суточные поправки к:

- долготе и широте станции, или  $\Delta UT0$  и вариация широты (VOL);
- углу  $\psi$  физической либрации Луны и углу вращения вокруг оси  $Y$ , перпендикулярной средней оси вращения Луны и направлению на Землю;
- дальности (поправка коррелирует с  $\Delta UT0$  и VOL и включена для более адекватной оценки ошибки этих параметров).

Формальные ошибки для сеанса 15 апреля 2014 г. (с уточненными параметрами вращения Земли (ПВЗ) и Луны (ПВЛ)) в обсерватории Apache Point (рис. 1), составляют:  $\sigma(\Delta UT0) = 28$  мкс,  $\sigma(VOL) = 1.7$  mas,  $\sigma(\Delta\psi) = 0.8$  mas,  $\sigma(\text{rot}Y) = 0.9$  mas. СКО без поправок к ПВЗ и ПВЛ для данного сеанса составляет 8.4 мм, с поправками — 6.2 мм. Формальные ошибки ПВЗ и ПВЛ для сеанса 21 октября 2016 г. в обсерватории

ОСА (рис. 2) составляют:  $\sigma(\Delta UT0) = 24$  мкс,  $\sigma(VOL) = 1.1$  mas,  $\sigma(\Delta\psi) = 1.0$  mas,  $\sigma(\text{rot}Y) = 1.4$  mas. СКО без поправок к ПВЗ и ПВЛ для данного сеанса составляет 8.5 мм, с поправками — 6.3 мм.

После устранения систематических суточных эффектов СКО остаточных невязок уменьшается, но продолжает превышать среднеквадратическое значение формальной ошибки нормальных точек, что говорит о неучтённых эффектах. Особенно явно о них свидетельствует картина чередующихся трендов в правой части рис. 1 и увеличение невязок в конце сеанса, когда Луна находится ниже  $20^\circ$ . Дополнительные эксперименты позволили заключить, что эффект не является артефактом уравнивания в решении различных станций или отражателей. Кроме того, при отсутствии на Луне океанов и атмосферы, а также слабой связи коры с ядром, крайне маловероятны столь быстрые колебания лунного отражателя или всей Луны во вращении. Следовательно, причина может быть или в тропосферной задержке, или в неучтённых смещениях инструмента. Инфракрасные LLR-наблюдения ОСА не имеют столь заметных систематических ошибок, что является аргументом против того, что ошибки в остаточных разностях Apache Point вызваны короткопериодическими вариациями вращения Земли.

В целом, LLR-наблюдения способны служить для уточнения суточных параметров вращения Земли или Луны, но их существенная зависимость от погодных условий снижает практическую применимость такого подхода. На рис. 3 и 4 приведены значения формальных ошибок определения ПВЗ и ПВЛ в сеансах 2015–2016 гг. с десятью или более нормальными точками, в которых такое определение прошло успешно. Из 460 сеансов, выполненных тремя инструментами (50 наблюдений 532 нм лазером Apache Point, 90 наблюдений 532 нм лазером ОСА и 320 наблюдений IR-лазером ОСА) всего в 23 сеансах поправка к UT0 определилась с точностью, превосходящей 50 мкс, и всего в 7 сеансах VOL определилась с точностью, превосходящей 1 mas. Наибольшее количество успешных сеансов было выполнено с использованием IR-лазера.

Точность поправок к ПВЛ практически не зависит от погрешности дальности и от тропосферы (но существенно зависит от количества наблюдений различных отражателей и длительности сеанса) и составляет 5 mas в 148 сеансах и 2 mas в 41 из них.

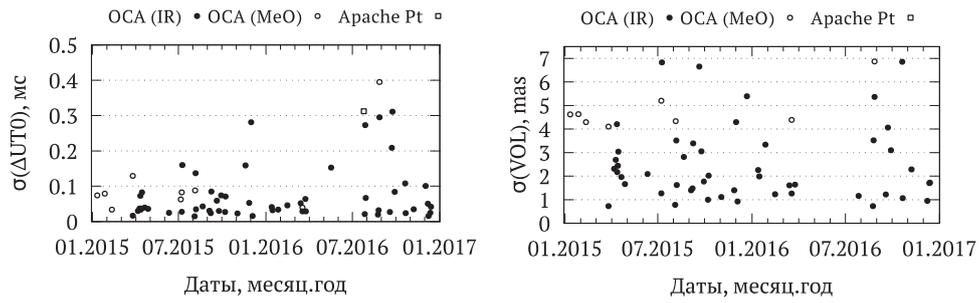


Рис. 3. Формальные ошибки определения  $UT_0$  (слева) и  $VOL$  (справа) по LLR-наблюдениям. Отсечены данные с  $\sigma(\Delta UT_0) > 0.5$  мс или с  $\sigma(VOL) > 7$  мас

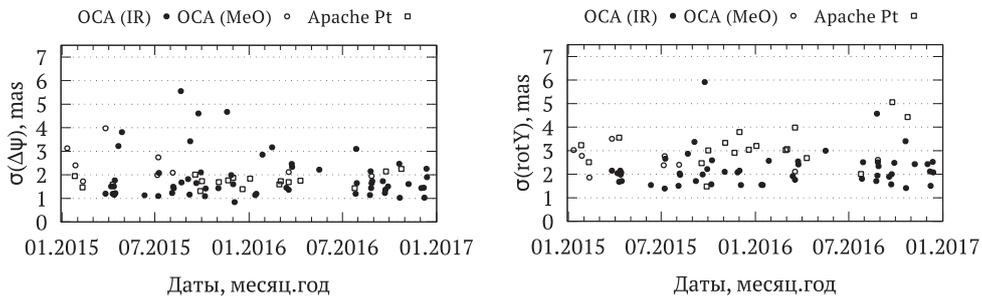


Рис. 4. Формальные ошибки определения параметров вращения Луны  $\Delta\Psi$  (слева) и  $rotY$  (справа) по LLR-наблюдениям. Отсечены данные с  $\sigma > 7$  мас

### Сравнение эфемериды EPM и DE430

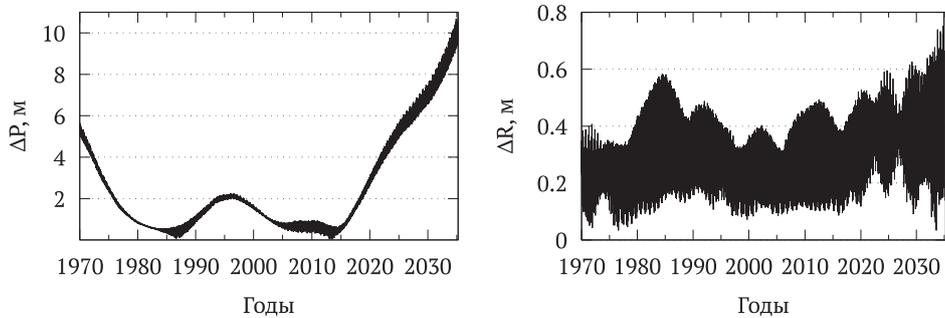


Рис. 5. Сравнение уточнённой лунной эфемериды EPM с DE430. Слева: модуль разности геоцентрических положений Луны ( $\Delta R$ ). Справа: модуль разности в углах физической либрации на поверхности Луны (максимальное значение,  $\Delta R$ )

На интервале с 2006 г. (начало высокоточных наблюдений) и до 2012 г. (выпуск DE430) видно совпадение орбит на уровне меньше 1 м и быстрое расхождение через 5 лет (рис. 5). Расхождение во вращении Луны не превышает 1 м на 30-летнем интервале. Однако приведённые цифры являются лишь эмпирической оценкой точности построенной орбиты.

### **Заключение**

СКО нормальных точек современных LLR-наблюдений составляет 2–5 мм. СКО остаточных разностей после уточнения параметров и учёта известных систематических эффектов составляет 6–10 мм, что свидетельствует о несовершенстве моделей короткопериодических эффектов в атмосфере, вращении Земли, смещении отражателей или наблюдательных инструментов.

Учёт океанической нагрузки имеет значение для обработки LLR-наблюдений, в то время как имеющиеся модели атмосферной нагрузки не оказывают заметного влияния.

Оценка точности орбиты Луны на интервале наблюдений, полученная путём сравнения эфемерид DE и EPM, составляет около 1 м в орбите и 1 м во вращении на поверхности Луны. Необходимо продолжать LLR-наблюдения для сохранения данного уровня точности.

Инфракрасные LLR-наблюдения, проводимые с 2015 г. в обсерватории OSA, являются более частыми и точными, чем традиционные наблюдения 532 нм лазером, т. к. в меньшей степени зависят от погодных условий и имеют меньшую задержку в тропосфере.

Точность определения суточных ПВЗ по наиболее успешным сеансам инфракрасных LLR-наблюдений составляет 20–50 мкс в UTO и 1–3 mas в VOL. Точность суточных ПВЛ составляет около 2 mas в долготе и 3 mas в широте.

### **Благодарности**

Авторы благодарны С. Л. Курдубову, Е. В. Питьевой, В. И. Скрипниченко и В. В. Суворкину (ИПА РАН) за помощь в работе; Дж. Вильямсу (NASA JPL) за неоценимую помощь в реализации модели движения Луны; Л. Ю. Петрову (NASA GSFC, Astrogeo Center) за модели океанических и атмосферных нагрузок; А. Фиенге и Ж.-М. Торре (OSA) и Т. Мёрфи (UCSD, Apache Point Observatory) за наблюдения; М. Флэтту (UoU, PLT Inc) за программную среду Racket.

## Литература

1. *Williams J. G., Boggs D. H. et al.* Lunar rotational dissipation in solid body and molten core / Williams J. G., Boggs D. H., Yoder C. F., Ratcliff J. T., Dickey J. O. // *J. Geophys. Res.: Planets.* — 2001. — Vol. 106(E11). — P. 27933–27968.
2. *Pavlis N. K., Holmes S. A. et al.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) / Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* — 2012. — Vol. 117, Is. B4.
3. *Konopliv A. S., Park R. S. et al.* The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission / Konopliv A. S., Park R. S., Yuan D. N., Asmar S. W., Watkins M. M., Williams J. G., Fahnestock E., Kruizinga G., Paik M., Strelakov D., Harvey N., Smith D. E., Zuber M. T. // *J. Geophys. Res.: Planets.* — 2013. — Vol. 118(7). — P. 1415–1434.
4. *Williams J. G., Boggs D. H.* Secular tidal changes in lunar orbit and Earth rotation // *Cel. Mech. Dyn. Astr.* — 2016. — Vol. 126. — P. 89–129.
5. *Petit G., Luzum B.* IERS Conventions (2010) // IERS Technical Note 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. — 179 pp.
6. *Павлов Д. А.* Уточнение параметров орбиты и либрации Луны на основе модели DE430 // *Известия ГАО в Пулковке № 223: Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулковско-2015», — Санкт-Петербург, 2016. — С. 229–234.*
7. *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 // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2016. — Vol. 126. — P. 61–88.
8. *Pitjeva E. V., Pitjev N. P.* Development of planetary ephemerides EPM and their applications // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* — 2014. — Vol. 119(3). — P. 237–256.
9. *Folkner W., Williams J., Boggs D., Park R., Kuchynka P.* The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431 // *IPN Progress Report.* — NASA JPL, 2014. — P. 42–196.
10. *Petrov L., Boy J.-P.* Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* — 2004. — Vol. 109, Is. B3.

## Analysis of the Improved Lunar Part of the EPM Ephemerides

D. A. Pavlov, E. I. Yagudina

The improved lunar ephemeris which is developed as a part of The Fundamental Ephemerides of Planets and the Moon (EPM) is analyzed. The ephemeris is based on the equations accepted originally in the JPL DE430 and modern lunar laser ranging (LLR) observations. Different treatments of geopotential variations, ocean and atmospheric loading are compared in this work.

The model of orbital-rotational motion of the Moon does not only include physical equations, but also the additional libration in longitude, modified coefficients of the lunar gravitational potential and other non-modelled effects. Nevertheless, some systematic effects found in the residual differences indicate that the models of orbital-rotational motion of the Moon and the Earth can be improved.

We have studied the efficiency of the lunar rotation parameters and Universal time determined from the LLR observations. The EPM and DE430 ephemerides are compared.

**Keywords:** lunar laser ranging, lunar ephemeris, lunar rotational model, geodynamic models, Universal time.