

Параметры эфемериды Луны EPM2021a

© М. О. Кан, Э. И. Ягудина

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Метод лазерной локации Луны (ЛЛЛ, Lunar Laser Ranging, LLR) вот уже более 50 лет является основным высокоточным средством для построения и улучшения эфемериды Луны. В предлагаемой работе рассматриваются и анализируются результаты обработки ЛЛЛ-наблюдений для получения параметров эфемериды Луны EPM2021a, созданной и поддерживаемой в ИПА РАН.

До 2014 г. российская эфемерида Луны была основана на модели орбитально-вращательного движения Луны Г. А. Красинского и реализована в рамках системы ERA-7. С 2014 г. Д. А. Павлов начал развивать новую версию эфемерид EPM (включая эфемериду Луны) в рамках модернизированной системы ERA-8.

В последней версии эфемериды Луны EPM2021a реализована модель орбитально-вращательного движения Луны, близкая к используемой в DE430 (NASA JPL).

В работе используется 30355 нормальных точек ЛЛЛ-наблюдений. Это число включает в себя 1344 впервые добавленных наблюдения. Нужно отметить, что 1210 из них были получены на станции Апахе в 2017–2020 гг.: наблюдения с этой станции не выкладывались с 2016 г.

В результате проведенной обработки наблюдений получены следующие результаты:

- 1) получены уточненные параметры эфемериды Луны EPM2021a и их ошибки;
- 2) проведен анализ и сравнение полученных параметров с результатами, полученными по эфемериде Луны INPOP19a [1].

Ключевые слова: эфемерида Луны, лазерная локация Луны, нормальные точки (н. т.), модель орбитально-вращательного движения Луны.

Контакты для связи: Ягудина Элеонора Ивановна (eiya@iaaras.ru).

Для цитирования: Кан М. О., Ягудина Э. И. Параметры эфемериды Луны EPM2021a // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 56. С. 32–38.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.56.32-38>

Parameters of EPM 2021a Lunar Ephemeris

M. O. Kan, E. I. Yagudina

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

For more than 50 years, Lunar laser ranging has served as the main high-precision tool for improving the ephemeris of the Moon. In this paper the results of LLR observations processing are considered and reviewed in order to obtain and refine the parameters of the ephemeris of the Moon EPM2021a which is created and maintained at the Institute of Applied Astronomy (IAA RAS).

Until 2014, the Russian ephemeris of the Moon was based on the model of the Moon orbital and rotational motion proposed by G. A. Krasinsky and implemented within the ERA-7 system. After, a new version of the ephemeris EPM (including the ephemeris of the Moon) began to develop within the renovated ERA-8 system created by D. A. Pavlov.

The latest version of the ephemeris EPM2021a is based on the model of the Moon orbital and rotational motion similar to that used in DE430 (NASA JPL) ephemeris.

In this work 30355 LLR normal points have been used to adjust the lunar ephemeris parameters. This number also includes 1344 ones added for the first time. It is worth noting that 1210 of them were obtained at the Apache station between 2017 and 2020: one could see that nothing had been posted at their site since 2016.

The following results has been achieved:

- 1) the parameters of the lunar ephemeris and their deviations have been determined;
- 2) these parameters have been studied and compared with that of the French ephemeris INPOP2019a [1].

Keywords: lunar ephemeris, lunar laser ranging observations, observation normal points, lunar orbital-rotational model of motion.

Contacts: Eleonora I. Yagudina (eiya@iaaras.ru).

For citation: Kan M. O., Yagudina E. I. Parameters of EPM 2021a Lunar Ephemeris // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 56. P. 32–38.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.56.32-38>

Введение

ЛЛЛ является высокоточным и надежным средством для получения точных параметров орбиты Луны и физической либрации. Уже в течение 52 лет ЛЛЛ надежно используются для уточнения параметров эфемериды Луны. В течение этого времени точность наблюдений ЛЛЛ изменилась с 50 см (начало 1970-х гг.) до 2–5 мм на современных станциях. В настоящее время кроме зеленых лазеров с длиной волны 532 нм на станции Cerga [2] используется инфракрасный лазер с длиной волны 1064 нм. Его использование позволяет повысить точность ЛЛЛ.

Сегодня поддержкой и улучшением эфемерид Луны занимаются три организации: NASA, JPL, США (DE405, DE430, DE431, DE440); IMCCE, Франция (Институт небесной механики (NPOP13, INPOP19a) и ИПА РАН (EPM2017, EPM2019, EPM2021a).

С 1989 до 2014 гг. в ИПА РАН развивалась и поддерживалась эфемерида Луны EPM-ERA, основанная на модели орбитально-вращательного движения Луны Г. А. Красинского [3] и реализованная в рамках системы ERA7 [4].

После 2014 г. начала развиваться новая версия эфемерид планет и Луны EPM в рамках модернизированной системы ERA-8 [5]. В этой версии эфемериды Луны реализована модель орбитально-вращательного движения Луны, близкая к используемой в DE430 (NASA JPL), с рекомендованными на сегодняшний день IERS геофизическими и геодинимическими моделями, которая заменила модель физической либрации Луны, предложенную Красинским.

В настоящей работе получены новые параметры модели движения Луны с учетом старых наблюдений на станциях Haleakala, McDonald-MLRS1-MLRS2, Cerga, Cerga-ir и 1344 новых — полученных на станциях Cerga-Meo, Cerga-ir, Apache (2017–2020 гг.), Wettzell, Matera. Всего использовано 30355 нормальных точек ЛЛЛ.

Модель орбитально-вращательного движения Луны

Во всех перечисленных выше эфемеридах использована динамическая модель Луны как эластичного тела с жидким ядром модели DE430 [6]. Эта модель впоследствии была модифицирована введением параметра сжатия ядра [7]. Современная модель орбитально-вращательного движения Луны EPM2021a строится путем совместного численного интегрирования орбитального движения Солнца и планет в инерциальной системе отчета BCRS с использованием динамической шкалы TDB с учетом сжатия Солнца, а также с учетом

дополнительных возмущений от 277 крупнейших астероидов, пояса, астероидов, 30 транснептуновых объектов и кольца транснептуновых объектов. Поворот Луны вокруг центра масс в небесной системе координат задается тремя углами Эйлера, которые и участвуют в численном интегрировании вместе с положением центра Луны.

Все изменения при построении новой версии эфемериды Луны выполнены Павловым Д. А. [8], продолжены [9] и реализованы в системе ERA-8 [10], которая постоянно совершенствуется и используется для обработки новых наблюдений и получения параметров эфемериды Луны.

Описание светолокационных наблюдений Луны

В эфемериде EPM2021a для уточнения теории орбитально-вращательного движения Луны используется 30355 ЛЛЛ-наблюдений (нормальных точек) на интервале 1970–2021 гг. В настоящее время на Луне находятся 5 отражателей: Аполлон-11, 14, 15 (США) и советско-французские отражатели Луноход-1, Луноход-2. Общее количество измерений светолокационных дальностей (начиная с 1970 г.) до рефлекторов составило соответственно:

1) Apollo-11	—	3664 (85);
2) Apollo-14	—	3474 (80);
3) Apollo-15	—	19797(432);
4) Lunokhod-1	—	1460 (8);
5) Lunokhod-2	—	1960 (24).

В скобках отмечено количество исключенных наблюдений (всего 629 из 30355 начиная с 1970 г.). Все наблюдения до 2016 г. были доступны на сайте: <http://polac.obsm.fr/lldatae.html>.

В настоящее время все доступные наблюдения (кроме наблюдений станции Apache) можно скачать в каталоге [11].

Наблюдения ЛЛЛ на станции Апаче доступны на сайте Apollo Normal Points [12].

Ранее авторами было отмечено, что вплоть до недавнего времени были доступны только те наблюдения со станции Апаче, которые были получены до конца 2016. Появившиеся недавно новые ЛЛЛ-наблюдения 2017–2020 гг. были включены в обработку и показали за 2017–2018 гг. ту же точность, что и прежние. Однако наблюдения 2019 г. отличаются значительными ошибками (из 100 новых ЛЛЛ 2021 г. выброшены 35). Наблюдения 2020 г. все же не так сильно отличаются от прежних точностей станции, поэтому все наблюдения 2019–2020 гг. нуждаются в тщательной проверке, и работа с ними продолжается.

Таблица 1

Наблюдения лазерной локации Луны 1970–2021 гг.

Станция	Годы	Кол-во норм. точек
McDonald, США	1970–1985	3588
Научный, Крым (СССР)	1982–1984	25
MLRS1, США	1983–1988	631
MLRS2, США	1988–2013	3669
Haleakala, США	1984–1990	770
Grasse, France (рубин)	1984–1986	1112
Grasse, France (YAG)	1987–2005	8316
Grasse, France (MeO)	2009–2020	1998
Grasse, Франция (IR)	2015–2020	5926
Matera, Италия	2003–2021	359
Apache Point, США	2006–2020	3858
Wettzell, Германия	2018–2020	103
Всего	1970–2021	30355

Всего было собрано 1344 новых ЛЛЛ-наблюдений, и они были включены в процедуру уточнения параметров модели движения Луны в эфемериде EPM2021a. В табл. 1 представлены все ЛЛЛ-наблюдения с 1970 по 2021 гг., вошедшие в обработку. Наблюдения 1982–1984 гг. (25 ЛЛЛ — н. т., проведенные в Крыму) были недавно обнаружены [13] и обработаны впервые эфемеридой Луны EPM2019 (Отчет о научно-исследовательской работе 0042-2018-0012, 2020). Их точность лежит приблизительно на уровне точности тех лет. Они находятся на сайте ИПА РАН и могут быть использованы для различных исторических исследований.

Результаты обработки новых наблюдений

Результаты обработки наблюдений получены с использованием программного комплекса ERA8. В процессе обработки уточнялись следующие параметры (около 100), приведенные ниже на эпоху JD 2446000.5:

- координаты и компоненты скорости Луны на эпоху JD 2446000.5;
- углы Эйлера и скорости их изменения на данную эпоху;
- начальная угловая скорость вращения ядра Луны;
- запаздывание лунных приливов;
- сумма масс Земля – Луна;
- коэффициент сжатия лунного ядра f_c , коэффициент трения ядра о кору K_v/C , H_2 — число Лава Луны;

— динамические параметры $\delta = (C-A)/B$, $\gamma = (B-A)/C$;

- приливная задержка τ ;
- параметры потенциала Луны;
- положение пяти лунных отражателей A11, A14, A15, L1, L2;
- положения станций наблюдения; Haleakala, McDonald-MLRS1-MLRS2, CERGA, Apache (Apollo), Matera, Wettzell;
- три дополнительных диссипативных приливных члена для Луны.

Кроме того, учитывалось 28 не моделируемых сдвигов наблюдаемых величин, вводимых для компенсации изменений наблюдений, возникающих в результате документированной смены оптики и измерительной аппаратуры обсерваторий, а также изменений невыясненной природы, обнаруживаемых по скачкам в остаточных невязках (post-fit residuals) в процессе обработки наблюдений. В статье [8] такие сдвиги приведены для некоторых станций и сравнены с такими же результатами для эфемериды DE430 при появлении скачков в значениях $O-C$.

Для всех станций распределение наблюдений по времени можно видеть на представленных рис. 1–7. Добавление новых наблюдений дало возможность уточнить параметры и показало (в очередной раз) эффективность использования наблюдений ЛЛЛ для этой цели.

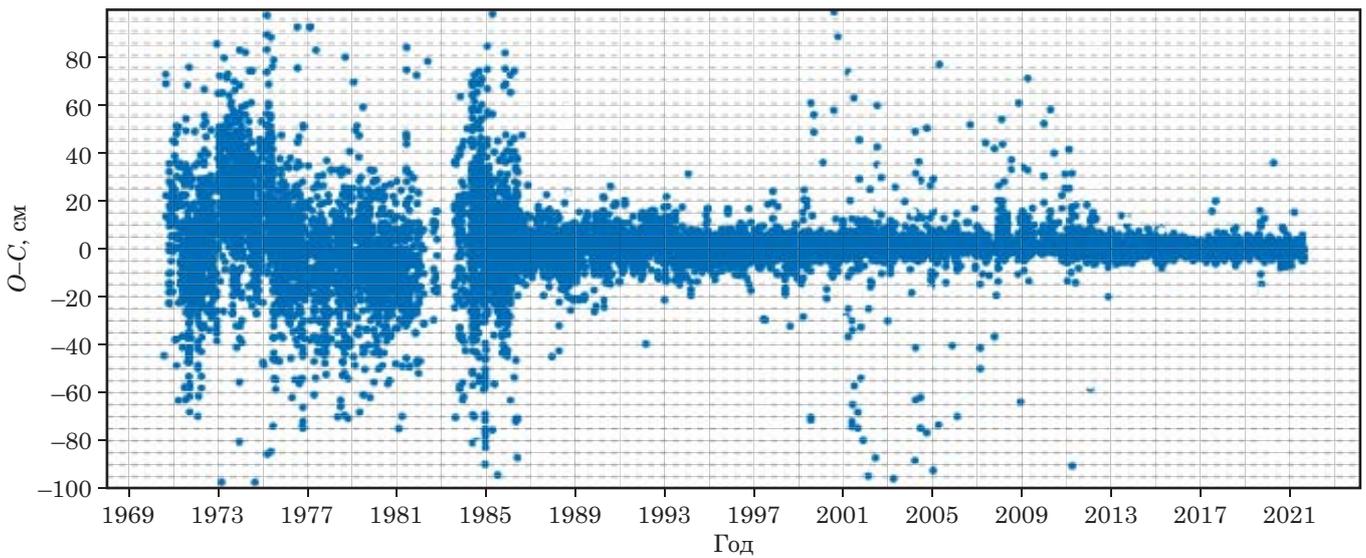


Рис. 1. Все односторонние ЛЛЛ-наблюдения с 1970 по 2021 гг., остаточные невязки $O-C$

Приведенные на графиках остаточные невязки $O-C$ (см) в одну сторону (с ошибками рис. 2–3 и без рис. 4–7) демонстрируют улучшение значения $O-C$ со временем, что свидетельствует и об улучшении параметров эфемерид Луны, и о точности

ЛЛЛ-наблюдений. До сих пор точность наблюдений ЛЛЛ выше точности полученных параметров из эфемериды. Результаты обработки инфракрасных (1064 нм) ЛЛЛ-наблюдений (станция Серга) демонстрируют постоянную и несколько лучшую

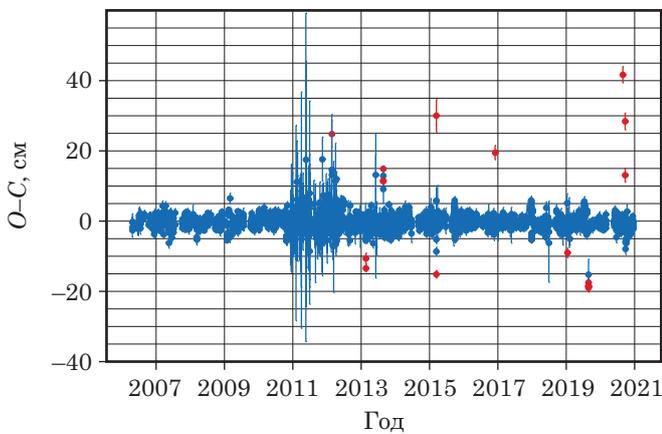


Рис. 2. ЛЛЛ наблюдения (с ошибками) для ст. Апаچه

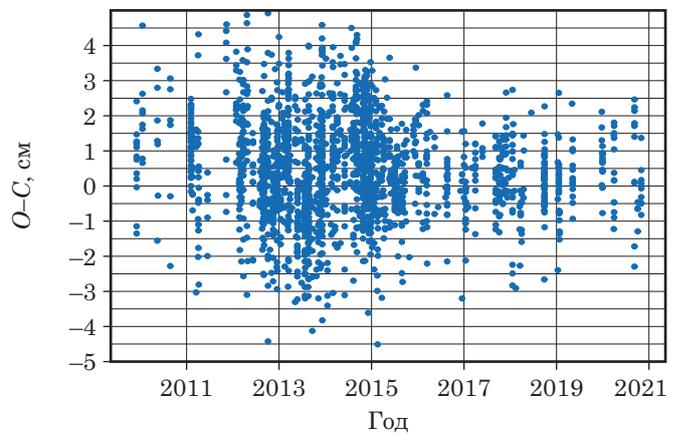


Рис. 4. Станция Серга (Serга-MEO)

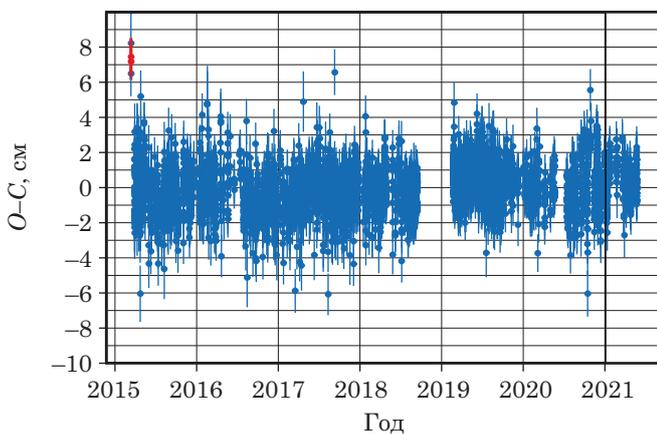


Рис. 3. На станции Serга-ir (с ошибками)

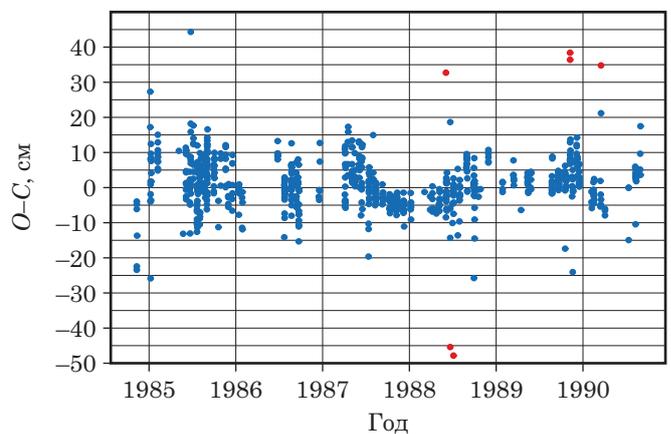


Рис. 5. Станция Haleakala

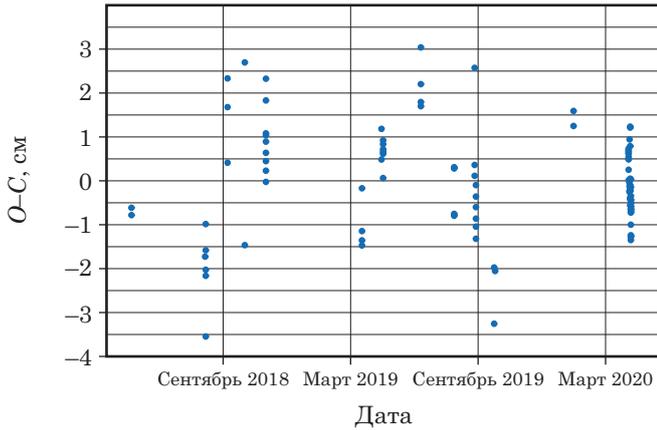


Рис. 6. Станция Wettzell

точность, чем зеленые (532 нм) ЛЛЛ-наблюдения. Статистика ЛЛЛ-наблюдений и остаточные невязки $O-C$ в см для различных станциях представлены на рис. 1–7.

На рис. 1, где представлены все ЛЛЛ-наблюдения с 1970 г., видно, как с течением времени менялись остаточные невязки $O-C$. На рис. 2 для станции Апаче приводятся отдельные выбросы, причины которых исследуются для последующего их устранения. Рис. 3 демонстрирует, что инфракрасные наблюдения наиболее эффективны в процессе получения $O-C$.

По результатам обработки наблюдений ЛЛЛ получены новые значения параметров эфемериды EPM2021a, часть из которых представлена в

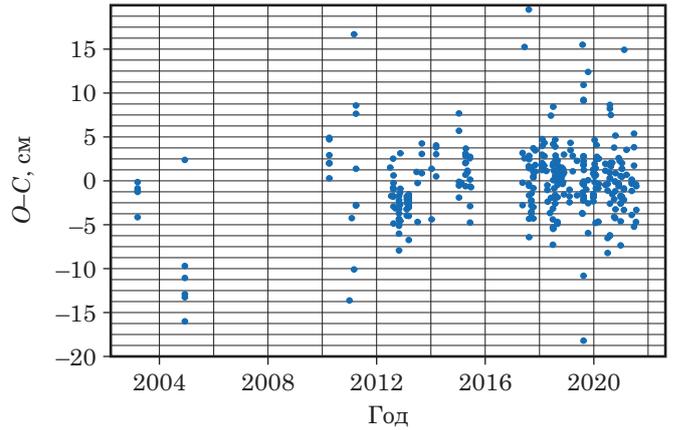


Рис. 7. Станция Matera

табл. 2, также приведено их сравнение со значениям и, полученными в предыдущей эфемериде Луны EPM2019.

Параметры табл. 2 определяются надежно и ошибки при увеличении количества новых ЛЛЛ-наблюдений несколько уменьшаются. Так, для 10 приведенных параметров ошибки уменьшились, а для 12 остались без изменения.

В табл. 3 и 4 представлено сравнение значений некоторых параметров, полученных в нашей работе по эфемериде Луны EPM2021a, со значениями, представленными французскими коллегами по эфемериде INPOP2019a [1]. Можно видеть, что приведенные параметры хорошо согласуются. Все это указывает на то, что эфемериды имеют

Таблица 2

Сравнение параметров эфемериды Луны EPM 2019 и EPM 2021a

	Параметр	Значение EPM2019	Значение EPM2021a
1	Moon X	-13713647379 ± 0.035 m	-13713647360 ± 0.033 m
2	Moon Y	-311514604.073 ± 0.039 m	-311514603.992 ± 0.036 m
3	Moon Z	-141738600.463 ± 0.065 m	-141738600.888 ± 0.059 m
4	Moon v_x	9622372276.463 ± 0.08 $\mu\text{m}/\text{sec}$	9622372276.463 ± 0.08 $\mu\text{m}/\text{sec}$
5	Moon v_y	-375608190.189 ± 0.09 $\mu\text{m}/\text{sec}$	-375608189.492 ± 0.09 $\mu\text{m}/\text{sec}$
6	Moon v_z	-268439309.871 ± 0.04 $\mu\text{m}/\text{sec}$	-268439309.798 ± 0.04 $\mu\text{m}/\text{sec}$
7	ω_{cx}	$(-882.7 \pm 1.8) \cdot 10^{-6}$ rad/day	$(-887.5 \pm 1.6) \cdot 10^{-6}$ rad/day
8	ω_{cy}	$(-6500 \pm 4) \cdot 10^{-6}$ rad/day	$(-6505 \pm 3.6) \cdot 10^{-6}$ rad/day
9	ω_{cz}	$(229.82 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$ rad/day	$(229.82 \pm 0.02) \cdot 10^{-6}$ rad/day
10	ϕ	$(-5823800 \pm 1) \cdot 10^{-8}$ rad	$(-5823800 \pm 1) \cdot 10^{-8}$ rad
11	θ	$(395116 \pm 1) \cdot 10^{-8}$ rad	$(395116 \pm 1) \cdot 10^{-8}$ rad
12	ψ	$(128918873 \pm 3) \cdot 10^{-8}$ rad	$(128918873 \pm 3) \cdot 10^{-8}$ rad
13	$\dot{\phi}$	-74.533 ± 0.001 arcs/day	-74.536 ± 0.007 arcs/day
14	$\dot{\theta}$	-37.0246 ± 0.0002 arcs/day	-37.0248 ± 0.0001 arcs/day
15	$\dot{\psi}$	47501.849 ± 0.001 arcs/day	47501.852 ± 0.001 arcs/day
16	β	$(631020.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$	$(631022.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$
17	γ	$(227738.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$	$(227738.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$
18	τ	0.096 ± 0.001 day	0.093 ± 0.001 day
19	h_z	0.0425 ± 0.0004	0.0429 ± 0.0004
20	$\mu_E + \mu_M$	403503.2364 ± 0.0001	403503.2364 ± 0.0001
21	k_v/C_T	$(15.9 \pm 0.1) \cdot 10^{-9}$	$(16.4 \pm 0.1) \cdot 10^{-9}$
22	f_c	$(0.260 \pm 0.002) \cdot 10^{-3}$	$(0.256 \pm 0.002) \cdot 10^{-3}$

Таблица 3

Координаты рефлекторов французской эфемериды INPOP19a и эфемериды EPM2021a ИПА РАН на эпоху JD 2446000.5

Рефлектор	$X_{INPOP19a}, \text{ м}$	$Y_{INPOP19a}, \text{ м}$	$Z_{INPOP19a}, \text{ м}$	$X_{EPM2021}, \text{ м}$	$Y_{EPM2021}, \text{ м}$	$Z_{EPM2021}, \text{ м}$
A11	1591966.611	690699.545	21003.750	1591966.886 ± 0.034	690699.375 ± 0.044	21003.724 ± 0.012
L1	1114292.264	-781298.384	1076058.636	1114292.435 ± 0.037	-781298.499 ± 0.031	1076058.752 ± 0.021
A14	1652689.584	-520997.502	-109730.527	1652689.750 ± 0.031	-520997.630 ± 0.044	-109730.551 ± 0.012
A15	1554678.305	98095.610	765005.206	1554678.538 ± 0.028	98095.437 ± 0.042	765005.260 ± 0.018
L2	1339363.364	801872.005	756358.649	1339363.664 ± 0.033	801871.830 ± 0.038	756358.691 ± 0.017

Таблица 4

Параметры системы Земля-Луна по INPOP19a и EPM2021a

Параметр	INPOP19a	EPM2021a	INPOP19a – – EPM2021a
f_c — коэффициент сжатия ядра	2.8E-04	2.6E-04	-0.02E-03
S_{32} — параметр потенциала Луны	4.85E-06	4.92E-06	-0.07E-06
$h_2\text{Moon}$ — число Лава	4.26E-02	4.29E-02	-0.03E-02
k_p/C_T — коэфф. трения ядра о кору (d^{-1})	1.64E-08	1.64E-08	0
τ_m — лунная приливная задержка, дни	9.4E-02	9.3E-02	0.1E-02
τ_{R1} — вращательная задержка земных приливов, дни	7.98E-03	7.51E-03	0.47E-03
τ_{R2} — вращательная задержка земных приливов, дни	2.82E-03	2.87E-03	-0.05E-03

Таблица 5

Статистика обработки LLR-наблюдений EPM2021a
(wrms- взвешенное среднеквадратическое значение остаточных невязок в одну сторону)

Станция	EPM2019				EPM2021a				Инт. точн., см
	Годы	Исп.	Отб.	wrms, см	Годы	Исп.	Отб.	wrms, см	
McDonald	1970–1985	3588	34	20.6	1970–1985	3588	34	21.3	30–8
MLRS1	1983–1988	631	46	10.3	1983–1988	631	46	8.8	13–4
MLRS2	1988–2015	3653	443	3.5	1988–2015	3653	388	3.5	5–1
Haleakala	1984–1990	770	22	5.4	1984–1990	770	22	5.1	7.5–1
Cerga Ruby	1984–1986	1112	3	16.7	1984–1986	1109	3	16.6	19–12
Cerga YAG	1987–2005	8316	39	2.4	1987–2005	8316	39	2.3	4–1
Cerga MeO	2009–2019	1950	0	1.6	2009–2020	1998	0	1.5	1.2–0.25
Cerga IR	2015–2020	5188	2	1.2	2015–2021	5926	3	1.1	1.0–0.25
Apache	2006–2016	2648	16	1.4	2006–2020	3858	76	1.4	1–0.05
Matera	2003–2019	233	14	3.4	2003–2021	359	16	3.4	5–1.5
Wetzell	2018–2019	42	0	0.95	2018–2020	103	2	0.93	1.4–0.4

близкую точность. В отдельных случаях разница значений параметров превышает полученные авторами ошибки, что может быть объяснено различиями принятых моделей движения и программного обеспечения.

Статистика по обработке новых ЛЛЛ-наблюдений представлена в табл. 5: здесь приведены взвешенные среднеквадратические значения $O-C$ в одну сторону (wrms, см), а также дано сравнение со значениями, полученными по эфемериде EPM2019. В последнем столбце приводится интер-

вал точностей наблюдений на указанном интервале для каждой станции.

Заключение

1. Уточнены значения параметров эфемериды Луны EPM2021a на основе обработки новых наблюдений ЛЛЛ (1344 н. т. станций Apache (2017–2019 гг.), Wetzell, Matera) с использованием всех прошлых наблюдений с 1970 по 2021 гг.

2. Выполнено сравнение полученных авторами параметров эфемериды Луны EPM 2021a с параметрами французской эфемериды INPOP2019a.

Еще начиная с предыдущих версий ЕРМ [14] и далее значения получаемых параметров при сравнении с параметрами эфемерид DE и INPOP показывали достаточно близкие результаты. Сейчас уже все три эфемериды, построенные по сравнительно одной и той же модели орбитально-вращательного движения Луны, и использующие для улучшения параметров одни и те же ЛЛЛ-наблюдения, дают достаточно близкие результаты.

3. В настоящее время остаточные невязки $O-C$ несколько больше точности априорных ошибок наблюдений ЛЛЛ. Возможно, требуется внести изменения в модель орбитально-вращательного движения Луны.

Благодарность

Авторы выражают благодарность французскому коллеге Jean-Marie Torre (Grasse station, Geoazur) за консультации по ЛЛЛ-наблюдениям на станции и за возможность получить отдельные, размещенные на станции наблюдения.

Литература

1. *Fienga A., Deram P., Viswanathan V., et al.* INPOP19a planetary ephemerides // ISBN 978-2-910015-81-7. S109. 2019. P. 1–35.
2. *Courde C., Torre J. M., Samain E. et al.* Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station // *Astronomy&Astrophysics*. 2017. Vol. 602. P. 1–29.
3. *Васильев М. В. Красинский Г. А.* Универсальная система программирования для эфемеридной и динамической астрономии // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 1. С. 228–248.
4. *Krasinsky G. A., Vasilyev M. V.* ERA-7 Knowledge base and programming system for dynamical astronomy // *Manual ERA-7*, 2007. Sankt-Petersburg. P. 1–240.
5. *Павлов Д. А., Скрипниченко В. И.* Первые результаты опытной эксплуатации кроссплатформенной версии системы ЭРА // Труды ИПА РАН. 2014. Вып. 30. С. 32–41.
6. *Williams J. G. et al.* Lunar rotational dissipation in solid body and molten core // *J. Geophys. Res. (Planets)* 2001. Vol. 106(E11). P. 293–300.
7. *Folkner W. et al.* The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431, IPN Progress Report 42–196. 2014. NASA JPL.
8. *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 // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. Springer, 2016. Vol. 126, no. 1–3. P. 61–88.
9. *Pavlov D.* Solid body tides in the dynamical model of the Moon // *Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA era*. 2020. P. 309–314.
10. *Pavlov D., Skripnichenko V.* Rework of the ERA software system: ERA-8 // *Proceedings of the Journées*. 2014. P. 243–246.
11. Каталог ftp://cdisa.gfc.nasa.gov/pub/slr/data/npt_crd.
12. SiteApolloNormalPoints. [Электронный ресурс]. URL: http://tmurphy.physics.ucsd.edu/apollo/norm_pts.html.
13. *Tryapitsyn V. N., Pavlov D. A., Yagudina E. I., Rumyantsev V. V.* The 1970–1984 lunar laser ranging observations in the Crimean Astrophysical Observatory // *Journal for the History of Astronomy*. 2021. Vol. 52(1). P. 67–76.
14. *Павлов Д. А., Ягудина Э. И.* Анализ уточнённой лунной части эфемерид ЕРМ // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 43. С. 104–112.