

Параметры эфемериды Луны EPM2022a

© М. А. Лебедева, Э. И. Ягудина

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

С 1969 г. лазерная локация Луны (ЛЛЛ) используется для построения и улучшения эфемериды Луны. В данной работе рассматриваются результаты обработки новых лазерных наблюдений для получения уточненных параметров эфемериды Луны EPM2022a, которая создана и поддерживается в ИПА РАН.

В 2014 г. получила развитие новая версия эфемерид EPM (в том числе Луны) в рамках модернизированной системы ERA-8. В новой версии эфемериды Луны реализована модель орбитально-вращательного движения Луны, близкая к используемой в DE430 (NASA JPL). В ней Луна рассматривается как эластичное тело с вращающимся жидким ядром, а поворот Луны вокруг центра масс в небесной системе координат задается тремя углами Эйлера. Вместе с необходимыми на сегодняшний день новыми геофизическими и геодинамическими параметрами эта модель заменила модель, предложенную Красинским Г. А. в ERA-7.

В данной работе для получения параметров эфемериды Луны EPM2022a использовано 31589 нормальных точек (н. т.) ЛЛЛ-наблюдений. Из них 1075 — новые наблюдения ЛЛЛ. Около 100 параметров эфемериды Луны EPM2022a были улучшены, и некоторые из них сравнены с теми же параметрами эфемерид INPOP21a и DE440. Кроме того, по просьбе коллег из Лаборатории Астрономического ежегодника, было произведено сравнение эфемерид EPM2021 и EPM2011. Результаты сравнения показывают, что разница в расстоянии до Луны от 0.2 м до 0.4 м — при сравнении этих расстояний эфемериды DE440 с эфемеридой EPM2021, и около 1 м — при сравнении этого параметра эфемериды DE440 с EPM2011, что свидетельствует о незначительности расхождений эфемерид и возможности использования эфемериды Луны EPM2011 (в пределах точности проектов Астрономического ежегодника) на достаточно длительных интервалах времени. Но при использовании эфемериды Луны в современных проектах и практических работах для космических исследований необходимо пользоваться последними эфемеридами Луны EPM2021 и EPM2022a.

Ключевые слова: лазерная локация Луны (ЛЛЛ), эфемерида Луны, модель орбитально-вращательного движения Луны.

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

Для цитирования: Лебедева М. А., Ягудина Э. И. Параметры эфемериды Луны EPM2022a // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 69. С. 8–17.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.69.8-17>

Parameters of the EPM2022a Moon Ephemeris

© М. А. Lebedeva, E. I. Yagudina

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

Abstract

Since 1969, Lunar Laser Ranging (LLR) has been used to build and improve the lunar ephemeris. This work presents the results of processing laser observations to obtain newly refined parameters for the EPM2022a lunar ephemeris which is constructed and maintained by the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences.

In 2014, a new version of the EPM Ephemeris (including the Moon) started to be developed within the upgraded ERA-8 system. The new version of the lunar ephemeris implements a model of lunar orbital-rotational motion that is similar to the one used in DE430 (NASA JPL). In this model, the Moon is considered to be an elastic body with a rotating liquid core, and the rotation of the Moon around its center of mass in the celestial coordinate system is described by three Euler angles. Along with the necessary new geophysical and geodynamic parameters, this model replaced the one proposed by Krasinsky G. A. in ERA-7.

In this paper, 31 589 LLR observations (normal points — n.p.) were used to obtain new parameters for the EPM2022a Lunar Ephemeris. Among them, 1 075 new LLL observations were added. About 100 parameters of the EPM2022a Lunar Ephemeris were improved and some of them compared with the same parameters of the INPOP21a and DE440 Ephemerides. Additionally, at the request of colleagues from the Astronomical Almanac Laboratory, a comparison was made between the EPM2021 and ERM2011 Ephemerides over a period of about 40 years, as well as with DE440 Ephemeris over the same interval.

The comparison results show that the difference in distance to the Moon is from 0.2 m to 0.4 m (when comparing the DE440 Ephemeris with the EPM2021 Ephemeris) and about 1.0 m (when comparing the DE440 Ephemeris with EPM2011), which indicates the insignificance of discrepancies between the ephemeris and the possibility of using the

EPM2011 Lunar Ephemeris (within the accuracy of the Astronomical Yearbook projects) over sufficiently long time intervals.

However, for modern projects and practical work in space research, it is necessary to use the latest lunar ephemerides, EPM2021 and EPM2022a.

Keywords: laser location of the Moon (LLR), ephemeris of the Moon, a model of the orbital-rotational motion of the Moon.

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

For citation: Lebedeva M. A., Yagudina E. I. Parameters of the EPM2022a Moon Ephemeris // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 69. P. 8–17.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.69.8-17>

Введение

Уже более 54 лет лазерная локация Луны является высокоточным, надежным средством для уточнения параметров орбиты Луны и её физической либрации. За полувековой промежуток точность наблюдений изменилась от 50 см в начале 70-х годов до 2–5 мм к текущему моменту. Последнее время на станции Cerga-IR помимо «зеленых» лазеров (на частоте 532 нм) используется инфракрасный лазер (1064 нм), что также позволяет повысить точность.

На сегодняшний день улучшением параметров эфемериды Луны занимаются специалисты в трех организациях: в Лаборатории реактивного движения (JPL, США, DE Ephemeris); Институте небесной механики (IMCCE, France, INPOP) и Институте прикладной астрономии (ИПА РАН, Россия, Ephemerides of Planets and the Moon – EPM). С 1989 по 2014 гг. эфемерида Луны EPM-ERA развивалась и поддерживалась на базе модели движения Луны Г. А. Красинского, она была реализована в рамках системы ERA-7 ([Krasinsky, Vasylyev, 2007](#)). Начиная с 2014 г. получила развитие новая версия эфемерид EPM в рамках модернизированной системы ERA-8 ([Павлов, Скрипниченко, 2014](#)), в которой реализована модель орбитально-вращательного движения Луны, близкая к используемой в DE430. В эту версию включены также геофизические и геодинамические параметры, рекомендованные на сегодняшний день Международной службой вращения Земли (IERS).

В данной работе получены новые параметры модели движения Луны (EPM2022a) с учетом старых наблюдений на станциях Haleakala, McDonald, MLRS1, MLRS2, Cerga (MEO), Cerga (YAG), Cerga (Ruby) и 1075 новых наблюдений, полученных на станциях Grasse (IR), Apache, Wettzell, Matera. Всего было использовано 31589 н.т.

Модель орбитально-вращательного движения Луны

При построении модели орбитально-вращательного движения Луны EPM2022a Луна рассматривается как эластичное тело с вращающимся жидким ядром, как и в модели Луны DE430 ([Williams et al., 2001](#)). Модель орбитально-вращательного движения Луны EPM2022a строится путем

совместного численного интегрирования орбитального движения Луны и планет в инерциальной барицентрической системе отчета (BCRS) с использованием динамической шкалы TDB ([Pavlov et al., 2016](#)), с учетом сжатия Солнца, дополнительных возмущений от крупнейших астероидов (277), пояса астероидов, транснептуновых объектов (ТНО-30), кольца ТНО. Поворот Луны вокруг центра масс в небесной системе координат задается тремя углами Эйлера, которые и участвуют в численном интегрировании вместе с положением центра Луны. Изменения, связанные с реализацией модели орбитально-вращательного движения Луны (аналогичной DE430 и реализованной в системе ERA-8), учитываются в процессе обработки ЛЛЛ-наблюдений и получения новых параметров эфемериды Луны.

Сведения об ЛЛЛ-наблюдениях

При создании эфемериды Луны EPM2022a была заново создана база ЛЛЛ-наблюдений на основании данных сайта ([EUROLAS Data Center \(EDC\)](#)), которая включает в себя 31589 измерений с 1969 по 2022 гг. Общее количество измерений светолокационных дальностей (с 1969 г.) до рефлекторов на Луне Apollo-11, Apollo-14, Apollo-15, Lunokhod-1, Lunokhod-2 представлено в табл. 1.

Всего было собрано 1075 новых ЛЛЛ-наблюдений, которые были добавлены к предыдущим и использованы для обновления параметров эфемериды Луны EPM2022a. В табл. 2 представлено количество наблюдений, проводимых на каждой

Таблица 1
Распределение наблюдений по отражателям

Отражатель	Количество наблюдений
Apollo-11	3947 (4049)
Apollo-14	3687 (3763)
Apollo-15	20196 (20619)
Lunokhod-1	1632 (1639)
Lunokhod-2	2127 (2140)

В скобках отмечено количество наблюдений в старой базе данных, использованной при построении эфемерид EPM2021.

Таблица 2

Наблюдения лазерной локации Луны 1969–2022 гг.

Станция	Годы	Количество н.т.	Добавлено
McDonald, USA	1969–1985	3588	–
Научный, Крым СССР	1982–1984	25	–
MLRS1, USA	1983–1988	631	–
MLRS2, USA	1988–2013	3669	–
Haleakala, USA	1984–1990	770	–
Grasse, France (Ruby)	1984–1986	1112	–
Grasse, France, (YAG)	1987–2005	8316	–
Grasse, France, (MeO) (Green)	2009–2021	2097	–
Grasse, France (IR)	2015–2022	6847	870
Matera, Italy	2003–2022	421	65
Apache Point, USA	2006–2022	3901	41
Wetzell, Germany	2018–2022	212	99
Всего	1969–2022	31589	1075

из станций, существовавших с 1969 по 2022 гг. Все они вошли в обработку данных, результаты которой рассматриваются в данной статье. Здесь же указываются и наблюдения 1982–1984 гг. (25 ЛЛЛ н. т.), проведенные в Крыму и обработанные впервые в рамках обновления эфемериды Луны ЕРМ в 2019 г. (Tryapitsyn et al., 2021).

Результаты обработки новых ЛЛЛ-наблюдений

В процессе обработки наблюдений уточнялись следующие параметры (около 100) на эпоху JD 2446000.5:

- начальные координаты и компоненты скорости Луны на данную эпоху;
- углы Эйлера и скорости их изменения на данную эпоху;
- начальная угловая скорость вращения ядра Земли;
- запаздывание лунных приливов;
- сумма масс Земля-Луна;
- коэффициент сжатия лунного ядра f_c ;
- коэффициент трения ядра о кору K_v/C ;
- число Лава Луны h_2 ;
- динамические параметры $\beta = (C-A)/B$, $\gamma = (B-A)/C$;
- 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, Wetzell;

— три дополнительных диссипативных приливных члена для Луны;

— 25 сдвигов (biases).

25 сдвигов (biases) — это немоделируемые сдвиги наблюдаемых величин для компенсации изменений, возникающих в результате документированных смещений в оптике и измерительной аппаратуре обсерваторий, а также изменений невыясненной природы, которые обнаруживаются по скачкам в остаточных невязках.

Для всех станций распределение наблюдений по времени представлено на графиках (рис. 1–11). Добавление новых наблюдений дало возможность уточнить параметры и продемонстрировало в очередной раз эффективность использования ЛЛЛ-наблюдений для этой цели.

Приведенные на графиках $O-C$ уменьшаются со временем, что указывает на повышение точности ЛЛЛ-наблюдений и модели орбитально-вращательного движения Луны. Особенно хорошо это видно на рис. 11. Начиная с конца 1980-х годов точность ЛЛЛ-наблюдений выросла с уровня десятков сантиметров до единиц миллиметров.

До настоящего времени точность наблюдений (2–5 мм) превосходит точность модели ($O-C$ около 2–5 см). Результаты обработки ЛЛЛ-наблюдений в ИК-диапазоне (станция CerGA IR, рис. 2) продемонстрировали точность лучше, чем в «зеленом» диапазоне ЛЛЛ-наблюдений, которые использовались при построении ЕРМ2021. Это вызвано тем, что наблюдения в ИК-диапазоне меньше зависят от погоды и дают большее количество измерений в сравнении с измерениями на длине волны 532 нм.

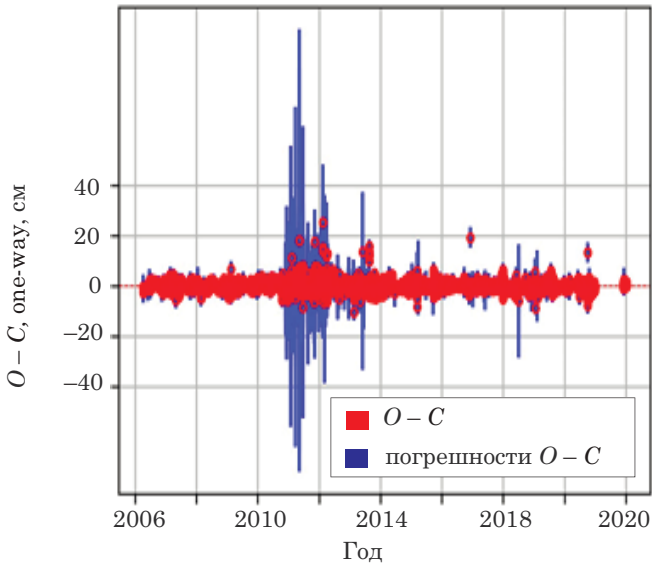


Рис. 1. ЛЛЛ-наблюдения на станции Arache

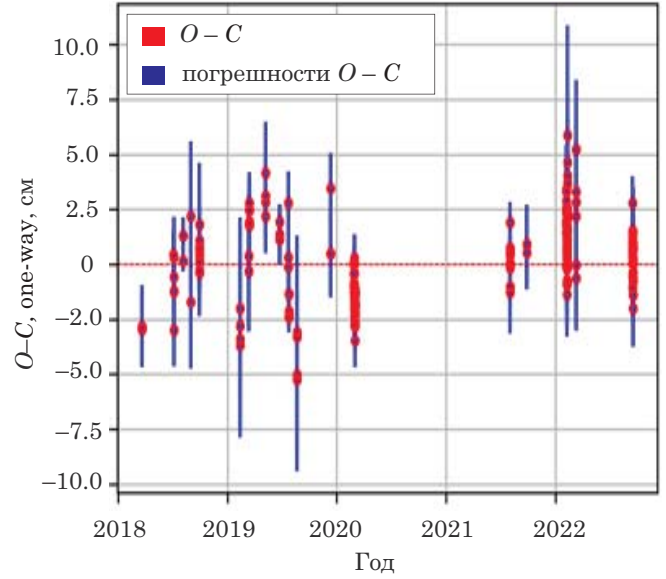


Рис. 4. ЛЛЛ-наблюдения на станции Wettzell

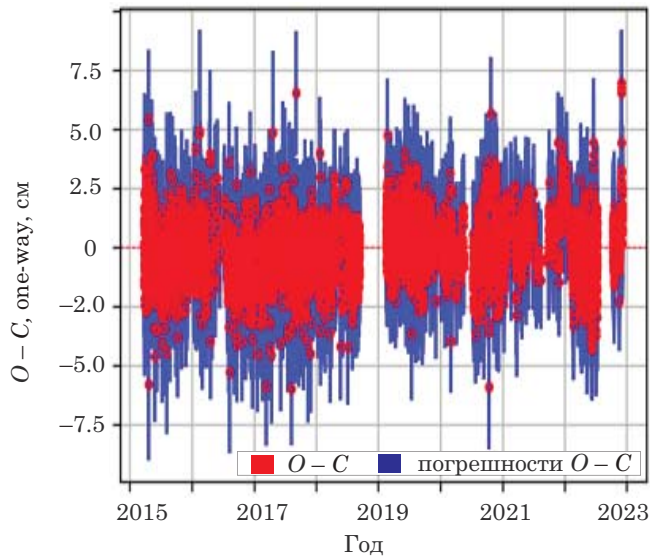


Рис. 2. ЛЛЛ-наблюдения на станции Cerga IR

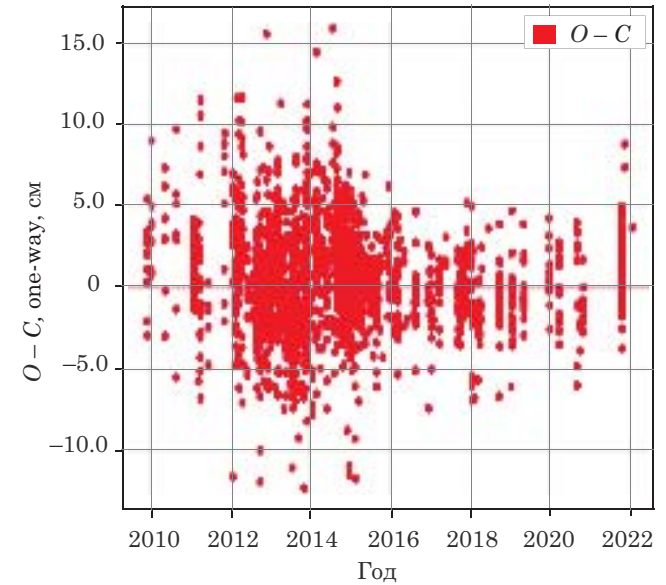


Рис. 5. ЛЛЛ-наблюдения на станции Cerga MeO

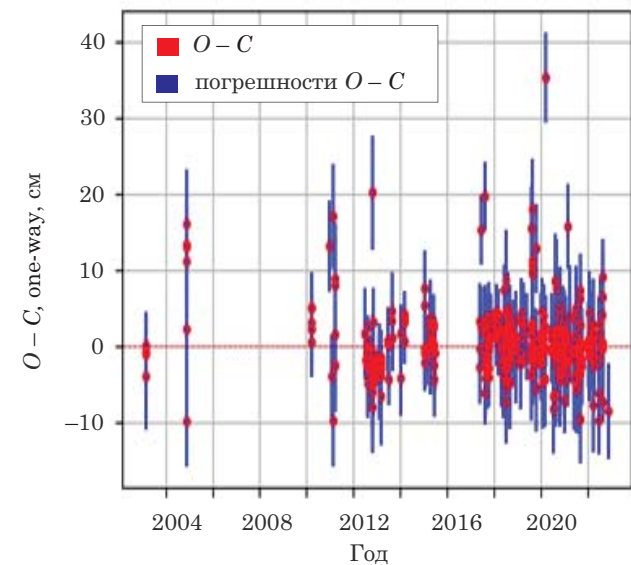


Рис. 3. ЛЛЛ-наблюдения на станции Matera

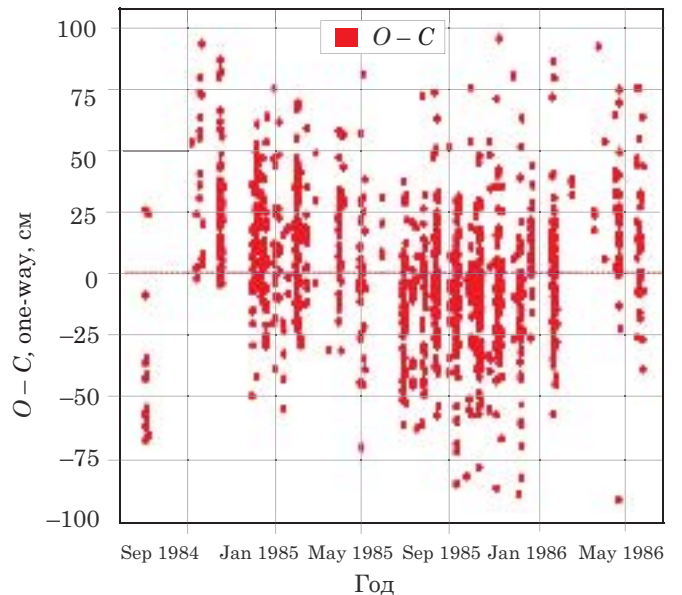


Рис. 6. ЛЛЛ-наблюдения на станции Cerga Ruby

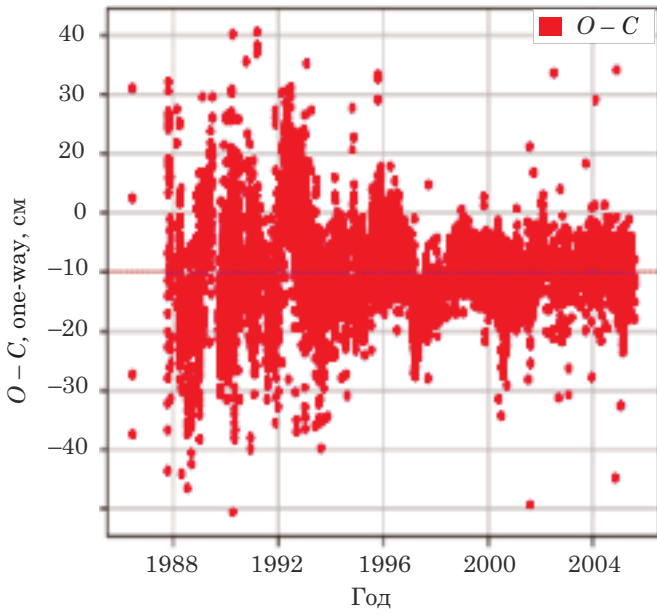


Рис. 7. ЛЛЛ-наблюдения на станции Cerro YAG

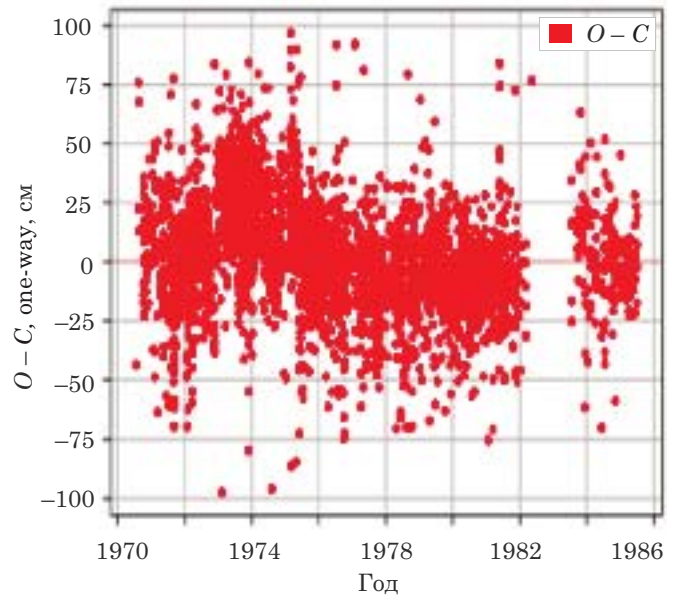


Рис. 9. ЛЛЛ-наблюдения на станции McDonald

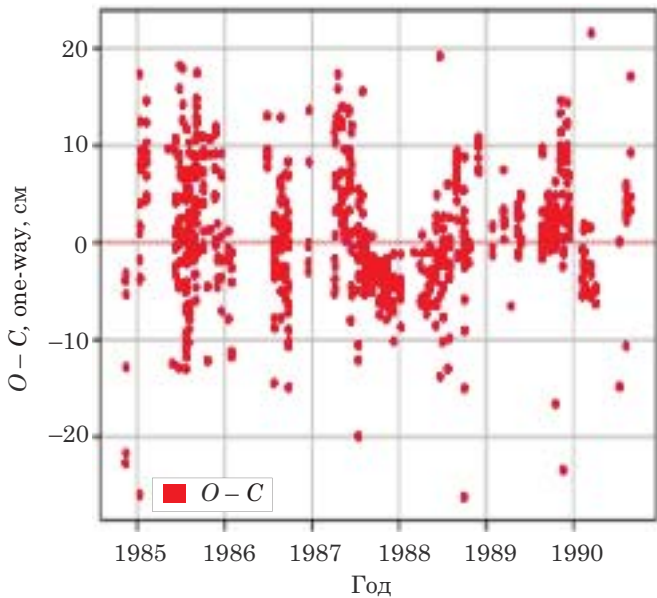


Рис. 8. ЛЛЛ-наблюдения на станции Haleakala

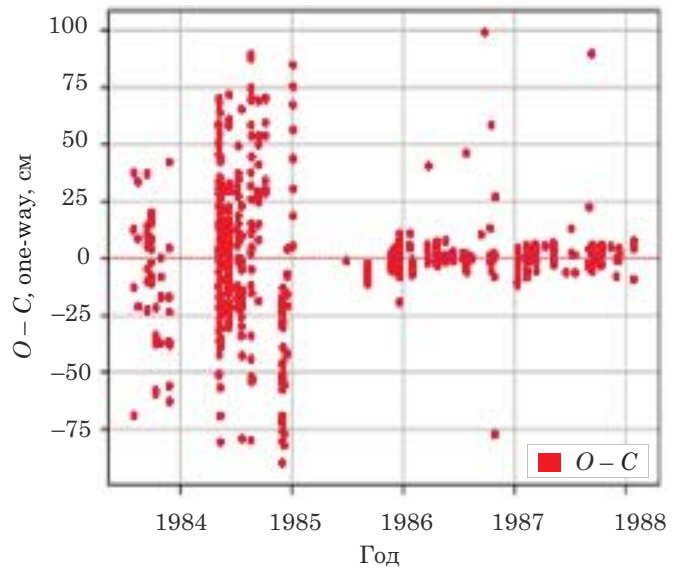


Рис. 10. ЛЛЛ-наблюдения на станции MLSR1

По результатам обработки наблюдений ЛЛЛ были получены новые значения параметров эфемериды EPM2022a, которые представлены в табл. 3 в сравнении со значениями, полученными в предыдущей эфемериде Луны EPM2021. Как видно по результатам, приведенным в табл. 3, параметры определяются надежно, и ошибки при увеличении количества новых ЛЛЛ-наблюдений либо несколько уменьшаются, либо остаются приблизительно такими же.

Для обработки новых наблюдений использовался программный комплекс ERA-8. Еще в предыдущей статье ([Кан. Ягулина, 2021](#)) было показано, что точности параметров эфемериды Луны, полученные в этой работе, близки к точности параметров эфемерид DE и INPOP. В данной статье также демонстрируется, что на текущий момент все три эфемериды имеют близкую точность (табл. 4–6).

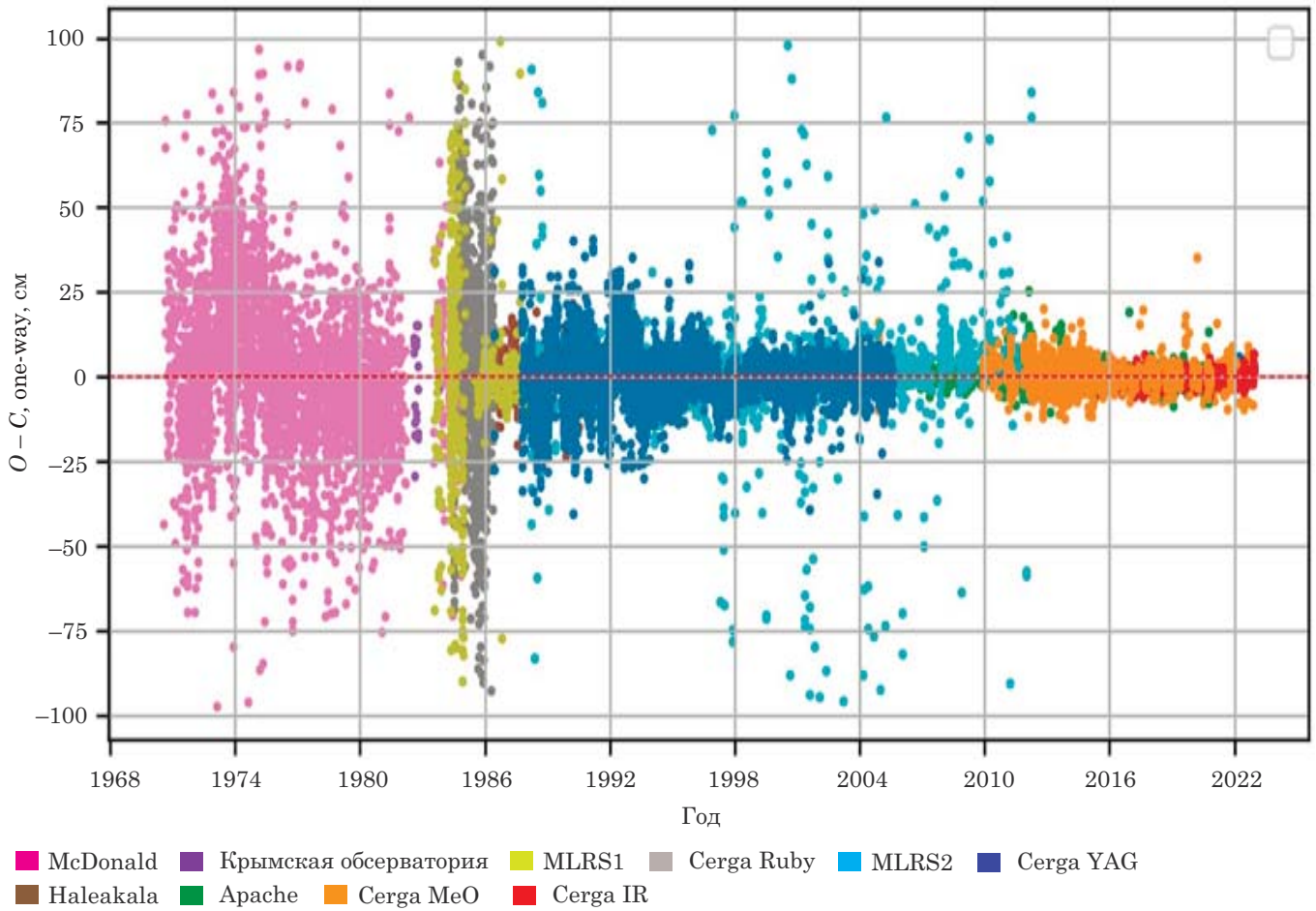


Рис. 11. Все наблюдения с 1969 по 2022 гг.

Таблица 3

Сравнение некоторых параметров эфемерид Луны EPM2021 и EPM2022a

	Параметр	Значение EPM2021	Значение EPM2022a
1	Moon X, m	-137136473.600 ± 0.033	-137136473.540 ± 0.033
2	Moon Y, m	-311514603.992 ± 0.036	-311514604.030 ± 0.036
3	Moon Z, m	-141738600.888 ± 0.059	-141738600.845 ± 0.059
4	Moon v_x , $\mu\text{m}/\text{sec}$	$962372\ 276.70 \pm 0.07$	962372276.75 ± 0.07
5	Moon v_y , $\mu\text{m}/\text{sec}$	-375608189.49 ± 0.09	-375608189.35 ± 0.08
6	Moon v_z , $\mu\text{m}/\text{sec}$	-268439309.79 ± 0.04	-268439309.75 ± 0.04
7	ω_{cx} , rad/day	$(-887.5 \pm 1.6) \times 10^{-6}$	$(-886.4 \pm 1.6) \times 10^{-6}$
8	ω_{cy} , rad/day	$(-6505 \pm 3.6) \times 10^{-6}$	$(-6504.0 \pm 3.5) \times 10^{-6}$
9	ω_{cz} , rad/day	$(229.95 \pm 0.02) \times 10^{-6}$	$(229.94 \pm 0.01) \times 10^{-6}$
10	φ , rad	$(-5823800 \pm 1) \times 10^{-8}$	$(-5823800 \pm 1) \times 10^{-8}$
11	θ , rad	$(395116 \pm 1) \times 10^{-8}$	$(395116 \pm 1) \times 10^{-8}$
12	ψ , rad	$(128918873 \pm 3) \cdot 10^{-8}$	$(128918873 \pm 2) \times 10^{-8}$
13	$\dot{\varphi}$, $''/\text{day}^{-1}$	-74.536 ± 0.007	-74.536 ± 0.007
14	$\dot{\theta}$, $''/\text{day}^{-1}$	-37.0248 ± 0.0001	-37.0253 ± 0.0001
15	$\dot{\psi}$, $''/\text{day}^{-1}$	47501.852 ± 0.001	47501.853 ± 0.001
16	β	$(631022.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$	$(631022.1 \pm 0.3) \times 10^{-9}$
17	γ	$(227738.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$	$(227738.6 \pm 0.3) \times 10^{-9}$
18	τ , day	0.096 ± 0.001	0.094 ± 0.001
19	h_2	0.0428 ± 0.0004	0.0429 ± 0.0004
20	$\mu_E + \mu_M$, km^3s^{-2}	403503.2364 ± 0.0001	403503.2362 ± 0.0001
21	k_v/C_T , day^{-1}	$(16.4 \pm 0.1) \times 10^{-9}$	$(16.4 \pm 0.1) \times 10^{-9}$
22	f_c	$(0.256 \pm 0.003) \times 10^{-3}$	$(0.255 \pm 0.002) \times 10^{-3}$

Таблица 4

Координаты рефлекторов, полученные при построении эфемерид Луны INPOP21a и EPM2022a, м

Refl.	$X_{INPOP21a}$	X_{EPM22a}	$Y_{INPOP21a}$	Y_{EPM22a}	$Z_{INPOP21a}$	Z_{EPM22a}
A11	1591966.641	1591966.890	690699.467	690699.297	21003.758	21003.725
A14	1652689.562	1652689.717	-520997.593	-520997.702	-109730.518	-109730.547
A15	1554678.307	1554678.526	98095.526	98095.358	765005.208	765005.258
L1	1114292.230	1114292.398	-781298.435	-781298.566	1076058.623	1076058.747
L2	1339363.394	1339363.674	801871.944	801871.743	756358.663	756358.690

Таблица 5

Координаты рефлекторов, полученные при построении эфемерид Луны DE440 и EPM2022a, м

Refl.	X_{DE440}	X_{EPM22a}	Y_{DE440}	Y_{EPM22a}	Z_{DE440}	Z_{EPM22a}
A11	1591967.049	1591966.890	690698.573	690699.297	21004.461	21003.725
A14	1652689.369	1652689.717	-520998.431	-520997.702	-109729.869	-109730.547
A15	1554678.104	1554678.526	98094.498	98095.358	765005.863	765005.258
L1	1114291.452	1114292.398	-781299.273	-781298.566	1076059.049	1076058.747
L2	1339363.598	1339363.674	801870.995	801871.743	756359.260	756358.690

Таблица 6

Некоторые параметры системы Земля – Луна, полученные при построении INPOP21a и EPM2022a

Параметр	INPOP2021a	EPM2022a	INPOP21a – EPM2022a
f_c — коэффициент сжатия ядра Луны	2.8E-04	2.5E-04 ± 0.018E-04	0.3E-04
C_{32} — параметр потенциала Луны	4.84501E-06	4.93565E-06 ± 0.0044E-06	-0.09064E-06
h_2 Moon — число Лава	4.23E-02	4.30E-02 ± 0.03E-02	-0.07E-02
k_p/C_T — коэффициент трения ядра Луны о кору, сутки ⁻¹	1.62E-08	1.640E-08 ± 0.101E-08	-0.02E-08
τ_m — лунная приливная задержка (day)	9.6E-02	9.3E-02 ± 0.06E-02	0.3E-02
Вращательные задержки земных приливов τ_{R1} сутки, τ_{R2} сутки	8.02E-03 2.82E-03	7.71E-03 ± 0.002E-03 2.85E-03 ± 0.002E-03	0.31E-03 -0.03E-03

В табл. 4–5 сравниваются координаты рефлекторов в эфемеридах Луны INPOP21a (Fienga et al., 2021), DE440 (Ryan et al., 2021), EPM2022a. Сравнение некоторых параметров системы Земля – Луна по различным эфемеридам INPOP21a и EPM2022a приведены в табл. 6.

В табл. 7 представлены результаты обработки ЛЛЛ-наблюдений эфемериды Луны EPM2022a и сравнение с предыдущей эфемеридой Луны EPM2021.

Нужно отметить, что в процессе работы была заново построена база наблюдений с 1969 по 2022 гг. с использованием данных сайта (EUROLAS Data Center (EDC)). В результате новая база отличается от базы, использованной в предыдущей работе. Это стало одной из причин изменений в представлении ЛЛЛ-наблюдений и в значениях параметров эфемериды Луны EPM2022a по сравнению с EPM2021.

Таблица 7

Результаты обработки ЛЛЛ-наблюдений эфемериды EPM2022a

Станция	EPM 2021				EPM 2022a			
	Годы	Использованы	Отброшены	wrms, см	Годы	Использованы	Отброшены	wrms, см
McDonald	1970–1985	3588	34	21.3	1970–1985	3588	34	21.6
MLRS1	1983–1988	631	46	8.8	1983–1988	631	46	8.9
MLRS2	1988–2015	3669	388	3.5	1988–2015	3669	389	3.6
Haleakala	1984–1990	770	22	5.1	1984–1990	770	23	5.2
Cerga Ruby	1984–1986	1112	3	16.7	1984–1986	1112	3	16.8
Cerga YAG	1987–2005	8316	39	2.3	1987–2005	8316	39	2.3
Cerga MeO	2009–2020	1998	0	1.5	2009–2022	2097	0	1.5
Cerga IR	2015–2021	5926	3	1.1	2015–2022	6847	7	1.2
Apache	2006–2020	3858	76	1.4	2006–2022	3901	78	1.4
Matera	2003–2021	329	30	3.4	2003–2022	421	2	3.2
Wetzell	2018–2020	103	2	0.93	2018–2022	212	0	1.5

При появлении новых проектов учитываются требования к точности всех параметров, которые будут востребованы в этих проектах. Также нужно учитывать, на каком временном интервале можно использовать параметры предыдущей эфемериды. Так, в Лаборатории Астрономических ежегодников ИПА РАН используется уже много лет эфемерида EPM2011, и для точности различных проектов ежегодника она была удовлетворительной. Но сейчас необходимо было сравнить результаты, полученные по этой эфемериде, со значениями современной эфемериды EPM2021. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования эфемериды EPM2011 для целей Астрономического ежегодника. Кроме того, было показано, что в слу-

чаях отсутствия новых наблюдений какое-то время эта эфемерида еще может быть использована, но только для проектов, предполагаемая точность результатов которых такая же, как и у эфемериды EPM2011.

Для выполнения этой задачи было проделано следующее: прежде всего, на интервале около 40 лет (2011–2050 гг.) с шагом в 1 сутки были вычислены расстояния до Луны по различным эфемеридам. В частности, были сравнены эти расстояния эфемериды DE440 с эфемеридами EPM2011 и EPM2021. На приведенных ниже графиках можно увидеть (рис. 12–14), что разница $|R_1 - R_2|$ не превышает 1 м, с годами увеличивается и к 2050 г. может достигать до 1.5 м.

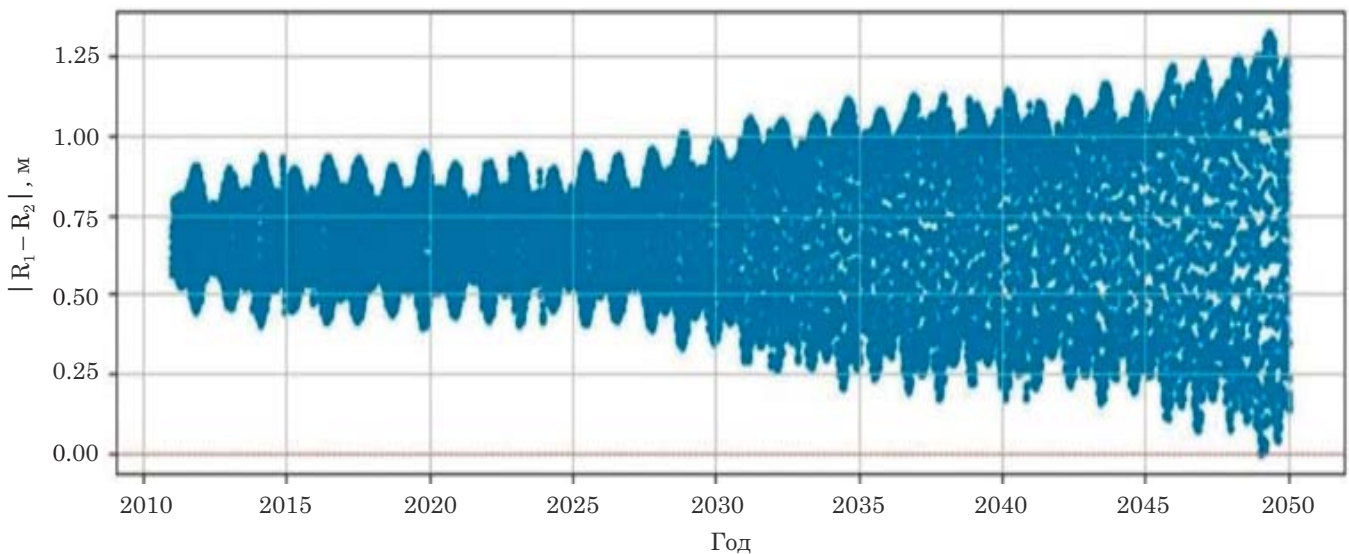


Рис. 12. Сравнение расстояний до Луны по эфемеридам EPM2011 (R_1) и DE440 (R_2) на интервале 2011–2050 гг. (с шагом в 1 сутки)

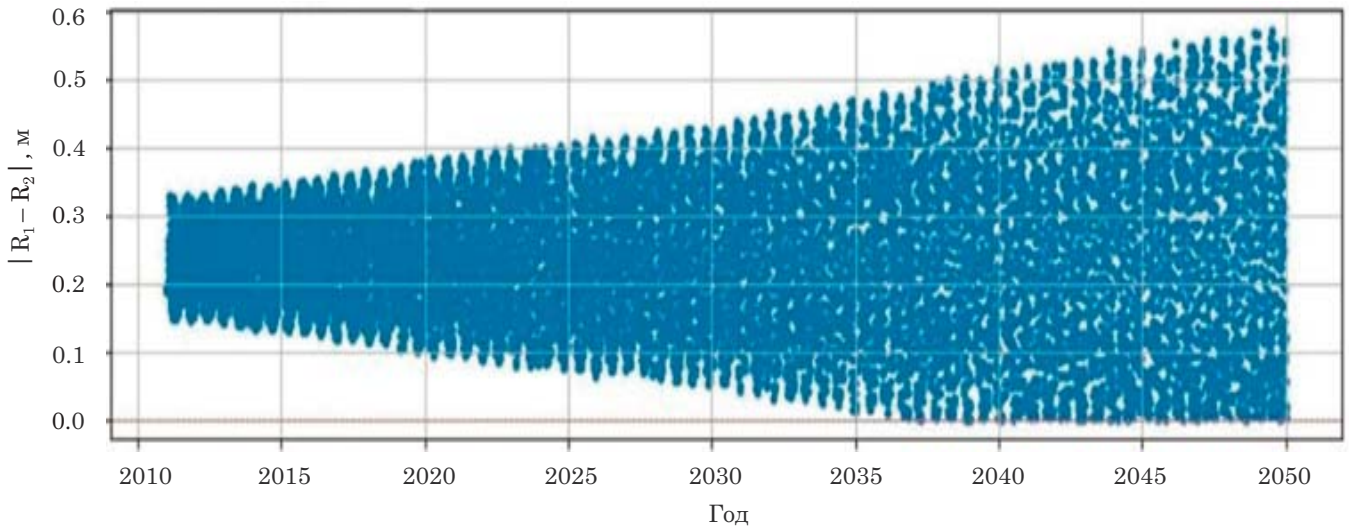


Рис. 13. Сравнение расстояний до Луны по эфемеридам EPM2021 (R_1) и DE440 (R_2) на интервале 2011–2050 гг. (с шагом в 1 сутки)

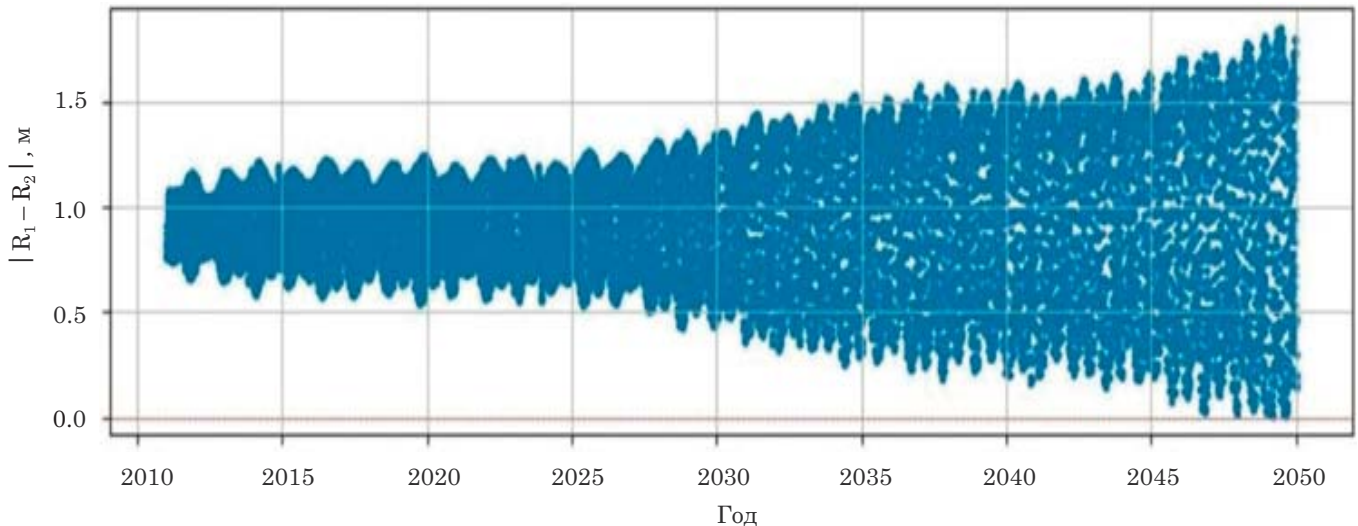


Рис. 14. Сравнение расстояний до Луны по эфемеридам EPM2021 (R_1) и EPM2011 (R_2) на интервале 2011–2050 гг. (с шагом в 1 сутки)

Результаты показывают, что пока в пределах точности проектов Астрономического ежегодника можно использовать эфемериду EPM2011. Однако при увеличении точностей современных проектов и практических работ для космических исследований необходимо переходить к более современным эфемеридам EPM2021, EPM2022a. При этом EPM2021 уже находится на уровне точности, близком точности последней американской эфемериды DE440.

Заключение

1. В работе были получены значения параметров эфемериды Луны EPM2022a на основе обработки новых наблюдений ЛЛЛ (1075 н. т.) на станциях Apache, Grasse (IR), Wettzell, Matera с учетом всех прошлых наблюдений с 1969 по 2022 гг.

2. Показано, что в настоящее время все три лунные эфемериды (DE, INPOP, EPM) имеют практически одну и ту же точность. Остаточные невязки ($O-C$) пока несколько больше значений априорных ошибок наблюдений ЛЛЛ: 2.5 см — величина $O-C$ и 2.5 мм — ошибки ЛЛЛ-наблюдений.

3. На интервале около 40 лет (2011–2050 гг.) были подсчитаны и сравнены расстояния до Луны по эфемеридам DE440 и EPM2011, DE440 и EPM2021. Разности расстояний представлены на рис. 12–14. Показано, что на достаточно большом интервале времени можно пользоваться эфемеридой EPM2011 для программ и проектов, предполагаемая точность которых лежит в пределах точностей, необходимых в работах Астрономического ежегодника. При требованиях более высокой точ-

ности необходимо использовать эфемериды Луны EPM2021 и EPM2022a.

4. Возможны следующие шаги по уточнению эфемеридных параметров:

4.1. Необходимо продолжать исследование случаев отклонения ошибочных наблюдений на различных станциях и вводить biases.

4.2. В предыдущих работах ([Васильев и др., 2016; Vasilyev et al., 2016](#)) на основе математического моделирования, было показано, что существуют некоторые пути улучшения параметров лунных эфемерид: добавление новых наблюдательных станций (до 12 %); привлечение радарных наблюдений Луны (от 20 % до 60 %), а также РСДБ-наблюдений (на уровне точности ЛЛЛ).

4.3. Что касается использования радарных наблюдений Луны (LRR): уже существуют реальные наблюдения ([Li et al., 2015](#)), которые использовались при получении селеноцентрических координат посадочного аппарата и других параметров (совместная работа с китайскими коллегами) — наблюдения на уровне 1–3 мм ([Marshall et al., 2020](#)).

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность Васильеву М. В. за помощь при обсуждении различных аспектов обработки ЛЛЛ-наблюдений и работы с системой ЭРА.

Литература

Васильев М. В., Гришин Е. А., Ивлев О. А. и др. О точности эфемерид Луны с использованием данных проектируемого Российского лунного лазерного дальномера // *Астрономический вестник*. 2016. Т. 50, № 5. С. 381–387.

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

Павлов Д. А., Скрипниченко В. И. Первые результаты опытной эксплуатации кроссплатформенной версии системы ЭРА // *Труды ИПА РАН*. 2014. Вып. 30. С. 32–41.

EUROLAS Data Center (EDC) [Электронный ресурс] URL: https://edc.dgfi.tum.de/pub/slr/data/npt_crd (дата обращения 02.05.2024).

Fienga A., Deram P., Di Ruscio A., et al. Notes scientifiques et techniques de l'institut de mecanique celeste. S110. INPOP21a planetary ephemerides. Paris: IMCCE, 2021. P. 1–19.

Krasinsky G. A., Vasilyev M. V. ERA–7 Knowledge base and programming system for dynamical astronomy // *Manual ERA–7*. Saint-Petersburg: Institute of Applied Astronomy RAS, 2007. 240 p.

Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. The Chang'e3 Mission Overview // *Space Science Reviews*. 2015. Vol. 190. P. 85–101.

Marshall D., Jinsong Ping, Wenxiao Li, et al. 3-Way lunar radio ranging experiment on RT-32 radio telescopes // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020. Vol. 57 (1–2). P. 22–27.

Pavlov D. P., 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*. 2016. Vol. 126, no. 1–3. P. 61–88.

Park R. S., Folkner W. M., Williams G. J., et al. The JPL planetary and lunar ephemerides DE440 and DE441 // *The Astronomical Journal*. Vol. 161, Issue 3. ID 105. 15 p.

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.

Vasilyev M. V., Shuygina N. V., Yagudina E. I. Expected impact of the lunar lander VLBI observations on the lunar ephemeris accuracy // *The 13th EVN Symposium & Users Meeting Proceedings*. 2016. P. 23–28.

Williams J. G., Boggs D. H., Yoder C. F., et al. Lunar rotational dissipation in solid and molten core // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2001. Vol. 106 (E11). P. 293–300.