

Результаты обработки наблюдений лазерной локации Луны (ЛЛЛ) на ЗТШ в Крыму в 1982–1984 гг

Тряпицын В.Н.¹, Ягудина Э.И.², Павлов Д.А.², Румянцев В.В.¹

1 ФГБУН "Крао РАН"

2 Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

- **1. История вопроса**
- **2. Наблюдения- лазерная локация Луны (1981-1984 гг) (ФИАН, КрАО)**
- **3. Обработка наблюдений, оценка точности**
- **4. Результаты и выводы**
- **5. Литература**



Сотрудники Крымской научной станции ФИАН и Крымской Астрофизической обсерватории, 13 сентября 1963 г.



Физический институт им. Лебедева АН СССР (ФИАН),
Крымская Астрофизическая Обсерватория, п. Научный, 13 сентября 1963 г.



Академик Басов Н.Г.- руководитель Лаб. квантовой радиофизики(ФИАН-Физический институт им. Лебедева АН СССР)



Рис. 1. Лазер на рубине в режиме свободной генерации с миллисекундным импульсом, около 50-70дж.

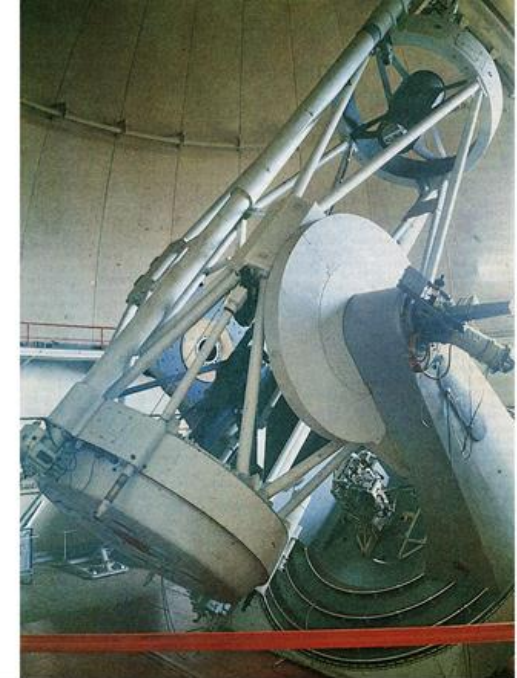


Рис. 2.Телескоп КАО ЗТШ с диаметром зеркала 2.6 метра

Первые эксперименты по ЛЛЛ-осуществлены в США в обсерватории Макдональд в 1962г. В том же 1962-работы по созданию аппаратуры для ЛЛЛ в ФИАН .

1.Первые результаты получены Командой сотрудников Крымской научной станции ФИАН под руководством Кокурина Ю.Л. с участием сотрудников КАО (под руководством Северного) в п. Научный. Объект локации- кратер **Альбатегний** на неосвещенной части Луны. Ошибка в измерении расстояния до Луны около **150-300 км.!**

2. 15 октября 1965 г. –серия измерений расстояний до дна кратера Фламарион –впервые применен новый лазер с **модуляцией добротности**, импульсы порядка **50 нс** и энергией **5-7 дж**. Аппаратурная ошибка измерений расстояния ~15 м, **точность измерения расстояния ~ около 200 м.!!**

3. Точечные мишени для локации.

Дальнейшие работы по локации Луны в рамках программы подготовки и доставки на Луну самоходных аппаратов “Луноход-1” и “Луноход-2” Крымская станция ФИАН в сотрудничестве с французскими специалистами участвовала в создании установки лазерных отражателей.

1969-1973гг –на Луне 5 отражателей :”Аполлон-11”, “Аполлон-14”, “Аполлон-15”(США), Луноход-1”, “Луноход-2” (СССР-Франция), что дало возможность измерения расстояния до Луны с высокой точностью:

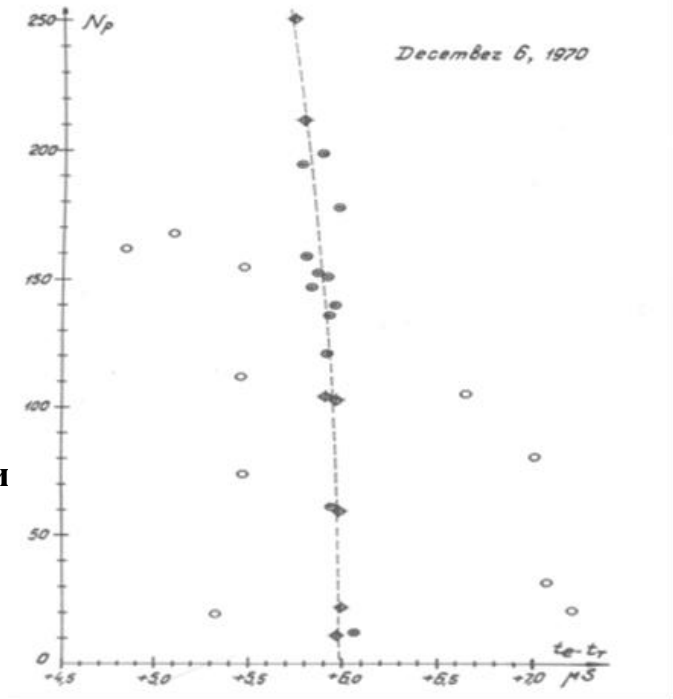


Рис.3. Результат накопления сигнала от отражателя “Луноход_1”.

а) В 1969 году были получены первые результаты по локации отражателя Аполлон-11 в обсерватории Макдональд.

В том же году группой сотрудников ФИАН и Крао на телескопе ЗТШ-2.6 м были начаты работы по установке нового лазерного передатчика и нового комплекса измерительной аппаратуры. Эти работы были завершены к моменту посадки на Луну «Лунохода-1»

б) **5-6 декабря 1970 г** были получены **первые результаты лазерной локации отражателя «Лунохода-1» с точностью индивидуального измерения ~3 м! .**

Был создан автоматизированный комплекс аппаратуры с точностью измерения $\pm 0,9$ м, с которым в 1973 г. были начаты регулярные измерения расстояний до всех лунных светоотражателей.

Одним из первых научных результатов, полученных из советских и американскими лазерно-локационными наблюдениями Луны, было высокоточное определение дуги Макдональд – п. Научный с точностью до 0.6 м

В 80-х годах 20 века Calame O. (Grasse, Франция) и Шубиным С.Г. независимо была определена упомянутая выше хорда Макдональд – КРАО с точностью около 30 см.

Улучшение точности единичного измерения до 25 см было достигнуто в 1978 г. после установки нового лазера.

В результате новых измерений оказалось, что новые наблюдения дают возможность уточнить положения наземных станций (Симеиз и Макдональд) через посылку лазерного луча на отражатель на Луне!!!! .

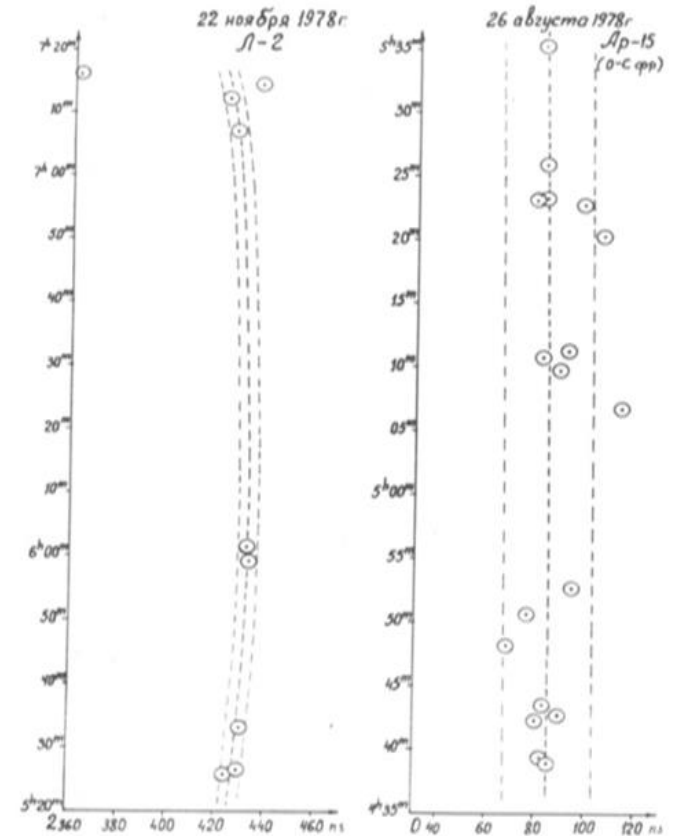


Рис.4.Накопление сигнала при локации Лунохода-2 (Л-2)-с новым и Аполлона-15-(А-15)-со старым лазером.

Вычислениями эфемерид кратеров на Луне, а позже светоотражателей доставленных на Луну занималась группа сотрудников отдела Астрономического ежегодника Института Теоретической астрономии в г. Ленинграде: **под научным руководством Абалакина В.К., сотрудниками-Фурсенко М.Н., Бойко В.Н. В, Шубиным С.Г. и др.)**

Для контроля использовалась эфемерида VSOP82 (Франция, P. Bretagnon, Bureau des Longitudes) с разложением по полиномам Чебышева координат и скоростей объектов в опорные моменты времени. В течение 10 лет было получено около 1400 единичных измерений расстояний до лунных отражателей (преимущественно от Аполлона-15 и Лунохода-2).

В 1984 г. были предприняты попытки лазерной локации Луны на лазерно-локационной станции «Katzively-1893» на телескопе ТПЛ-1 с диаметром зеркала 1 м, но достичь надёжных результатов не удалось.

С 1984 г. работы по лазерной локации Луны на телескопе ЗТШ-2.6 прекратились.

В настоящее время существующая точность нормальных точек в расстоянии до Луны современными лазерами достигает **нескольких мм**, а точность современных эфемерид около **20-30 см**.

В данной работе была поставлена задача: провести обработку старых, неиспользованных наблюдений и проанализировать результаты при сравнении с современной эфемеридой ЕРМ, а также определить место этих наблюдений в современной базе данных ЛЛЛ.

В течение этих 10 лет в КрАО было проведено около 1400 единичных измерений расстояний до Луны. В основном, расстояния наблюдались до 2-х отражателей (“Луноход -2” и “Аполлон -15”), есть несколько наблюдений до “Аполлона-11” в 1979-1981 гг.

Таблица 1.ЛЛЛ наблюдения на КрАО 1979-1984 гг

№	Период наблюдений	Метеоданные	Электр. задержка	Геометр. задержка	Количество ЛЛЛ
1	1979-1981	-	-	-	101
2	1982	+	+	+	130
3	1983	+	+	+	45
4	1984	+	+	+	12

Почти во всех случаях (1982-1984 гг) есть необходимые метеоданные, присутствуют значения электронной и геометрической задержек почти во всех сеансах. Метеоданные воосстанавливались с помощью сотрудников КрАО -соавторы). Кроме того, пришлось обращаться к среднестатистическим метеоданным, имеющимся в распоряжении КрАО, и по аналогии с теми годами, где метеоданные существуют, приписывать их к тем датам и годам , где таких данных нет. Форматы записи наблюдений КрАО сопоставлялись с различными информационными документами тех лет .

3. Обработка наблюдений с использованием эфемериды EPM

Наблюдения на ЗТШ 1982-1984 гг были представлены в формате, предложенном Дж. Д. Малхолландом и применявшемся в те годы для ЛЛЛ-наблюдений в США . Данные о 177 единичных фотонах были обработаны с использованием системы ЭРА и эфемериды Луны EPM. Использовалась рабочая версия EPM, которая незначительно отличается от опубликованных эфемерид EPM2015 и EPM2017 в указанный период времени.

В качестве ряда ПВЗ использовался JPL KEOFF], который, содержит более точные данные UT1 для ранних лет, нежели международный ряд C04.

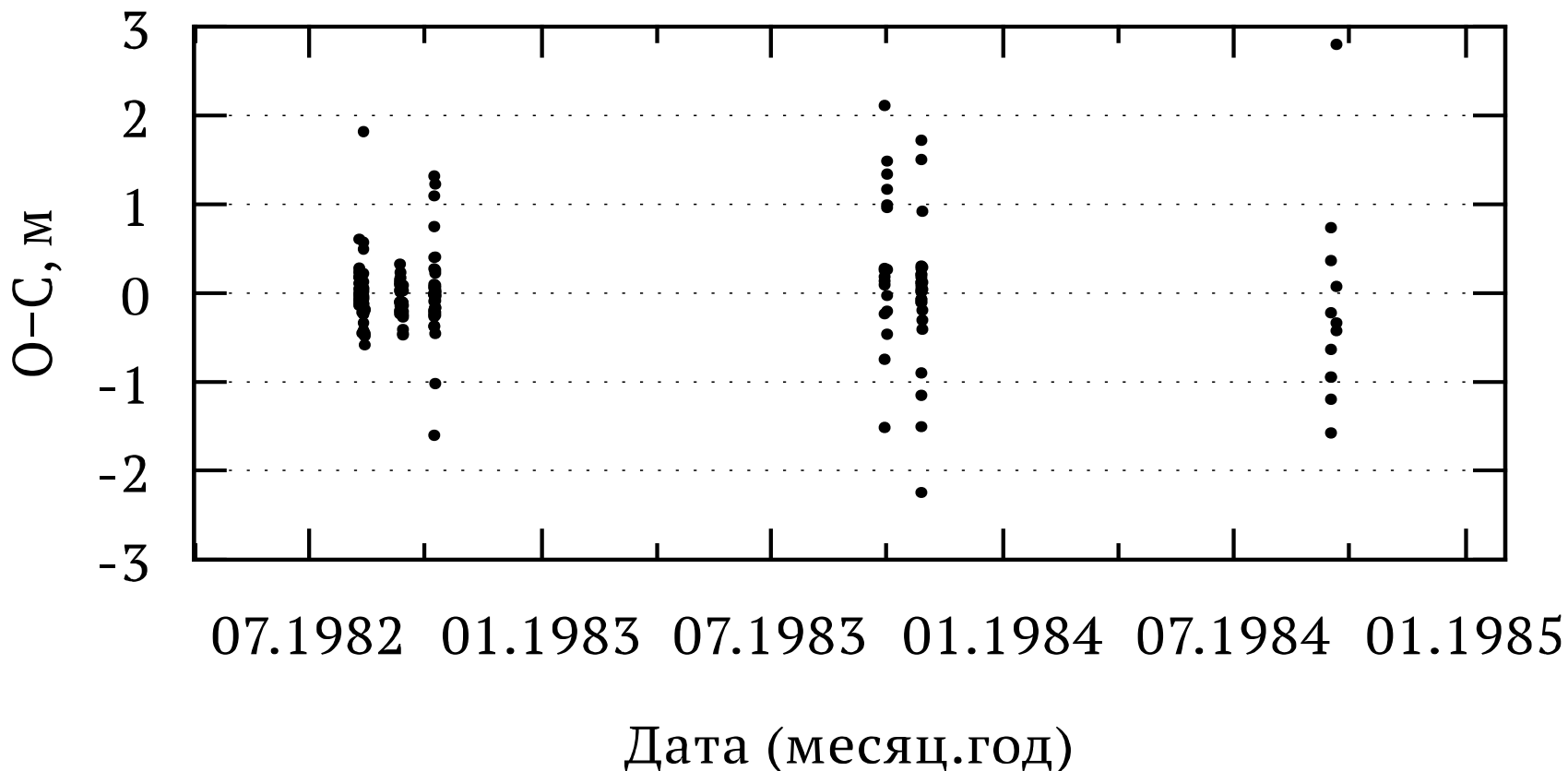
Метки времени наблюдений (время пульса лазера) при обработке привязывались к международной шкале UTC. Фактически наблюдения были привязаны к национальной шкале UTC(SU). Бюллетени ГМЦ ГСВЧ с привязкой UTC(SU) к международной UTC за указанные годы, к сожалению, недоступны.

Наиболее ранний доступный бюллетень относится к 1988 г; в нём поправка составляет около 20 мкс. Поэтому за отсутствием иных вариантов, шкала времени наблюдений трактовалась как международная UTC.

При обработке были учтены содержащиеся в наблюдениях метеоданные (температура, относительная влажность, атмосферное давление).

В некоторых отдельных наблюдениях показатели относительной влажности отсутствовали; для таких наблюдений были взяты среднегодовые показатели. Данное решение не ухудшает качество обработки, поскольку изменение относительной влажности в разумных пределах не оказывает заметного (в рамках точности наблюдений) влияния на расчётные величины.

Рис.4. Невязки (O-C) наблюдений 1982-1984 на ЗТШ-2.6м



Невязки (односторонние) 177 наблюдений на ЗТШ. Априорные ошибки наблюдений, составляющие от 0.24 до 0.25 м, не приведены

Единственными параметрами, фактически уточнёнными по наблюдениям на ЗТШ, являются координаты точки отсчёта телескопа, к которой отнесены наблюдаемые величины:

$$\begin{aligned}\rho \cos(\varphi) &= 4539.377061 \text{ км} \quad (1\sigma = 8.5 \text{ см}) \\ \lambda &= 34^\circ.015782 \quad (1\sigma = 0^\circ.000001) \\ \rho \sin(\varphi) &= 4466.363410 \text{ км} \quad (1\sigma = 20 \text{ см}),\end{aligned}$$

где ρ — длина геоцентрического радиус-вектора; λ — долгота, φ — широта.

Среднеквадратичное значение (rms) приведённых на Рис. 4 невязок равно 59 см. При отсечении наблюдений с невязками более 1.5 м по абсолютной величине остаётся 167 наблюдений; их (для этих наблюдений) ? rms равен 41 см.(равно 41 см).

Кроме упомянутых наблюдений 1982-84 гг, на сохранившихся материалах были представлены отдельные наблюдения за 1974-1981 гг. И особенно хочется **отметить историческую значимость 3-х наблюдений Лунохода-1, сделанных в 1974 г.**

Результаты обработки этих наблюдений (с использованием положения Лунохода-1, уточнённого по современным наблюдениям) приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Невязки 3-х наблюдений Лунохода-1 на ЗТШ

Дата и время наблюдения	Значение O-C (м)
28.05.1974 18:37:46.929988	0.93
28.05.1974 19:51:32.251415	-0.95
15.07.1974 01:42:05.114108	-0.50

Положение Лунохода-1 считалось официально утерянным с 1971 г. до 2010 г., когда оно было обнаружено вновь благодаря данным космической миссии Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).

По трём измерениям, указанным в Таблице 2, определить положение отражателя с хорошей точностью невозможно; **однако значения невязок, рассчитанные по уже известному положению отражателя, свидетельствуют о корректности прошлых наблюдений. (Calame O., 1973 г- 36 инд фотонов)**

1. История создания необходимой аппаратуры для лазерной локации Луны (ЛЛЛ) и теоретических обоснований для ее реализации уже насчитывает несколько десятилетий и довольно хорошо описана в научной и популярной литературе. Работа все эти годы была очень продуктивной (сотрудничество ФИАН, КРАО и ИПА).

2. Уже более 48 лет ведутся регулярные ЛЛЛ наблюдения, точность которых выросла с 25 см до 2-3 мм. Наблюдения проводились и проводятся различными станциями в различные интервалы времени: одни станции прекратили свое существование, другие появились не так давно, есть станции, которые только в проекте, но уже реализуемом.

3. Представленные ЛЛЛ наблюдения 1982-1984 гг не могут конкурировать с последними современными данными, однако, они вписываются в картину эволюции точности ЛЛЛ наблюдений тех лет и могут занять свое место среди наблюдений указанных лет в общей базе данных .

4. 2019 год-50-летие развития и применения лазерной локации Луны в различных областях наук.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

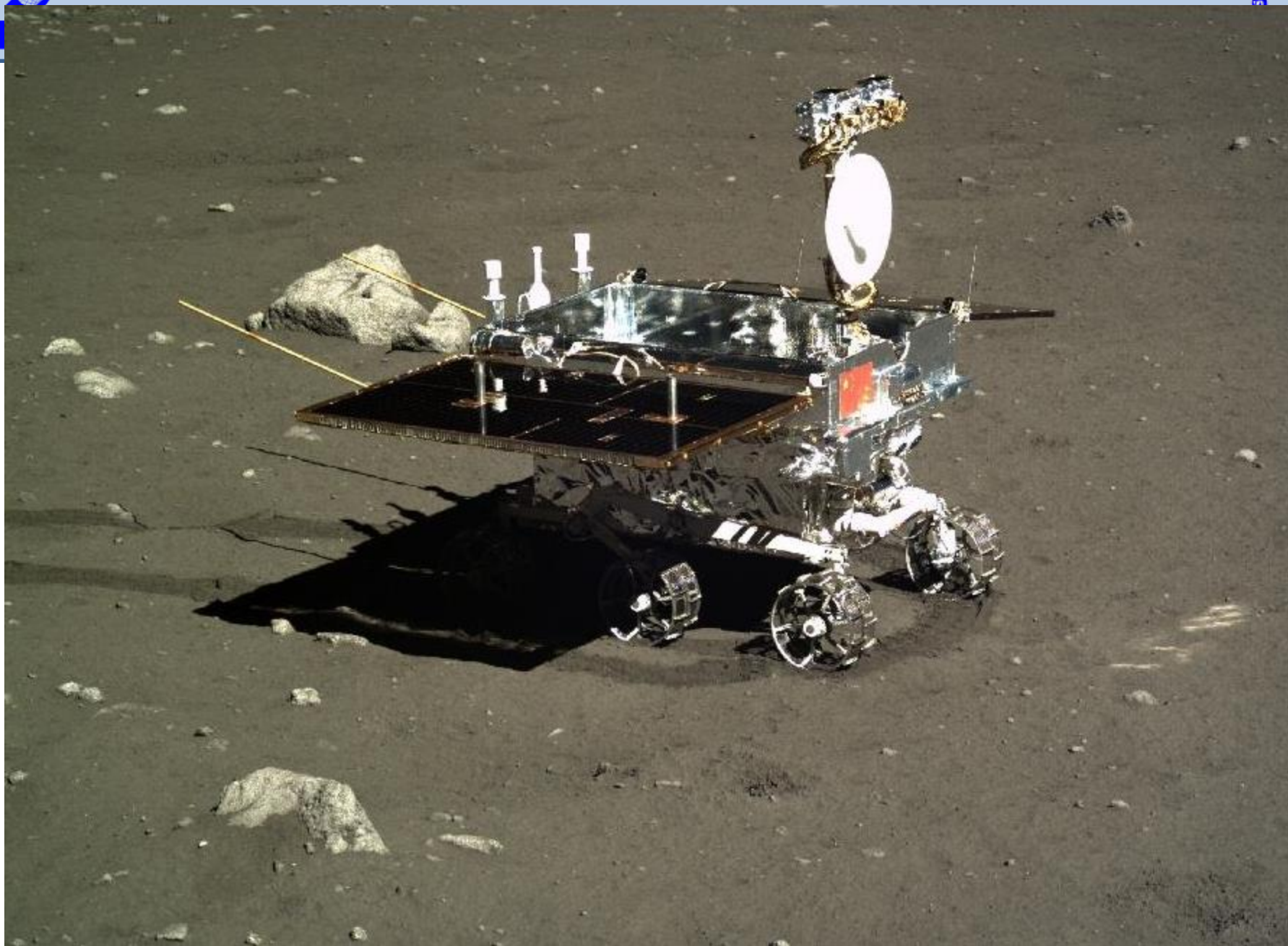
Литература.

1. Yu L Kokurin, "Lunar laser ranging: 40 years of research", QUANTUM ELECTRON, 2003, 33 (1), 45-47.
2. <http://iaaras.ru/en/dept/ephemeris/epm/2017/>
3. L. S. Mullin, G. F. Iosco, Proc. IRE, 50, 1703 (1962).
4. Грасюк А.З. и др. ДАН СССР, т.154, № 6, 1303, (1964). Doklady Akademii Nauk, Sov. J., (Physics), Volume 154, №6, 1303, (1964)
5. Ю.Л.Кокурин, В.В.Курбасов, В.Ф.Лобанов, В.М.Можжерин, А.Н.Сухановский, Н.С.Черных "Измерение расстояния до Луны методом оптической локации" Pis'ma v Zh. Èksper. Teoret. Fiz., Volume 3, 219-223 (1966).
6. Abalakin V K, Kokurin Yu L "Optical location of the Moon" Sov. Phys. Usp. 24, 619–623 (1981)
7. Кокурин Ю. Л., Курбасов В. В., Лобанов В. Ф., Можжерин В. М., Сухановский А. Н., Черных Н. С. «Космические исследования», 1966, т. 4, № 3, стр. 414.
8. Yu L Kokurin, V V Kurbasov, V F Lobanov, A N Sukhanovskii and N S Chernykh "Laser location of the reflector on board Lunokhod-1" Sov. J. Quantum Electron. 1, 555, (1972).
9. Calame O. Compt. Rend. B, V.280, 551 (1975)
10. Yu. Kokurin "Lunar laser ranging: 40 years of research", Quantum Electronics (2003), 33 (1):45.
11. J.D. Mulholland, "Proposed Standards for Distribution and Documentation of Lunar Laser Ranging Data", COSPAR Information Bulletin, 61, London, 1972.
12. Д.Ф. Павлов, В.И. Скрипниченко." Первые результаты опытной эксплуатации кроссплатформенной версии системы ЭРА"//Труды ИПА РАН, гю 30632-40(2014)ю
13. Е.В. Питьева, Д.А. Павлов." Новая версия эфемерид планет и Луны"-ЕРМ2015//Труды ИПА РАН, вып. 43, 42-52(2017).
14. Ratcliff, J., Gross, R.: Combination of Earth Orientation Measurements: SPACE2014, COMB2014, and

POLE2014, LPL publication 15-8, NASA(2015).

15. Dmitry A. Pavlov, James G. Williams, Vladimir Suvorkin: Determining parameters of Moon's orbital and rotational motion from LLR observations using GRAIL and IERS-recommended models// Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy 126(1), 61-88(2016).

16. T.W. Murphy Jr. et al. Laser ranging to the lost Lunikhod 1 reflector, Icarus 211 (2011).



- В настоящее время существуют 2 проекта по установке ЛЛД на станциях **Алтай (Россия)** и **Ла Силья (La Silla) (Европейский проект)**. Ожидаемое увеличение точности Лунной эфемериды (с получением новых ЛЛН) является основной целью данного сообщения. ЛЛН лежат в основе современных эфемерид Луны

