

Первые космические эксперименты по лазерной локации Луны (К 50-летию посадки на Луну «Лунохода-1»)

© А. В. Ипатов, Л. А. Ведешин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

10 ноября 1970 г. состоялась мягкая посадка на Луну советской космической станции «Луна-17» с первым в мире самоходным аппаратом «Луноход-1». На борту «Лунохода-1» был установлен советско-французский лазерный ретрорефлектор для проведения космических экспериментов по локации Луны. До этого — 16–21 июля 1969 г. — на Луну был запущен и доставлен американский посадочный аппарат Аполлон-11. Всего за период 1969–1973 гг. на поверхности Луны было установлено пять ретрорефлекторов (3 — США и 2 — СССР), включая ретрорефлектор «Лунохода-2». С использованием этих ретрорефлекторов уже более 50 лет проводится лазерная локация Луны, а также проведено более 27000 наблюдений (нормальных точек). Точность светолокационных наблюдений Луны за это время выросла на несколько порядков. Анализ полученных результатов показал, что это один из самых эффективных методов исследования Луны, а в ближайшем будущем, возможно, и других объектов Солнечной системы. Все современные высокоточные лунные эфемериды построены на основе светолокационных наблюдений Луны, причем особый интерес представляет их использование для изучения тонких деталей вращения Луны, связанных с особенностями ее внутреннего строения, гравитационного поля, распределения масс на Луне и приливных явлений. Статья посвящена описанию истории и технических деталей первых советских экспериментов по лазерной локации Луны и приурочена к 50-летию посадки на Луну «Лунохода-1».

Ключевые слова: Луна, лазерная локация, ретрорефлектор, космическая станция, «Луна-17», «Луноход-1», «Луноход-2».

Контакты для связи: Ведешин Леонид Александрович (vedeshin40@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 30.06.2020, принята к публикации 07.07.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Ипатов А. В., Ведешин Л. А. Первые космические эксперименты по лазерной локации Луны // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 30–37.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.30-37>

The first experiments on laser ranging of the Moon (To the 50th anniversary of the Lunokhod-1 landing on the Moon)

A. V. Ipatov, L. A. Vedeshin

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

On November 10, 1970 a soft landing on the Moon of the Soviet space station Luna-17 with the world's first self-propelled vehicle Lunokhod-1 took place. A Soviet-French laser retroreflector was installed on board Lunokhod-1 to conduct space experiments on the lunar laser ranging (LLR). Prior to that, on July 16-21, 1969, the American Apollo 11 lander was launched and delivered to the Moon. In total, during 1969–1973 five retroreflectors (3 USA and 2 USSR) were installed on the lunar surface, including the retroreflector of Lunokhod-2. With the use of these retroreflectors, LLR has been carried out for more than 50 years and, more than 27000 observations (normal points) have been obtained. The accuracy of LLR observations of the Moon during this period has increased by several orders of magnitude. An analysis of the series of observations obtained showed that this is one of the most effective methods for studying the Moon, and in the near future, possibly other objects of the Solar System. All the modern high precision lunar ephemeris are built on the basis of LLR observations, and of particular interest is their use to study the Moon's rotation associated with the peculiarities of its internal structure, gravitational field, mass distribution on the Moon and the tidal phenomena. The paper deals with the description of the history and technical details of the first Soviet LLR experiments and is timed to the 50th anniversary of the Lunokhod-1 landing on the Moon.

Keywords: Moon, laser ranging, retroreflector, space station, “Luna-17”, “Lunokhod-1”, “Lunokhod-2”.

Contacts: Leonid Vedeshin (vedeshin40@mail.ru).

Received June 30, 2020, accepted July 7, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Ipatov A. V., Vedeshin L. A. The first experiments on laser ranging of the Moon (To the 50th anniversary of the Lunokhod-1 landing on the Moon) // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 30–37.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.30-37>

Введение

Первые эксперименты по лазерной локации Луны были выполнены американскими учеными в 1962 г. [1], а годом позже — 13 сентября 1963 г. — советскими специалистами [2]. В них луч лазера при помощи телескопа направлялся на определенную точку лунной поверхности, отраженный от Луны световой сигнал попадал в тот же телескоп и регистрировался фотоприемником. Для локации использовались рубиновые лазеры с длительностью импульса ~ 1 мс. Соответствующая этой длительности ошибка в измерении расстояния до Луны составляла около 150 км, что значительно превышало возможную ошибку при определении его другими методами. С началом космических полетов к Луне и другим телам Солнечной системы возникла необходимость получения более точных астрометрических данных, таких как привязка удаленных пунктов Земли, движение полюсов, дрейф континентов, определение координат навигационных, связанных и других искусственных спутников Земли. В настоящее время техника лазерной локации космических объектов позволяет с высокой точностью определять расстояние между станцией наблюдения на Земле и интересующим нас объектом.

Предыстория

В связи с разработкой в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР рубинового лазера в 1962 г. директор Института академик Н. Г. Басов предложил ученым Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) провести научный эксперимент по лазерной локации Луны [3]. На крымской научной станции Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) в поселке Кацивели для телескопа ЗТШ-2.6 м, который был установлен в поселке Научный КрАО, была смонтирована лазерно-локационная аппаратура, с помощью которой в 1963 г. были зарегистрированы, первые отраженные Луной лазерные сигналы. Объектом исследования был кратер Альбатегний. Годом раньше был проведен аналогичный эксперимент по локации Луны в США [2]. Первые исследования, проведенные учеными СССР и США, положили начало новому направлению в науке — лазерной локации космических объектов. В экспериментах на телескопе ЗТШ-2.6 м использовались рубиновые лазеры с длительностью импульса порядка 1–2 мс, что соответствовало ошибке при определении расстояния до Луны порядка 150–300 км. Цель этих экспериментов заключалась в подтверждении практической возможности и ценности результатов лазерной локации Луны и других объектов.

Первые лазерные измерения расстояния до Луны, имевшие практическую ценность, были выполнены в 1965 г. с длительностью импульса по-

рядка 5×10^{-8} с и ошибкой 7.5 м. При этом ошибка в измерении расстояния зависела не от параметров аппаратуры, а от рельефа Луны и составляла примерно 200 м. Этот результат позволил использовать его для оценки точности эфемерид Луны. Точность в топоцентрическом расстоянии до поверхности Луны в то время составляла порядка 3 км. Эксперименты по лазерной локации Луны показали не только возможность уточнить основные параметры системы Земля – Луна, но и значительно продвинуться в решении задач селенодезии, астрометрии и геофизики [3].

Следующий лазерный эксперимент советские ученые провели в КрАО в 1966 г. по измерению расстояния до лунного кратера Фламарион. Для локации применялся лазер с модулированной добротностью. Длительность его импульса составляла порядка стомиллионных долей секунды, что позволило снизить ошибку измерения до нескольких сотен метров. Причем она была обусловлена уже не свойствами аппаратуры (длительностью импульса), а свойствами самого объекта, на который направлялся луч лазера [4]. Первые опыты лазерной локации Луны выявили два основных недостатка этого метода: во-первых, значительное ослабление светового сигнала по пути к Луне и обратно затрудняло его регистрацию на Земле; во-вторых, нестрогая параллельность световых лучей в пучке, посылаемом с Земли (лучи расходятся на несколько угловых секунд) вела к тому, что пучок освещал на Луне площадку в несколько километров, в районе которой всегда могли быть неровности рельефа с большой разностью высот. Таким образом, возникала ошибка в сотни метров. Научный же интерес в то время представляло измерение расстояния до Луны с точностью в несколько метров. Для получения таких результатов необходимо было локализовать точки отражения на Луне, т. е. установить на ней малые мишени, эффективно отражающие свет в направлении наблюдателя [5]. Этого результата советские и французские ученые

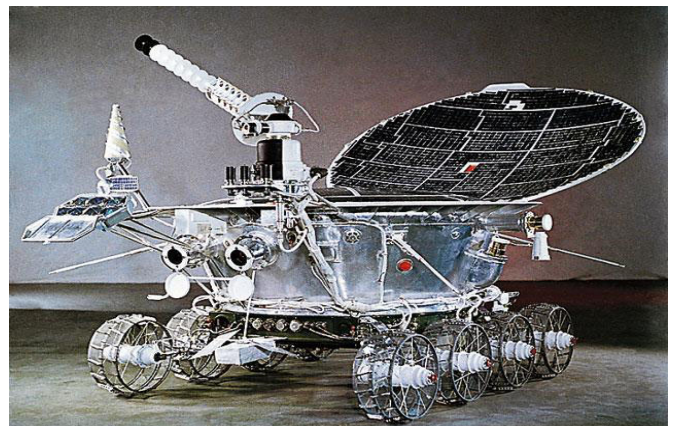


Рис. 1. Первый советский самоходный аппарат «Луноход-1»

достигли в 1970 г., установив лазерный ретрорефлектор (уголковый отражатель) на советском самоходном аппарате «Луноход-1» [6], а затем на «Луноходе-2» в 1973 г. (рис. 1). При работе с такой мишенью ошибки при определении расстояния до Луны зависели лишь от длительности импульса лазера и точности измерения времени.

Космические эксперименты по лазерной локации Луны

Идея проведения совместного советско-французского эксперимента с лазерным отражателем на Луне возникла в 1967 г. в рамках международной программы «Интеркосмос» [6]. После изучения технических возможностей совместного проекта специалисты СССР и Франции договорились о работе по лазерной локации отражателей, установленных на поверхности Луны. При этом французская сторона взяла на себя обязательства по изготовлению панелей лазерных ретрорефлекторов, а советская — по их установке на борт лунного посадочного аппарата. Работами по подготовке совместного эксперимента с советской стороны руководил заведующий сектором ФИАН д. ф.-м. н. Ю. Л. Кокурин, который внес большой вклад в мировое развитие методов радиолокации Луны и космических объектов.

Французский лазерный отражатель (рис. 2), установленный на «Луноходе-1», представляет собой панель весом 3,8 кг и размером $450 \times 210 \times 75$ мм, на которой было установлено 14 триппель-призм, изготовленных из высокооднородного кремниевого стекла, имеющего хорошую стойкость к радиации и малый коэффициент теплового расширения, что позволило избежать термических деформаций в суровых лунных условиях. Лунные отражатели, установленные на американских кораблях «Аполлон-11» и 14 содержали по 100 уголковых рефлекторов, «Аполлон-15» — 300. Необходимо отметить, что французский лазерный отражатель отличался по своему устройству от американских (был в пять раз эффективнее в

условиях лунной ночи). Лунным днем из-за нагрева Солнцем эффективность отражателя резко падала [6].

При изготовлении отражателя кремниевое стекло вначале разрезалось на кубы, затем из них вырезались тетраэдры, задние грани которых образуют трехгранный прямой угол с точностью 0,2 угл. сек, плоскости — с точностью 0,07 мкм. Если на плоскость среза, являющуюся входной гранью призмы, послать луч света, то после трехкратного внутреннего отражения в призме он выйдет из нее по направлению падающего луча. Это свойство призм отражает свет точно в обратном направлении сохраняется только при условии, что их прямые углы выдержаны до десятых долей угловой секунды. Задние грани каждого тетраэдра имеют серебряное покрытие, нанесенное в вакууме. Металлизация граней влечет за собой неравномерный нагрев призм и их тепловую деформацию, что является некоторым недостатком конструкции. Однако это окупается рядом преимуществ, в частности тем, что устраняется нежелательная поляризация отраженного света.

Французскими специалистами была разработана специальная система теплозащиты: панель снизу была закрыта многослойным теплоизоляционным кожухом в целях обеспечения минимального теплового контакта призм с кожухом отражателя и через них — с луноходом, а также минимального обмена с излучаемой поверхностью Луны. Советские специалисты изготовили для лазерного отражателя пылезащитную крышку и установили ее на специальных кронштейнах в передней части лунохода. Углы ее установки были выбраны такими, чтобы обеспечить ориентацию отражателя на Землю путем разворота лунохода по азимуту. Ориентация проводилась перед началом лунной ночи, в течение которой осуществлялся сеанс лазерной локации Луны (рис. 3).

Диапазон рабочих углов отражателя был $\pm 10\text{--}15^\circ$. Приблизительно с такой точностью он

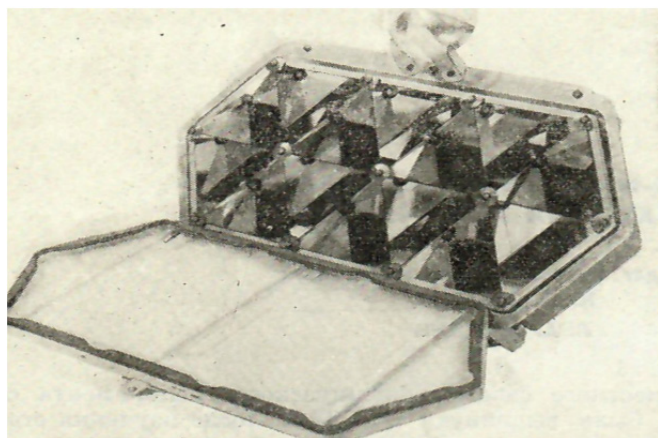


Рис. 2. Французский лазерный отражатель

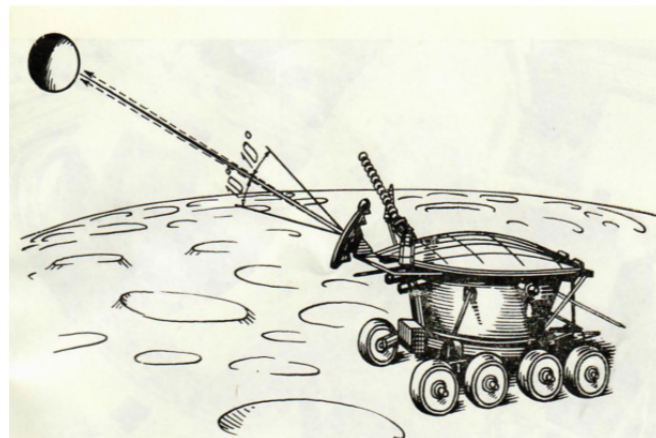


Рис. 3. Схема ориентации отражателя на Землю

должен был быть ориентирован на Землю. Отклонения оси отражателя за счет либрации Луны могли достигать $\pm 7^\circ$. Для того чтобы не выйти за диапазон рабочих углов, ориентация отражателя по углу места и азимуту осуществлялась с точностью $2\text{--}3^\circ$. Для проведения эксперимента комплекс лазерно-навигационной аппаратуры, разработанной в ФИАН, был установлен на крупнейшем в то время в Европе телескопе диаметром 2.6 м в поселке Научный КрАО. Эта аппаратура состояла из оптического передатчика на рубиновом лазере с модулированной добротностью и длительностью импульса около двух стомиллионных долей секунды, узкополосного приемника системы регистрации отраженного сигнала, измерителя времени распространения светового сигнала до отражателя и обратно с точностью порядка стомиллионной доли секунды, блока автоматики и управления всем комплексом приборов. Отраженный сигнал регистрировался только в течение узкого строб-импульса, середина которого совмещалась с расчетным моментом прихода отраженного сигнала. Остановка счета могла производиться как отраженным сигналом, так и фоном. При большом фоне это могло привести к потере полезного сигнала. Чтобы это не происходило, параллельно измерителю временных интервалов был включен осциллографический регистратор, который фиксировал в течение строб-импульса как полезный, так и шумовой сигналы. Точность измерения времени осциллографом была на порядок ниже, чем на измерителе временных интервалов [7].

Проведение эксперимента в условиях лунной ночи было сопряжено с известными трудностями. Сложным оказывалось наведение телескопа на отражатель, находящийся на неосвещенной стороне Луны. На дневной ее стороне выбиралась опорная точка (кратер) с неизвестными координатами. На выбранную точку наводился гид телескопа. Чтобы направить сам телескоп (по оси которого проходит лазерный луч) на отражатель, необходимо было ось телескопа сместить на определенный угол относительно оси гидирования — метод, аналогичный артиллерийской стрельбе по закрытой цели с использованием точки наводки [7]. Практическая реализация этой схемы встретила некоторые препятствия, связанные с малыми полями зрения телескопа и вращением полей относительно экваториальной системы координат. Поэтому лазерную аппаратуру пришлось расположить в необычном месте — на полярной платформе телескопа (рис. 4). Аналогичная лазерно-локационная аппаратура была создана во Франции и установлена в обсерватории Пик-дю-Миди в Пиренеях на телескопе 1.02 м.

В течение первой лунной ночи, после посадки автоматической станции «Луна-17», условия для

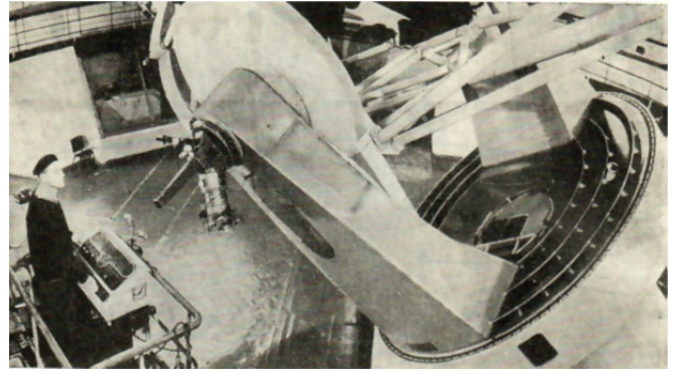


Рис. 4. Лазерно-локационная аппаратура на 2.6-метровом телескопе в КрАО

проведения лазерных измерений были благоприятные 5–8 декабря. За этот период советским ученым удалось провести два сеанса измерений 5 и 7 декабря 1970 г., 8 декабря работы не проводились из-за плохих метеорологических условий в Крыму. Следует отметить, что маневрирование «Лунохода-1» осуществлялось в пределах этого пятна и введение поправок на маневрирование не было необходимым. Избранный способ наводки телескопа не ограждает от плохо учитываемых ошибок, поэтому была разработана программа поиска лазерного отражателя путем последовательного обстрела 25 точек, равномерно распределенных в квадрате размером 25×25 км (рис. 4). Поиск был начат с центральной точки этого квадрата с координатами $34^\circ 53' W$ и $38^\circ 17' N$ (точка № 13), локация которой проводилась в течение всего сеанса 5 декабря. В результате сеанса, продолжавшегося около 40 мин (170 импульсов), был обнаружен достаточно четкий отраженный сигнал. С целью уточнения наводки лазерного луча на отражатель во время сеанса 6 декабря 1970 г. обследовались другие точки, соседние с центральной, каждая из которых лоцировалась в течение часа (250 импульсов в точку). При этом существенного усиления сигнала получено не было. Для выделения отраженного сигнала и исследования изменения измеряемого расстояния со временем рассмотрены участки строб-импульсов, соответствующие отраженному сигналу. На рис. 5 точками показана разность $t_{\text{э}} - t_{\text{т}}$ экспериментального и теоретического времени прихода отраженного сигнала в функции номера лазерной посылки (или времени). Для определения расстояний до отражателя использовались только сигнальные точки (с крестиками), полученные с помощью измерителя временных интервалов, т. е. с точностью $\pm 10^{-8}$ с (результаты, снятые с осциллографа: (точки с кружками) не учитываются ввиду меньшей точности). Если аппроксимировать ход этих точек плавными кривыми, то отклонение экспериментальных значений от кривых не

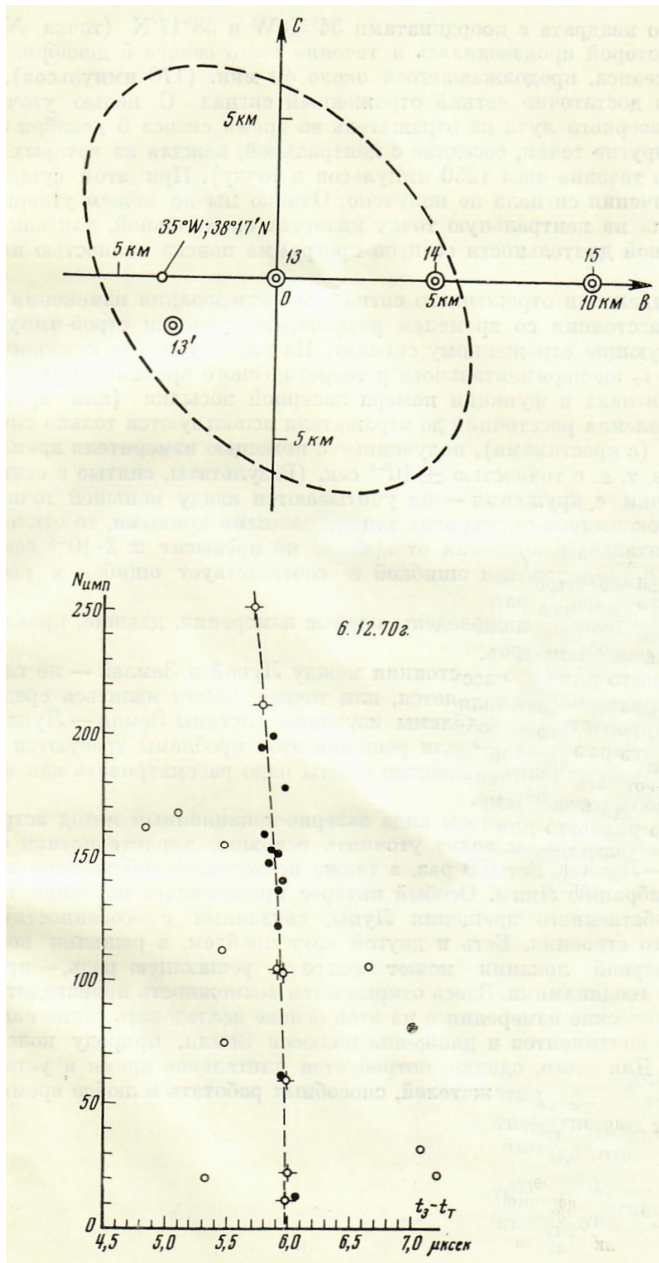


Рис. 5. График разности экспериментального и теоретического времени прихода отраженного сигнала и схема участка лунной поверхности в районе посадки «Луны-17» [7]

превысит $\pm 2 \times 10^{-8}$ с, что совпадает с аппаратурной ошибкой и соответствует ошибке в расстоянии ± 3 м [7].

Вслед за «Луноходом-1» 16 января 1973 г. станцией «Луна-21» на Луну был доставлен самоходный аппарат «Луноход-2». К французскому уголкового отражателю были добавлены фотоэлементы советского производства. В обсерваториях Пик-дю-Миди на телескопе 1.02 м в Пиренеях и в Крыму французскими и советскими учеными соответственно были проведены лазерные измерения с использованием уголковых отражателей с целью определения расстояния от Земли до Луны с точностью до 3 м. При работе с «Луноходом-1»

точность измерений в КРАО составляла около 3 м и до 40 см — с «Луноходом-2» [7].

Во Франции также были проведены первые измерения, давшие несколько меньшую точность. В рамках подготовки к работе с уголковыми отражателями на Луне, в ряде стран была создана новая светолокационная аппаратура. Необходимо отметить, что осуществление светолокационных измерений расстояний до Луны с высокой точностью представляет собой сложнейшую научно-техническую задачу. Достаточно сказать, что уровень отраженного сигнала в точке приема при реально доступных параметрах аппаратуры составляет десятые доли фотона на один импульс лазера. Регистрация такого сигнала с точной (10^{-6} – 10^{-7}) привязкой к шкале всемирного времени при наличии паразитных засветок, требует применения статистического накопления сигнала с эффективным спектральным и пространственно-временным селектированием [5].

Более результативные эксперименты по лазерной локации были получены при работе с несколькими лазерными отражателями в различных точках лунной поверхности. В соответствии с рекомендацией, вынесенной в 1968 г. Комитетом по исследованию космического пространства, на Луну было доставлено пять отражателей — три американских (в июле 1969 г. космическим кораблем «Аполлон-11» — в восточную часть Моря спокойствия, в феврале 1971 г. кораблем «Аполлон-14» — в западную часть Луны, в район экватора, и в июле 1971 г. кораблем «Аполлон-15» — на юго-восточной окраине Моря дождей) и два французских («Луноход-1» — в ноябре 1970 г. в западную часть Луны, в Море дождей, и «Луноход-2» — в январе 1973 г. в Море ясности). Для лазерных измерений была создана база из пяти реперных точек. Участие в этом эксперименте могли принять все страны, обладающие соответствующим наземным оборудованием [8].

В 1970 г. НАСА организовало специальную группу по лунной локации Луны и стало проводить регулярные измерения расстояний до лунных отражателей в обсерватории Макдональд Техасского университета (США) с помощью телескопа диаметром 2.7 м. Первоначальная погрешность измерений составляла 3 м, которая к 1972 г. была уменьшена до 15 см. В период 1984–1987 гг. работы по лазерной локации были постепенно переведены на специально созданную станцию MLRS, оборудованную телескопом 0.76 м. При этом рубиновый лазер был заменен лазером на кристаллах YAG. Эта станция проводит регулярные измерения расстояний до Луны и до геодинимических спутников с высокими орбитами. Погрешность измерений доведена до 1–3 см. За многие годы в обсерватории MLRS накоплены ряды наблюдений

десятки тысяч точек. В других обсерваториях США, в которых начинались работы в области лазерной локации Луны, были по разным причинам прекращены [9].

В СССР измерения расстояний до лунных светотражателей были начаты в КрАО в 1969 г., однако регулярный характер они приобрели спустя четыре года, когда в 1973 г. был введен в действие автоматизированный лазерно-локационный комплекс с погрешностью измерений 0.9 м. К 1978 г. была построена новая модель лазерного локатора с ошибкой единичного измерения около 25 см. Всего в КрАО было проведено около 1400 единичных измерений расстояний, в основном на основе двух отражателей («Луноход-2» и «Аполлон-15»). Одним из первых научных результатов, полученных советскими и американскими учеными в результате лазерно-локационных наблюдений Луны путем посылки лазерного луча на Луну, было высокоточное определение дуги (хорды) «Макдональд» США — поселок Научный в Крыму с точностью 0.6 м. В настоящее время существующая точность нормальных точек на расстоянии до Луны современными лазерами достигает нескольких мм, а точность современных эфемерид 2–4 см.

Во Франции лазерные наблюдения Луны длительное время проводилась в обсерватории Пик-дю-Мюди, где для этих целей строился многоэлементный телескоп диаметром 6 м. Довести его параметры до проектных не удалось, и в конце 1970-х гг. работы по лазерной локации были перебазированы во вновь построенную геодинамическую обсерваторию CERGA на Лазурном берегу, где в 1983 г. начались регулярные лазерные наблюдения лунных мишеней. Сегодня погрешность наблюдений составляет 1–2 см и ведутся работы по снижению ошибки до субсантиметрового уровня. На лазерно-локационной станции в Италии (г. Матера) применен лазер с синхронизацией мод, длительность импульса которого составляет 50 пс, а энергия — 100 мДж и первые успешные наблюдения Луны были проведены в 1998 г. В 1960–1970 гг. предпринимались попытки осуществить лазерную локацию Луны в Японии, Австралии, Германии, но они не дали ощутимых результатов. В Китае ведется создание аппаратуры для лазерной локационной станции в связи с началом исследований на Луне [10].

На Луне создана сеть лазерных мишеней, пригодных для исследований в области астрономии, селенодезии и физики Луны, геодезии, геодинамике, геофизики, теорий гравитации. Анализ результатов лазерной локации Луны проводится в основном в США (Техасский университет, Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического университета), во Франции (Парижская обсерватория) и в России (ИПА РАН).

В 1983 г. работы по лазерной локации Луны в КрАО были прекращены и переданы в Кацивели. Однако параметры нового локатора оказались неудовлетворительными для наблюдений Луны и он стал использоваться только для наблюдений ИСЗ.

Параллельно с работами по наблюдению Луны с использованием телескопа ЗТШ-2.6 в ФИАН были созданы пять транспортабельных станций с телескопами ТПЛ-1 с диаметром зеркала 1 м для лазерной локации ИСЗ. Одна из них предназначалась для локации как ИСЗ, так и Луны. Однако довести ее до уровня, необходимого для локации Луны, не удалось, и сейчас она используется для наблюдений ИСЗ с орбитами до 40000 км. Еще три станции этой серии проводят регулярные наблюдения низкоорбитальных и геодинамических ИСЗ. Необходимо отметить, что осуществление лазерно-локационных измерений расстояний до Луны с высокой точностью представляет собой сложнейшую научно-техническую задачу [11].

Возобновление наблюдений «Лунохода-1»

В 70-х годах прошлого века «Луноход-1» был потерян, и после нескольких безуспешных попыток его наблюдения были прекращены. Спустя 40 лет американскими учеными под руководством Тома Мерфи из Университета Сан-Диего удалось получить сигналы от углового отражателя «Лунохода-1» с помощью облучателя, установленного на 3-метровом телескопе в обсерватории Апаچی-Поинт: после потери связи «Луноход-1» оказался на практически горизонтальной площадке в таком положении, при котором возможно многолетнее проведение его лазерной локации с Земли. Сигналы оказались в 5 раз ярче сигнала от «Лунохода-2». При этом удалось определить расстояние с точностью 1 см и его координаты — широту и долготу с погрешностью 10 м. Лазерный отражатель «Лунохода-2» также до сих пор посылает на Землю сигналы, когда его облучают лазером с Земли. Специалисты орбитального спутника Луны «Lunar Reconnaissance Orbiter» передали американскому профессору Филу Стуки снимки лунной поверхности, на которых он разглядел следы второго лунохода, оставленные 40 лет назад в Море ясности, как свидетельство первой советской миссии на Луне. Наличие наблюдений на больших временных интервалах позволило уточнить периодическую и вековую динамику движения Луны [12].

Заключение

Проведенные лазерные эксперименты на «Луноходах-1, 2» надо рассматривать как пионерские работы по светолокации Луны в России и мире. Уже в современном своем виде светолокационный метод астрометрических измерений позволяет уточнить основные характеристики системы Зем-

ля – Луна, а также исследовать собственное вращение или либрацию Луны. Особый интерес представляет изучение тонких деталей вращения Луны, связанных с особенностями ее внутреннего строения, гравитационного поля, распределения масс на Луне и приливных явлений. Есть и другой круг проблем, в решении которых метод лазерной локации может сыграть решающую роль, — проблем геодезии и геодинамики. Здесь открывается возможность производить точные геодезические измерения и на этой основе исследовать такие явления, как дрейф континентов и движение полюсов Земли, природу колебаний Чандлера. Для этого потребуется длительное время и установка на Луне нескольких новых отражателей, способных работать в любое время лунных суток. В настоящее время уголкового отражатели размещены преимущественно в северном полушарии.

Работы по созданию в СССР эфемерид Луны на основе лунных светолокационных наблюдений начались в 70-х годах прошлого века под руководством В. К. Абалакина в Институте теоретической астрономии АН СССР [13]. Затем, с 1995 г. построение высокоточной численной теории орбитально-вращательного движения Луны и ее уточнение на основе локационных наблюдений было продолжено в России в ИПА РАН под руководством Г. А. Красинского [14]. В настоящее время лунные эфемериды ИПА РАН стоят в одном ряду с американскими и французскими эфемеридами и имеют примерно равную с ними точность [15].

В России метод лазерной локации используется сейчас в основном для регулярных наблюдений низкоорбитальных и геодинамических ИСЗ. В частности, для координатно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», которые проводят высокоточные радиотехнические наблюдения, установлены инструменты для лазерной локации ИСЗ [16]. На территории России, а также в ЮАР, Бразилии и Казахстане, действует 11 лазерных станций, образующих Российскую сеть лазерной дальнометрии и одновременно входящих в состав Международной службы лазерной дальнометрии (International Laser Ranging Service) для высокоточного определения орбит спутников и координат станций. В целях повышения эффективности применения российских станций создан Центр сбора, обработки и анализа информации средств российской сети лазерной дальнометрии.

Вводятся в строй две лазерные станции нового поколения для комплекса средств фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС. Лазерные станции системы формируют дальномерные данные геодезических и навигационных КА с субмиллиметровой погрешностью измерений и псевдодальномерные данные навигационных ИСЗ, оснащенных модулями приема лазерных

импульсов с субмиллиметровой погрешностью измерений [17]. Кроме того, планируется введение Российского лунного лазерного дальномера на Алтае, который будет обеспечивать миллиметровый и выше уровень точности измерений светолокационных дальностей до Луны.

В соответствии с Российской национальной программой в 2021–2027 гг. планируется запуск на Луну трех космических станций «Луна – Глоб» («Луна-25»), «Луна – Ресурс» («Луна-26») и («Луна-27») и «Луна – Грунт» с уголковыми отражателями на борту для проведения лазерных исследований. Дистанционные наблюдения и непосредственные контактные исследования поверхности Луны космическими станциями позволят получить новую информацию о системе Земля – Луна [18].

Литература

1. *Smullin L. D., Fiocco G.* Project Luna-See // Proc. IRE. 1962. Vol. 50. P. 703.
2. *Грасюк А. З.* Доклады Академии наук СССР. 1964. Т. 154, № 6. С. 1303–1305.
3. *Басов Н. Г., Кокурин Ю. Л.* Лазерная локация Луны // Наука и человечество. 1986. С. 262–277.
4. *Кокурин Ю. Л., Курбасов В. В., Лобанов В. Ф. и др.* Измерение расстояния до Луны методом оптической локации // Письма в Журнал экспериментальной теоретической физики. 1966. № 3. С. 219–223.
5. *Кокурин Ю. Л.* Лазерная локация Луны. 40 лет исследований // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 1. С. 45–47.
6. *Верешетин В. С., Ведешин Л. А., Воронин В. В. и др.* Орбиты сотрудничества / Под ред. ак. Петрова Б. Н. М.: Машиностроение, 1981. С. 52–53.
7. *Кокурин Ю. Л., Ведешин Л. А.* Советско-французский эксперимент по лазерной локации Луны // Вестник АН СССР. 1971. № 6. С. 33–38.
8. Космонавтика. Энциклопедия / Под ред. ак. Глушко В. П. М.: Издательство «Советская энциклопедия». 1985. С. 225–227.
9. *Shelus H. J.* X International laser workshop. Shanghai, 1996. Vol. 2. P. 183–185.
10. *Кокурин Ю. Л., Курбасов В. В., Лобанов В. Ф. и др.* Препринт ФИАН № 127. 1974.
11. *Абалакин В. К., Кокурин Ю. Л.* Оптическая локация Луны // УФН, 1981. № 134. С. 526–535.
12. *Murphy Jr T. W., Adelberger E. G., Battat J., et al.* Laser ranging to the lost Lunikhod ~ 1 Reflector // Icarus. 2010. doi: 10.1016/j.icarus.2010.11.010.
13. *Abalakin V. K., Boiko V. N., Kokurin Yu. L., et al.* Prospects for utilizing light-ranging /laser/ observations of the moon // Soviet Astronomy. 1975. Vol. 19, no. 2. P. 236–241. Translation. *Astronomicheskii Zhurnal*. 1975. Vol. 52. P. 387–397.
14. *Aleshkina E., Krasinsky G. A., Vasilyev M. V.* Analysis of LLR data by the program system ERA // International Astronomical Union Colloquium. 1997. Vol. 165 (Dynamics and astrometry of natural and artificial celestial bodies). P. 227–232.
15. EPM2017 and EPM2017H ephemerides. URL: <http://iaaras.ru/en/dept/ephemeris/epm/2017> (дата обращения 01.03.2020).

16. *Ипатов А. В.* Предварительные результаты модернизации РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Док. на Совете РАН по космосу. 25.09.2019. С. 19.

17. *Шаргородский В. Д., Олейников И. И.* Штатные оптико-электронные системы поиска, обнаружения, определения орбит и изображений в видимом и лазер-

ном диапазоне. Доклад на Совете РАН по космосу. 11.05.2019. С. 17.

18. *Зеленый Л. М.* Текущие вопросы реализации российских лунных проектов с посадочными КА «Луна – Глоб», «Луна – Ресурс». Доклад на Совете РАН по космосу. 11.05.2018. С. 6.