

ЛУННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ *)*Дж. Фоллер, Дж. Уамплер*

Специальный отражатель, установленный на Луне первыми лунными астронавтами, возвращает на Землю импульсы света, посланные земными лазерами. Знание времени прохождения импульса туда и обратно позволяет определить расстояние до Луны с точностью в 15 см.

В июле 1969 г. астронавты с «Аполлона-11» установили на поверхности Луны комплект призмных отражателей, что дало возможность измерить расстояние между Землей и Луной с точностью, достигающей 15 см. Расстояние определяется при помощи мощного пучка света от лазера, направляемого на отражатель, путем измерения времени, за которое короткий импульс света достигает Луны и возвращается обратно.

Однако наиболее важная цель этих наблюдений состоит не в измерении абсолютной величины расстояния между Землей и Луной в какой-то заданный момент времени, а в определении изменений этого расстояния, измеряемых с точностью 15 см (или еще точнее) на протяжении нескольких месяцев или лет. Изучение этих вариаций позволит получить ответы на ряд важных для науки вопросов. Среди них — проблемы распределения масс в недрах Луны; скорости, с которой сближаются (или расходятся) земные континенты, а также изменения положения Северного полюса Земли (который перемещается под действием неизвестных сил). Еще более фундаментальный вопрос, чем перечисленные, на который можно получить ответ путем длительных измерений расстояния между Землей и Луной, — это вопрос о том, неизменна ли постоянная тяготения или же она медленно уменьшается со временем.

Уже более 2000 лет Луна оказывается «пробным камнем» для теорий вселенной, которые выдвигаются человечеством. В III в. до н. э. Аристарх Самосский из наблюдений лунных затмений вывел, что расстояние от Земли до Луны круглым счетом в 10 раз больше земного диаметра. Его оценка опиралась на тот наблюдательный факт, что диаметр земной тени, падающей на диск Луны во время лунных затмений, примерно в $2\frac{1}{2}$ раза превышает видимый диаметр Луны. Если считать Солнце точечным источником света, расположенным в бесконечности, то поперечник земной тени точно соответствовал бы поперечнику Земли. В этом случае диаметр Луны составлял бы 40% диаметра Земли. Однако Аристарх осознавал, что конусообразная земная тень, создаваемая Солнцем, имеет сужение примерно в полградуса. Исходя из этого и оценивая (неправильно) видимый

*) James E. Faller, E. Joseph Wampler, The Lunar Laser Reflector. Sci. American 222 (3), 38 (1970). Перевод Л. В. Самсоненко.

Дж. Фоллер — профессор Уэслейнского университета, Дж. Уамплер — сотрудник Ликской обсерватории Калифорнийского университета.

диаметр лунного диска, он и получил указанную выше величину расстояния до Луны.

Полученное Аристархом значение могло быть значительно лучше. Если бы он не ошибся так грубо в определении видимого размера Луны. Он оценил его в два градуса дуги, что в четыре раза превышает действительную величину. В результате он получил, что Луна находится к нам гораздо ближе, чем на самом деле. Столетием позже Гиппарх воспользовался более точным значением для видимого диаметра и вывел, что расстояние до Луны составляет 59 земных радиусов (истинное среднее расстояние составляет 60,3 земного радиуса, или 384 000 км).

Гиппарх также открыл эксцентричность орбиты Луны, наклонение лунной орбиты к плоскости орбиты Земли, движение узлов (точек, в которых лунная орбита пересекает плоскость орбиты Земли) и движение линии апсид (прямой, соединяющей точки, где расстояние Луны от Земли принимает минимальное и максимальное значения).

Если не считать небольших улучшений некоторых измерений, то вплоть до переворота в астрономии, происшедшего в XVI—XVII вв., не было сделано никаких фундаментальных вкладов в изучение движения Луны. Решающим достижением астрономии после этого переворота была ньютоновская теория гравитации, в создании которой Луна сыграла выдающуюся роль: «[Я] сравнил, — писал Ньютон, — силу, необходимую для того, чтобы удерживать Луну на ее орбите, с силой тяжести на поверхности Земли, и нашел их близко соответствующими друг другу».

В последующие два с половиной века астрономы широко использовали измерения оптического параллакса Луны и наблюдения покрытий звезд и тем самым уменьшили неопределенность расстояния Земля — Луна до $\pm 3,5$ км. С 1957 г. для изучения Луны начали широко применяться также радиолокационные методы *). Помимо определения расстояния до Луны с точностью $\sim 1,1$ км, радиолокационные измерения дали сведения о мелкомасштабной неровности лунной поверхности, а также о некоторых электрических свойствах материала, слагающего поверхность Луны.

Не так давно на Луну был направлен свет рубинового лазера и был зарегистрирован слабый сигнал, отразившийся от Луны. Впервые отражение света лазера от лунной поверхности было обнаружено восемь лет назад группой из Массачусетского технологического института. Импульсы лазера длительностью 1 мсек направлялись к Луне при помощи 12-дюймового (30,5 см) телескопа. При использовании в качестве приемника 48-дюймового (122 см) телескопа для уверенного выявления возвращающегося сигнала требовался прием многих импульсов. Аналогичный эксперимент был проведен в 1964 г. советскими астрономами, которые использовали 260-сантиметровый телескоп как для послылки, так и для приема импульсов света.

Первый эксперимент, обеспечивающий точность, достаточную для научного использования, был проведен той же группой советских специалистов осенью 1965 г. Они использовали 260-сантиметровый телескоп для послылки и приема импульсов длительностью 50 мсек от рубинового лазера. Эксперимент позволил определить расстояние до Луны с точностью ~ 180 м. Точность, которая может быть достигнута при отражении светового импульса непосредственно от лунной поверхности, ограничивается кри-

*) Мысль о возможности радиолокации Луны была высказана советскими учеными академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси в 1944 г. [см. Успехи физ. наук 29 (3—4), 251 (1946)]. Впервые радиолокация Луны была осуществлена в 1946 г. двумя группами венгерских и американских специалистов [см.: Z. B a y, Hungarica Acta Physica 1, 1 (1946); J. H. D e W i t t, E. K. S t o d o l a, Proc. Inst. Radio Eng. 37, 229 (1946)]. (Прим. персе.)

визной и нерегулярностью поверхности, которые «размазывают» момент прибытия возвращающегося сигнала.

Спустя примерно 2000 лет после первого измерения, метод определения расстояния от Земли до Луны радикально изменился. Во время своего сравнительно недолгого пребывания на Луне Эдвин Олдрин и Нейл Армстронг установили на лунной поверхности систему отражателей, которые могут возвращать направленные на них импульсы лазера с интенсивностью в 10—100 раз большей, чем при отражении от естественной поверхности Луны. Кроме того, что не менее существенно, эти отражатели исключают «растягивание» времени возвращения, возникающее при отражении направляемого с Земли светового пучка от различных участков лунной поверхности.

Мысль об эксперименте по определению расстояний посредством лазера родилась лет десять назад в Принстонском университете в группе, которая возглавлялась Р. Дикке и занималась гравитационными исследованиями. В 1959 г. три члена этой группы написали статью, в которой сделали обзор проблемы точного определения положений искусственных спутников оптическими методами. В этой статье обсуждались три метода освещения спутника для получения данных о расстоянии: прямой солнечный свет; лампа-вспышка на борту спутника; уголкового отражателя на спутнике, возвращающий импульсы света, направляемые с установленной на земле мощной лампы. Опубликование статьи побудило Генри Плоткина и его сотрудников из Годдардовского центра космических полетов предпринять первые опыты по оптическому прослеживанию спутников.

В 1962 г., том же году, когда группа из Массачусетского технологического института сообщила о получении первого отражения от Луны луча лазера, принстонская группа предложила поместить на Луне уголкового отражателя для увеличения интенсивности отраженного сигнала и сужения его по времени. Хотя первоначально эксперимент предназначался для проверки скалярно-тензорной теории тяготения Бранса — Дикке, точное определение расстояний посредством лазера оказалось весьма перспективным для многих отраслей геофизики и астрофизики.

Вскоре после опубликования статьи, озаглавленной «Оптический радиолокатор с использованием уголкового отражателя на Луне», была образована группа по определению расстояния до Луны при помощи лазера. Состав этой группы отражал многообразие отраслей науки, которые имели отношение к эксперименту, а также обширность тех знаний, которые требовались для успешного проведения эксперимента. Координация работы в группе была возложена на Кэррола Олли из Мерилендского университета.

Комплект отражателей, который был установлен на Луне в июле 1969 г., состоит из 100 уголкового отражателей, размещенных в квадратной раме $45 \times 45 \text{ см}^2$. Каждый из 100 «уголков» напоминает те отражатели-катафоты, которые часто укрепляются на велосипедах и дорожных знаках: эти отражатели должны отразить в обратном направлении пучок света от любого источника, независимо от того, откуда свет упал на отражатель (рис. 1). Разумеется, лунные отражатели отличались исключительной точностью изготовления. Каждый уголкового отражатель действует на луч света в пространстве таким же образом, как угол бильярдного стола на движущийся по поверхности стола бильярдный шар. Когда шар (не вращающийся) попадает в угол бильярда, то после двух ударов о борта он выскакивает из угла по направлению, в точности параллельному его первоначальной траектории. В случае света три отражающие поверхности, расположенные под прямыми углами друг к другу, образуют «уголок», обладающий такими же отражающими свойствами.

Первая конструкция отражателя была предложена одним из авторов (Фоллером) после того, как были рассмотрены многочисленные (и нередко противоречащие друг другу требования), которые предъявлялись к аппаратуре, предназначенной для размещения на Луне. Сотрудники Мерилендского университета аккуратно рассчитали отражение пучка света от отражателя в виде угла куба и провели испытание уголкового отражателя подходящего размера (около 4 см в поперечнике) в условиях, близких к условиям на поверхности Луны; это было сделано на стимуляторе солнечного излучения Годдардовского центра космических полетов.

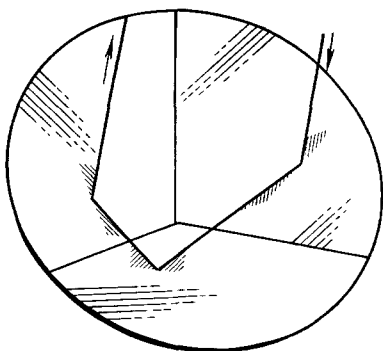


Рис. 1. Уголкового отражатель, или катафот, обладает способностью возвращать обратно луч света по пути, в точности параллельному первоначальному направлению луча. На каждой внутренней поверхности угол отражения равен углу падения (как указано заштрихованными треугольниками). Уголкового отражатели, которые были использованы в аппарате, установленном на Луне, были отрезаны от тщательно отполированных кубов из плавленого кварца.

Окончательная разработка, изготовление и испытания аппаратуры, в том числе термические, были проведены компанией «Артур Д. Литтл» совместно с членами группы по проведению лунного лазерного эксперимента. Компании «Перкинс — Элмер» и «Бокстон — Бил» изготовили исключительно точные уголкового отражатели. Отделение «Аэроспейс системс» компании «Бендикс» приняло на себя обеспечение включения разработанной установки в перечень аппаратуры, предназначенной для проведения лунного эксперимента по программе «Аполлон».

Теоретически нетрудно определить оптимальный размер уголкового отражателя, предназначенного для определения расстояния до Луны. Интенсивность возвращающегося света будет максимальна в том случае, если используется единственный отражатель, идеальный оптически (с учетом эффектов дифракции) и имеющий настолько большие размеры, насколько это допустимо из соображений веса. На практике, однако, приходится принимать во внимание два существенных обстоятельства. Первое состоит в том, что возвраща-

ющийся на Землю луч света от лазера будет смещен в сторону из-за относительного движения Луны и источника света (абберация); второе связано с термическим искажением формы уголкового отражателя, вызванным как прямым нагревом солнечными лучами, так и значительными колебаниями температуры на поверхности Луны (от -170 до $+130^{\circ}\text{C}$).

В результате абберации центр отраженного пучка света смещается примерно на 1,6 км от точки выхода первоначального импульса света с Земли. При использовании уголкового отражателей поперечником более 12 см телескоп, осуществляющий прием сигнала, должен быть из-за этого смещения отделен пространственно от аппарата, дающего импульсы, для того чтобы перехватить хотя бы часть возвращающегося пучка света. Однако для отражателей меньше 12 см в поперечнике дифракционная картина оказывается настолько широкой, что передающий световые импульсы телескоп будет обязательно облучаться хотя бы частью возвращающегося пучка света. Проведенные расчеты показали, что имеются достаточно широкие пределы размеров отражателей (начиная с поперечника примерно 4 см), при которых точность определения расстояния при посылке и приеме сигналов в одном и том же месте почти не зависит от поперечника отражателя, а определяется лишь количеством отражателей.

Чтобы уменьшить до минимума температурные градиенты, которые могли бы исказить дифракционную картину, создаваемую возвращающимся пучком света, мы решили разместить на Луне отражатели наименьшего эффективного размера (~ 4 см в поперечнике), а для увеличения интенсивности отраженного сигнала до приемлемой величины увеличить число отдельных отражателей. Температурные градиенты были уменьшены до минимума тем, что каждый отражатель был на половину своего поперечника заглублен в круглое гнездо (рис. 2). Отражатель крепился в гнезде посредством двух тефлоновых колец, что дополнительно уменьшило передачу тепла к отражателю. Конструкция, к которой крепились отражатели, обеспечивала пассивный тепловой контроль; это достигалось специальной обработкой поверхности, расположением гнезд для отражателей и учетом облучения лучами Солнца. Чтобы увеличить срок работы оборудования и дополнительно уменьшить термические искажения, мы пошли на ослабление интенсивности отраженного сигнала примерно на две трети за счет того, что задние поверхности индивидуальных отражателей не были алюминированы и отражение света происходило лишь за счет внутреннего отражения. Угловые отражатели с размерами менее 4 см давали бы слишком слабый пучок света (из-за дифракционного уширения), что делало бы невозможным его обнаружение на Земле приемником данной площади. Пучок света, отбрасываемый единичным угловым отражателем, расширился бы из-за дифракции до 16 км, пройдя 384 000 км, отделяющие Луну от Земли (рис. 3).

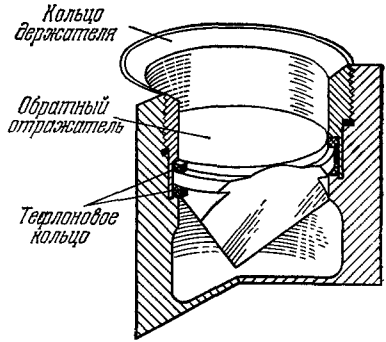


Рис. 2. Для того чтобы отражатели могли выдерживать вибрации и ускорения, а также для максимального уменьшения температурных градиентов в лунных условиях, которые могли бы исказить правильность формы оптических поверхностей, компания «Артур Д. Литтл» разработала специальную оправу для отражателей. Каждый угловой отражатель был утоплен примерно на половину своего 4-см поперечника и через тефлоновые кольца поджимался к раме при помощи оправы из алюминия.

Хотя дело с лазерным отражателем продвигалось вперед, у нашей группы отнюдь не было уверенности, что установка попадет на Луну в ходе полетов по программе «Аполлон». К нашей радости, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) сообщило, что разработанный нами лазерный отражатель будет взят в первый же полет на борт «Аполлона-11». 20 июля 1969 г. миллионы телезрителей наблюдали, как Олдрин выдвинул отражатель из ниши «Орла», отнес его примерно на 20 м от космического корабля и установил отражатель на лунной поверхности (рис. 4). Затем Армстронг, пользуясь рукоятками наклона и поворота отражателя, придал отражателю такой наклон, что его лицевая поверхность стала приблизительно перпендикулярна к воображаемой прямой, соединяющей место прилунения и Землю. Наконец, Армстронг выравнивал отражатель на угол в $1-2^\circ$ в направлении восток — запад, пользуясь тенью, отбрасываемой гномом, укрепленным на основании отражателя. Вся операция заняла около пяти минут.

К моменту посадки «Аполлона-11» несколько обсерваторий США были подготовлены к посылке лазерных импульсов на Луну и попыткам обнаружения отражений. В настоящее время работа продолжается в двух местах. В одном месте применяется 107-дюймовый телескоп

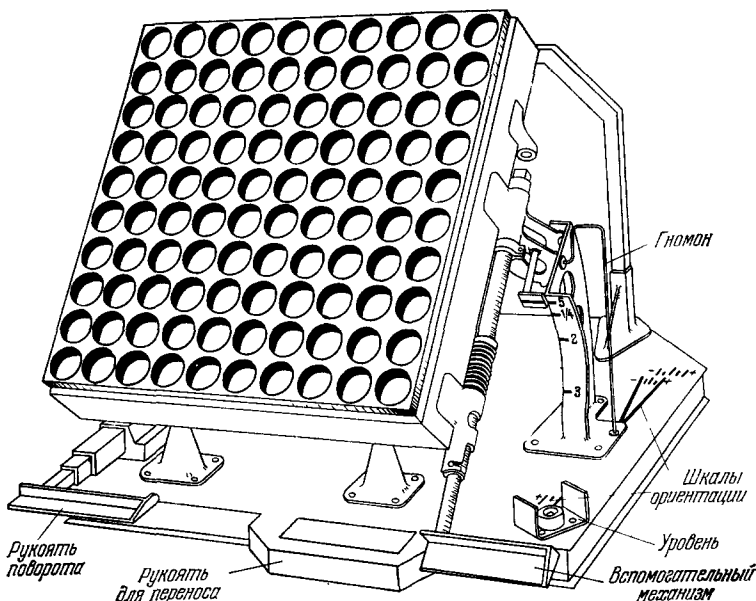


Рис. 3. Лунный лазерный отражатель — это квадрат со стороной 45 см. Он состоит из 100 отдельных уголковых отражателей и может быть направлен под различными углами, что позволяет учесть различие местоположений на Луне. Поскольку он был установлен на Луне близ лунного экватора в точке поверхности, отстоящей на 23° к востоку от субтерральной точки (где Земля находится точно в зените), отражатель был наклонен на 23° . На рисунке наклон больше. Тень от гномона позволяет фиксировать направление восток — запад.

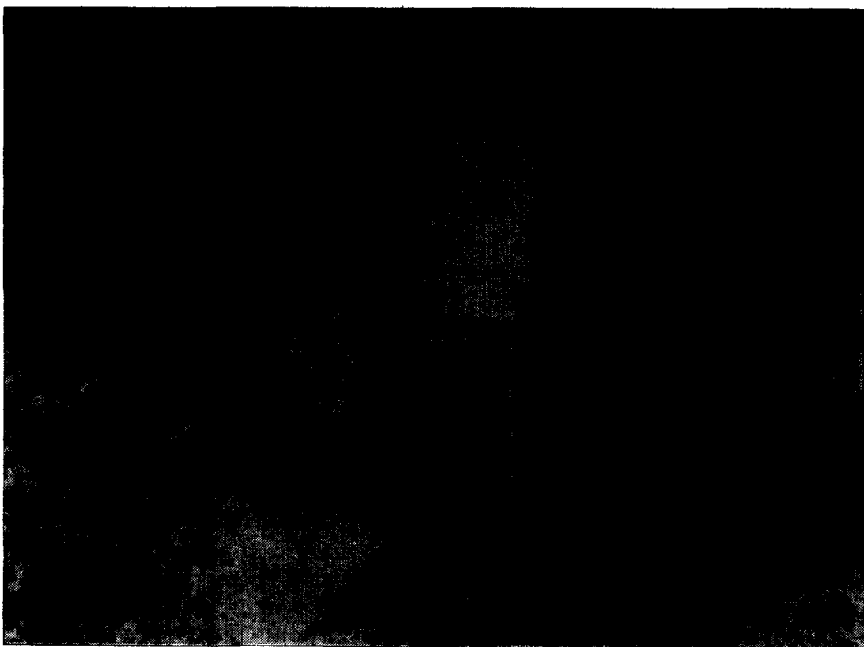


Рис. 4. Этот лунный носильщик — Эдвин Олдрин — был сфотографирован Нейлом Армстронгом, командиром «Аполлона-11». Олдрин удаляется от «Орла»; в правой руке он несет лазерный уголковый отражатель, а в левой — аппаратуру для проведения пассивного сейсмического эксперимента. Потом Армстронг аккуратно установил отражатель на лунной поверхности, примерно в 20 м от посадочной кабины, как показано на рис. 5. Высказывались опасения, что струя газов из взлетного двигателя «Орла» может забросать отражатель пылью, но, к счастью, они не оправдались.

обсерватории Мак-Дональд (Форт Дэвис, Техас), где наблюдения выполняются штатом обсерватории совместно с нашей первоначальной группой. В другом месте работы ведутся Кембриджской исследовательской лабораторией ВВС США, с использованием 60-дюймового, рефлектора с металлическим зеркалом, установленного близ Таксона (Аризона).

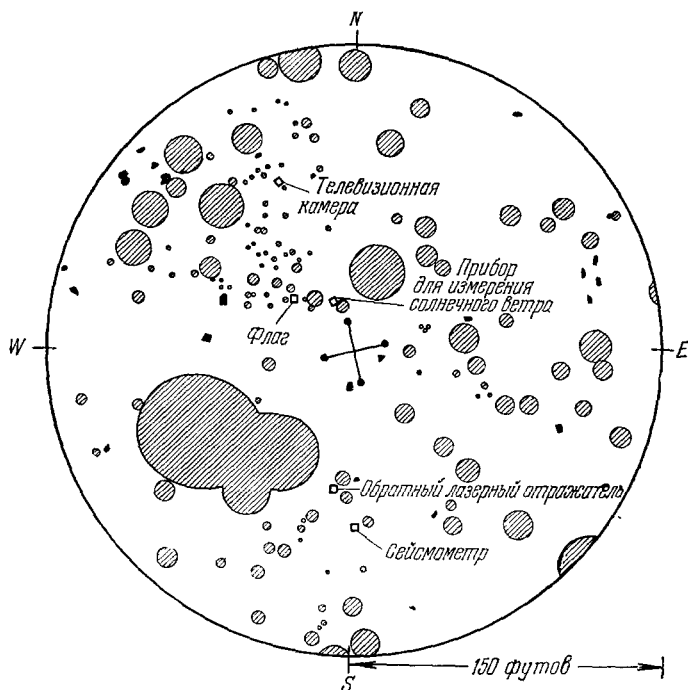


Рис. 5. Район Моря Спокойствия, где совершил посадку «Орел», был картографирован НАСА на основании фотографий, снятых с посадочной кабины (левая половина), и фотографий, сделанных кораблями «Орбитер» и astronautами с поверхности Луны (правая половина). На карте отмечены положение кабины (в центре), а также кратеры (серые пятна), крупные камни (черные пятна) и аппаратура, установленная на Луне.

Первые отраженные сигналы были зарегистрированы третьей станцией, на которой работали сотрудники Уэслейнского университета, Годдардовского центра космических полетов и Калифорнийского университета. Эта группа пользовалась 120-дюймовым телескопом Ликской обсерватории на горе Гамильтон в Калифорнии, который был специально переоборудован для первых попыток обнаружения световых сигналов, отраженных от уголкового отражателя, установленного на Луне.

Хотя эксперимент был задуман таким образом, чтобы отраженные сигналы могли быть приняты телескопами умеренного размера, НАСА обратилась к Ликской обсерватории, располагающей превосходными инструментами, с просьбой принять участие в первых попытках регистрации отраженных сигналов.

Включение в работу 120-дюймового ликского телескопа (второго по величине в США), по мнению НАСА, значительно повышало шансы на успешное обнаружение сигналов, отразившихся от лунного уголкового отражателя. Совершенно очевидно, что чем больше диаметр телескопа, тем большее количество возвратившегося слабого света может быть собрано.

Менее очевидным было то, что чем больше (до определенного предела)

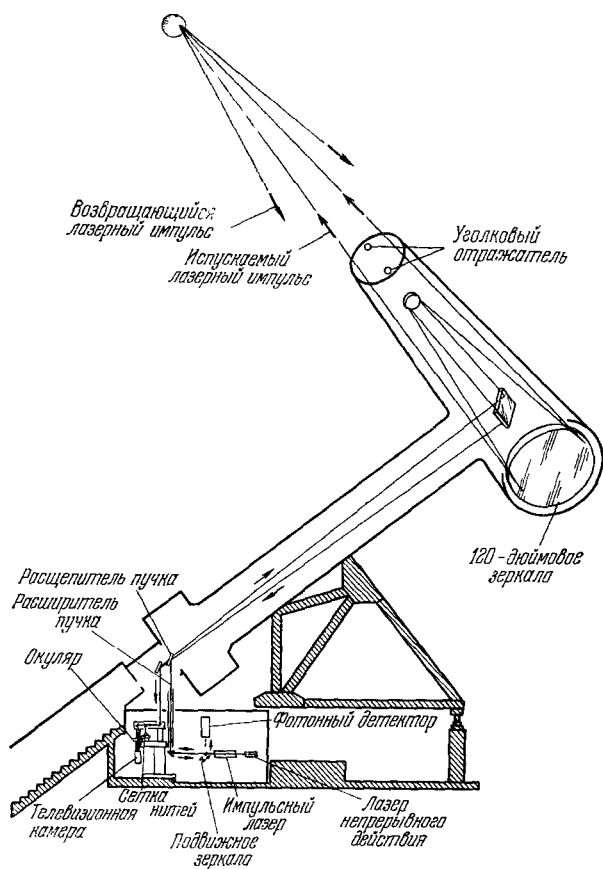


Рис. 6. Эксперимент по измерению расстояний до Луны на Ликской обсерватории при помощи лазера состоит в посылке мощного импульса света от лазера посредством 120-дюймового телескопа и регистрации сигналов, отразившихся от углового отражателя, установленного на Луне командой «Аполлон-11». Оптика телескопа ограничивает расширение светового пучка до круга на поверхности Луны около 1,5 км в диаметре. Та часть вернувшегося света от лазера, которая попадает в телескоп, отражается от поворачивающегося зеркала и попадает на счетчик фотонов. Испущенный импульс света содержит $\sim 10^{20}$ фотонов, из которых через $2\frac{1}{2}$ сек примерно 25 возвращается в телескоп. Малоомощный лазер непрерывного действия, нацеленный сквозь лазер, дающий мощные импульсы, создает луч, образующий постоянную опорную прямую для наведения телескопа совместно с телевизионной камерой и системой сеток нитей, показанных слева внизу. Угловые отражатели, укрепленные непосредственно перед телескопом, перехватывают часть света от лазера и направляют его обратно в оптическую систему, где он накладывается на изображение Луны в системе наведения. Группа на Ликской обсерватории успешно использовала две отдельные лазерные системы.

размер телескопа, тем выше интенсивность света лазера, который может быть сконцентрирован на лунном угловом отражателе и отражен назад на Землю.

Без телескопа расхождение луча лазера таково, что световой импульс, испущенный лазером, расширится до поперечника ~ 500 км за то время, пока он достигнет Луны. Телескоп обычно применяется для того, чтобы увеличить угловые размеры объекта, который мы наблюдаем, однако его действие можно обратить и рассматривать телескоп как инструмент для уменьшения угла расхождения проходящего через телескоп пучка света. Величина, на которую уменьшается расхождение пучка, определяется отношением диаметра телескопа к диаметру лазера. Хотя в принципе размеры пятна света от лазера на Луне с возрастанием диаметра телескопа продолжают уменьшаться, на практике турбулентность в земной атмосфере ограничивает поперечник пятна величиной немногим более $\sim 1,5$ км. Для уменьшения расходимости лазерного луча до указанного предела, который определяется земной атмосферой при хороших условиях, даже мощный рубиновый лазер требует применения телескопа диаметром около 100 дюймов.

В Ликской обсерватории для определения расстояний использовались две различные системы. Каждая включала свой

собственный мощный рубиновый лазер и электронную аппаратуру для обна-

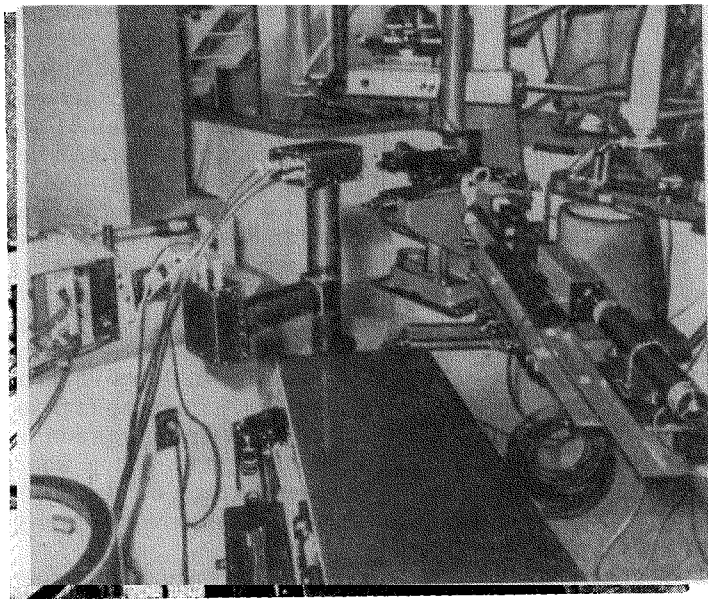


Рис. 7. Экспериментальная установка в подвале Ликской обсерватории под 120-дюймовым рефлексом. Она включает две лазерные системы; систему наведения, предназначенную для направления луча лазера на место посадки астронавтов на Луне, и аппаратуру для обнаружения слабого возвращающегося импульса.

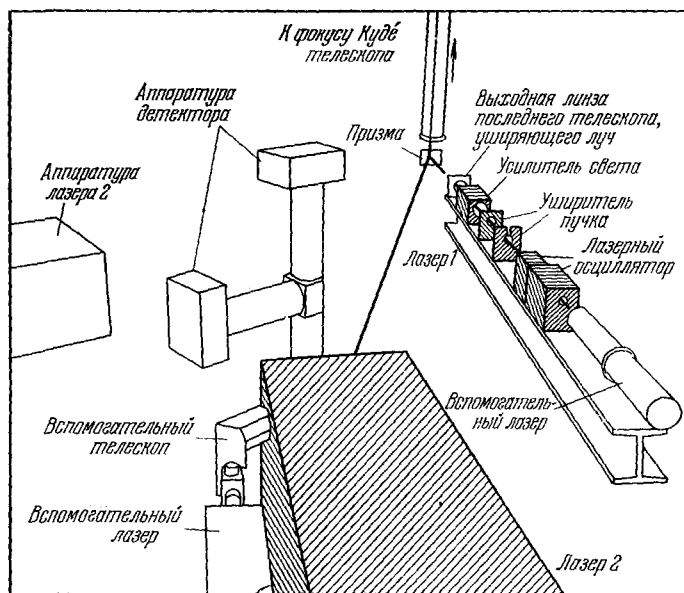


Рис. 8. Аппаратура для определения лунных расстояний на Ликской обсерватории состояла из двух мощных рубиновых лазеров. Один из них (правый) мог давать импульсы дважды в минуту при длительности импульса 10 нсек; второй (в центре на переднем плане) мог давать импульсы 20 раз в минуту при продолжительности импульса 60 нсек. Выход каждого лазера достигал 8 дж в импульсе. С этими лазерами авторы и их сотрудники 1 и 3 августа 1969 г. получили первые отражения от лунного отражателя.

ружения сигнала. Один из лазеров мог давать импульсы 20 раз в минуту. Другой давал импульсы лишь два раза в минуту, но обладал меньшей расходимостью пучка. На выходе каждого лазера устанавливался маленький галилеевский телескоп, который служил для расширения диаметра лазерного луча от $\sim 1,8$ до 5 см. Для луча такого диаметра можно было использовать обычную оптику без риска повредить ее, как могло бы случиться с более интенсивным пучком меньшего диаметра.

После прохождения 5-см галилеевского телескопа (см. рис. 6), установленного перед лазером, луч направлялся вверх посредством призмы и попадал на расщепитель. Призма служила двум целям: она направляла свет на расщепитель и действовала как переключатель двух лазерных систем. Перед расщепителем пучок света диаметром ~ 5 см расширялся посредством специально подобранных отрицательных линз таким образом, чтобы лазерный луч целиком заполнил зеркало 120-дюймового телескопа. Луч покидал телескоп, имея в диаметре 3 м и расширялся на 30 см на расстоянии 80 км. Расщепитель отражал 99% света с длиной волны, соответствующей свету лазера, и был прозрачен для более коротких длин волн. В результате обычный синий и зеленый свет от Луны мог свободно проходить через расщепитель и отражаться от зеркала в систему наведения и гидирования телескопа.

Сигнал, возвращающийся от углового отражателя, проходил в обратном порядке путь, проделанный лазерным импульсом, и в конце концов проходил через выходную линзу 5-см галилеевского телескопа. За этой линзой было установлено небольшое зеркало, которое могло устанавливаться в нужное положение после подачи лазерного импульса и отражать вернувшийся сигнал на детектор. Детектор располагался за диафрагмой, которая уменьшала интенсивность фона — света, отраженного от областей, расположенных в окрестности места прилунения. Кроме того, детектор был снабжен фильтром, который отсекал любое излучение, кроме света с определенной длиной волны, испущенного лазером (рис. 7, 8).

В системе наведения использовался сине-зеленый участок света Луны, который проходил через расщепитель и создавал изображение, необходимое для наведения телескопа на место прилунения. На изображение Луны накладывались светящиеся изображения трех сеток нитей, и затем оно проецировалось на экран обзорной телевизионной камеры. Путем установки сетки нитей на известные положения лунных кратеров и последующим смещением телескопа таким образом, чтобы изображения кратеров наложилось на изображение нитей, мы добьемся того, что телескоп будет точно направлен на место посадки — достаточно плоский и почти лишенный каких-либо деталей рельефа район Луны (рис. 9).

Перед 120-дюймовым зеркалом телескопа было установлено несколько маленьких уголковых отражателей. Они перехватывали часть пучка света, исходившего из телескопа, и отражали его обратно по направлению, в точности параллельному выходящему из телескопа пучку света. При испускании лазером светового импульса около 1% этого импульса проходило через расщепитель и попадало в систему наведения. Этот свет создавал яркое пятно на экране телевизора и точно указывал точку Луны, на которую был направлен телескоп в момент импульса лазера. Устанавливая нити сетки на заранее намеченные кратеры и затем прослеживая местоположение вспышек, возвращаемых уголковыми отражателями, укрепленными на телескопе, возможно навести телескоп с ошибкой по поверхности Луны меньше, чем в 1,5 км. Применение обзорной телевизионной системы обеспечивало полную безопасность глаз человека, подправляющего движение телескопа для того, чтобы удерживать место посадки в пределах пятна света от лазерного импульса на лунной поверхности.

Кроме того, телевизионная система служила для увеличения контраста лунной поверхности. В дневное время на телевизионном экране были различимы такие детали поверхности, которые непосредственно не были видны глазом на изображении лунного диска.

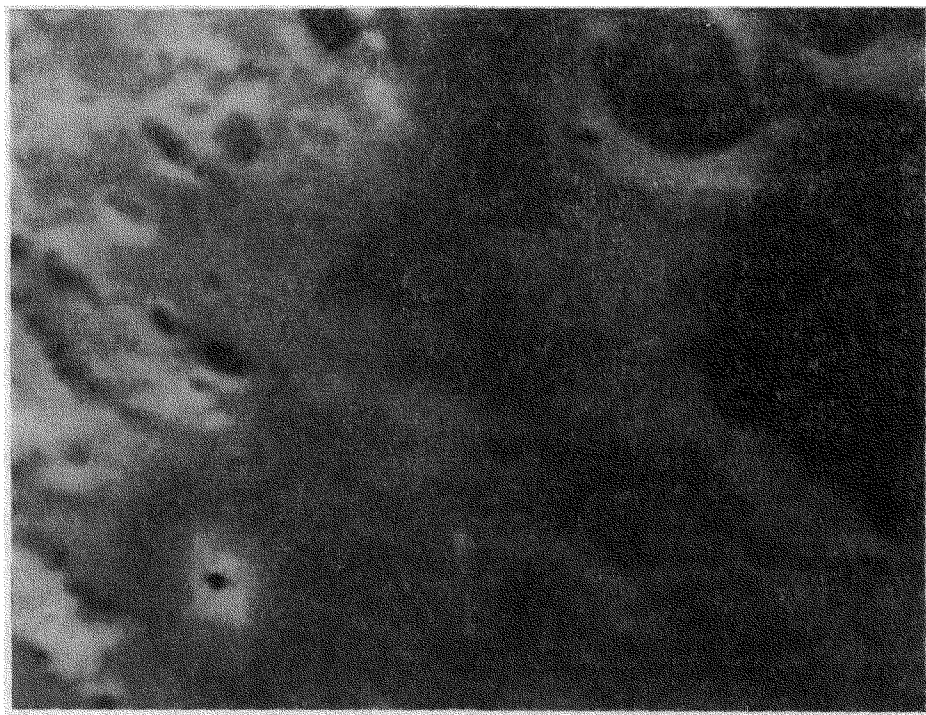


Рис. 9. Невидимой целью при эксперименте по определению расстояния до Луны был уголкового отражатель на месте посадки «Аполлона-11» в Море Спокойствия. Система наведения, при помощи которой лазерный луч посредством линского телескопа направлялся на лунный отражатель, включала телевизионную камеру. На фотографии — изображение на телевизионном экране, снятое в то время, когда космонавты еще находились на Луне. Место посадки определялось по отношению к известным кратерам. Когда телескоп направлялся таким образом, что крест нитей попадал на один из этих кратеров, Мольтке (нижний слева), прицельная сетка нитей оказывалась над предполагаемым положением места посадки (в центре внизу), примерно в 40 км от кратера. (В то время, когда делался этот снимок, данные еще не были уточнены, из-за чего прицельный крест нитей был слегка сдвинут от правильного положения.) Чтобы подтвердить правильность наведения телескопа, небольшая часть луча лазера возвращалась в телевизионную камеру уголковыми отражателями, закрепленными на телескопе, так что на прицельный крест нитей при каждом импульсе лазера накладывалось яркое пятно.

Для успешного проведения эксперимента потребовалось выявить и разрешить множество проблем. Одна из неожиданных трудностей состояла в том, что при заходе на посадку в аэропорты, расположенные в районе Сан-Франциско, самолеты обычно пролетали над Ликской обсерваторией. В целях безопасности Федеральное авиационное агентство в периоды операций с лазерами направляло самолеты по другим маршрутам. Первой ночью, которую мы выбрали для лазерной локации Луны, была ночь самой посадки, 20 июля 1969 г. К сожалению, первоначальные данные о расстоянии и положении места посадки имели недостаточную точность. Более того, Луна была так низко над горизонтом, что в нашем распоряже-

нии было всего около часа для довольно бессистемных поисков отражателя, прежде чем Луна опустилась за горизонт. Поиски оказались неудачными.

Бесплодными оказались и последующие ночи. Луна смещалась по своей орбите к югу, и с каждым днем оказывалась все ниже над горизонтом

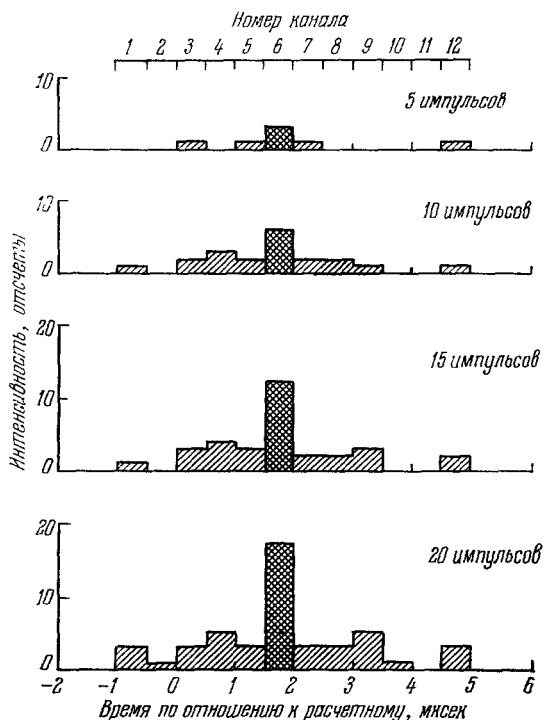


Рис. 10. Отождествление отраженных лазерных сигналов осуществлялось путем подразделения выхода фотонного детектора по времени на 12 каналов, охватывающих предсказанное время возвращения сигнала, и наблюдений, насыщается ли один из каналов быстрее, чем другие. Ширина каждого канала могла меняться от 0,25 до 2 мсек. В иллюстрируемом эксперименте, выполненном в августе 1969 г. на Ликской обсерватории, ширина каждого канала была 0,5 мсек. Один из каналов, № 6, насыщавшийся быстрее, чем другие, подтверждал тем самым, что регистрируются возвращающиеся фотоны, отразившиеся от уголкового отражателя на Луне.

10 нсек. Возвращающиеся сигналы могли отражаться только от уголковых отражателей, установленных в Море Спокойствия.

Метод подсчета возвращающихся импульсов состоял в следующем. Фотону, движущемуся со скоростью 300 000 км/сек, требуется примерно $2\frac{1}{2}$ сек для путешествия к Луне и обратно. В соответствии с этим через $2\frac{1}{2}$ сек после импульса, направленного на Луну (точный промежуток времени устанавливался для каждого импульса в соответствии с предвычисленными расстояниями, рассчитанными Дж. Д. Мюлхолландом из Лаборатории реактивных двигателей), один за другим последовательно включались 12 счетчиков для подсчета любых импульсов, которые появлялись на фотодетекторе. Полное время, в течение которого каждый счетчик был чувствительным, могло меняться от 0,25 до 2 мсек. Ввиду этого полное время регистрации отраженных фотонов могло меняться от 3 до 24 мсек.

так что турбулентность атмосферы все больше портила изображения. Фаза Луны росла, а это увеличивало паразитный фон лунного света, попадающего в детекторы. Наконец, сами лазеры, которые работали на пороге надежности, требовали постоянного внимания.

Через четыре дня после посадки на Луну, не обнаружив никаких отраженных сигналов и учитывая, что Луна располагается неблагоприятно — слишком низко над горизонтом, мы решили не проводить измерений следующие пять суток и использовать время для контроля аппаратуры и проверки каждой детали. Первого августа измерения на Ликской обсерватории были возобновлены с новыми значениями координат места посадки, полученными из Центра космических полетов НАСА в Хьюстоне. Первые возвращающиеся от отражателя на Луне сигналы были зарегистрированы в 2 час 00 мин 1 августа. Импульсы непрерывно посылались всю оставшуюся часть ночи (через каждые 30 сек) при энергии на выходе от 7 до 8 дж и продолжительностью импульса ~

За 24 мксек свет проходит 7,2 км; за 3 мксек он проходит лишь 900 м. Таким образом, чтобы быть уверенным, что мы зарегистрировали возвращающийся сигнал, нам необходимо знать удвоенное расстояние до Луны в любой момент времени с точностью, по меньшей мере заключенной между указанными пределами. Последовательность счетчиков может быть центрирована на предполагаемое время возвращения отраженного сигнала. Солнечный свет, рассеянный от лунной поверхности, образует фон, который медленно и в случайной последовательности насыщает все 12 каналов счетчиков. Однако если луч лазера точно направлен на угловой отражатель, а промежуток времени подобран правильно, один из каналов будет постоянно насыщаться быстрее, чем другие (рис. 10).

1 августа, в ночь нашего первого успеха, лазер дал 162 импульса девятью сериями, прежде чем было отмечено первое возвращение сигнала.

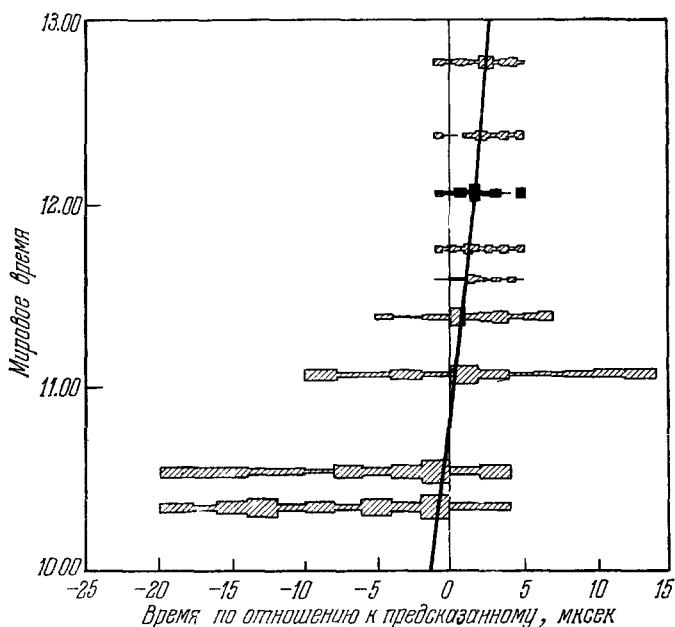


Рис. 11. Отклонение от предсказанного времени возвращения сигналов, отмеченное 1 августа 1969 г. при определении расстояния до Луны по девяти первым зарегистрированным возвратившимся импульсам, казалось загадочным. Каждая горизонтальная полоса на рисунке представляет отдельное измерение; толщина каждого сегмента полоски соответствует числу фотонов, зарегистрированных в каждом из 12 каналов детектора. Измерение, показанное на предыдущем рисунке и выполненное в 12 час 0,3 мин всемирного времени, отмечено штриховкой. Наклонная прямая, проведенная через каналы с наибольшим количеством зарегистрированных фотонов, показывает, что действительный момент возвращения отраженных сигналов сначала был раньше, чем предвычисленное время (вертикальная прямая), а затем сместился больше чем на 2 мксек. Тем самым было установлено, что 120-дюймовый ликский телескоп находится на некотором расстоянии (~ 540 м) от того положения, на основе которого предвычислялось время возвращения сигналов. Когда поправка на местоположение была учтена, фактические и предвычисленные времена совпали друг с другом.

Заключительная серия из 120 импульсов, после различных регулировок, проведенных на месте, дала 100 возвратившихся сигналов, превышающих уровень фона. Таким образом, более 80% импульсов создавали различимые возвращающиеся сигналы. В двух сериях мы достигли точности по времени 0,1 мксек; это означает, что мы установили расстояние до Луны с точностью ± 8 м. Однако мы были озадачены кажущимся дрейфом времени возвращения сигнала относительно предвычисленного значения (рис. 11)

Эта загадка разрешилась сама собой, когда мы поняли, что 120-дюймовый телескоп был расположен на некотором расстоянии от места, указанного в «Американском ежегоднике» для Ликской обсерватории. Так важное значение лазерного эксперимента для геофизических измерений было продемонстрировано в первую же ночь.

3 августа в течение 2 часов успешно действовала вторая лазерная система. Данные, полученные на этот раз, дали расстояние до Луны с ошибкой всего ± 6 м. Полученные на Ликской обсерватории результаты показали, что отражатель не был поврежден струей газа от двигателей «Орла» и что он работает в лунных условиях точно так, как предсказывалось. Кроме того, подтверждение точности указания местоположения отражателя на поверхности Луны, а также измерение точного расстояния оказали существенную помощь работе других станций.

В течение месяца отраженные сигналы были успешно зарегистрированы на обсерватории Мак-Дональд и на обсерватории ВВС США близ Таксона. Аппаратура нашей группы на обсерватории Мак-Дональд, которая была установлена сотрудниками Мерилендского университета и Годдардовского центра космических полетов, разрабатывалась в течение нескольких лет для достижения высокой точности при определении расстояний. Недавно тамошняя группа достигла точности определения возвращения сигналов в 2 *нсек* при использовании импульсов длительностью 4 *нсек*. Это соответствует точности определения расстояний ~ 30 см. Некоторая неопределенность значения скорости света не влияет на возможность использования этих результатов, поскольку все астрономические измерения опираются на принятое по международному соглашению значение скорости света 299 792,5 км/сек.

Познакомимся теперь поближе с теми вопросами, на которые возможно получить ответ при помощи продолжительного ряда измерений расстояния до Луны. Очевидным результатом будет значительно более точное определение фактического движения Луны по ее орбите. Связанная с этим теоретическая задача адекватного описания движения Луны входит в число старейших проблем науки. Другой экспериментальный результат — это надежное измерение либрации Луны, т. е. нерегулярных «покачиваний» Луны вокруг своего центра, позволяющих нам обзирать примерно 59% лунной поверхности. Наблюдаемые либрации в основном вызываются эллиптичностью лунной орбиты, но некоторая доля этих движений определяется неравномерностью распределения масс в Луне. Лунный уголковый отражатель позволит резко улучшить измерения либраций Луны и получить данные для более точных расчетов распределения масс в недрах Луны. В свою очередь это позволит нам заглянуть в прошлое Луны.

Другая важная цель — это лучшее изучение Земли. Согласно современным теориям поверхность Земли разделена на ряд блоков, которые перемещаются друг относительно друга. Эти перемещения, по-видимому, могут объяснить дрейф континентов. Например, предполагается, что тихоокеанский блок движется по направлению к Японии со скоростью около 10 см в год. После организации наблюдательных станций на Гавайских островах и Японии измерения лунных расстояний дадут значения долгот этих станций с такой высокой точностью, которая позволит выявить это предполагаемое движение за два-три года наблюдений.

Данные, полученные из измерений расстояний до Луны, дадут также возможность найти положение Северного полюса Земли с точностью около 15 см, что в 5—10 раз лучше, чем известно в настоящее время. Полюс перемещается по поверхности Земли довольно сложным круговым дви-

жением и может за год смещаться приблизительно на 60 м по грубо эллиптической траектории. Механизм возбуждения этих «дрожаний» полюса до сих пор служит предметом дискуссий: нельзя с уверенностью утверждать, состоит ли причина движения полюсов в перемещении атмосферных масс, изменении степени связи между ядром Земли и ее мантией или в перемещениях земной коры. Последняя гипотеза предполагает существование определенной корреляции между смещениями полюса и крупными землетрясениями; вот почему улучшение измерений лунных расстояний может привести к лучшему пониманию землетрясений. Измерение лунных расстояний позволяют также точнее определить скорость вращения Земли, чем это было возможно раньше.

Наконец, повышение точности, связанное с установкой аппаратуры на поверхности Луны, даст возможность снова использовать Луну, как ее прежде использовал Ньютон, в качестве испытательного полигона для проверки теорий гравитации. Мы хотели бы знать, остается ли постоянная гравитации неизменной или медленно убывает со временем, что связано с расширением Вселенной, как предполагает ряд физиков.

Пробным камнем для этих гипотез могло бы послужить тщательное изучение движения Луны. Кроме того, имеется возможность обнаружить некоторые весьма малые, но важные эффекты, предсказываемые общей теорией относительности.

Метод получения интересных научных результатов из точных измерений расстояния до Луны, в принципе, исключительно прост, но на практике необходимо принимать во внимание множество тонких факторов. Рассмотрим для примера простейший случай определения изменений расстояния между Луной и данной наблюдательной станцией за 6-часовой период (рис. 12). После введения различных поправок на относительное движение Луны и Земли за указанный период проблема сводится к определению расстояния наблюдательной станции от оси вращения Земли. Для определения этой величины на практике приходится делать много измерений высоты Луны на небе, и расстояние от оси вращения определяется по амплитуде 24-часовой компоненты. Другие данные о местоположении станции могут быть получены аналогичным путем.

Основная трудность подобной работы состоит в том, что движение Луны нам известно с недостаточной точностью. Подробная аналитическая теория движения Луны была разработана за последние 90 лет Дж. Хиллом.

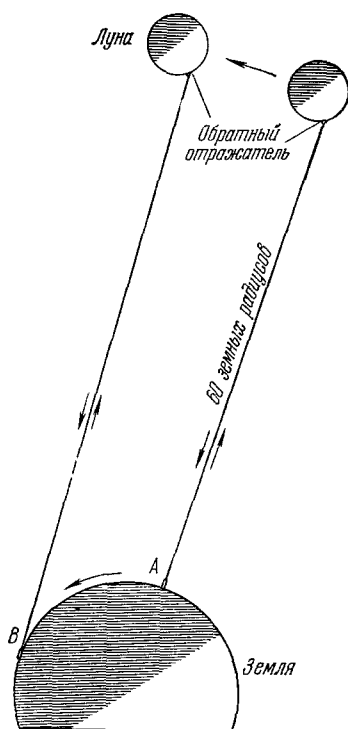


Рис. 12. Простейшая схема эксперимента по определению лунных расстояний может состоять в измерении расстояния до Луны в два момента времени с промежутком в 6 часов. Первое измерение (А) проводится, когда наблюдательная станция пересекает воображаемую прямую, соединяющую центр Земли и отражатель на Луне. Второе измерение выполняется, когда Земля повернется ровно на 90° . Конечно, необходимо принять во внимание движение Луны: за 6 часов она продвинется по своей орбите примерно на 3° . Когда эти поправки будут учтены, различие между двумя измеренными значениями дает расстояние наблюдательной станции от оси вращения Земли.

лом, Э. Броуном и У. Эккертом. Однако возмущения от планет никогда не рассчитывались с такой полнотой, чтобы обеспечить точность в 15 см, соответствующую точности определения расстояний посредством лазера. Ввиду этого лучший путь, по-видимому, лежит в использовании достижений электронной техники для вычисления полного движения Луны посредством прямого численного интегрирования уравнений движения всех тел Солнечной системы.

После выполнения этой работы вычисленное расстояние Луны сравнивается с расстоянием, полученным из лазерных наблюдений. Затем вводятся поправки с тем, чтобы вычисленное значение все теснее приближалось к наблюдаемому. И если теория движения тел в гравитационном поле является правильной, то результаты будут сходиться.

Однако далеко не очевидно, как в описанной процедуре можно отделить информацию о Земле от информации о Луне. Например, можно представить себе, что какое-то неизвестное колебание вращения Земли (или перемещение одного из континентальных блоков) будет интерпретировано как возмущение в движении Луны. Разумеется, здесь не место подробно описывать, каким образом возможно выпутаться из подобного затруднительного положения. Достаточно лишь отметить, что надежные методы разделения геофизических и лунных эффектов все же существуют. Например, данные, полученные с четырех или более разумно размещенных по поверхности Земли наблюдательных станций, позволяют отделить местные нарушения (скажем, дрейф континентов) от движений Земли в целом.

Совершенно очевидно, что для наиболее полного использования лунного отражателя в интересах науки необходимо иметь большое число наблюдательных станций, охватывающих весь мир. Международное сотрудничество здесь не только желательно, но и является неперенным условием использования всех возможностей нового инструмента исследования. Мы были весьма рады узнать, что наши коллеги в СССР, Чехословакии и Японии готовятся к проведению лазерных измерений расстояния до Луны.

Установка на Луне уголкового отражателя командой «Аполлона-11» в июле 1969 г. привела к драматическому изменению возможностей человека измерять расстояние до Луны. Поскольку отражатель уже выдержал без заметных повреждений несколько лунных дней и ночей, мы можем надеяться, что он будет продолжать свою вахту и дальше, на многие годы обеспечив человечество верстовым столбом в космосе.

Примечание при корректуре. Согласно сообщению ТАСС, на советском аппарате «Луноход-1», доставленном на Луну в ноябре 1970 г., был установлен лазерный отражатель, изготовленный французскими специалистами. 5 и 6 декабря 1970 г. в Крымской астрофизической обсерватории при помощи 2,6-метрового телескопа были проведены успешные эксперименты по лазерной локации лунной поверхности в районе стоянки лунохода («Правда» № 345 (19123) от 11 декабря 1970 г.). Проведение аналогичных исследований планируется также на обсерватории Пик-дю-Миди (Франция). (Прим. перев.)

ЛИТЕРАТУРА

1. C. O. Alley, P. L. Bender, D. G. Curie, R. H. Dicke, J. E. Faller, в сборнике *The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors*, ed. by S. K. Rancorn, N.Y., J. Wiley, 1969.
2. C. O. Alley, P. L. Bender, R. H. Dicke, J. E. Faller, P. A. Franken, H. H. Plotkin, D. T. Wilkinson, *J. Geophys. Res.* 70 (9), 2267 (1969).
3. J. Faller, I. Winer, W. Carrion, Th. S. Johnson, P. Spadin, L. Robinson, E. J. Wampler, D. Wieber, *Science* 166 (No. 3901), 99 (1969).