

# **ПРИРОДА**

№ 9, 2002 г.

**Алёшкина Е.Ю.**

## ***Лазерная локация Луны***

© “Природа”

Использование и распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”  
(грант РФФИ 00-07-90172)

[vivovoco.rsl.ru](http://vivovoco.rsl.ru)  
[www.ibmh.msk.su/vivovoco](http://www.ibmh.msk.su/vivovoco)

# Лазерная локация Луны

Е.Ю.Алёшкина

**Л**уна — наш ближайший и пока единственный в Солнечной системе космический сосед, где побывали астронавты. Казалось бы, знания о Луне исчерпывающи — по крайней мере в том, что касается ее видимой стороны. Но это не так: исследования не прекращаются и дают все новую информацию о динамике и физике не только самого спутника, но и Земли.

Среди современных высокоточных астрономических наблюдений, таких как радиоинтерферометрия, лазерная локация спутников, слежение за навигационными искусственными спутниками Земли, особое место занимает лазерная локация Луны. Это единственный активный лунный эксперимент, который продолжается уже более 30 лет после посадок там советских и американских космических аппаратов. Такой продолжительный интерес к нему объясняется междисциплинарным характером результатов, получаемых на основе эксперимента.

## Лунные «осветители»

Луну, как давно известно, мы видим в отраженных солнечных лучах. А если попытаться осветить ее с Земли — конечно, не для того, чтобы что-то рассмотреть, а в це-

© Е.Ю.Алёшкина



*Екатерина Юрьевна Алёшкина, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории эфемеридной астрономии Института прикладной астрономии РАН (Санкт-Петербург). Область научных интересов — селенодинамика и селенодезия, теория движения небесных тел, вращение Земли.*

лях локации? Такая фантастическая на первый взгляд идея родилась в начале 60-х годов минувшего века в группе гравитационных исследований Принстонского университета США [1]. Реальную почву для нее обеспечило то, что к этому времени были созданы принципиально новые источники направленного излучения — лазеры. Для целей лазерной локации в университете Мериленда и Годдардовском космическом центре США было разработано и построено оборудование, которое затем разместили на 2.7-метровом оптическом телескопе обсерватории Макдональд Техасского университета.

Параллельно с 1963 г. работа по созданию аппаратуры для аналогичных наблюдений активно велась в Физическом институте им. Лебедева АН СССР в Москве [2] и во Франции в Политехнической школе Парижа совместно с обсерваторией Пик дю Миди [3].

В 1970 г. НАСА организовало специальную экспериментальную группу по лунной локации (LURE — Lunar Ranging Experiment), и с этого времени начали проводиться регулярные наблюдения в обсерватории Макдональд. Планировалось проводить наблюдения в США и на других станциях, однако попытки оказались не очень удачными.



Рис.1. 2.6-метровый зеркальный телескоп им.Г.А.Шайна Крымской астрофизической обсерватории.

В Японии в астрономической обсерватории Токио совместно с компанией Хитачи было установлено оборудование для лазерной локации на 188-сантиметровом телескопе, где в 1971 г. удалось осуществить сеансы, после чего работы были приостановлены [4] в связи с прекращением финансирования компанией «Хитачи».

В течение 1971—1981 гг. периодические сеансы лазерной локации Луны проводились у нас с использованием 2.6-метрового телескопа им.Г.А.Шайна в Крымской астрофизической обсерватории (рис.1). С 1981 г. регулярные наблюдения стали вестись во Франции в Центре геодинимических исследований CERGA (Centre d'Etudes et de Recherches Geodynamiques et Astrodynamiques) недалеко от Ниццы. Серия успешных наблюдений была осуществлена на Гавайских о-вах в обсерватории Халиакала. В обсерватории Макдональд локационное оборудование дважды меняло свое расположение после модификации лазера и увеличения его мощности, что позволило использовать менее крупные телескопы. Наиболее полными являются

регулярные наблюдения во Франции и в США, которые ведутся и по сей день. Однако понятно, что всего две станции составляют минимальную сеть для использования локационных данных, и, безусловно, необходимо расширение этой сети.

Лазерный импульс, посланный с Земли и отраженный просто от лунной поверхности, оказывается очень слабым, чтобы его можно было зарегистрировать. Поэтому для реализации разработанной программы на лунную поверхность в ходе нескольких экспедиций были доставлены пять уголкового отражателей: в июле 1969 г. — на американском корабле «Аполлон-11»; в ноябре 1970 г. — с помощью советской автоматической лаборатории «Луноход-1», привезенной на космическом аппарате «Луна-17»; в феврале 1971 г. — на «Аполлоне-14»; в июле 1971 г. — на «Аполлоне-15»; в январе 1973 г. — с помощью «Лунохода-2», прилетевшего на «Луне-21» (рис.2).

Каждый лунный отражатель (рис.3) — это панель из небольших уголкового призм, кварцевых (размером 3.8 см) в американских конструкциях и покрытых серебром (размером 10.6 см) — в доставленных «Луноходами». Отражатели с «Аполлонов-11 и -14» содержали по 100 уголкового рефлекторов, с «Аполлона-15» — 300, с «Луноходов» — 14. Отражатели, размещенные на советских станциях, были сделаны во Франции. Еще шесть рефлекторов были изготовлены в СССР, но на Луну не попали в связи с сокращением лунных программ. К сожалению, отражатель с «Лунохода-1» быстро вышел из строя, зато четыре остальных продолжают работать и сегодня.

На основе анализа локационных данных проводится определение и уточнение большого числа селено- и геодинимических параметров. Такими исследованиями занимаются в Лаборатории реактивного движения JPL (Jet Propulsion Laboratory) НАСА и Университете Техаса в США, Центре геодинимических исследований

CERGA и Парижской обсерватории во Франции, в обсерватории Шанхая в Китае, в Институте прикладной астрономии РАН. Чтобы достаточно точно измерять параметры вращения Луны, отражатели на лунной поверхности следовало расположить как можно дальше друг от друга и с возможно большим разбросом по диску. Положение уголкового отражателя на диске показано на рис.4.

Экспериментальный материал можно разделить на три части по точности наблюдений. Первая группа охватывает 1970—1976 гг. и имеет формальную точность регистрации 1 нс. Наблюдения 1976—1986 гг. проводились с точностью 0.5 нс. В последней группе, включающей наблюдения 1986—2000 гг., точность регистрации достигает 0.1 нс.

## Немного подробностей

Техника локации космических объектов позволяет с высокой точностью определять расстояние между станцией наблюдения на Земле и интересующим нас объектом. Для объяснения принципа локации достаточно простой геометрической схемы (рис.5). Эксперимент в данном случае — просто измерение временно́й задержки между испусканием светового сигнала и приемом отраженного. Этот интервал соответствует времени распространения света от лазера на станции до уголкового отражателя на Луне и обратно от него до принимающего сигнал телескопа, т.е. прохождению двойного расстояния от станции до отражателя ( $D$ ). Среднее расстояние Луны от Земли (384 000 км) свет проходит за 1.25 с, т.е. временно́я задержка между посылкой и приемом лазерного импульса составляет 2.5 с. Ясно, что фактическая временно́я задержка зависит от места станции на поверхности Земли ( $R_c$ ), от расположения отражателя на лунной поверхности ( $R_o$ ) и положения Луны на геоцентрической орбите ( $r$ ) в моменты посылки, отражения и приема сигнала.

Рис.2. Модель советской автоматической лаборатории «Луноход-2», работавшей на поверхности спутника в 1973 г.



Рис.3. Панель уголкового отражателя, доставленного на Луну экспедицией «Аполлон-11» в 1969 г.

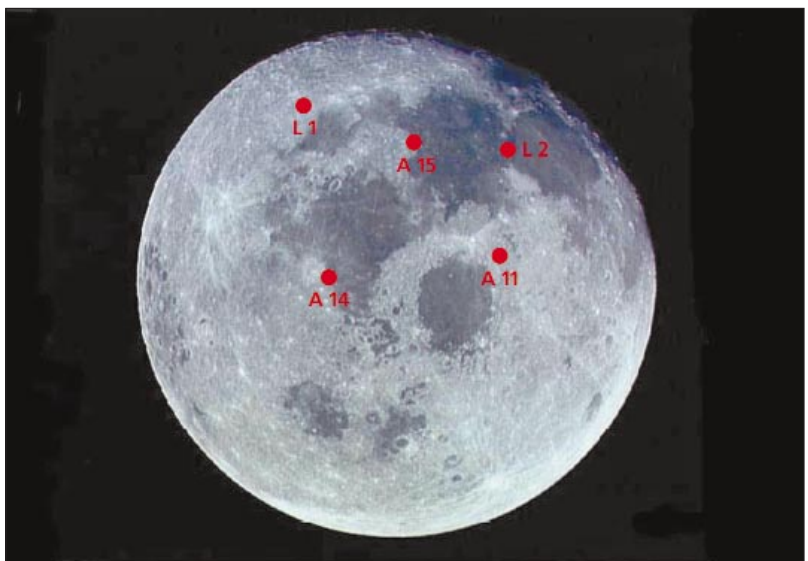


Рис.4. Положение на диске Луны пяти уголковых отражателей, размещенных в 1969—1973 гг.

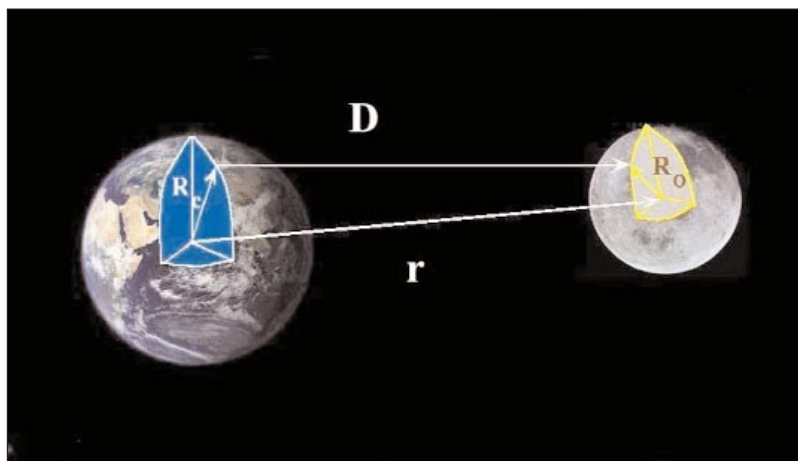


Рис.5. Геометрическая схема проведения локации лунных уголкового отражателей.

В эксперименте использовались лазеры двух поколений с разными характеристиками. Первые рубиновые лазеры излучали световые импульсы с энергией 3 Дж и длительностью 3 нс. Второе поколение лазеров на основе неодима имело хоть и меньшую излучаемую энергию — 120 мДж, но зато и менее длительный импульс — 200 пкс. Более короткий импульс дает улучшение точности локационных данных, которая обратно пропорциональна длительности лазерного импульса. Законы дифракции заставляют расширяться даже прекрасно коллимированный в начале лазерный пучок: на пути к Луне расхождение возрастает до нескольких километров. Уголкового отражатель захватывает и отражает только часть испускаемой энергии, которой тем не менее достаточно, чтобы ее можно было зафиксировать на станции (прием одного фотона требует в среднем 10—20 лазерных «выстрелов»). Отраженный луч также претерпевает расхождение и создает на Земле пятно размером порядка 16 км. За время распространения сигнала телескоп из-за вращения Земли и ее движения по орбите перемещается на расстояние  $\sim 1.6$  км от места излучения, но значительно больший размер пятна позволяет телескопу принимать почти столько же энергии, как если бы его движения не было. Для уменьшения шумов в приемной системе

предпринимаются специальные усилия: используются узкий спектральный фильтр с полосой 1 Е, пропускающий практически только излучение с длиной волны лазера, пространственный фильтр для ограничения поля приема; играет свою роль и то, что мы можем предсказать момент возвращения сигнала. Наблюдения проводятся при высоте Луны над горизонтом  $>20^\circ$ , в моменты прохождения Луны через меридиан, а также за 3 ч до прохождения и через 3 ч после него. Такое расписание наблюдений особенно важно для определения особенностей вращения Земли на основе изменения расстояний Земля—Луна. Помимо этого, для каждого наблюдения фиксируются атмосферные условия: температура, давление и влажность — чтобы иметь возможность использовать математическую модель атмосферы с целью учета задержки в ней лазерного импульса. На достигаемом уровне точности измерения расстояний в несколько сантиметров это очень существенно, поскольку величина атмосферной задержки в наносекундах  $\sim 6/\cos(z)$ , где  $z$  — зенитное расстояние Луны.

Вычисление теоретического времени возвращения света производится с высокой точностью. Считать, что Луна движется вокруг Земли по эллиптической орбите, можно лишь в очень грубом приближении. На самом деле переме-

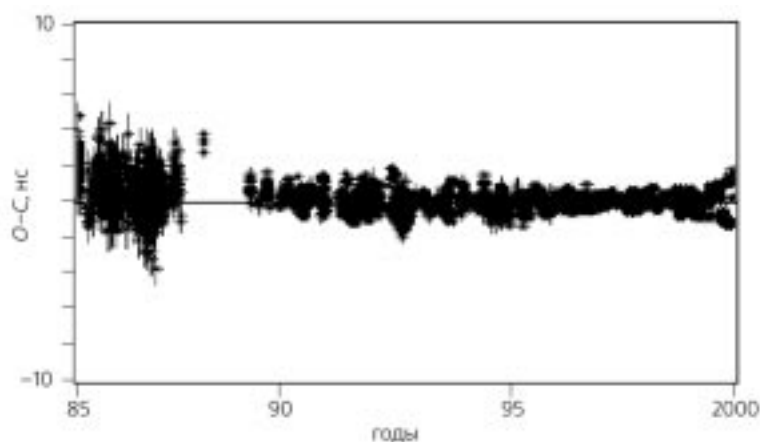
щение Луны в пространстве и ее вращение вокруг своей оси имеют крайне сложный характер. Факторы, оказывающие влияние на ее движение, обусловлены положением Луны в солнечной системе и ее формой. Массивное Солнце расположено достаточно близко к системе Земля—Луна, чтобы оказывать значительное возмущающее действие. Плоскость орбиты спутника наклонена к плоскости эклиптики на угол, среднее значение которого  $5^\circ 08' 43''$ , а ее экватор в свою очередь — на средний угол  $1^\circ 31'$ .

Форма Луны аппроксимируется несимметричным трехосным эллипсоидом.

Сложность теоретического описания лунного движения осознали еще во времена Ньютона. Кроме притяжения Луны «точечными» Землей и Солнцем, которое рассматривается в так называемой задаче трех тел, пришлось учитывать притяжение других планет Солнечной системы. По мере того как возрастала точность и совершенствовались методы наблюдений, теория Луны нуждалась все в больших дополнениях, чтобы на ее основе можно было получить положения спутника сопоставимой с наблюдениями точности. Потребовалась разработка орбитально-вращательной теории Луны, учитывающей большое количество возмущающих факторов: размеры



Рис.6. Невязки (O–C) во временных задержках лазерного импульса для наблюдений в Центре геодинамических исследований Франции (2 нс соответствуют 30 см в расстоянии).



и формы Земли и Луны, особенности их гравитационных полей, силы тяготения со стороны малых планет, силы приливного взаимодействия и диссипации энергии вращения наших объектов под действием этих сил. Для построения таких теорий невозможно использовать аналитические методы. Единственным способом достичь нужной точности остается метод численного интегрирования уравнений движений.

Суть обработки наблюдений лазерной локации заключается в вычислении невязок (O–C) — разностей между наблюдаемой временно́й задержкой светового импульса O и теоретической задержкой C, найденной на основе теории движения Луны. Получаемые отклонения экспериментальных значений от расчетных (O–C) говорят о степени совершенства теории (рис.6). Анализ этих отклонений, например, с помощью решения уравнений методом наименьших квадратов, позволяет определить ошибки теории. В результате удается решать очень широкий спектр задач, которые можно разделить на несколько групп. Сначала обратимся к самым фундаментальным из них.

## На службе космологии

Строго говоря, с самого начала

методика лазерной локации как раз и разрабатывалась, чтобы найти ответы на принципиальные космологические вопросы. К последним можно отнести такие: справедлив ли принцип эквивалентности Эйнштейна в космических масштабах? Изменяется ли величина гравитационной постоянной  $G$  со временем?

Принцип эквивалентности связан с законом равенства гравитационной  $m_g$  и инертной  $m_i$  массы тела и постулирует, что отношение этих масс одинаково для всех тел независимо от их строения. В лабораторных условиях этот принцип проверялся, но для достаточно массивных тел такая проверка не проводилась. На уровне сантиметровой точности в расстояниях, которую дает лазерная локация, существует возможность обнаружения так называемого эффекта Нордвекта (рис.7). Суть его заключается в том, что если принцип эквивалентности нарушается, то лунная орбита вокруг центра масс системы Земля—Луна должна быть смещена в сторону Солнца в радиальном направлении на величину  $\Delta r = \text{Const} \cdot \eta \cdot \cos D$ , где  $D$  — угловое

удаление Луны от Солнца, Const — некоторая постоянная, величину которой дает теория ( $\sim 13$  м). Безразмерный параметр  $\eta$ , определяемый из анализа лазерных наблюдений, характеризует возможное

отклонение отношения гравитационной массы к инертной от единицы ( $m_g/m_i - 1$ ). Недавние исследования [5] не обнаружили нарушения принципа эквивалентности и дали оценку параметра  $\eta = -0.0005 \pm 0.0011$ .

Современные лазерные лунные наблюдения наряду с оптическими, проводимыми на протяжении столетий, использовались для оценки величины  $\dot{G}$  — возможного изменения гравитационной постоянной со временем. Согласно идее Т.Ван Фландерна [6], проверить эту гипотезу можно, используя значение приливного замедления Луны  $\dot{n}_m$ . Если величины  $\dot{n}_m$ , определенные на основе оптических наблю-

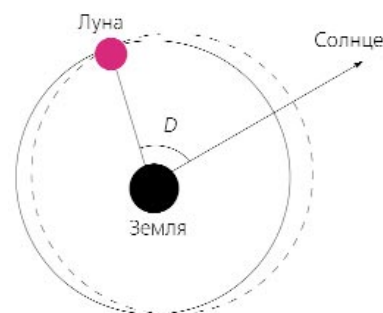


Рис.7. Смещение геоцентрической орбиты Луны вследствие эффекта Нордвекта (пунктирная линия) в случае нарушения принципа эквивалентности.

дений в шкале динамического времени и на основе лазерных наблюдений в шкале атомного времени, имеют расхождение, то его можно интерпретировать как результат изменения  $G$ . Полученная на основе лазерной локации Луны оценка  $\dot{G}G = (-0.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-11}/\text{год}$  [7] в пределах точности результата не подтверждает гипотезу уменьшения гравитационной постоянной.

## Возвращаясь на Землю

В экспериментах по лазерной локации задействованы точки и на Луне, и на Земле, т.е. мы имеем дело с относительным движением обоих тел. Поэтому разумно попытаться извлечь информацию о вращении нашей планеты. И действительно, на основе лазерной локации Луны можно оценивать целый ряд геодинамических параметров: удастся изучать нерегулярность земного вращения, определять постоянные прецессии и нутации, устанавливать изменения координат станций, следить за движением материковых плит. Поддаются оценке эффекты переноса углового момента между твердой Землей и атмосферой, приливная диссипация в океанах, а также влияния последней на вращение Земли.

Локационные наблюдения предоставляют полезную геодинамическую информацию о долгопериодических составляющих вращения Земли. Параметры вращения Земли — это скорость ее вращения и движение полюса. На коротком периоде времени лунный отражатель можно использовать как опорную точку и рассматривать изменение в расстоянии, измеряемом при наблюдении, как следствие вращения Земли. Ось вращения перемещается относительно земной поверхности. Это явление называется движением полюса, и его величина определяется на основе средств космической геодезии с высокой точностью. Из лазерной локации Луны обычно определяется одна из компонент движения полюса, которая вызывает изменения широт станций и поправки

к всемирному времени.

Приливные взаимодействия проявляются в динамических свойствах системы Земля—Луна. Они вызывают как замедление движения Луны по орбите, приводящее к изменению ее среднего движения, так и вековое замедление осевого вращения Земли и Луны. Величины приливной диссипации на обоих объектах определяются из анализа наблюдений лазерной локации. При приливных взаимодействиях существенную роль играет отклонение свойств вещества тела от идеальной упругости или идеальной текучести. Это отклонение характеризуется параметром добротности  $Q$ , который определяет эффективную диссипативную функцию при приливных деформациях, т.е. величину рассеяния вращательной энергии. В зависимости от эластичных свойств вещества происходит смещение приливного горба, возникающего под действием притягивающего тела (рис.8). Смещение сопровождается диссипацией энергии, т.е. необратимым переходом механической энергии вращения в другие виды, в частности в тепловую. Величина  $Q$  связана с фазовым углом запаздывания приливного горба  $\delta_\epsilon$  соотношением:

$Q = 1/\text{tg}(2\delta_\epsilon)$ . Уточнение фазо-

вого угла запаздывания приливного горба  $\delta_\epsilon$  позволяет охарактеризовать диссипацию энергии вращения Земли, обусловленную суммарным действием приливов в океанах и в твердой коре. Приливные взаимодействия в системе достаточно велики и играют важную роль в вопросе ее эволюции. Аналогично есть и возможность уточнить величину угла  $\delta_m$  для Луны, а следовательно, и значения  $Q$  для нее.

В астрометрии использование лазерных измерений совместно с наблюдениями покрытий Луной внегалактических радиоисточников (т.е. исчезновения источников за лунным диском) позволяет уточнить ориентацию динамической

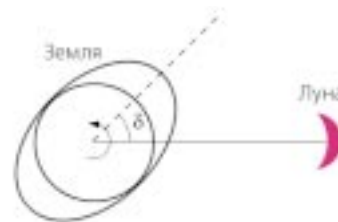


Рис.8. Угол запаздывания приливного горба. Приливной горб при наличии трения выносится вперед вращением Земли, и максимум прилива наступает в более поздний момент, чем при отсутствии трения.

системы координат, используемой при построении теорий движения планет и Луны, по отношению к радиоастрометрической координатной системе, которая основана на высокоточных координатах квазаров. С 1998 г. в Институте прикладной астрономии (ИПА) РАН ведется подготовка программы и разработка методики наблюдений радиопокрываний на телескопах его обсерваторий «Светлое» и «Зеленчукская» [8].

## Новости о Луне

Лазерная локация дает информацию для исследования динамики и структуры Луны, что позволяет развивать наши представления о физической либрации Луны, о ее гравитационном поле, о распределении масс в Луне и ее внутреннем строении, о приливных эффектах.

Луна обладает синхронным вращением, т.е. период ее обращения по орбите вокруг Земли в среднем совпадает с периодом оборота вокруг своей оси. Поскольку Земля со спутником представляют собой сложную взаимодействующую двойную систему, орбитальное движение Луны не может быть представлено с хорошей точностью без учета особенностей ее вращения. Физическая либрация характеризует отклонение осевого вращения Луны от равномерного, описываемое тремя известными законами Кас-

сини. Лазерные наблюдения позволяют уточнять параметры физической либрации, в которой в свою очередь можно выделить две составляющие — вынужденную и свободную. Последняя аналогична земной и может быть обусловлена неэластичностью реакции лунного вещества на приливы, вязким трением на границе твердой мантии и жидкого железного ядра, а также падением крупных метеоритов.

Вопрос о наличии тяжелого ядра у Луны долгое время оставался открытым. Сегодня с большой степенью достоверности можно говорить о существовании такого ядра, и верхний предел его диаметра оценивается в 400 км. Теоретическое ограничение на размеры тяжелого железного ядра накладывает величина относительного момента инерции Луны  $I = C/MR^2$  (где  $C$ ,  $M$  и  $R$  — главный осевой момент инерции, масса и радиус Луны соответственно). Из совместного использования данных лазерной локации и измерений доплеровских сдвигов для искусственных спутников Луны [5] определено значение  $I = 0.3935 \pm 0.0011$ . Теоретическое значение для случая однородной Луны со средней плотностью  $3.4 \text{ г/см}^3$  составляет 0.4, а наличие тяжелого ядра плотностью  $8 \text{ г/см}^3$  с радиусом 700 км уменьшает это значение до 0.391. По-видимому, плотность реального ядра имеет среднее значение, и достоверность оценки в 400 км подтверждается также сейсмическими данными, полученными в ходе проведения искусственных лунотрясений. Диссипация вращения Луны обусловлена двумя факторами: с одной стороны, приливами в твердом теле Луны, а с другой — взаимодействием жидкого ядра и твердой мантии, которое также может быть оценено из анализа локационных наблюдений.

Как устроена Луна, каково там распределение масс, есть ли ядро — вопросы, тесно взаимосвязанные; для ответа на них нужно знать значения чисел Лява для Луны. Три числа Лява  $k_2$ ,  $h_2$ ,  $l_2$  опи-

сывают пластические свойства лунного вещества. Число  $k_2$  характеризует изменение гравитационного потенциала Луны из-за приливного воздействия Земли и Солнца и учитывается в уравнениях орбитально-вращательного движения при численном интегрировании. Числа  $h_2$  и  $l_2$  определяют величину смещения из-за приливов точки поверхности Луны в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно и учитываются при редукации наблюдений (т.е. при внесении поправок на влияние атмосферы, на движение материковых плит и приливов в твердой земле, на переход от небесной системы координат к земной и т.д.).

Задачи уточнения координат точек на лунной поверхности в ближайшее время будут важны не только для фундаментальной науки, но и в практическом отношении, при построении и уточнении лунных карт. Для построения селенодезических опорных сетей наиболее удобна селенодинамическая система отсчета, оси которой совпадают с главными осями инерции Луны. Практическая реализация селенодезической системы — это координаты некоторой совокупности точек лунной поверхности, определяемые из наблюдений. На сегодняшний день эта система координат задана четырьмя опорными точками — лунными отражателями. Лазерная локация позволила определить их координаты с точностью, на несколько порядков превышающей все предшествующие методы. Например, координаты отражателей определены с точностью до 0.1 м (табл.1), в то время как методы наземной оптической астрономии, а именно — определение координат кратеров

Луны на основе ее фотографий на фоне звезд, дают точность вдоль поверхности до 500 м, а в направлении Земли до 2 км [9]. Однако следует учитывать: хотя расположение отражателей на лунной поверхности достаточно удачно, но, как видно на рис.4, все четыре опорные точки практически находятся в северном полушарии. Таким образом, точность селенодезической системы координат в южном полушарии ниже. Кроме того, из анализа локационных данных не удастся уточнить координаты всех четырех отражателей одновременно, и один из них обычно фиксируется.

## Насколько предсказуема Луна?

Совершенствование теорий движения и вращения Луны, т.е. возможность более точного предсказания положения Луны в пространстве, а значит, и видимого ее положения на небе, — это задача, которую на протяжении долгого времени решают астрометрия и небесная механика. Существует большое число теорий движения Луны, которые в той или иной степени учитывают различные эффекты и используют разные модели ее строения, отталкиваясь от тех или иных наборов параметров. Процесс развития теорий, увеличения учитываемых в них возмущающих факторов и соответственно их точности представлен диаграммой на рис.9. Сегодня самой точной и широко используемой во многих национальных астрономических ежегодниках считается теория движения больших планет и Луны DE403/LE403, разработанная в Лаборатории реактивного движения

Таблица 1

Координаты отражателей на поверхности Луны в селенодинамической системе отсчета

Отражатель	X (км)	Y (км)	Z (км)
с «Аполлона-11»	1591.955	690.724	21.005
с «Аполлона-14»	1652.697	-520.972	-109.729
с «Аполлона-15»	1554.675	98.120	765.007
с «Лунохода-2»	1339.349	801.893	756.360



(США) JPL [10]. Она построена на основе численного интегрирования уравнений движения больших планет, астероидов, Луны и лунных либраций на интервале в 600 лет (1600—2200).

О степени правдоподобности теорий судят по их предсказательной способности. Современные теории позволяют предсказывать движение Луны с высокой точностью. Например, моменты наступления солнечных или лунных затмений вычисляются с точностью до сотых долей секунды, а вероятные отклонения в моментах реальных затмений в основном связаны не с теориями движения, а с неровностями лунного края, которые могут достигать 2'', что соответ-

ствует 4 с времени. Иначе говоря, мы сегодня можем утверждать, что на коротких в астрономических масштабах интервалах времени, охватывающих десятки лет, мы знаем положение Луны практически точно. Если же говорить о более значительных промежутках времени в столетия и тысячелетия, то в этом случае можно оценивать не «абсолютную» точность теорий, определяемую из сопоставления с наблюдениями, а их внутреннюю

точность. Последняя для численных теорий контролируется сравнением результатов интегрирования в разном направлении — вперед и назад — на нужном интервале времени. На этой внутренней точности сказываются как ошибки самого математического метода численного интегрирования, так и неопределенность значений тех постоянных, которые используются в интегрируемых уравнениях. Понятно, что точность теоретических предсказаний ухудшается при экстраполяции на интервал времени вне рамок имеющихся наблюдений. В случае Луны, например, для интервала времени лазерных наблюдений точность вычисления долготы составляет  $\sim 0.005''$ . Вне

этого интервала ошибка в долготе Луны накапливается из-за возможной неточности одной из постоянных интегрирования — значения приливного замедления  $\dot{l}_m$ , значение этой ошибки за тысячу лет может достигать нескольких десятков секунд дуги, что соответствует ошибке в расстоянии в десятки метров.

В России работа по анализу данных лунной локации и их использованию на протяжении дол-

гого времени велась в Институте теоретической астрономии АН СССР [11]. В ИПА РАН построение численной теории Луны и ее уточнение на основе локационных наблюдений проводятся с 1995 г. группой профессора Г.А.Красинского. На начальном этапе с помощью численного интегрирования была построена теория орбитально-вращательного движения Луны без учета приливных взаимодействий, и на основе локационных наблюдений уточнялось приливное замедление Луны [12].

Анализ лазерных наблюдений 1970—1995 гг. позволил построить промежуточную теорию, представляющую современные наблюдения с формальной точностью для остаточных невязок 2 нс, что соответствует 30 см в расстоянии от станции до отражателя. Позднее в связи с необходимостью улучшения динамической модели и расширением наблюдений была проведена работа по построению уточненной эфемериды Луны (т.е. численных значений геоцентрических координат и либраций), с учетом ряда дополнительных факторов при моделировании возмущающих сил. Эта работа велась в рамках построения единой теории движения больших планет и Луны ЕРМ-2000, осуществляемой в лаборатории эфемеридной астрономии ИПА РАН [13, 14]. При построении теории динамическая модель в уравнениях движения включала помимо главных дополнительные возмущающие силы: притяжение 300 крупнейших астероидов и приливное взаимодействие в системе Земля—Луна. В уравнения Эйлера для физической либрации были включены по сравнению с предшествующей теорией приливные возмущения вращения Луны, обусловленные следующими факторами: изменением потенциала и моментов инерции Луны, во-первых, из-за приливов, вызванных притяжением Земли и Солнца, а во-вторых, вследствие сжатия под действием центробежной силы; наличием диссипации — запаздывания приливов, вызванного неупругими свойствами тела Луны. Представление наблюдений на 30-летнем

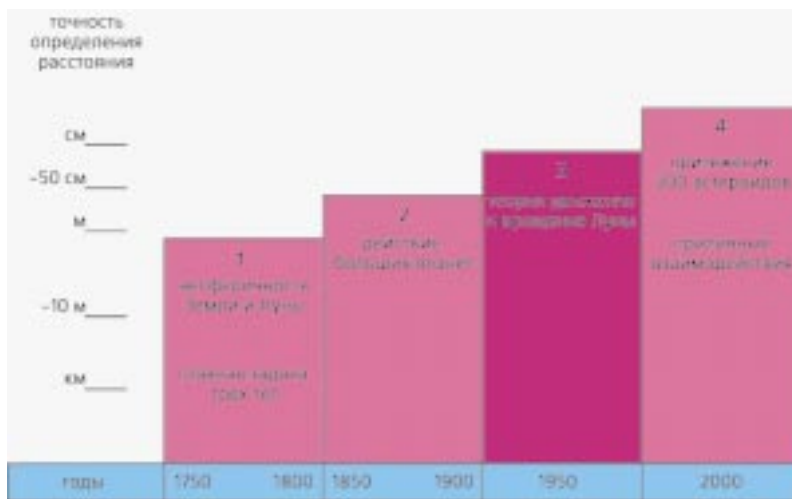


Рис.9. Совершенствование теорий движения Луны по мере увеличения учитываемых в них возмущающих факторов. 1 — теории А.К.Клеро (1747), Ж.Л.Д'Аламбера (1756), П.С.Лапласа (1802); 2 — теории П.А.Ганзена (1857), Ш.Э.Делоне (1862), С.Ньюкома (1875), Э.У.Брауна (1919); 3 — теории У.Эккерта (1952), К.Остервинтера и Ч.Козна (1972); 4 — современные численные теории LE403 (1995),

Таблица 2

Число экспериментальных значений времени задержки, полученных с помощью различных отражателей в разных обсерваториях

Станция Интервал	McDonald 1970—1985	MLRS 1986—1988	MLRS2 1988—2000	Haleakala 1985—1990	CERGA 1984—2000	Всего
Отражатель						
с «Аполлона-11»	468	10	156	20	730	1384
с «Аполлона-14»	494	26	189	23	648	1380
с «Аполлона-15»	2349	236	1746	633	5959	10923
с «Лунохода-2»	131	3	12	18	262	426
Всего	3442	275	2103	694	7599	14113

интервале дает определение расстояния от станции до отражателя с точностью до 3—5 см, при этом уточняются значения нескольких десятков параметров.

Статистика использованных в анализе данных лазерных наблюдений Луны приведена в табл.2.

В результате проведенного анализа с использованием новой теории были уточнены значения основных селенодинамических параметров.

Получена оценка фазового угла запаздывания приливов на Земле  $\delta_e = (9004.33'' \pm 2.61'') = 0.04365 \pm 0.00001$  и соответствующего ему значения приливного замедления Луны в расчете на столетие в квадрате  $\dot{n}_m = -(26.4 \pm 0.7)''/ст^2$ .

Были уточнены коэффициенты Стокса разложения лунного гравитационного потенциала по сферическим функциям. На сегодняшний день существует несколько десятков различных моделей лунного гравитационного поля, полученных по различным данным. Уточнение этих моделей особенно важно для планирования полетов космических аппаратов. Как показывают исследования, гравитационное поле Луны сложнее и неоднороднее земного, его гармоники убывают не так быстро. Существенной компонентой лунного потенциала является его вторая гармоника, которая отражает отклонение тела от гидростатического равновесия. Она включает пять составляющих: зональную  $C_{20}$ , две секториальных

$C_{22}$ ,  $S_{22}$  и две тессеральные  $C_{21}$ ,  $S_{21}$ . Важным результатом проведенного анализа лазерных наблюдений оказалось уверенное определение гармоник  $C_{21}$ ,  $S_{22}$ , до этого полагаемых равными нулю. Эти значения характеризуют небольшие отклонения осей используемой системы координат от главных осей инерции Луны.

Приведем полученные величины:

$$C_{20} = (2.02351 \pm 0.000013) \cdot 10^{-4},$$

$$C_{21} = (0.0175 \pm 0.0007) \cdot 10^{-7},$$

$$C_{22} = (2.2699 \pm 0.00006) \cdot 10^{-5},$$

$$S_{22} = (0.0017 \pm 0.0001) \cdot 10^{-7}.$$

Величина числа Лява  $k_2$  для Луны была найдена равной 0.0205, что подтверждает другие аналогичные определения. Угол запаздывания приливов на Луне оценивается из анализа наблюдений величиной  $\delta_m = (9204.4'' \pm 17.2'') = 0.0446 \pm$

$\pm 0.0001$ , что соответствует значению параметра, характеризующего диссипацию вращательного движения Луны,  $Q_m = 11.18$ . Это удивительно низкое значение, поскольку для твердых планет типичное значение  $Q$  имеет порядок 100. Земля, имеющая  $Q = 11.5$ , представляет собой исключение, по-видимому, из-за наличия в первую очередь значительного трения в мелких морях, в то время как для Луны такая величина  $Q$  не совсем понятна на сегодняшний день.

## Не останавливаться на достигнутом!

Дальнейшее уточнение теорий и накопление наблюдательного материала позволяет определять значения тех или иных физических характеристик с возрастающей точностью и на основе новых уточненных значений делать более обоснованные выводы о движении и строении Луны. Это особенно важно, поскольку данные о лунном строении являются в основном косвенными (если не считать тех краткосрочных экспериментов, которые проводились во время реализации лунных программ), и чем точнее определяемые характеристики, тем более достоверны наши заключения. Луна — богатейшая лаборатория и великолепный полигон для будущих исследований. Отсутствие атмосферы, т.е. условия практически полного вакуума, — это прекрасная возможность для проведения астрономических наблюдений и различных физических и химических экспериментов. Поэтому как дистанционные наблюдения, так и непосредственные исследования на поверхности в будущем принесут еще много новой информации. ■

## Литература

1. *Alley C.O., Bender P.L., Dickey R.H. et al.* // J. Geophys. Res. 1965. V.70. № 9. P.2267—2269.
2. *Кокурин Ю.Л.* Лазерная локация Луны // Тр. ФИАН им.Лебедева. 1976. Т.91.
3. *Orszag A., Rosch J., Calame O.* La station de telemetre laser de l'observatoire du Pic-du-Midi et l'acquisition des cataphotes francais de Luna 17 // Space Research XII / Eds S.A.Bowhill, L.D.Jaffe and M.J.Rycroft. Berlin, 1972. V.1. P.205—209.
4. *Tachibana A., Yamamoto Y., Takatsuji M. et al.* A preliminary system of lunar ranging // Space Research XII / Eds S.A.Bowhill, L.D.Jaffe and M.J.Rycroft. Berlin, 1972. V.1. P.187—195.
5. *Dickey J.O., Bender P.L., Faller J.E. et al.* // Science. 1994. V.265. P.482—490.
6. *Van Flandern T.C.* IAU Coll. 63 / Ed. O.Calame. Dordrecht, 1982. P.207—212.
7. *Алешкина Е.Ю., Красинский Г.А., Питьева Е.В. и др.* // Успехи физ. наук. 1987. Т.151. Вып.4. С.720—724.
8. *Алешкина Е.Ю.* Предварительная программа наблюдений покрытий Луной квазаров // Проблемы современной радиоастрономии. СПб., 1997. Т.2. С.270.
9. *Алешкина Е.Ю., Красинский Г.А., Рахимов Л.И. и др.* Уточнение селенодезической системы координат из обработки крупномасштабных снимков Луны // Тр. ИПА РАН. Сер. Астрометрия и геодинамика. 1998. Вып.3. С.88—95.
10. *Standish E.M., Newhall X.X., Williams J.G., Folkner W.M.* JPL planetary and lunar ephemerides, DE403/LE403 // IOM 314.10-127. Pasadena, 1995.
11. *Бойко В.Н., Фурсенко М.А.* Лазерная локация Луны // Препринт ИТА РАН, 1994. №36.
12. *Алешкина Е.Ю., Васильев М.В., Красинский Г.А.* Некоторые результаты анализа лазерных наблюдений Луны 1970—1995 гг. // Тр. ИПА РАН. Сер. Астрометрия и геодинамика. 1997. Вып.1. С.262—274.
13. *Питьева Е.В.* Новая численная теория движения планет ЕРМ98 // Тр. ИПА РАН. Сер. Астрометрия и геодинамика. 1998. Вып.3. С.5—23.
14. *Алешкина Е.Ю., Васильев М.В., Красинский Г.А.* Построение численной теории орбитально-вращательного движения Луны с учетом приливных эффектов на основе лазерных наблюдений // Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века. СПб., 2000. С.235—237.