

Занимательная Наука

Павлов Дмитрий Алексеевич

ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ ЛУНЫ: НАУЧНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ В 40 ЛЕТ

Статья описывает историю лазерной локации Луны от её возникновения до наших дней. Этот уникальный научный эксперимент, длящийся более 40 лет, позволяет вычислять положение нашего спутника с поразительной точностью. Научные данные, накопленные за время эксперимента, во-первых, позволяют прогнозировать орбитально-вращательное движение Луны на месяцы и даже годы вперёд (что важно для спутниковой навигации на Земле и для поддержки будущих космических миссий к Луне и планетам), во-вторых, доказывают наличие у Луны жидкого ядра и, в-третьих, помогают проверять научные теории, касающиеся фундаментальных свойств пространства-времени.

Расстояние от Луны до Земли – около 384 тыс. км, это в 30 раз больше диаметра Земли и в 960 раз больше высоты орбиты Международной космической станции. Сама же Луна заняла прочное место в научно-фантастических сюжетах как обитаемая

база с космодромом для запусков ракет в Солнечную систему и как месторождение Гелия-3 для термоядерных реакторов (рис. 1).

В реальности, конечно, ничего этого нет, а экспедиции на Луну прекратились более 40 лет назад. Тем не менее, Луна служит ба-



Рис. 1. Смотритель лунного горнодобывающего комплекса в фильме «Луна» 2009 г.

зой для научных экспериментов, в которых удалённость спутника от Земли скорее помогает ученым, чем мешает. Наша планета мала, а для многих физических и астрономических исследований требуется лаборатория, превосходящая её по размерам. Ниже мы расскажем о том, как Луну сделали частью такой лаборатории.

РЕТРОРЕФЛЕКТОРЫ

Угловой отражатель (*corner cube*) представляет собой три плоские отражающие поверхности, пересекающиеся под прямым углом. Луч света, попавший в такую конструкцию, отразится по одному разу от каждой из трёх сторон и уйдёт в направлении, противоположном исходному (рис. 2). Такие отражатели очень часто используются, например, во всем известных автомобильных катафотах: во многих их моделях каждая составляющая их ячейка – это и есть угловой отражатель.

Такой отражатель не требует электроэнергии и обслуживания. Если установить его на Луне, а в обсерватории на Земле разместить лазер, оптический телескоп и высокоточные часы, то можно регулярно измерять время хода луча от обсерватории до отражателя и обратно (оно составляет от 2 до 2,7 секунд).

Первая высадка людей на Луну состоялась 20 июля 1969 г. во время экспедиции

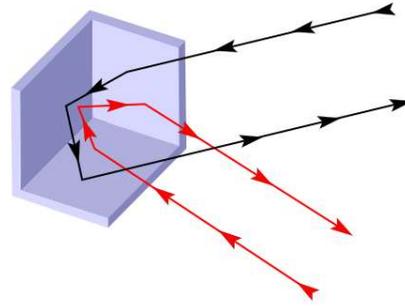


Рис. 2. Угловой отражатель: принцип работы

«Аполлон 11». Время пребывания астронавтов на поверхности было ограничено; из всевозможных предметов и устройств, которые человечество хотело бы установить на Луне, при планировании миссии было выбрано три наиважнейших: это панель угловых отражателей (*Laser Ranging Retroreflector, LRRR*), сейсмограф и американский флаг. Все три объекта были успешно установлены, правда, сейсмограф выработал свой ресурс уже через 3 недели, но ретрорефлектор (те самые угловые отражатели) функционирует и по сей день (рис. 3). Флаг, вероятно, тоже.

Космическая гонка шла полным ходом, и уже 10 ноября 1970 г. произошло очередное историческое событие: посадка на Луну космического аппарата «Луна-17» с управляемым аппаратом «Луноход-1». Он был сделан в СССР; единственной импортной частью была панель из 14 угловых отражате-

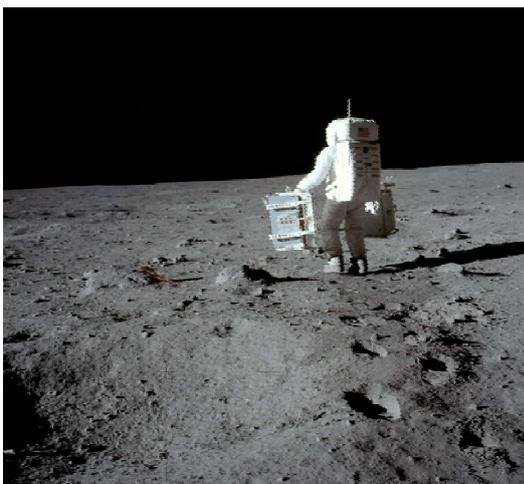


Рис. 3. Ретрорефлектор в правой руке База Олдрина и на поверхности Луны (источник: NASA)

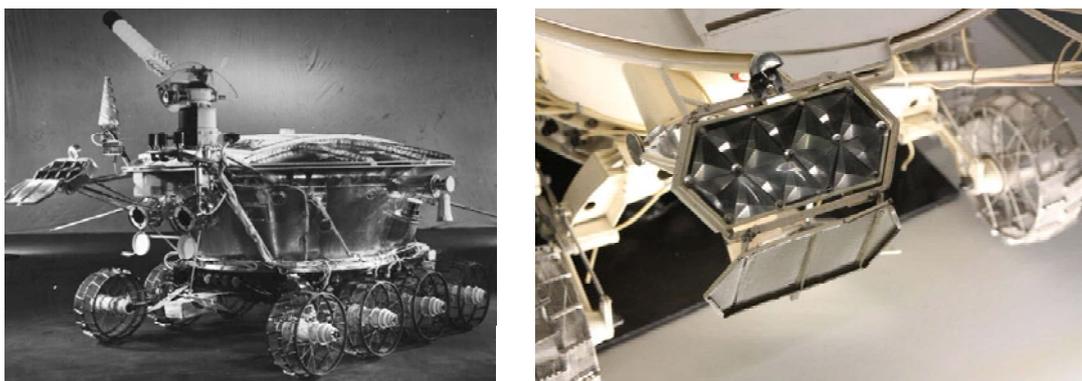


Рис. 4. Луноход (слева) и лазерный отражатель (справа), установленный на передней части Лунохода (модель)

лей, сделанная французской фирмой «Aérospatiale» (рис. 4).

Впоследствии ещё две подобные панели были установлены участниками экспедиций «Аполлон 14» и «Аполлон 15» в 1971 г, а последняя прилунилась вместе с «Луноходом-2» на космическом аппарате «Луна-21» в 1973 г.

Таким образом, на Луне сейчас есть пять ретрорефлекторов, установленных в различных районах. Наибольший по площади – ретрорефлектор «Аполлона 15», содержащий 300 уголкового отражателя диаметром 3,8 см (его предшественники содержали лишь по 100 отражателей). Правда, к большому сожалению ученых, эти отражатели медленно деградируют: по оценкам 2010 г.

они отражают в 10 раз меньше фотонов, чем в начале эксплуатации [1]. Высказываются различные гипотезы о причинах деградации, и наиболее вероятной считается лунная пыль (рис. 5).

ОБСЕРВАТОРИИ

Лазерная локация Луны осуществлялась и до «Аполлона-11». За неимением на поверхности нашего спутника ретрорефлекторов телескопы тогда улавливали фотоны, отражённые непосредственно от лунного грунта. Первые успешные эксперименты по лунной локации были проведены в 1962 г. сначала в Массачусетском технологическом институте, а затем в Крымской астрофизи-

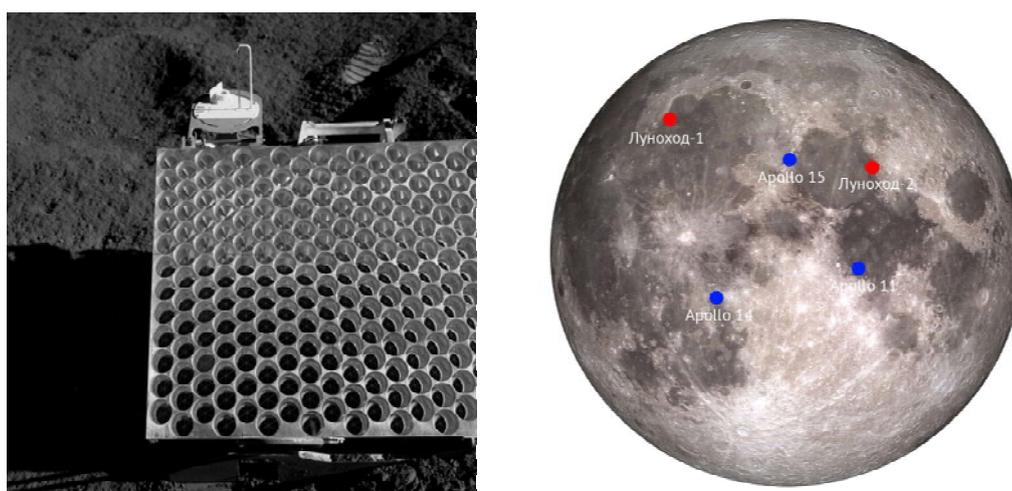


Рис. 5. Ретрорефлектор «Аполлона-15» (слева; источник: NASA) и карта расположения лунных ретрорефлекторов

ческой обсерватории (КрАО) [2]. В 1965 г. были проведены наблюдения, имевшие погрешность измерения всего в 200 метров, и эта погрешность обуславливалась рельефом Луны, а не оборудованием обсерватории.

С 1969 г. и позже локацию вели уже по отражателям, а не по грунту. Благодаря этому погрешность измерений уменьшилась до 3 метров и продолжала уменьшаться по мере совершенствования лазеров. (Наблюдения в КрАО прекратились в 1983 г. в связи с закрытием лунной программы СССР.)

Для решения научных задач, о которых будет рассказано ниже, желательно накапливать данные наблюдений лазерной локации лунных отражателей за как можно более долгий срок. Старейшие из наблюдений, данные которых опубликованы и используются сегодня в расчётах, – это наблюдения, сделанные в обсерватории МакДональд (США), начиная с 1969 г. Крымские же данные, к сожалению, до сих пор не опубликованы, но сохранены и, возможно, ещё увидят свет. Вот полный список обсерваторий с доступными данными.

Обсерватория: **McDonald.**

Расположение: Техас, США.

Период наблюдений: С 1970 г. по настоящее время.

Примечания: Изначально наблюдения проводились с рубиновым лазером и телескопом диаметром 2.7 м. С 1983 г. проводились наблюдения на отдельной площадке «McDonald Laser Ranging Station» (MLRS) с YAG-лазером и телескопом диаметром



Первые успешные эксперименты по лунной локации...

0.76 м. В 1988 г. MLRS была перемещена с перевала на гору Mt. Fowlkes.

Обсерватория: **Haleakala.**

Расположение: Гавайи, США.

Период наблюдений: С 1984 по 1990 г.

Примечания: Лазерная локация Луны была прекращена, но обсерватория продолжает осуществлять лазерную локацию искусственных спутников Земли.

Обсерватория: **Observatoire de la Côte d'Azur (OCA).**

Расположение: Лазурный берег, Франция.

Период наблюдений: С 1984 г. по настоящее время.

Примечания: Изначально наблюдения проводились под управлением Исследователь-



Рис. 6. Станции лунной лазерной локации, регулярно проводящие наблюдения (или проводившие их ранее)

ского центра в области геодинамики и астрометрии (Centre de recherches en géodynamique et astrométrie, CERGA). В 1986 г. рубиновый лазер был заменён на YAG, а в 2009 начал работу MeO-лазер.

Обсерватория: Matera.

Расположение: Базиликата, Италия.

Период наблюдений: С 2003 г. по настоящее время.

Примечания: Лазерная локация Луны проводится редко

Обсерватория: Apache Point .

Расположение: Нью-Мексико, США.

Период наблюдений: С 2006 г. по настоящее время.

Примечания: Обсерватория выдаёт самые точные на сегодня наблюдения лазерной локации Луны: погрешность составляет от 2 до 10 мм.

В начале 1970-х гг. попытки наладить лазерную локацию Луны предпринимались в Японии (обсерватория Окаяма) совместно с компанией Хитачи, но эти работы были остановлены после прекращения финансирования. Также наблюдения лунной лазерной локации проводились в Австралии в



Рис. 7. Лазерная локация Луны в обсерватории Apache Point (автор: Dan Long, источник: Википедия – https://en.wikipedia.org/wiki/Apache_Point_Observatory_Lunar_Laser-ranging_Operation)

обсерватории Оррорал с 1972 по 1998 г. Существует статья [3] про обработку этих наблюдений, но сами их данные, к сожалению, недоступны. Во Франции до CERGA также были попытки создания станции лунной лазерной локации в обсерватории Пикдю-Миди, не увенчавшиеся успехом. В Германии в многоцелевой геодинимической обсерватории около г.Ветцель были получены пробные измерения лунной лазерной локации, но регулярных измерений в этой обсерватории не проводится (рис. 7).

В настоящее время станция лунной лазерной локации строится в ЮАР в сотрудничестве с ОСА и NASA, а также в России в Алтайском оптико-лазерном центре по заказу Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Неудачи или скудные результаты многих обсерваторий в лазерной локации лунных отражателей не случайны. Вот краткий перечень основных трудностей эксперимента.

- Наведение лазера и принимающей оптической системы необходимо осуществлять по звёздам или по лунным кратерам. При этом необходимо слежение в реальном времени за движущейся Луной с учётом упреждения на время хода луча (от 1 до 1,3 секунд в одну сторону).

- Фокусировка исходящего луча достигает в лучшем случае 1 угловой секунды в расходимости луча. При отражении возникает дифракция, и на Землю луч приходит в виде пятна диаметром 15 км. Так что лишь несколько фотонов в итоге попадут в телескоп.

- Кроме отражённых фотонов, в телескоп попадают (и их – подавляющее большинство) «мусорные» фотоны от лунного грунта и земной атмосферы. Для борьбы с ними ограничивают период времени приёма (строб) и фильтруют принимаемые фотоны по длине волны, но и этого недостаточно: после сеанса измерений наблюдения подвергаются статистической обработке, при которой окончательно отделяют истинные наблюдения от «мусора».

- Импульс лазера должен быть достаточно коротким, чтобы обеспечить хорошую точность наблюдений, но при этом достаточно мощным, чтобы содержать достаточное количество фотонов (не менее 300 квадриллионов).

- Для калибровки наблюдательных данных на телескопе требуется установка опорного отражателя: часть испускаемого луча отражается от него и обрабатывается теми же средствами, что и основные наблюдения.

- Наблюдения при облачности или сильном ветре невозможны.

- Зачастую невозможны наблюдения в дневное время суток или наблюдения отражателей, находящихся на освещённой части лунного диска.

Наблюдения по лазерной локации всегда проводятся сериями. Лазер испускает 10–20 импульсов в секунду, чтобы обеспечить достаточное количество данных для последующей статистической обработки. Соответственно, в космическом пространстве постоянно находятся 25–50 импульсов, летящих от Земли к Луне или обратно. Принимающая оптическая система активизируется с частотой, соответствующей частоте испускаемых импульсов, в те периоды времени, когда *приблизительно* должен вернуться фотон (понятно: если бы время было известно точно, эксперимент бы не требовался). В одной серии проводится локация нескольких отражателей (в идеале – всех пяти), что повышает научную ценность полученных данных.

В результате обработки серии наблюдений лунного отражателя формируется так называемая *нормальная точка* (*normal point*), содержащая время полёта некоторого «виртуального» фотона на некоторый момент времени. Нормальная точка имеет погрешность, вычисляемую в ходе обработки серии. Чем больше фотонов обработано в серии, тем меньше будет погрешность полученной нормальной точки.

Нормальные точки, в свою очередь, подвергаются обработке более высокого уровня в специализированных научных центрах. При такой обработке учитываются внешние

физические факторы, неизменные в процессе обработки сессии:

- положение станции на Земле и отражателя на Луне;

- дрейф станции (несколько сантиметров в год);

- смещение станции из-за твердотельных приливов от Солнца и Луны (десятки сантиметров);

- смещение станции из-за океанических приливов (сантиметры);

- смещение отражателя из-за твердотельных приливов от Солнца и Земли (сантиметры);

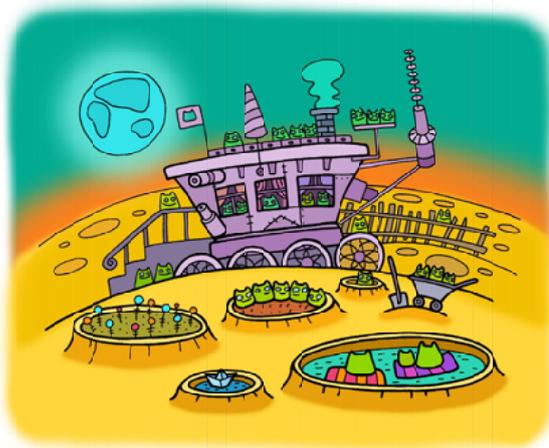
- задержка света из-за гравитационного искривления пространства крупными телами (метры) и другие релятивистские эффекты.

ОРБИТАЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ

Обработка наблюдений лазерной локации позволяет вычислить траекторию орбитально-вращательного движения Луны на длительном интервале времени (например, на 100 лет до и после периода наблюдений). Такая вычисленная траектория называется *эфемеридой*. Эфемерида Луны имеет большое значение при расчёте орбит искусственных спутников Земли, в частности, навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС: Луна возмущает их орбиты, а наличие эфемериды Луны позволяет смоделировать эти возмущения. Точность же рассчитанных орбит навигационных спутников оказывает прямое влияние на точность геопозиционирования с их помощью.

Вспомним также, что Луна гравитационно связана не только с Землёй, но и с Солнцем и с другими планетами, – так что вычисление её эфемериды, как правило, делается совместно с обработкой планетных наблюдений и вычислением эфемерид Солнца и планет. В мире существует всего три организации, выпускающих эфемериды тел Солнечной системы:

- 1) Лаборатория реактивного движения (Jet Propulsion Lab) в Калифорнии (подразделение NASA) выпускает эфемериды JPL DE (Development Ephemeris);



С тех пор «Луноход-1» наблюдается всеми обсерваториями...

2) Институт прикладной астрономии РАН в Санкт-Петербурге выпускает эфемериды ЕРМ (Ephemerides of Planets and Moon);

3) Институт небесной механики и вычисления эфемерид (Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides) в Париже выпускает эфемериды IМССЕ INPOR.

Эфемериды распространяются бесплатно и обновляются примерно один раз в год; новые версии отличаются от старых обработкой свежих наблюдений и более точными орбитами, которые удалось получить благодаря этим наблюдениям.

Интересную роль в лазерной локации Луны сыграл космический аппарат «Lunar

Reconnaissance Orbiter» (LRO), запущенный в 2009 г. и передающий на Землю фотографии лунной поверхности, сделанные с близкого расстояния. Дело в том, что местоположение первого «Лунохода» с 1971 г. после потери связи с ним не было известно. Лазерная локация «вслепую» не давала результатов, и в итоге все попытки использовать отражатель «Лунохода-1» для науки были оставлены. Высказывались даже печальные предположения о том, что панель с отражателями, установленная на аппарате, сбилась и направлена так, что ее лазерная локация с Земли невозможна. Однако в марте 2010 г., изучая публично доступные снимки LRO, сотрудник ГЕОХИ РАН Альберт Абдрахимов обнаружил небольшое пятно, напоминающее Луноход и находящееся в районе его возможного пребывания (рис. 8).

В апреле 2010 г. Том Мёрфи из обсерватории Apache Point успешно провёл измерения лазерной локации потерянного Лунохода [4]. Его координаты были уточнены: выяснилось, что аппарат находится на расстоянии 5 км от ранее предполагаемой точки, а его отражатель в хорошем состоянии. С тех пор «Луноход-1» наблюдается всеми обсерваториями наравне с другими четырьмя отражателями. Важно, что это единственный отражатель, находящийся в северо-западной части лунного диска, поэтому введение его в строй позволило значительно повысить качество наблюдательных данных в целом.

ПОЛУЧЕННЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Благодаря наблюдениям по лазерной локации уголкового отражателя на лунной поверхности были получены следующие важные результаты.

- Луна удаляется от Земли примерно на 38 мм в год, а её орбита становится более вытянутой. Причина этого – диссипация (рассеивание) энергии из-за приливных эффектов, возникающих в Луне и Земле при их действии друг на друга. Изучение эволюции орбиты нашего спутника обогащает знания людей о том, как формировалась уникальная система «Земля-Луна».

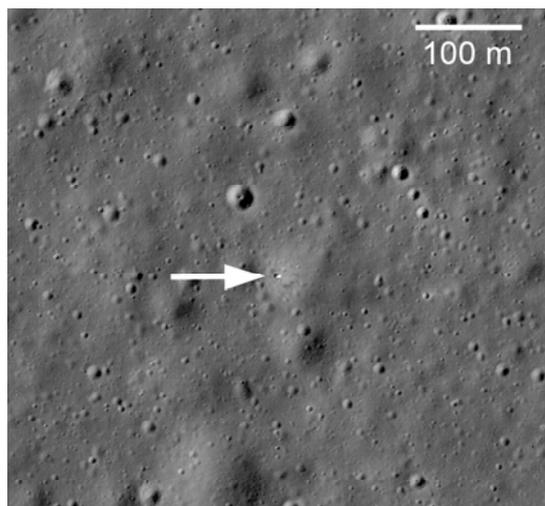


Рис. 8. «Луноход-1» на снимке LRO (источник: NASA)

- У Луны есть жидкое ядро! «Лунотрясения» были обнаружены ещё сейсмографами, установленными американскими астронавтами, но оставались сомнения – происходят ли они из-за геологической активности Луны или из-за приливных деформаций. В 2001 г. была предложена модель Луны с жидким ядром [5], которая великолепно объяснила сложное вращательное движение Луны, определяемое по лазерным измерениям.

- С недостижимой ранее точностью были подтверждены постоянность скорости света [6] и постоянность гравитационной константы [7].

- Было обнаружено, что сильный принцип эквивалентности и общая теория относительности (ОТО) не нарушаются [8], по крайней мере, в пределах точности лазерных измерений.

БУДУЩИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Точность лазерных наблюдений сегодня такова, что разработанная модель вращательного движения Луны не может предсказать всех наблюдаемых колебаний ее вращения. (Аналогичная ситуация, кстати, и с Землёй, но поправки к параметрам вращения Земли определяются из ежедневных наблюдений внегалактических радиоисточников – квазаров – методом *радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, РСДБ* [9, 10].) Сейчас в лабораториях мира ведётся разработка более точных моделей внутреннего строения Луны, учитывающих резонанс колебаний в лунной коре, приливную диссипацию энергии и другие эффекты. Создание новой модели позволит ученым получить новую информацию о физике процессов, происходящих на границе между корой и ядром (рис. 9).

Экспериментальная наука локации Луны не должна останавливаться на лазерных наблюдениях. В них есть целый ряд неисполнимых ограничений, уже упоминавшихся выше: это зависимость от погодных условий и от фаз Луны, высокие требования к лазерно-оптической системе обсерватории. Этих

недостатков нет у наблюдений в радиодиапазоне. С другой стороны, точность радионаблюдений ниже, чем лазерных, и для их проведения требуется установить радиопередатчик или транспондер на поверхности Луны.

Такой транспондер был установлен на китайских лунных посадочных аппаратах «Чанъэ-2» и «Чанъэ-3». Были осуществлены радиолокационные наблюдения «Чанъэ-3», но использование этих результатов совместно с результатами лазерных наблюдений и современными моделями движения Луны пока не состоялось, а аппарат «Чанъэ-3» прекратил работу в 2015 г. В будущем, при наличии транспондеров на последующих китайских «Чанъэ-4» и «Чанъэ-5» и на других аппаратах станет возможной круглосуточная радиолокация Луны многими радиообсерваториями. Количество полученных наблюдений позволит компенсировать большую погрешность и достичь миллиметровой (лазерной) точности определения положения Луны.

Локационные наблюдения – радио- или лазерные – обладают низкой чувствительностью к положению Луны на орбите. Несмотря на миллиметровую точность лазерных наблюдений, реальная погрешность орбиты Луны в эфемериде составляет не меньше



Рис. 9. Гипотеза о внутреннем строении Луны (источник: NASA)



Рис. 10. «Радиоастрон» (источник: АКЦ ФИАН)

метра, а реальная погрешность расстояния до Луны – не менее 30 см. В модели эта погрешность «уходит» в координаты отражателей – сказывается то обстоятельство, что все отражатели расположены на одной (видимой) стороне Луны. Можно поставить эксперимент, который позволит преодолеть это ограничение: это РСДБ-наблюдения квазаров лунным радиотелескопом совместно с земными. Для этого потребуется развернуть на поверхности Луны радиотелескоп. Такой проект принесёт массу научных результатов, среди которых уточнённая орбита Луны будет далеко не единственным и не основным. Так, внеземные радиотелескопы необходи-

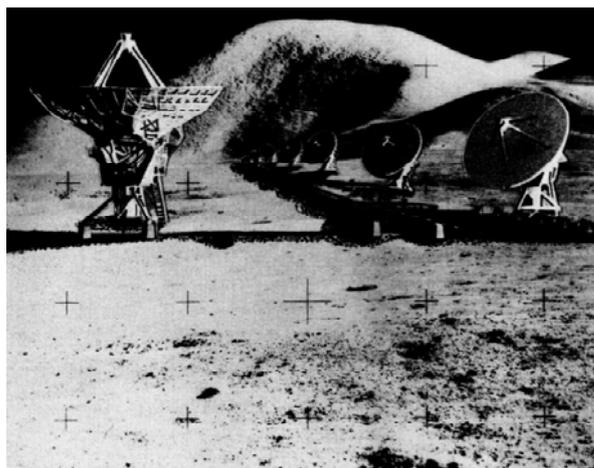


Рис. 11. Мечты 30-летней давности: радиотелескопы на Луне (источник: NASA)

мы для повышения точности инерциальной системы отсчёта по сравнению с нынешней реализацией (International Celestial Reference Frame, ICRF), основанной на земной сети радиотелескопов.

Пока единственным действующим внеземным радиотелескопом является «Радиоастрон», созданный в АКЦ ФИАН [11]. Этот 10-метровый радиотелескоп на земной орбите используется для астрофизических исследований, но не применим для задач, связанных с построением систем отсчёта, из-за своей нестабильной орбиты (рис. 10).

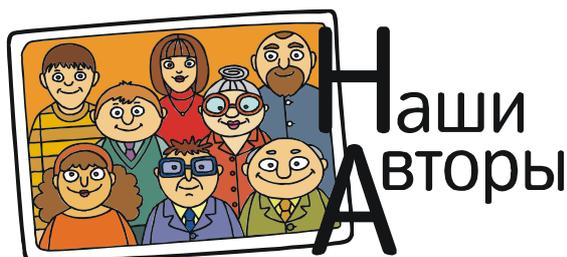
Радиотелескоп же, расположенный на Луне, позволит повысить точность инерциальной системы на порядок, при этом связав эту систему (через Луну) с остальными планетами. Такая система облегчит навигацию космических аппаратов в межпланетном пространстве, а также позволит провести массу новых фундаментальных исследований: это проверка тонких эффектов ОТО, изучение тёмной материи и движения Солнца в галактике и другие, не говоря уже о том, что использование лунного радиотелескопа совместно с «Радиоастрономом» сулит более точные астрофизические данные.

Идея создания земно-лунного радиоинтерферометра [12] высказывалась ещё в 1985 г. Джеком Бёрнсом из Университета Нью-Мексико (рис. 11). Предложения построить лунный радиотелескоп на Луне с целью повышения точности реализации инерциальной системы отсчёта поступают и в наши дни, но конкретных планов пока нет. Джек Бёрнс сейчас возглавляет сеть американских университетов по лунным астрофизическим исследованиям. С Луной (а точнее говоря, с обратной стороной Луны) действительно связано много проектов астрофизических исследований, но это уже совсем другая история.

Автор благодарен С.Л. Курдубову (ИПА РАН) за многочисленные дискуссии, предшествующие написанию данной статьи.

Литература

1. *Murphy Jr. T.W., Adelberger E.G., Battat J.B.R., Hoyle C.D., McMillan R.J., Michelsen E.L., Samad R.L., Stubbs C.W., Swanson H.E.* Long-term degradation of optical devices on the Moon. – *Icarus* 208 (2010) 31–35.
2. *Кокурин Ю.Л.* Лазерная локация Луны. 40 лет исследований // *Квантовая электроника*, 33, № 1 (2003).
3. *Morgan P., King R.W.* Determination of Coordinates for the Orroral Lunar Ranging Station. In: O. Calame (Ed.) *High-Precision Earth Rotation and Earth-Moon Dynamics*, Volume 94 of the series *Astrophysics and Space Science Library* (1982), 305-311.
4. *Murphy Jr. T.W., Adelberger E.G., Battat J.B.R., Hoyle C.D., Johnson N.H., McMillan R.J., Michelsen E.L., Stubbs C.W., Swanson H.E.* Laser ranging to the lost Lunokhod 1 reflector. *Icarus* 211 (2011) 1103–1108.
5. *Williams James G., Boggs Dale H., Yoder Charles F., Ratcliff J. Todd, Dickey Jean O.* Lunar rotational dissipation in solid body and molten core. *J. Geophys. Res.*, 106(E11) (2001), 27933–27968.
6. *Williams James G., Turyshev Slava G., Boggs Dale H.* The past and present Earth-Moon system: the speed of light stays steady as tides evolve. *Planetary Science* (2014), 3:2.
7. *Müller Jürgen, Biskupek Liliane.* Variations of the gravitational constant from lunar laser ranging data. *Classical and Quantum Gravity* 24(17) (2007).
8. *Williams James G., Dickey Jean O.* Lunar Geophysics, Geodesy, and Dynamics [electronic resource]. URL: http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/williams_lw13.pdf
9. <http://iaaras.ru/quasar>
10. *Finkelstein Andrey et al.* EOP Determination from Domestic Observations of the Russian VLBI Network “QUASAR”. *IVS 2012 General Meeting Proceedings “Launching the Next-Generation IVS Network”* Dirk Behrend and Karen D. Baver (eds), 181–185 (2012).
11. *Кардашев Н.С. и др.* «Радиоастрон» – телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // *Астрономический журнал*, т. 90, № 3.
12. *Burns J.O.* A moon-earth radio interferometer. In: *Lunar bases and space activities of the 21st century (A86-30113 13-14)*. Houston, TX, Lunar and Planetary Institute, 1985, p. 293–300.



*Павлов Дмитрий Алексеевич,
кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
Института прикладной
астрономии РАН.*