1972 г. Сентябрь *Том 108, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

МАГНЕТИЗМ ЛУНЫ *)

523.038:523.3

П. Дайэл, К. Паркин

Переданные на Землю показания магнитометров, установленных на лунной поверхности участниками экспедиций «Аполлон», позволяют нам лучше понять историю и современное физическое состояние Луны.

Магнитометры, установленные на Луне экипажами «Аполлон-12» и «Апполлон-14», обнаружили два типа лунных магнитных полей: постоянные поля, порожденные «ископаемым» магнетизмом лунного вещества, и переменные поля, вызванные электрическими токами, возбуждаемыми в недрах Луны. Эти магнитные измерения дали нам уникальную информацию об истории и современном состоянии Луны. Источник «ископаемого» магнетизма неизвестен и указывает на существование некоторой необычной эпохи в истории Луны. Переменные поля возбуждаются в Луне изменениями магнитного поля, связанного с «солнечным ветром» — потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Измерение переменных полей дает нам возможность вычислить проводимость и температуру лунных недр. Магнитные измерения наглядно демонстрируют возможности нового метода для будущих исследований Солнечной системы, в частности Марса, который до известной степени похож на Луну.

Хотя напряженность постоянных полей, измеренных на Луне, составляет менее 1% напряженности магнитного поля Земли, лунные поля оказались гораздо сильнее, чем предполагалось на основе измерений, проведенных ранее советскими и американскими космическими аппаратами либо во время пролетов близ Луны, либо с окололунной орбиты. Приборы, доставленные на поверхность Луны «Аполлонами», засвидетельствовали то, что постоянные поля на лунной поверхности меняются от точки к точке, но не укладываются в картину глобального дипольного поля, аналогичного земному. Это говорит о том, что обнаруженные поля вызваны местными источниками. Более того, большая напряженность полей указывает, что источники поля приобрели намагниченность во внешних полях, гораздо более сильных, чем существующие на Луне в настоящее время. Когда-то в прошлом Луна либо сама обладала сильным магнитным полем, либо находилась в области сильного поля. Мы сталкиваемся здесь с целой серией загадок лунной истории: имела ли древняя Луна поле, подобное земному, которое, как и в случае Земли, возбуждалось внутренним «динамо»? Была ли Луна гораздо ближе к Земле, там, где земное

---

*) Palmer Dyal, Curtis W. Parkin, The Magnetism of the Moon, Scientific American 225 (2), 63 (1971). Перевод Л. В. Самсоненко.

Авторы статьи Палмер Дайэл и Кэртис У. Паркин работают в Эймсском исследовательском центре НАСА, Калифорния, США.

магнитное поле было достаточно сильным? Приобрела ли Луна намагниченность в каком-то ином районе солнечной системы и позднее была захвачена Землей? Ответы на эти вопросы могут быть зашифрованы в «ископаемом» магнетизме лунного вещества. Тот факт, что Луна мало изменилась за миллиарды лет, открывает нам возможность получить палеомагнитные данные о ранней истории Солнечной системы. Аналогичная магнитная информация, «записанная» в земной коре, давно уже стерта и перепутана из-за активности коры и излияний магнитных материалов на поверхности Земли, вызванных изменениями расплавленного вещества земных недр.

Переменные поля, порождаемые электрическими токами, текущими в недрах Луны, связаны со всей Луной, а не с каким-либо ее отдельным районом. Эти поля быстро растут и убывают в соответствии с изменениями солнечного ветра. Свойства индуцированных лунных полей зависят от проводимости лунных недр, а последняя в свою очередь тесно связана с температурой вещества. Поэтому магнитометр может быть использован как косвенный «термометр сопротивления» для определения внутренней температуры Луны.

Анализ переменных полей показывает, что температура в недрах Луны достигает лишь 1000° С на глубине, составляющей половину расстояния до центра, или примерно на 3400° холоднее, чем в Земле на глубине, равной половине земного радиуса. Найденные таким путем лунные температуры хорошо увязываются с низкой сейсмической активностью, обнаруженной при помощи сейсмометров, размещенных на поверхности нашего спутника. Полученные результаты прямых измерений свидетельствуют о том, что Луна не может быть горячей и расплавленной внутри, а скорее является относительно холодным телом, так что ее поверхность изменилась под действием скорее метеоритных ударов, а не вулканической активности. Последующие магнитные измерения позволят построить более точное распределение температуры в недрах Луны, а также прольют свет на природу внутренних источников тепла. Эти же данные дают надежду получить ответы на фундаментальные вопросы о происхождении и эволюции Луны.

Эксперимент с лунным магнитометром можно рассматривать как современное повторение первого планетарного магнитного эксперимента, осуществленного У. Гильбертом в 1600 г. Наблюдая, как подвешенная намагниченная игла наклоняется к Земле на определенный угол, Гильберт заключил, что сама Земля действует, как гигантский магнит. Впоследствии как геометрические, так и переменные во времени характеристики земного поля многократно анализировались для определения проводимости и температуры земной коры и мантии. Длительные магнитные измерения говорят о том, что расплавленные недра Земли вращаются с чуть меньшей скоростью, чем твердая кора. По-видимому, именно это дифференциальное вращение создает динамо-эффект, необходимый для генерирования магнитного поля.

С развитием ракетной техники стало возможным поместить магнитометры на космический аппарат, обращающийся вокруг Земли, изучить распределение земного магнитного поля в околоземном космическом пространстве и исследовать взаимодействие поля с солнечным ветром.

Э. Дж. Смит из лаборатории реактивных двигателей (США) организовал проведение магнитных экспериментов на борту космических аппаратов «Маринер», пролетавших вблизи Марса и Венеры; в ходе полетов были измерены межпланетные поля солнечного происхождения и исследовано, каким образом эти планеты взаимодействуют с солнечным ветром. Никаких магнитных полей ни у Марса, ни у Венеры найти не удалось.

Магнитные поля Солнца и небесных тел за пределами Солнечной системы были измерены при помощи телескопических наблюдений. Еще в 1908 г. Дж. Э. Хейл (США) обнаружил, что магнитное поле Солнца расщепляет линии солнечного спектра (зееман-эффект). Впоследствии Г. У. Бэбкок и другие исследователи применили метод Хейла для измерения магнетизма других звезд и целых галактик. Недавно Дж. С. Кемп из Орегонского университета (США) нашел исключительно мощное магнитное поле (в 100 миллионов раз более сильное, чем геомагнитное) у звезды-карлика в созвездии Дракона.

Магнитные исследования Луны начались в 1850 г., когда К. Крейль открыл, что земное магнитное поле систематически изменяется в зависимости от фазы Луны. Позднее выяснилось, что этот эффект порождается

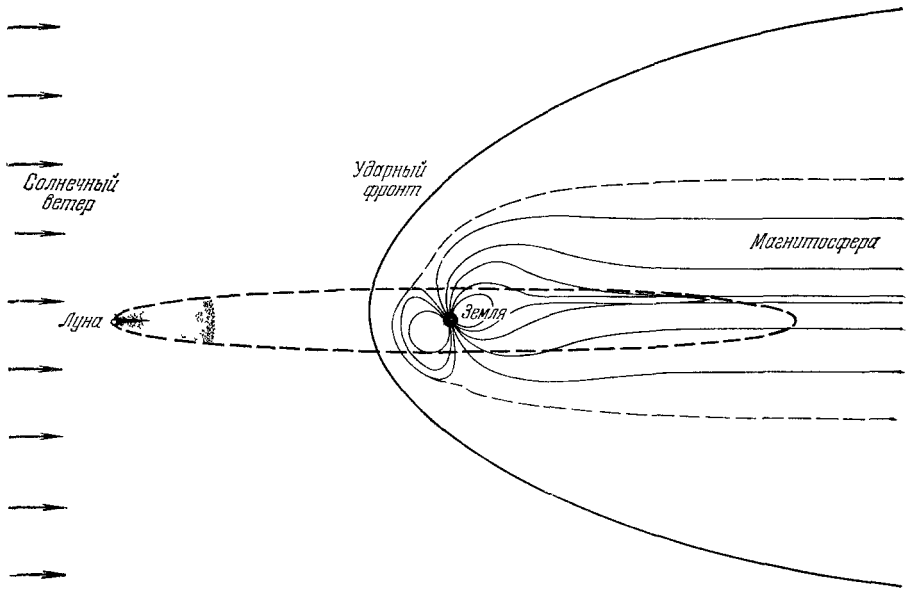


Рис. 1. «Магнитные окрестности» Луны сильно зависят от положения Луны на орбите. «Солнечный ветер», состоящий из частиц, испускаемых Солнцем со сверхзвуковыми скоростями, обтекает земное магнитное поле, создавая полость, именуемую магнитосферой В свою очередь магнитосфера действует как барьер для солнечного ветра, образуя чашеобразный ударный фронт перед Землей. Когда Луна погружена в магнитосферу, лунные поля преобладают над сравнительно постоянным магнитным полем Земли В свободном потоке солнечного ветра Луна подвергается воздействию не только со стороны солнечного магнитного поля, но также и плазменных волн, распространяющихся от Солнца. Промежуточная область характеризуется беспорядочным потоком солнечных частиц и наиболее турбулентными полями на лунной орбите

воздействием притяжения Луны на атмосферу и ионосферу Земли и никак не связан с наличием или отсутствием лунного магнитного поля. Загадка оставалась нерешенной до тех пор, пока в окрестности Луны не были запущены космические аппараты, что позволило провести прямые измерения лунного магнитного поля. Поскольку до сих пор отсутствует строгая теория, которая бы удовлетворительно объясняла происхождение постоянного магнитного поля Земли, неудивительно, что оценить напряженность постоянного магнитного поля Луны никому не удавалось. Впрочем, изучение ряда особенностей нашего спутника, в частности оптические исследования хода изменения температуры лунной поверхности, а также изучение фигуры Луны и ее динамических характеристик, подсказывали, что у Луны внутреннее «динамо», по-видимому, отсутствует.

Теоретические расчеты других магнитных свойств Луны были сделаны перед началом полетов человека на Луну несколькими американскими исследователями, в том числе Ф. К. Майклом из Райсского университета,

Т. Голдом из Корнеллского университета и Дж. Р. Спрейтером из Стэнфордского университета. Они попытались предсказать, как Луна будет взаимодействовать с частицами высоких энергий солнечного ветра в двух

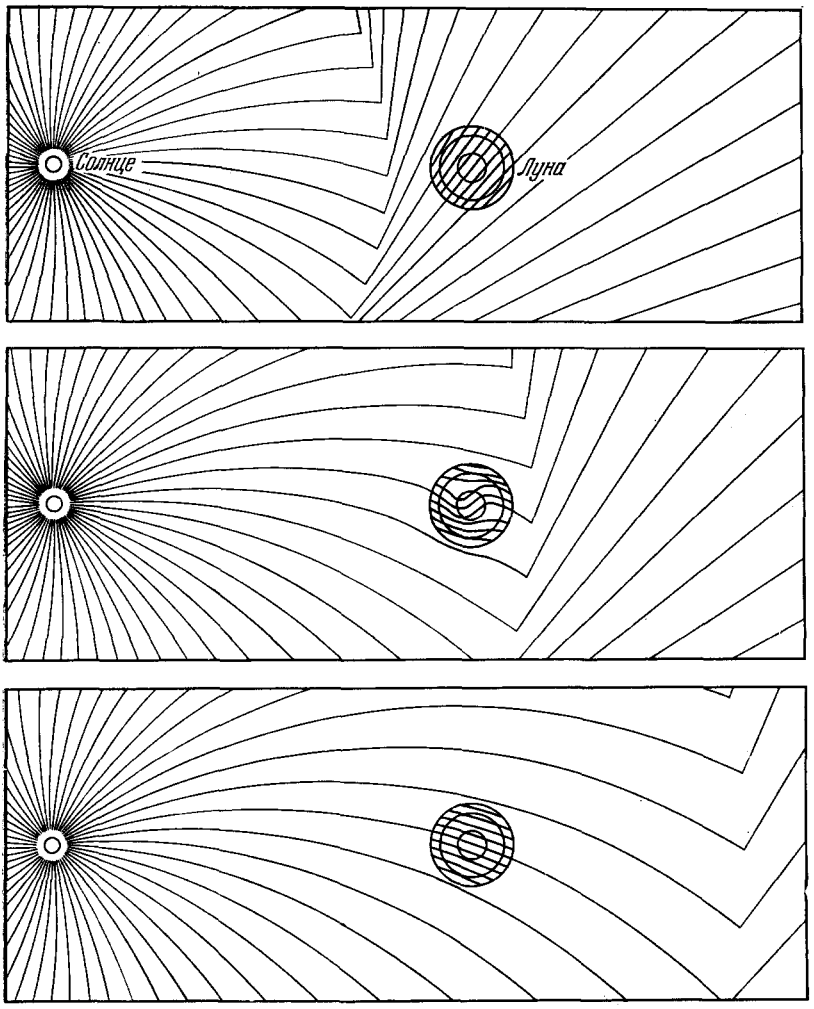


Рис. 2. Предполагаемое поведение гипотетической трехслойной модели Луны для случая, когда скачкообразное изменение солнечного магнитного поля проходит мимо Луны и распространяется дальше со сверхзвуковой скоростью.

Три слоя модели характеризуются последовательно убывающим электрическим сопротивлением по мере приближения к центру Луны. Вверху — Луна погружена в постоянное солнечное поле до прихода скачкообразного изменения направления поля. В середине — магнитное поле внутри Луны сразу же после прохождения скачка солнечного поля. В Луне индуцируются вихревые токи в соответствии с законом Ленца, согласно которому в проводящей среде индуцируются поля и токи, которые стремятся противодействовать любому изменению внешнего магнитного поля. Подобные вихревые токи существуют дольше всего в областях с малым сопротивлением, так что первоначальная ориентация магнитного поля дольше всего сохраняется в ядре. Наконец, все вихревые токи затухают, и искажение полного поля совершенно прекращается (внизу).

крайних случаях: либо у Луны полностью отсутствует магнитное поле, либо Луна имеет поле такой же напряженности, как и Земля (земное поле на экваторе равно примерно 30 000 γ, или 0,3 *э*). При отсутствии поля Луна действует просто как непрозрачный шар, «отсекая» от солнечного ветра лишь те заряженные частицы, которые сталкиваются с Луной, тогда как все прочие частицы свободно проходят мимо Луны, никак не взаимо-

действуя с ней (рис. 1). Если же Луна имеет заметное общее поле, то частицы солнечного ветра будут обтекать лунный шар более сложным образом. Кроме того, на «обдуваемой» солнечным ветром стороне Луны возникнет ударный фронт, немного напоминающий ударную волну, образующуюся перед сверхзвуковым самолетом.

Были рассмотрены также несколько возможных случаев, промежуточных между описанными крайними. Если у Луны отсутствует общее постоянное поле, превышающее 40γ (поля такой напряженности позже были

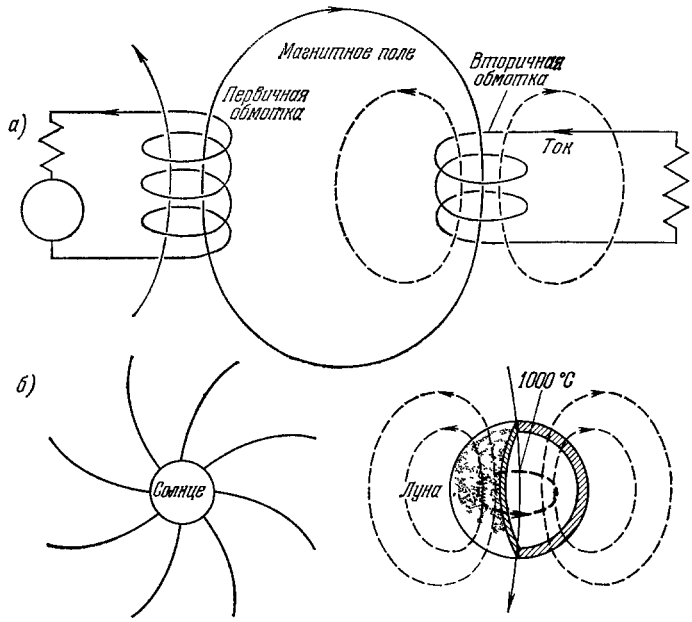


Рис. 3. Вихревые токи и магнитные поля могут индуцироваться в Луне способом, вполне аналогичным возбуждению токов и полей во вторичной обмотке обычного трансформатора (*а*).

В первичную обмотку включен источник тока, который возбуждает ток в обмотке и меняет ее магнитное поле. Силовые линии от поля первичной обмотки охватывают вторичную обмотку, и любое изменение поля первичной обмотки приводит к образованию дипольного поля во вторичной. Время, необходимое для затухания индуцированных токов и полей, зависит от индуктивности и сопротивления вторичной цепи. Точно так же Солнце действует как первичная обмотка в том смысле, что оно является источником магнитного поля и может изменять это поле. Внезапное изменение солнечного поля приводит к появлению соответствующих индуцированных тока и дипольного поля в Луне (*б*). Время затухания лунных поля и тока определяется как сопротивлением лунного вещества, так и размерами Луны. Если предположить различный химический состав Луны, можно оценить температуру лунных недр путем расчета проводимости лунного вещества. Например, считая, что Луна целиком состоит из чистого оливина, мы получаем, что температура Луны увеличивается с глубиной, достигая примерно 1000 °С в центральной области.

действительно обнаружены), то переменные магнитные поля, возбуждаемые в недрах Луны, могли бы заметно исказить поток солнечного ветра. При этом возможны два основных типа наведенных магнитных полей. Первый тип поля создается в Луне солнечным ветром, проходящим мимо Луны. Эту возможность отметил Голд, и она была детально разработана Д. С. Колберном и Ч. П. Соннетом из Эймсского исследовательского центра НАСА (США). Второй тип — это переменное дипольное поле, которое может наводиться в Луне временными изменениями поля солнечного ветра (рис. 2). В этом случае в недрах Луны возбуждаются вихревые токи — вполне аналогично тому, как возбуждается ток во вторичной обмотке трансформатора (рис. 3). Описанный механизм был предложен одним из авторов (Дайэлом) в 1966 г. и развит Дж. Блэнком и У. С. Сил-

лом, сотрудниками фирмы «Белл», в 1969 г. Магнитометрические измерения, проведенные на поверхности Луны впоследствии, доказали, что дипольное поле, порожденное вихревыми токами, по-видимому, является основным типом наведенных лунных полей.

Измерения магнитных полей вблизи Луны начались в январе 1959 г., когда советская автоматическая станция «Луна-1» пронесла магнитометр на расстоянии нескольких сот километров от поверхности Луны. В сентябре 1959 г. «Луна-2», также снабженная магнитометром, достигла поверхности Луны. Прибор на борту «Луны-2» дал верхний предел 300 γ для напряженности возможного лунного магнитного поля на высоте 48 *км* над поверхностью Луны. В апреле 1966 г. «Луна-10» с магнитометром в 10 раз более чувствительным, чем прибор на «Луне-2», была успешно выведена на окололунную орбиту в 350 *км* над поверхностью Луны. Магнитометр «Луны-10» измерил вблизи Луны магнитное поле, меняющееся от 24 до 40 γ. Это поле, напряженность которого коррелировала с изменениями магнитной активности на поверхности Земли, было интерпретировано советским исследователем Л. Н. Жузговым как указание на существование слабой лунной магнитосферы.

Годом позже, в июле 1967 г., США вывели на окололунную орбиту «Эксплорер-35», снабженный двумя магнитометрами. Аппарат работает до настоящего времени на орбите, находящейся в 830 *км* от лунной поверхности. Приборы «Эксплорера-35» имели чувствительность $\pm 0{,}2$ γ. Это позволило измерить магнитные свойства полости, создаваемой потоком солнечного ветра, обтекающего Луну. Однако приборы на «Эксплорере-35» не смогли обнаружить лунную магнитосферу, на существование которой указывали измерения ударного фронта «Луной-10», и конфигурацию наведенного поля, предсказанную Голдом. Из анализа данных «Эксплорера-35» Сонетт заключил, что если постоянное магнитное поле Луны все же существует, то его напряженность должна быть меньше 2 γ на высоте 830 *км* — обескураживающе малая величина.

Таким образом, все говорило о том, что Луна в магнитном отношении мертва. К этому времени мы закончили испытания магнитометра со вспомогательным оборудованием, который предназначался для установки в ноябре 1969 г. в Океане Бурь членами экспедиции «Аполлона-12». Можно представить себе наше удивление и восхищение, когда прибор измерил в месте посадки «Аполлона-12» постоянное магнитное поле в 38 γ! Затем в феврале 1970 г. А. Б. Шепард и Э. Д. Митчелл из экипажа «Аполлона-14», работая с портативным магнитометром, обнаружили магнитные поля с напряженностью 43 и 103 γ в двух различных местах посадки примерно в 175 *км* к востоку от места посадки «Аполлона-12».

Магнитометры, размещенные на Луне членами экипажей «Аполлона-12» и «Аполлона-14», были сконструированы в Эймсском исследовательском центре НАСА. Сонетт организовал эксперимент на «Аполлоне-12», а один из авторов (Дайэл) выдвинул предложение об организации сети стационарных и переносных магнитометров для последующих экспедиций «Аполлон». Прибор, использованный на «Аполлоне-12», был сконструирован и изготовлен компанией «Филко-Форд» под руководством Дж. Килера из Эймсского центра. Он был объединен в один комплект с оборудованием для четырех других экспериментов, проводимых на поверхности Луны; это комплектование выполнила компания «Бендикс».

Переносные магнитометры для экспедиции «Аполлона-14» были изготовлены группой из Эймсского исследовательского центра, возглавляемой К. Приветте, и размещены в космическом корабле сотрудниками Центра

пилотируемых полетов НАСА. При разработке приборов для «Аполлона-12» были приняты во внимание результаты магнитных измерений на «Эксплорере-35» и «Луне-2». В приборе для «Аполлона-12» три компоненты вектора напряженности магнитного поля определялись тремя феррозондовыми датчиками, расположенными на концах трех взаимно перпендикулярных штанг (рис. 4). Датчики были размещены в пространстве

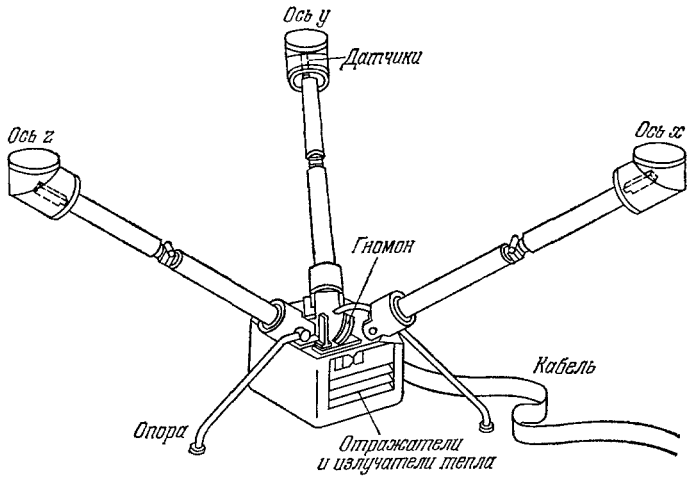


Рис. 4. Магнитометр для размещения на поверхности Луны, разработанный сотрудниками Эймсского исследовательского центра НАСА.

Он устанавливается в фиксированной точке лунной поверхности, где можно непрерывно измерять три компоненты лунного магнитного поля как во время лунного дня, так и во время ночи. Три феррозондовых датчика магнитного поля (каждый из которых взаимно перпендикулярен к двум остальным) установлены на верхних концах штанг примерно в 80 *см* над поверхностью Луны (показаны штриховыми линиями). По команде с Земли каждый датчик может изменять свое положение на 90 или 180° или поворачиваться вокруг оси при помощи специального двигателя (не показанного на рисунке) таким образом, что все три датчика могут одновременно измерять напряженность поля вдоль направления каждой из штанг. Двигатели и аппаратура для обработки данных размещены в отдельном ящике, и все оборудование укрыто теплоизолирующей защитой. Удаление избыточного тепла (в дневное время) и подогревание (в ночное время) контролируется комплектом параболических рефлекторов по обе стороны ящика с электроникой. Пузырьковый уровень и гномон для определения азимута по Солнцу на верхней части ящика дают возможность космонавтам точно ориентировать магнитометр. Питание, двоичные сигналы и управляющие команды передаются по изолированному кабелю, связывающему прибор с центральной приемно-передаточной станцией.

таким образом, что однородность исследуемого магнитного поля могла быть обнаружена путем измерения напряженности поля в месте расположения каждого датчика. Каждый датчик весил меньше 30 *г* и требовал для работы мощности 15 *мвт*.

Феррозондовый датчик с модуляцией потока состоит из слегка намагниченного сердечника из пермаллоя с тремя обмотками: одна предназначена для насыщения сердечника в присутствии внешнего магнитного поля, другая — для измерения суммы насыщающего и внешнего полей, а третья — для исключения внешнего поля внутри детектора. Сигнал удвоенной частоты относительно частоты насыщающего поля возбуждается в сигнальной обмотке; амплитуда сигнала пропорциональна внешнему полю (рис. 5). Каждый датчик имеет частотную характеристику, лежащую в пределах от 0 до 3 *гц*, и угловую характеристику, которая пропорциональна косинусу угла между вектором магнитного поля и осью датчика. Прибор может быть настроен на области ± 100, ± 200 или ± 400 γ при точности 0,2% в каждом случае.

Вспомогательное электронное оборудование размещено в отдельном ящике, за исключением источника энергии (последний представляет собой термоэлектрический радиоизотопный генератор), а также системы теле-

метрии и временнóго контроля всех экспериментов, выполняемых на лунной поверхности. Вспомогательное оборудование весит 2,5 *кг*, имеет объем 4,5 *дм*³ и состоит из 6400 электронных деталей. Специальная электронная схема управляет работой феррозондовых датчиков, измеряет ориентацию прибора, контролирует работу трех двигателей системы ориентации датчиков и обрабатывает результаты измерений перед их передачей по радио на Землю.

Прибор защищен тепловой изоляцией и снабжен тепловыми радиаторами для излучения избыточного тепла в окружающее пространство во время лунного дня. Нагреватели сопротивления обеспечивают необходимый приток тепла в течение лунной ночи. Таким способом температура

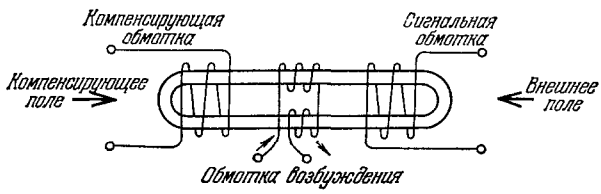


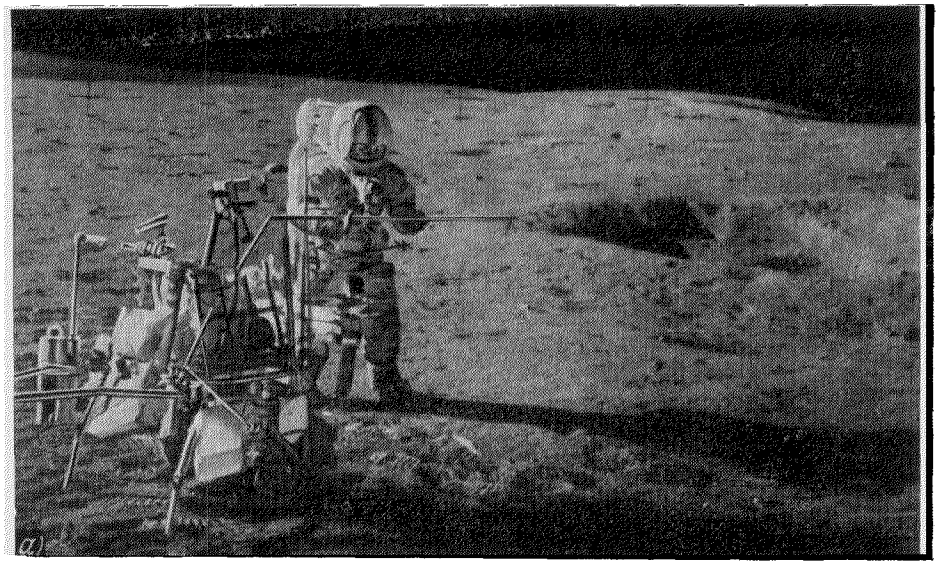
Рис. 5. Для измерения внешнего магнитного поля в обоих типах лунных магнитометров используются феррозондовые датчики.

Датчик состоит из слабо намагниченного тороидального сердечника из пермаллоя, который доводится до насыщения переменным сигналом определенной частоты. Сигнальная обмотка регистрирует сумму поля обмотки возбуждения и внешнего магнитного поля; в результате в сигнальной обмотке генерируется сигнал удвоенной частоты по сравнению с подводимой частотой возбуждения; амплитуда этого сигнала пропорциональна напряженности внешнего поля. Сдвиг фазы сигнала удвоенной частоты относительно фазы опорного сигнала указывает направление внешнего поля по отношению к оси детектора. Гармонический сигнал преобразовывается и пропускается через компенсирующую обмотку, чтобы снизить до нуля внешнее поле внутри детектора, что увеличивает тепловую стабильность датчика.

прибора поддерживается в интервале от —25 до 75° С, хотя температура лунной поверхности, на которой находится прибор, меняется от —150 до 120° С (рис. 6).

В ходе экспедиции «Аполлона-12» магнитометр был установлен и приведен в рабочее положение космонавтом А. Л. Бином в точке с лунными координатами 23,35° в. д., 2,97° ю. ш. Бин выровнял прибор по пузырьковому уровню и придал ему нужный азимут при помощи гномона, повернув так, чтобы тень оказалась между заданными отметками. Прибор был включен по радиокоманде из Центра пилотируемых полетов в Хьюстоне, и началась передача на Землю результатов измерений, что свидетельствовало о нормальной работе всей аппаратуры.

Успешное проведение магнитного эксперимента на «Аполлоне-12» подало мысль изготовить переносной магнитометр для измерения местных постоянных полей в месте посадки «Аполлона-14». Магнитометр для «Аполлона-14» был разработан как полностью автономный прибор, что позволяло космонавтам во время переходов измерять постоянное магнитное поле в различных точках лунной поверхности. Конструкция позволяла измерять изменения магнитного поля на расстоянии до 1,5 *км* (по сравнению с 1,5 *м* в случае «Аполлона-12»). Три взаимно перпендикулярных датчика — таких же, как и датчики прибора на «Аполлоне-12», были установлены на верху треноги. Комплект датчиков на треноге был связан 15-метровым кабелем с ящиком, в котором были смонтированы электронная схема, батарея и три измерителя (рис. 7). Космонавт считывал показания шкал измерителей и по радио сообщал их на Землю. Наличие 15-метрового кабеля резко уменьшало посторонние эффекты магнитных полей, наводимых электронным оборудованием и снаряжением космонавта. Прибор весит 5 *кг*, потребляет мощность 1,5 *вт* и функционирует



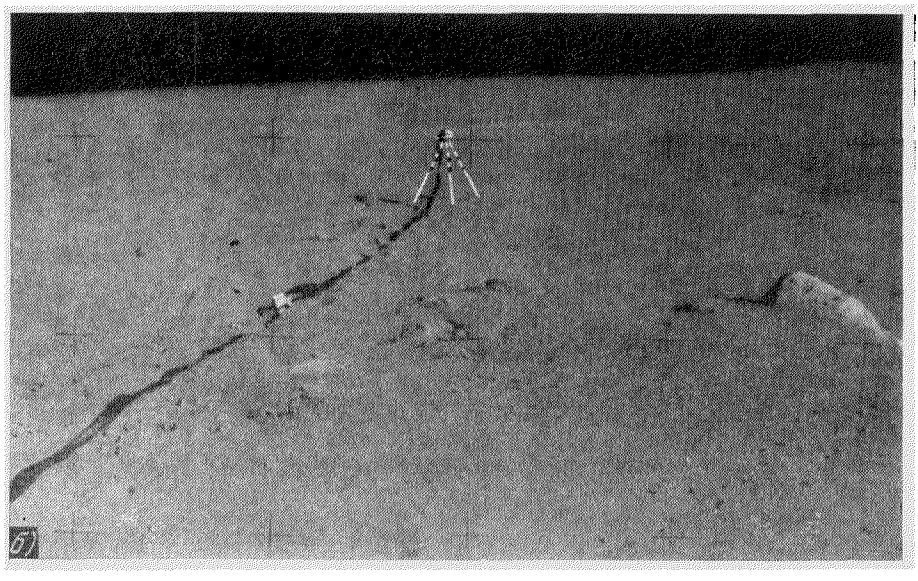


Рис. 6. Переносный магнитометр «Аполлона-14»— автономный прибор с питанием от батарей — был разработан для использования его космонавтами во время маршрутов по лунной поверхности с целью измерения постоянного магнитного поля Луны в различных местах.

На снимке *а*), сделанном космонавтом Э. Д. Митчеллом, виден лунный магнитометр, установленный на двухколесной лунной тележке. Космонавт А. Шепард занят работой с другим оборудованием позади тележки. На снимке *б*) тренога с магнитометром расположена в 15 *м* от ящика с электронным оборудованием, который во время измерений оставался на тележке. После окончания считывания показаний всех шкал и передачи их на Землю космонавты складывали треногу, сматывали кабель и продолжали передвижение по поверхности.

в интервале температур от 0 до 50° С. Предусмотрен также фильтр для отсекания высокочастотных флуктуаций, вызываемых магнитным полем солнечного ветра. Два измерения магнитного поля были сделаны Шепардом и Митчеллом во время второго выхода космонавтов на лунную поверхность. Первый результат был снят в 300 *м* к востоку от лунной кабины, второй — в 1,1 *км* дальше к востоку, вблизи вала кратера.

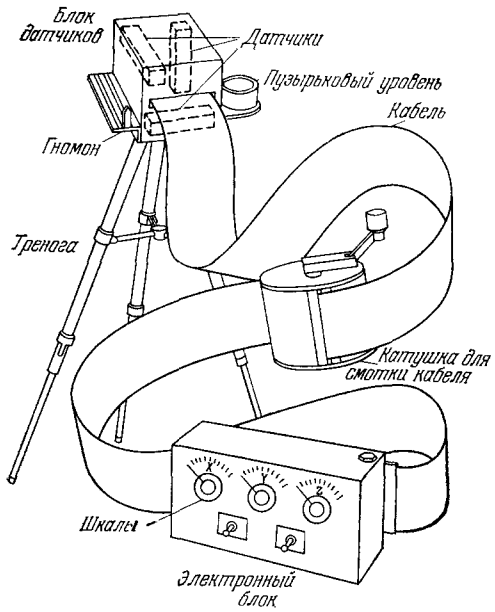


Рис. 7. Лунный переносный магнитометр содержит три взаимно перпендикулярных феррозондовых датчика с модуляцией потока, аналогичных тем, которые использовались в лунном стационарном магнитометре.

Датчики размещены в корпусе кубической формы, установленном на треноге. Комплект датчиков связан посредством 15-метрового кабеля с ящиком, в котором смонтированы аппаратура, батареи питания и три измерительных прибора со шкалами. В каждой точке измерения на поверхности Луны космонавт считывает со шкал значения трех компонент магнитного поля и сообщает эти данные на Землю.

Результаты измерений, переданные с магнитометров, установленных на поверхности Луны, дали гораздо больше информации, чем предполагалось. Были не только измерены постоянные магнитные поля, в 25 раз превышающие ожидаемые, но наблюдались и четко выраженные лунные индуцированные поля, что дало нам возможность рассчитать проводимость и температуру Луны. Изменение измеренных полей от напряженностей меньше 40 γ до превышающих 100 γ свидетельствуют о том, что наши приборы фиксируют поля, вызванные сильно намагниченными местными источниками, а не общее лунное дипольное поле.

Напряженность постоянного магнитного поля 38 γ — раз в десять больше, чем максимальная ожидаемая величина (о чем прибор, доставленный на Луну «Аполлоном-12», передал на Землю через 40 минут после включения), — была настолько неожиданной, что мы боялись поверить в ее правильность до тех пор, пока не прокалибровали инструмент с помощью радиосигналов из Хьюстона, которые должен был принять прибор. Через три дня после установления магнитометра Луна вошла в хвост земной магнитосферы, где солнечный ветер вытеснялся геомагнитным полем. В это время Луна оказалась в области очень спокойного магнитного поля, и мы передали на прибор команды, которые позволили использовать его как градиометр. Для этого датчики были повернуты при помощи двигателей так, что все три компоненты вектора напряженности можно было измерять последовательно в каждом из трех положений датчиков. Эти три измерения показали, что градиент напряженности поля меняется меньше, чем минимально измеряемая величина 0,2 γ на полуторраметровом расстоянии между двумя любыми датчиками.

Пространственная однородность поля указывает на то, что если источник сильного магнитного поля представляет собой единственный метеорит, погрузившийся неглубоко под поверхность Луны, то он должен находиться на расстоянии больше 200 *м* от инструмента. С другой стороны, верхний предел напряженности постоянного лунного поля, выводимый из результатов измерений «Эксплорера-35», показывает, что источник поля нахо-

дился на расстоянии ~200 *км* от приборов «Аполлона-12». Можно рассчитать минимальные и максимальные размеры источника, если предположить, что он представляет собой шар с такой же остаточной намагниченностью, как и образцы лунных пород, доставленные на Землю. Мы вычислили, что если гипотетический источник лежит в 200 *м* от прибора, то его диаметр должен составлять 15 *м*, а при удалении 200 *км* диаметр источника должен достигать 50 *км*.

Другое наблюдение, которое проливает свет на размеры источника постоянного поля — это сжатие поля солнечным ветром. А. Барнс и П. Кассен из Эймсского исследовательского центра оценили, что постоянное поле напряженностью 38 γ будет сжато солнечным ветром, если его эффективная протяженность над поверхностью превышает 10 *км*. Такое сжатие поля указанной напряженности в месте приземления «Аполлона-12» было действительно отмечено в моменты, когда Луна попадает под плотный поток частиц из солнечного ветра (рис. 8). Плотность частиц солнечного ветра была измерена К. Снайдером и Д. Клэем из Лаборатории реактивных двигателей.

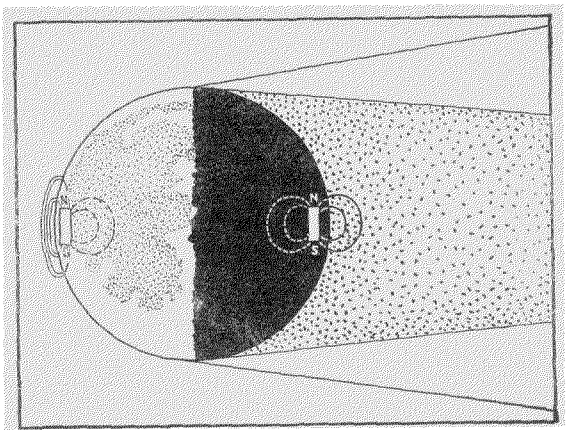


Рис. 8. Солнечный ветер может сжимать лунное магнитное поле, формируя чашеобразный ударный фронт.

Это указывало бы на то, что постоянное поле достаточно сильно, а его источники имеют большие размеры. Слабое общее дипольное лунное поле (или полное отсутствие его) не может вызвать появление ударного фронта, подобного ударному фронту вблизи Земли. В этом случае солнечный ветер в дневное время беспрепятственно достигает лунной поверхности и образует позади Луны (на стороне, противоположной Солнцу) турбулентный «кильватерный след» — полость, более или менее свободную от солнечных частиц. Местное лунное постоянное магнитное поле, создаваемое достаточно сильным и достаточно протяженным источником, могло бы не оказывать влияния на внешнее поле внутри полости, однако могло бы сжиматься солнечным ветром на дневной стороне Луны. Такое сжатие постоянного поля было действительно зарегистрировано в месте посадки «Аполлона-12» по данным, переданным во время солнечной магнитной бури.

Измерения магнитного поля, проведенные «Аполлоном-12» и «Аполлоном-14», а также высокая остаточная намагниченность, обнаруженная у лунных пород, доставленных со всех мест посадок «Аполлонов» (в том числе «Аполлона-11» в 1500 *км* к востоку от места посадки «Аполлона-12») показали, что Луна обладает магнитными свойствами в районах, весьма удаленных друг от друга. Дж. Михалов из Эймсского исследовательского центра пересмотрел данные о магнитных измерениях и плотности частиц, полученные «Эксплорером-35», и заключил, что как на видимой, так и на обратной сторонах Луны могут существовать несколько намагниченных областей. Таким образом, мы можем с уверенностью считать, что бо́льшая часть лунной поверхности (возможно, даже вся оболочка Луны, состоящая из кристаллических пород) в какой-то момент в прошлом приобрела магнитные свойства. Очевидно, на большей части или даже на всей лунной поверхности существовали внешние магнитные поля, гораздо более сильные, чем наблюдаемые в настоящее время, либо Луна получила магнитный «заряд» на какой-то ранней стадии эволюции Солнечной системы (рис. 9).

Результаты магнитных измерений, проведенных в местах посадки «Аполлоном-12» и Аполлоном-14», поразительно сходны друг с другом: все векторы магнитного поля направлены вниз и к югу, а их величины

различаются не более чем в три раза. Это позволяет предположить, что оба пункта магнитных измерений «Аполлоном-14» и, возможно, пункт измерения «Аполлоном-12» расположены на одном блоке вещества, некогда намагниченного равномерно. Впоследствии магнетизм этого блока мог

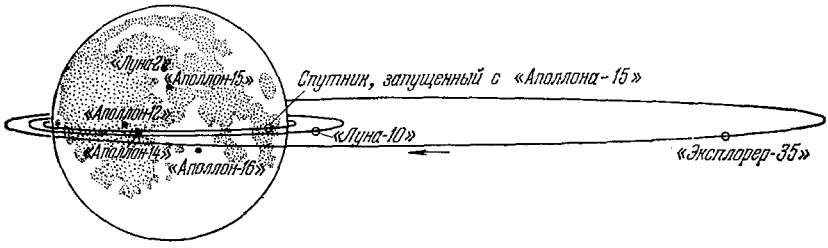


Рис. 9. На фоне видимой стороны Луны указаны местоположения проведенных магнитных экспериментов, а также планируемых США в 1972 г.

Первые лунные магнитные измерения выполнили советские автоматические станции «Луна-2», достигшая поверхности Луны в 1961 г., и «Луна-10», выведенная на окололунную орбиту, однако их аппаратура не была настолько чувствительной, чтобы обнаружить переменные и постоянные магнитные поля самой Луны. «Эксплорер-35», запущенный США в 1967 г. и выведенный на окололунную орбиту, позволил детально изучить воздействие Луны на солнечный ветер, но его удаление от Луны было слишком велико, чтобы измерить лунные поля. Магнитометры, доставленные на Луну «Аполлоном-12» и «Аполлоном-14» в 1969 и 1971 гг., показали, что Луна гораздо активнее в магнитном отношении, чем предполагалось ранее. Магнитометры, которые будут доставлены на Луну последующими экспедициями по программе «Аполлон», несомненно, дадут более подробную информацию.

изменяться за счет местных процессов, например, тектонической активности, разломов и размагничивания при падении метеорных тел (рис. 10).

Вещество близ лунной поверхности, вероятно, приобрело намагниченность во время кристаллизации и отвердевания Луны примерно

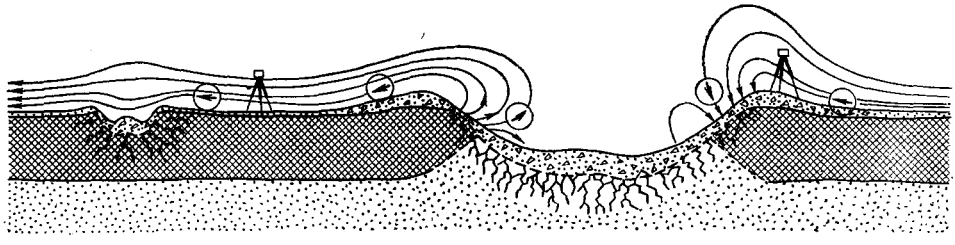


Рис. 10. Неоднородное постоянное магнитное поле было измерено космонавтами «Аполлона-14» в двух местах на расстоянии 1,1 *км* друг от друга.

Это свидетельствует о том, что поблизости имеется вещество с сильной намагниченностью. Неоднородность можно объяснить существованием подповерхностного вещества, которое было однородно намагничено в какой-то момент, но впоследствии было изменено местными процессами, например, за счет размагничивания под действием ударов метеоритов. Луна имеет слабое (или полностью отсутствующее) дипольное поле; по-видимому, постоянное лунное магнитное поле определяется локальными источниками, подобными, например, изображенному на рисунке, причем это поле меняется от места к месту. Ввиду этого компас с магнитной стрелкой был бы бесполезен для ориентации на Луне.

3,7 млрд. лет назад. Остаточная намагниченность образцов, доставленных «Аполлоном-11» и «Аполлоном-12», как будто свидетельствует о наличии магнитного поля, превышающего 1000 γ; поля такой напряженности в космическом пространстве вблизи Луны до сих пор не измерялись. Источник древнего внешнего поля мог не иметь никакой связи с Луной (например, поле могло вызываться Солнцем или Землей) или, наоборот, находиться в недрах Луны (скажем, возбуждаться динамо-эффектом или внутренними электрическими токами) (рис. 11).

Магнитное поле Земли могло бы намагнитить лунное вещество, если бы геомагнитное поле в прошлом было гораздо сильнее или лунная орбита

располагалась гораздо ближе к Земле. Если земное поле никогда не было сильнее, чем в настоящее время, то для приобретения поля напряженностью ~1000 γ Луна должна была бы находиться на расстоянии 2—3 земных радиусов. Но эта величина может оказаться меньше так называемого «предела Роша», при достижении которого Луна была бы разрушена приливными силами. Если же требуемое для указанной намагниченности поле было вызвано внутренним лунным «динамо», то у Луны должно было бы существовать горячее ядро и достаточно высокая скорость вращения в то время, когда на поверхности вещество Луны охладилось ниже

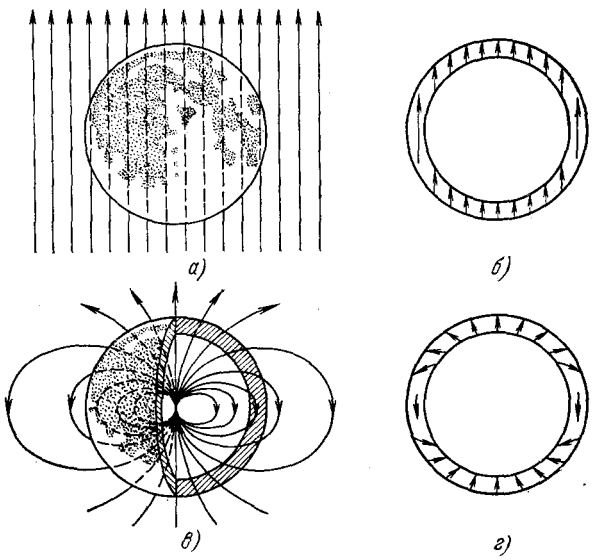


Рис. 11. Результаты магнитных измерений позволяют предположить, что некогда в истории Луны на большей части или даже на всей лунной поверхности внешние поля были гораздо более сильные, чем сейчас.

Согласно одному из предположений Луна могла получить сильный «магнитный заряд» за короткое время на ранней стадии эволюции Солнечной системы. Если в то время намагниченность приобрела кора Луны в целом, то общая картина намагниченности лунного вещества зависела бы от того, существовало ли внешнее поле вне Луны или оно возникло в ее недрах. Внешнее поле (*а*), которое было сильнее солнечного или земного поля, существующих в настоящее время, привело бы к намагничиванию вещества коры в одном направлении (*б*), внутреннее же поле (*в*) привело бы к различию направлений намагничивания (*г*).

точки Кюри (т. е. температуры, когда существующая намагниченность «замерзает» в веществе). Эти гипотезы требуют существования пока неизвестного механизма, уменьшающего температуру лунных недр и понижающего скорость вращения до нынешних значений. Наши знания о Луне пока слишком ограничены, чтобы мы могли сделать выбор между этими (и другими) предположениями. Можно надеяться, что построение карты постоянного магнитного поля Луны и измерение поля с окололунных орбит даст в будущем возможность прояснить события «магнитной эпохи» Луны и разрешить одну из наиболее интригующих загадок лунной истории.

Однако какая бы гипотеза ни выдвигалась, они все должны принимать во внимание малую магнитную проницаемость Луны. Высказывалось мнение, что часть лунных недр может иметь высокое содержание железа; в этом случае магнитная проницаемость Луны была бы значительной. Наш анализ данных магнитных измерений «Эксплорера-35» и «Аполлона-12» указывают на другую возможность. Если Луна имеет значительную магнитную проницаемость, то это привело бы к измеримому искажению

силовых линий в окрестностях Луны. Однако было отмечено лишь малое искажение поля или даже полное отсутствие искажения; магнитная проницаемость Луны, по-видимому, столь же низка, как и у свободного пространства. Мы заключаем, что Луна в целом не обладает свойствами большого магнита.

Все участвовавшие в разработке магнитометрического эксперимента, надеялись, что измерения, сделанные в месте посадки «Аполлона-12»,

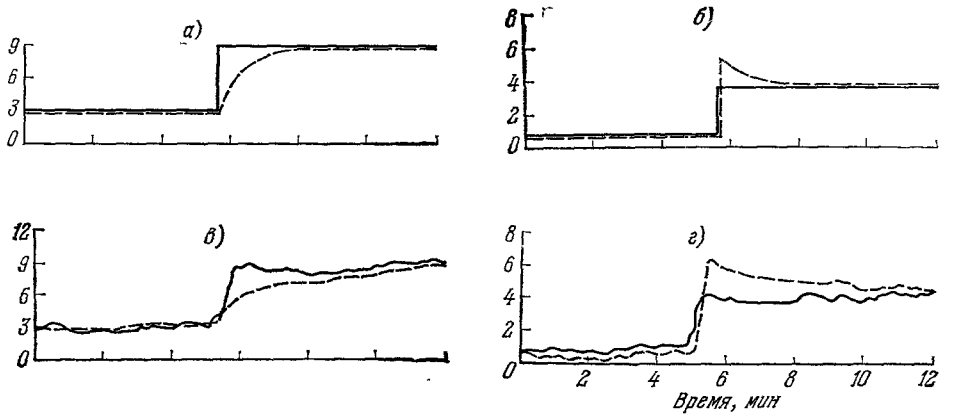


Рис. 12. Магнитометрические записи прохождений мимо Луны скачкообразной неоднородности были использованы для оценки проводимости недр Луны.

Данные были записаны, когда лунный магнитометр находился на ночной стороне Луны, так что эффект сжатия поля солнечным ветром можно было не принимать во внимание. Теоретические расчеты для полей на ночной стороне Луны при однородном сопротивлении представлены на двух верхних графиках. Жирные кривые показывают ступенчатое изменение солнечного поля для двух компонент внешнего поля (вертикальной и горизонтальной относительно лунной поверхности). Тонкие кривые показывают теоретические значения полной напряженности вертикальной (*а*) и горизонтальной (*б*) компонент. На двух нижних графиках приведены образцы реальных записей магнитометров. Жирные кривые — изменения солнечного поля по данным «Эксплорера-35», находящегося на окололунной орбите. Тонкие кривые — одновременные значения вертикальной (*в*) и горизонтальной (*г*) компонент поля на лунной поверхности по данным магнетометра «Аполлона-12». По всей вероятности, отклонения измерений от теории вызваны существованием ядра с меньшим сопротивлением, чем сопротивление внешних слоев Луны. По величине этих отклонений может быть вычислена проводимость лунных недр. Явное различие между поведением вертикальной и горизонтальной компонент иллюстрирует, как Луна в целом реагирует на изменения солнечного магнитного поля.

позволят рассчитать проводимость недр Луны, что дало бы возможность оценить внутреннюю температуру Луны. Сначала мы не знали, окажутся для этой цели более полезными измерения во время лунного дня или лунной ночи. Впоследствии выяснилось, что значительно легче интерпретировать измерения, сделанные во время лунной ночи. Во время лунного дня солнечный ветер сжимает постоянное магнитное поле напряженностью 38 γ, причем сжатие пропорционально сильно меняющейся плотности солнечного ветра. Таким образом, для аккуратного анализа дневных данных необходимо учитывать одновременное влияние солнечного ветра. Ночью же Луна может рассматриваться как проводящая сфера в вакууме.

Поскольку Солнце и Луна электромагнитно связаны благодаря солнечному ветру, Солнце действует как первичная обмотка трансформатора, а Луна — как вторичная обмотка. Любое изменение напряженности первичного магнитного поля приводит к изменению электрического тока и магнитного поля во вторичной цепи. Время, необходимое для затухания вторичных тока и поля, является функцией проводимости и размеров вторичной цепи, иными словами самой Луны (см. рис. 3).

Магнетометр на поверхности Луны во время лунной ночи и магнитометр на борту «Эксплорера-35» дают нам одновременные записи, которые

можно сравнивать при наступлении внезапного изменения напряженности магнитного поля, связанного с солнечным ветром (рис. 12). Вообще говоря, вертикальные компоненты поверхностных полей медленно меняются в ответ на быстрые изменения внешнего поля, в то время как горизонтальные компоненты поверхностных полей изменяются быстро и притом сильнее, чем одновременные изменения напряженностей полей в окололунном космическом пространстве (рис. 13).

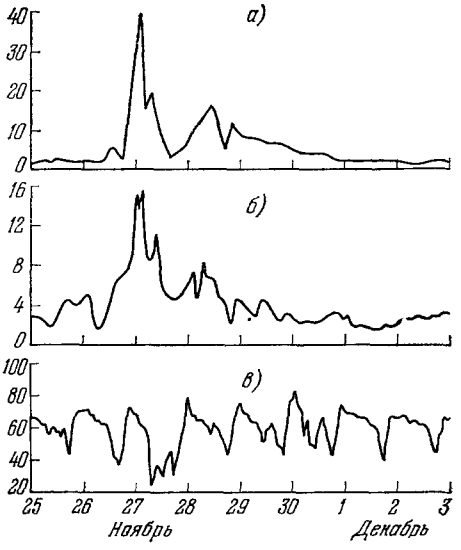


Рис. 13. Сравнение воздействий солнечной бури на лунное магнитное поле в месте посадки «Аполлона-12» и на земное магнитное поле в пункте на поверхности Земли.

Верхняя кривая (*а*) показывает возрастание давления в относительных единицах, которым сопровождается приход частиц солнечной бури в окрестности системы Земля — Луна. Средняя кривая (*б*) показывает, что горизонтальная компонента измеренного аппаратурой «Аполлона-12» постоянного магнитного поля увеличивается прямо пропорционально давлению солнечного ветра. Нижняя кривая (*в*) иллюстрирует, что напряженность геомагнитного поля, напротив, соответственно уменьшается во время солнечной бури. Это уменьшение полного геомагнитного поля вызывается формированием вокруг Земли кругового тока, образуемого заряженными частицами, захваченными земной магнитосферой. Но не известен ни один механизм, посредством которого мог бы формироваться подобный кольцевой ток вокруг Луны.

Мы исследовали записи магнитометров, вызванные более чем 100 внезапными изменениями солнечного ветра. Анализы уверенно свидетельствуют о том, что на любое изменение внешнего поля Луна «откликается» в целом; близ поверхности сразу же возникают индуцированные токи, которые медленно диффундируют в глубь Луны. Наши расчеты показывают, что внешняя область Луны (примерно 40% расстояния до центра) имеет сопротивление около 10 000 *ом·м*, а внутренняя область, или ядро, имеет сопротивление всего лишь 100 *ом·м*. Для Земли соответствующие значения составляют 0,1 и 0,00001 *ом·м*.

Рассчитанные значения сопротивления в недрах Луны можно использовать для оценки температуры в Луне на различных глубинах. Для этого можно использовать лабораторные значения сопротивления в зависимости от температуры (и давления) для наиболее правдоподобных составляющих лунного вещества. Поскольку такие измерения были выполнены с чистыми минералами, результаты могут в лучшем случае лишь грубо представлять действительный состав Луны. Если предположить, что основная составляющая — это перидотит (обычный минерал для мантии Земли), то наблюдаемое сопротивление Луны соответствует максимальной температуре от 600 до 1000° С для основной массы лунных недр. Это значение — лишь грубая оценка, но она свидетельствует в пользу гипотез, согласно которым в течение большей части своей истории Луна была лишена сколько-нибудь крупного расплавленного ядра.

ЛИТЕРАТУРА

Magnetism and the Cosmos, ed. by W. R. Hindmarsh et al., Oliver and Boyd, 1967.— Z. Kopal, The Moon: Our Nearest Celestial Neighdour, Dordrecht, D. Reidel Publ., Co., 1969.— P. Dyal, C. W. Parkin et al., — Apollo 14 Preliminary Science Report. NASA SP-272, U. S. Government Printing Office, July 1971.— P. Dyal, C. W. Parkin, Proc. of the 2nd Lunar Science Conference (Houston, Texas, January 11—14, 1971), The MIT Press, 1971.