

УДК 550.837

И. И. Рокитянский, А. В. Терешин

Институт геофизики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

ГЛУБИННОЕ МАГНИТОВАРИАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЛУНЫ

Зроблено короткий огляд результатів досліджень Місяця в 1969—1972 рр. та перелічено не розв'язані проблеми досліджень електропровідності надр Місяця, які мають розв'язувати майбутні місії на Місяць, зокрема в рамках російського проекту «Луна-Глоб». Магнітоваріаційне зондування Місяця як вхідний сигнал використовує варіації первинного міжпланетного магнітного поля, вимірюваного орбітальним магнетометром, а як вихідний сигнал — варіації вимірюваного на поверхні Місяця вторинного магнітного поля струмів. За цими даними обчислюється перехідна характеристика (частотна чи імпульсна) надр Місяця — її функція відгуку, за якою розв'язується обернена задача — пошук залежності електропровідності від глибини. Розглядаються фізичні аспекти магнітоваріаційного зондування, обговорюються його обмеження і головні джерела похибок — неврахування кондуктивної моди вторинного поля і різка асиметрія навколomisячної плазми на денному та нічному боках Місяця.

Электропроводность — важный параметр, характеризующий состав и физическое состояние недр Земли, Луны и планет. Исследование уравнений состояния твердого тела при высоких давлениях и температурах, а также результаты лабораторных экспериментов указывают на тесную связь электропроводности горных пород с температурой. Следовательно, измерение глубинной электропроводности может дать информацию о температуре и фазовом состоянии недр уже в настоящее время. Отметим, что измерения теплового потока позволяют рассчитать глубинную температуру только в весьма отдаленном прошлом. Исследования глубинной электропроводности Земли позволили существенно уточнить распределение температуры в мантии Земли и локализовать зоны расплавов [7]. Аналогичные исследования Луны и планет существенны как для понимания их строения, так и для построения теории происхождения и развития Солнечной системы.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НЕДР ЗЕМЛИ И ЛУНЫ

Для изучения (зондирования) глубинной электропроводности Земли и Луны используют

ся естественные электромагнитные (ЕМ) поля, возбуждаемые солнечным ветром — неоднородным потоком заряженных частиц, летящих от Солнца со средней скоростью $V = 400$ км/с и несущих магнитные поля $B_e \approx 5$ нТл. Обе величины зависят от активности Солнца и в возмущенные интервалы могут увеличиваться в 2–3 раза.

Наличие у Земли сильного геомагнитного поля (до 60 мкТл на поверхности), убывающего до значений, присущих солнечному ветру на расстоянии 12–15 земных радиусов, приводит к захвату частиц солнечного ветра магнитосферой Земли. Вносимое солнечным ветром внешнее (external) электрическое поле $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$ возбуждает сложную систему магнитосферно-ионосферных токов. Благодаря очень высокому сопротивлению нижней атмосферы (порядка $10^{13} - 10^{14}$ Ом·м при сопротивлении верхних слоёв Земли $0.2 - 10^5$ Ом·м) эти токи практически не проникают из ионосферы в землю. Таким образом, переменные геомагнитные поля, наблюдаемые на поверхности Земли, имеют индукционное происхождение (магнитная или ТЕ — transverse electrical мода). Они состоят из первичного поля ионосферных и магнитосферных токов и вторичного поля токов, индуцированных в проводящих слоях тела Земли. Регистрируя магнитные поля на поверхности Земли и околоземных спутниках можно сделать определённые выводы

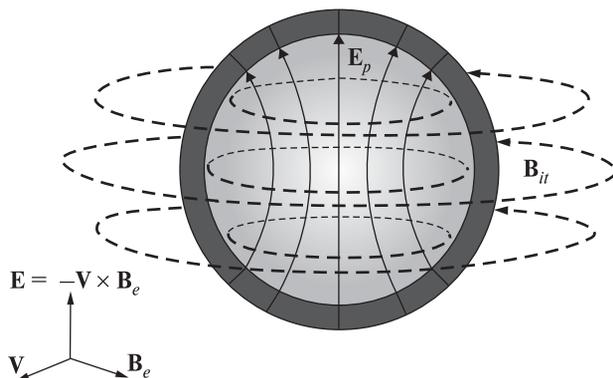


Рис. 1. Полоидальная система токов в твёрдой Луне, возникающих под действием электрического поля $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$, и тороидальное магнитное поле \mathbf{B}_{it} этих токов в вакууме (электрическая мода)

о распределении электропроводности земных недр, при этом кондуктивной или электрической (ТМ) модой обычно пренебрегают [6, 7].

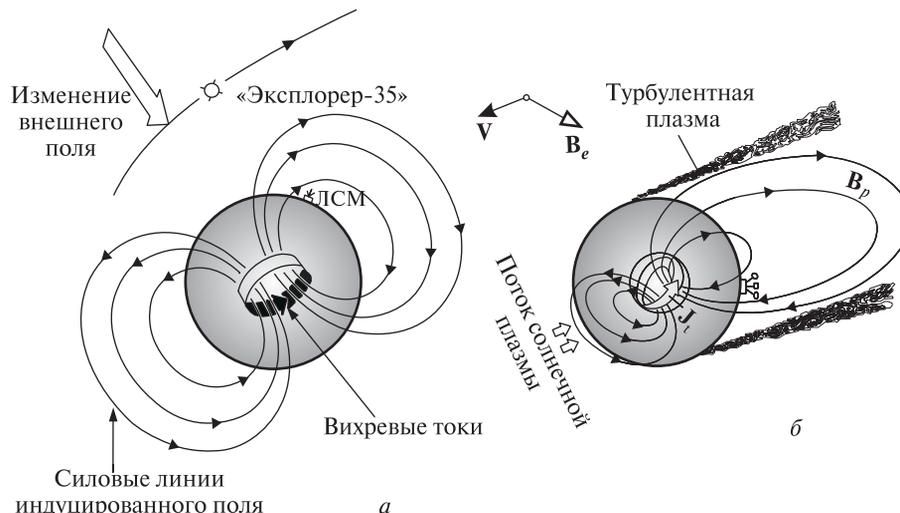
На Луне нет ни атмосферы, ни глобального магнитного поля, поэтому плазма солнечного ветра непосредственно бомбардирует лунную поверхность и поглощается ею. Казалось бы, преимущество при ЕМ-зондировании Луны должно быть отдано кондуктивной моде, когда токи, возникающие от вносимого солнечным ветром электрического поля, пронизывают тело Луны, образуя полоидальную систему токов и тороидальное вторичное магнитное поле (рис. 1). Однако во всех известных нам работах, посвященных изучению Луны, этой модой пренебрегают. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Солнечный ветер имеет очень высокую электропроводность, и электрическое поле в нем практически равно нулю. В системе координат, связанной с Луной, появляется электрическое поле $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$. Полагая $V = 400$ км/с и $B_e = 5$ нТл, получаем $E = 0.002$ В/м, а интегрируя по диаметру Луны, получаем разность потенциалов ΔU , приложенную к Луне, равной 7000 В. В концентрически слоистой Луне возникает полоидальная система токов с отличными от нуля радиальной и меридианальной составляющими (полярная ось системы направлена вдоль вектора \mathbf{E}) и соответственно тороидальное вторичное магнитное поле \mathbf{B}_{it} , имеющее только азимуталь-

ную компоненту (рис. 1). Согласно имеющимся данным наиболее высокое удельное сопротивление имеет верхний слой Луны, и именно он, будучи «подключенным» последовательно с внутренними более проводящими слоями, определяет суммарный полоидальный ток кондуктивной моды. Самый верхний слой Луны — реголит. Его образцы были доставлены на Землю и изучены в лабораториях, его удельное сопротивление получилось равным 10^7 — 10^{10} Ом·м по разным оценкам, причем нельзя исключать, что *in situ* эти значения окажутся другими. Мощность реголита составляет 2—12 м. Для предварительной оценки порядка величины \mathbf{B}_{it} предположим среднее удельное сопротивление верхнего ($h = 100$ км) слоя равным $\rho = 10^7$ Ом·м, а нижние слои будем считать значительно более проводящими, и следовательно, не влияющими заметным образом на формирование суммарного тока. Поперечное (радиальное) сопротивление такого слоя $\rho_{r1} = \int \rho dr \approx \rho h = 10^{12}$ Ом·м. После деления на площадь слоя ($2\pi a^2 = 1897 \cdot 10^{10}$ м², где $a = 1738$ км — радиус Луны) получаем сопротивление двух последовательных полусферических слоев равным всего $R = 0.1$ Ом. Отсюда оценка суммарного тока $J \approx \frac{\Delta U}{R} = \Delta U \frac{S_n}{2\rho h} \approx 66700$ А.

Этот ток создаст на приэкваториальной части поверхности Луны магнитное поле $B_{it} \approx \mu_0 \frac{1}{2\pi r} \approx 7.67$ нТл. Измеряемые на Луне магнитные поля примерно такого порядка величины. Если среднее удельное сопротивление верхнего 100-километрового слоя ρ принять равным 10^8 Ом·м, то тороидальное магнитное поле составит 0.767 нТл — также вполне измеримая величина. Если удастся показать из наблюдений, что тороидальное поле меньше некоторой величины, то это сразу даст нижнюю оценку поперечного сопротивления ρ_{r1} верхнего слоя Луны. Эта величина представляет большой интерес.

Итак, согласно нашим оценкам тороидальное поле может давать ощутимый вклад в наблюдаемое на Луне магнитное поле, особенно если есть локальные каналы или области пониженного сопротивления, на наличие которых указывают многочисленные косвенные данные: неодно-

Рис. 2. Кольцевой тороидальный ток, индуцированный изменениями внешнего магнитного поля ΔB_e , и полоидальное поле B_{ip} (магнитная мода): *a* — в вакууме, *b* — в условиях несимметричного «обжатия» солнечным ветром — качественная картина из работы [13]



родность слоя реголита, данные сейсмологии о существенно неоднородном распределении очагов землетрясений как приливной, так и тектонической природы; данные гравиметрии о наличии интенсивных плотностных неоднородностей в коре и мантии Луны; структура рельефа; локальное истечение газов глубинного происхождения и другие явления [2, 3, 9, 10]. При использовании для зондирования электрической моды, формулы для интерпретации существенно отличаются от таковых для магнитной моды ([7, с. 48; 11]). Разделить наблюдаемое поле на две моды по наблюдениям трёх составляющих магнитного поля в одном пункте на поверхности Луны и в одном на орбите невозможно. Для разделения мод необходимы наблюдения магнитного поля по меньшей мере в трех пунктах на лунной поверхности.

Во всех работах по электропроводности Луны (и Земли) использовалась только магнитная или индукционная мода, которая содержит наиболее интересную информацию о проводимости глубоких недр. Формирование вторичного полоидального магнитного поля индукционной моды представлено на рис. 2, *a*.

Теория электромагнитной индукции на сфере для зондирования Земли развита в конце 19-го — начале 20-го веков. Она представляет магнитное поле в виде разложения в ряд по сферическим

гармоникам и устанавливает соотношения между компонентами поля на поверхности сферы: отношение амплитуды вертикальной составляющей к амплитуде горизонтальных для сферической гармоники порядка n и временной гармоники с круговой частотой ω определяется выражением [7, с. 46—51]

$$W = \frac{B_{r0}}{B_{\theta 0}} = \frac{B_{r0}}{B_{\phi 0}} = \frac{n(n+1)}{r} R(\omega, \sigma(r)), \quad (1)$$

где $R(\omega, \sigma(r))$ — функция отклика concentрически слоистой сферы, имеющая размерность длины. Она характеризует эффективную глубину проникновения поля заданной временной частоты ω при выполнении условия частотного зондирования

$$\frac{n(n+1)}{r^2} \ll k^2 = i\omega \mu\sigma. \quad (2)$$

Если условие (2) не выполняется, магнитное поле теряет связь с электропроводностью. Выполнение этого условия зависит от распределения электропроводности с глубиной. С увеличением глубины исследования к электромагнитному поглощению поля добавляется его геометрическое затухание, зависящее от порядка n гармоники. При $n(n+1)/r^2 > k^2$ вторичное индуцированное переменное магнитное поле на поверхности планеты составляет малую долю

первичного поля и не может быть надёжно измерено. Наиболее важной для зондирования Луны и Земли является гармоника $n = 1$, соответствующая однородному полю. На Земле удаётся выделить вариации $n = 1$ в диапазоне временных периодов от долей суток до 11 лет, и все они, как и гармоники S_q ($n = 2 \div 5$), как показывает построение кривых кажущегося сопротивления, удовлетворяют условию (2). Объясняется это высокой электропроводностью Земли и её интенсивным увеличением с глубиной [7, с. 117, 160, 167]. Электропроводность недр Луны, по-видимому, значительно меньше, чем у Земли, поэтому необходима проверка выполнения условия (2) при интерпретации данных.

Межпланетное магнитное поле солнечного ветра неоднородно. Если его пространственные неоднородности характеризовать спектром с параметром λ (длина волны), то для лунного наблюдателя они будут восприниматься как временные вариации с периодом λ/V . Неоднородность, равная диаметру Луны ($\lambda \approx 3500$ км) соответствует периоду 0.01 с, неоднородность, равная расстоянию от Луны до Земли (384400 км) — периоду 1 с. Следовательно, для длиннопериодных вариаций ($T > 1$ с) внешнее индуцирующее поле \mathbf{V}_e можно предполагать однородным в пределах Луны. Флуктуации \mathbf{V}_e межпланетного магнитного поля проникают в Луну и индуцируют в её проводящих слоях вихревые токи и полоидальное магнитное поле \mathbf{V}_{ip} . Наблюдаемое на поверхности Луны магнитное поле равняется сумме $\mathbf{V}_e + \mathbf{V}_{ip}$. Другие компоненты, такие как тороидальное поле, поле остаточной намагниченности горных пород имеют другие параметры и должны быть исключены из рассмотрения (не исключенная часть даст вклад в погрешность метода МВЗ). Соотношение амплитуд сферических гармоник вертикальной составляющей к амплитудам горизонтальных определяется проводимостью тела [6, 7]. На поверхности идеально проводящей сферы вертикальная составляющая магнитных вариаций равна нулю, а горизонтальная увеличена в полтора раза для первой гармоники $n = 1$. На поверхности шара-изолятора амплитуда первой сферической гармоники вертикальной и горизонтальных составляющих

равна 1 (все величины нормированы к соответствующим компонентам первичного поля \mathbf{V}_e). Для реальных небесных тел должны наблюдаться промежуточные значения между рассмотренными крайними случаями. Запишем сказанное в виде неравенств:

$$0 < B_{\text{набл}}/B_e < 1$$

— для вертикальной составляющей, (3)

$$1 < B_{\text{набл}}/B_e < 1.5$$

— для горизонтальных составляющих. (4)

Неравенства (3)—(4) получены для проводящего шара, окруженного непроводящей средой. Они являются следствием сферической геометрии и общепринятого, но не очевидного предположения о возбуждении электромагнитной индукции однородным в пределах рассматриваемого небесного тела полем. Выполнение неравенств (3)—(4) является необходимым условием применения методики МВЗ для изучения электропроводности.

Большую часть лунного месяца Луна «обдувается» солнечным ветром, который, благодаря высокой проводимости, экранирует магнитные поля внутреннего происхождения; поэтому считается, что магнетометр на окололунной орбите, пребывая в солнечном ветре, регистрирует \mathbf{V}_e в чистом виде [12—14]. Вычитая его из поля на поверхности Луны, получаем индуцированное поле \mathbf{V}_i . Однако экранировка солнечным ветром существенно искажает полоидальные поля. На дневной стороне силовые линии магнитного поля сжаты токами, индуцированными в солнечном ветре так, что вертикальная составляющая обращается в нуль на поверхности Луны, а горизонтальная может усиливаться в несколько раз по сравнению со свободным пространством (рис. 2). В зону лунной тени солнечный ветер практически не проникает, и там проводимость достаточно низкая, так что ночную полость от Луны принято рассматривать как вакуум (рис. 2, б). Так поступали при интерпретации наблюдений на ночной стороне Луны, однако вместо вытянутой от Луны полости свойствами вакуума наделялось всё пространство вне Луны. Таким образом, для дневной и ночной сторон решались сферически-симметричные задачи, что является

очень грубым приближением, могущим существенно исказить результаты зондирования.

Вторым возможным источником погрешности индукционного зондирования, как отмечалось выше, является наложение кондуктивной моды. Рис. 3 иллюстрирует, как может возникать дополнительная асимметрия наблюдаемого поля при суперпозиции мод.

Рассмотрим особенности наблюдений при зондировании Луны. На рис. 4 дана проекция лунной орбиты на плоскость эклиптики в первый месяц работы магнетометра «Аполлон-12». Три четверти лунного месяца Луна находится в зоне действия солнечного ветра, и в течение недели проходит дважды турбулентные области плазменного слоя со средним уровнем магнитного поля около 8 нТл и геомагнитный хвост с полем ± 9 нТл.

В зависимости от положения Луны относительно выше рассмотренных внешних полей и от положения магнетометра, зондирование электропроводности имеет следующие разновидности.

1. Источник индуцирующего поля — солнечный ветер, лунный день. Индуцированное поле зажато солнечным ветром в полость, ограниченную с дневной стороны поверхностью Луны.

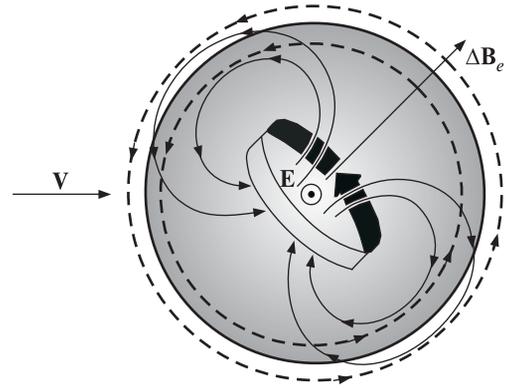


Рис. 3. Суперпозиция вторичных полоидального (сплошные линии) и тороидального (пунктир) магнитных полей в условиях практически полного сферически-симметричного «обжатыя». Фактически поля «обжаты» солнечным ветром только с левой стороны, а с правой должны быть вытянуты в лунную полость (как на рис. 2, б). Электрическое поле рис. 1 повернуто здесь на 90° и перпендикулярно к плоскости чертежа, магнитное поле B_e может иметь любое направление в плоскости чертежа. Производная магнитного поля (или ΔB_e) может иметь любое направление в пространстве, и за ней будет поворачиваться кольцо индуцированных вихревых токов и вторичное полоидальное поле. На данном рисунке изображен частный случай, когда производная внешнего поля лежит в плоскости чертежа. Суперпозиция полей порождает свою специфическую асимметрию, могущую принимать любое направление, определяемое направлениями внешнего поля и его производной

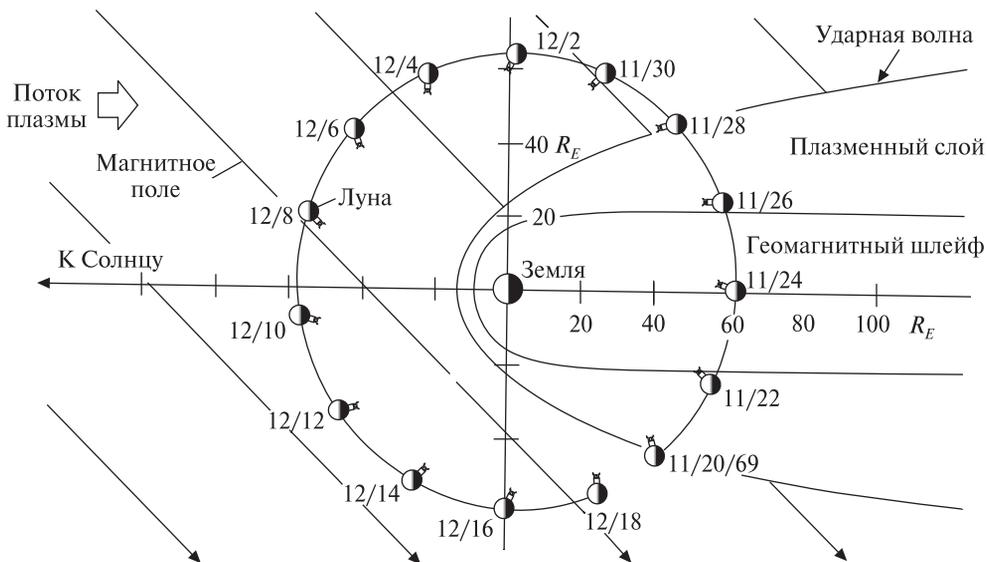


Рис. 4. Кинематика движения Луны с магнитометром «Аполлона-12» с 20 ноября по 18 декабря 1969 г. Магнетометр в течение недели пересёк ударную волну, плазменный слой и геомагнитный шлейф, остальные три недели лунного месяца находился в потоке солнечного ветра с магнитным полем, представленным прямыми линиями [13]

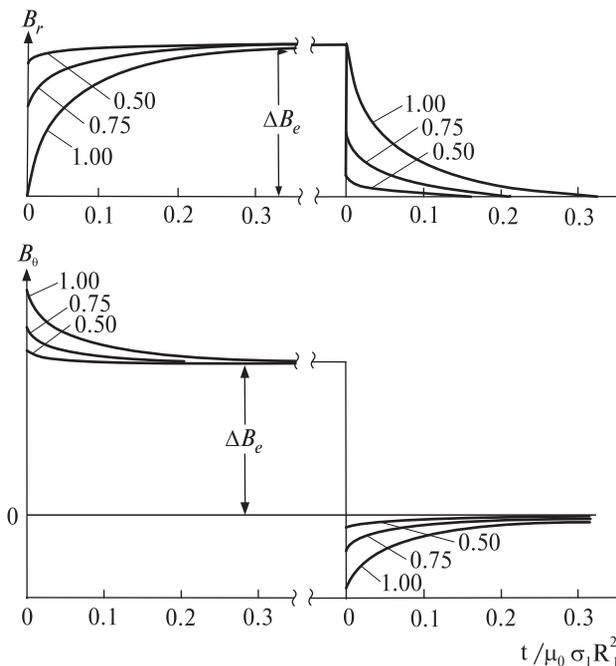


Рис. 5. Отклик двухслойной модели Луны (верхний слой — изолятор, нижний — однородный проводник радиуса r_1 и проводимости σ) на ступенеобразное изменение внешнего поля ΔB_e . Полярная ось сферической системы (r, θ, φ) направлена вдоль ΔB_e [12]. Цифры у кривых — значения R_1/R_L

2. Источник индуцирующего поля — солнечный ветер, лунная ночь. Вне Луны среда рассматривается как вакуум.

3. Источник индуцирующего поля магнитное поле геомагнитного хвоста. Оно стабильнее, чем поле солнечного ветра, в нём эффекты плазменного обжатия минимальны, и рассмотрение индуцированного поля в вакууме более оправданно. Время пролёта Луны через геомагнитный хвост порядка 3 сут, что недостаточно для выделения длиннопериодных вариаций методом гармонического анализа.

Обработка временных рядов, записанных магнетометрами, выполнялась с помощью гармонического анализа (преобразование Фурье) [1, 16, 17] или анализа переходных характеристик (преобразование Лапласа) [1, 4, 14]. Последний способ требует значительно более короткой реализации длиной всего 5—15 мин, содержащей выразительный импульс внешнего поля, в идеа-

ле ступенеобразной формы. Решение уравнений Максвелла на проводящей сфере при ступенчатом изменении однородного внешнего магнитного поля ΔB_e для упрощенной концентрически слоистой модели Луны описано в работе [12] и представлено на рис. 5, из которого видно, что для радиальной составляющей вторичное индуцированное поле вычитается из первичного (во время переходного процесса), а для тангенциальной — складывается с ним. Максимально возможная величина тангенциального полоидального поля равна $\Delta B_e/2$ при $r_i = a$. С увеличением глубины до проводящего слоя Луны вторичное поле на её поверхности уменьшается (геометрическое затухание). Например, при $r_i = a/2$ оно уменьшается в восемь раз и становится трудно измеримым (рис. 5). Зависимость амплитуды индуцированного поля от времени близка к экспоненте. Если проводимость Луны увеличивается с глубиной, эта зависимость описывается наложением экспонент. На рис. 6 представлены две записи ступенеобразных вариаций внешнего поля B_e , записанного на окололунном спутнике «Эксплорер-35», и синхронные записи $B_e + B_i$ станции «Аполлон-12» на лунной поверхности. Видно, что ступенька на горизонтальной составляющей на поверхности Луны почти вдвое больше, чем на орбите, хотя теоретически для принятой модели различие не может превышать 0.5. Измерения выполнены на ночной стороне Луны в поле геомагнитного шлейфа, и в работе [12] пространство над поверхностью Луны принималось за вакуум, что, по-видимому, не совсем корректно. Следует подчеркнуть, что эффект «обжатия» полоидального поля проводящей плазмой вне Луны качественно такой же, как эффект электропроводности в коре и мантии Луны: и увеличение электропроводности недр Луны, и увеличение электропроводности окололунного пространства уменьшают вертикальную составляющую и увеличивают горизонтальную. Эффект полного «обжатия» солнечным ветром полоидального поля в рамках сферически-симметричной модели рассчитывался отдельными исследователями, использовавшими наблюдения на дневной стороне Луны. Результат расчётов: вертикальная составляющая индуцирован-

ного поля на поверхности Луны обращается в ноль, горизонтальная «усиливается примерно в 3–5 раз за счёт сжатия солнечным ветром на дневной стороне» [4]. Были и попытки [1] приближенной оценки асимметрии «обжатия» (рис. 2, б) полоидального поля, однако необходима более строгая и точная оценка.

Из рассмотрения рис. 6 видно, что внешнее индуцирующее поле отличается по форме от идеального прямоугольного импульса, поэтому для получения функции отклика, свободной от формы внешнего индуцирующего поля, необходима специальная обработка, развитая для анализа переходных процессов. Входной сигнал — индуцирующее поле $B_e(t)$ (при $t > 0$ принимается равным нулю), функция отклика недр Луны $R(t)$ (это может быть магнитное отношение, импеданс или кажущееся сопротивление) и выходной сигнал (синхронно записанное на поверхности Луны индуцированное поле $B_i(t)$ связаны соотношением свертки, которое рассматривается как интегральное уравнение относительно $R(t)$ — импульсной переходной характеристики недр Луны $\int_0^t B_e(t-\tau)R(\tau)d\tau = B_i$ [8]. Удобным способом обработки является преобразование Лапласа, представляющее три выше указанные величины в виде спектра экспонент.

Магнитометрами «Аполлонов» была зарегистрирована реакция Луны на магнитные поля солнечного ветра на ночной и дневной сторонах, а также в геомагнитном хвосте, где плазменные эффекты солнечного ветра практически отсутствуют [14, 15]. Представленные в указанных работах функции отклика в диапазоне периодов 30–1000 с в значительной степени не удовлетворяли неравенствам (3)–(4), поэтому полученные модели распределения электропроводности нельзя рассматривать как достоверно установленные.

В кратере Лемонье на солнечной стороне Луны «Луноход-2» зафиксировал становление во

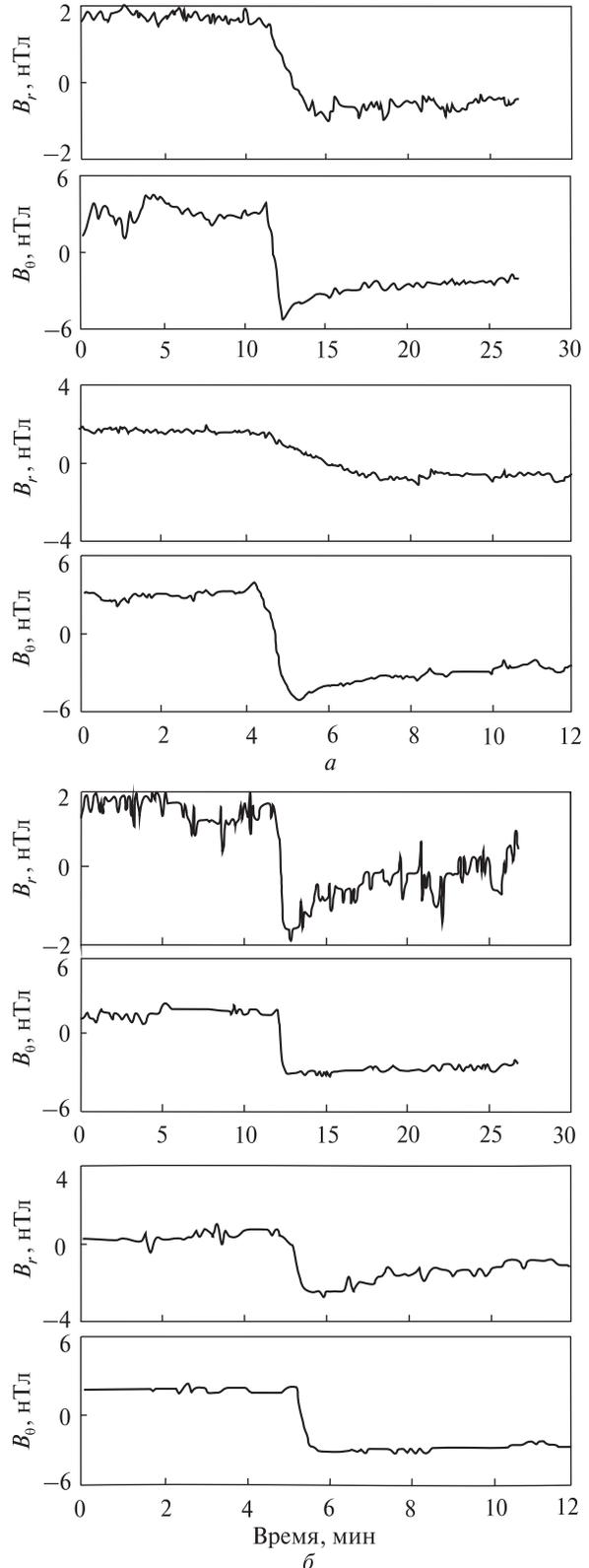


Рис. 6. Отклик реальной Луны по записи поля $B_e + B_i$ «Аполлона-12» (а) на квазиступенчатое изменение внешнего поля B_e , синхронно записанное 8 декабря 1969 г. на окололунном спутнике «Эксплорер 35» (б)

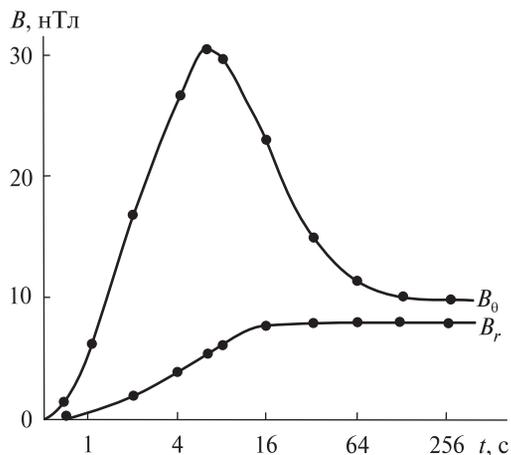


Рис. 7. Интенсивный (30 нТл) импульс, зарегистрированный «Луноходом-2» 23.03.1973. Скорость солнечного ветра во время импульса превышала 730 км/с. По одному этому импульсу выполнено зондирование Луны [5]

времени сильной вариации межпланетного магнитного поля (рис. 7). При этом горизонтальная составляющая магнитного поля отражала глубинную электропроводность Луны, а величина вертикальной составляющей характеризовала напряженность внешнего поля. Экспериментальный график кажущегося сопротивления интерпретировался путем сравнения с теоретическими кривыми.

В 1970-х гг. были построены различные модели электропроводности Луны [1, 4, 5, 12, 14, 15]. Отличаясь в некоторых деталях, они дают в общем сходные распределения электрических свойств лунного материала с глубиной: в верхних (200 км) находится плохо проводящий слой с удельным сопротивлением более 10^5 Ом·м. Более точная оценка по магнитной моде невозможна, а электрическая мода не выделена. Глубже залегает слой пониженного сопротивления (10^3 Ом·м) мощностью 150–200 км, до глубины 600 км сопротивление увеличивается на порядок и далее опять уменьшается до 10^3 Ом·м на глубине 800 км. По мнению более осторожных исследователей, слой с повышенной проводимостью на глубине 200–400 км не следует с необходимостью из полученных данных, и предлагается сглаженное монотонное увеличение проводимости с глубиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Электромагнитными наблюдениями 1969–1973-х годов установлено, что верхние 150–200 км Луны имеют высокое удельное сопротивление $\rho_1 > 10^5$ Ом·м. Ниже, по-видимому, залегают породы с сопротивлением 10^3 – 10^4 Ом·м. Для получения более определенных результатов необходимо учесть асимметрии «обжатия» внутреннего поля солнечным ветром и учесть возможное влияние тороидального вторичного поля, т. е. кондуктивной моды. Для решения этих задач необходимо выполнить синхронные измерения по меньшей мере в трех пунктах лунной поверхности.

2. Перспективны наблюдения во время прохождения Луны через геомагнитный хвост (длительность прохождения всего 3 сут), в котором эффекты солнечного ветра — несимметричное «обжатие» и кондуктивная мода, — по-видимому, не возникают.

3. Необходимо увеличить чувствительность и помехозащищенность аппаратуры.

Амплитуда отдельных избранных ступенеобразных импульсов составляет 3–10 нТл [12], а иногда в возмущенные периоды — до 30 нТл [5]. Заявленная разрешающая способность лунных магнетометров «Аполлона» была 0.2 нТл, что достаточно для регистрации указанных сигналов, но не достаточно для выделения особенностей спада ступенеобразных импульсов, несущих информацию о деталях строения недр Луны и для выделения тороидальной моды. Такая чувствительность также недостаточна при гармоническом анализе данных, поскольку большинство спектральных составляющих имеют малую амплитуду. Если в будущих лунных экспериментах удастся увеличить реальную чувствительность магнетометра на порядок и соответственно понизить уровень шумов, то можно рассчитывать на получение новых более достоверных результатов исследования электропроводности недр Луны.

Авторы признательны В. Е. Корепанову, инициировавшему данную работу и сделавшему ценные замечания по тексту рукописи.

1. Ваньян Л. Л., Бердичевский М. Н., Егоров И. В. и др. Кажущееся электрическое сопротивление Луны и

- его интерпретация // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1973. — № 11. — С. 3—12.
2. Виноградов А. П. (ред.), Космохимия Луны и планет. — М.: Наука, 1975.
 3. Галкин И. Н. Геофизика Луны. — М.: Наука, 1978. — 176 с.
 4. Дайел П., Паркин К., Дейли В. Лунная электропроводность, магнитная проницаемость и температура по данным магнитных экспериментов экспедиций «Аполлон» // Космохимия Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. — М.: Наука, 1975. — С. 323—340.
 5. Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузов Л. Н. и др. Магнетизм и электропроводность Луны по данным «Лунохода-2» // Космохимия Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. — М.: Наука, 1975. — С. 314—322.
 6. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. — М.: Мир, 1986. — 527 с.
 7. Рокитянский И. И. Индукционные зондирования Земли. — Киев: Наук. думка, 1981. — 297 с.
 8. Светов Б. С. Электродинамические основы квазистационарной геоэлектрики. — М: ИЗМИРАН, 1984. — 184 с.
 9. Шкуратов Ю. Г. Луна далекая и близкая. — Харьков: ХНУ, 2006. — 184 с.
 10. Шкуратов Ю. Г., Кислюк В. С., Литвиненко Л. Н., Яцкив Я. С. Модель Луны 2004 для проекта «Укрселена» // Космічна наука і технологія. Додаток. — 2004. — **10**, № 2. — С. 3—51.
 11. Шуман В. Н. Бимодальная структура функций отклика в слабопроводящей атмосфере и обобщённая модель глобального электромагнитного зондирования Земли // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 5. — С. 708—715.
 12. Dyal P., Parkin C. W. Electrical Conductivity and Temperature of the Lunar Interior from Magnetic Transient-Response Measurements // J. Geophys. Res. — 1971. — **76**, N 25. — P. 5947—5969.
 13. Sill W. R., Blank J. L. Method for Estimating the Electrical Conductivity of the Lunar Interior // J. Geophys. Res. — 1970. — **75**, N 1. — P. 201—210.
 14. Sonett C. P. Solar wind induction and lunar conductivity // Phys. Earth Planet. Interior. — 1975. — **10**. — P. 313—322.
 15. Sonett C. P. Some Consequences of Solar Wind Induction in the Moon // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. — 1977. — **285**. — P. 537—547.

Надійшла до редакції 30.03.10

I. I. Rokityansky, A.V. Tereshyn

ELECTROMAGNETIC DEPTH SOUNDING OF THE MOON

A brief overview of the lunar interior electrical conductivity study made from 1969 to 1972 is given. We consider unsolved problems of the study which can be investigated by future missions to the Moon, in particular, within the framework of the Russian Luna-Glob project. Electromagnetic sounding of the Moon uses variations of the interplanetary magnetic field (as input inducing field) measured with the orbital magnetometer and variations of the secondary induced (output) magnetic field measured at the lunar surface. From this data transfer function (in frequency or time domain) of the Moon interior is calculated and inverse problem (lacking for conductivity versus depth distribution) is solved. We consider physical aspects of electromagnetic sounding, discuss its limitations and principal sources of error, namely, the asymmetry of daytime and nighttime near-the-Moon plasma and the neglect of conductive mode.