

Исследование электропроводности Луны (итоги и перспективы)

© *И. И. Рокитянский, А. В. Терешин, 2010*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 2 февраля 2010 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Місяць інтенсивно досліджували у 1959—1976 рр., коли було побудовано перші геофізичні моделі його надр. Дані місячної сейсмології, гравіметрії, топографії й селенології чітко вказують на наявність значних неоднорідностей у місячній корі та мантії. Проте, маючи 4 сейсмографи та одиничні магнітометри, вдалось побудувати лише попередні сферично-симетричні 1D моделі сейсмічних швидкостей та питомої електропровідності. Електромагнітне (ЕМ) зондування Місяця використовує варіації первинного міжпланетного магнітного поля, яке вимірюють орбітальним магнітометром і вважають вхідним сигналом, а також варіації вторинного магнітного поля струмів, індукованих у провідних шарах Місяця, яке вимірюють на поверхні Місяця і вважають вихідним сигналом. За цими даними обчислюють перехідну характеристику (частотну або імпульсну) надр Місяця — його функцію відклику, за якою розв'язують обернену задачу — знаходження залежності електропровідності від глибини. У статті досліджено фізичні аспекти ЕМ зондування, обговорено його обмеження та головне джерело похибки — різка асиметрія білямісячної плазми на денному і нічному боках Місяця.

The Moon was intensively studied in 1959—1976, when the first geophysical models of the Moon interior was created. Data of lunar seismology, gravity, topography, and selenology yield clear understanding that lunar crust and mantle are substantially not uniform laterally. Nevertheless having quite few seismometers and magnetometers at the Moon, only spherically symmetric 1D preliminary models of seismic velocities and electrical conductivity were obtained. Electromagnetic (EM) sounding of the Moon uses the variations of interplanetary magnetic field (as input inducing field) measured by orbital magnetometer and secondary induced (output) magnetic field measured at lunar surface. From this data, transfer function (in frequency or time domain) of the Moon interior is calculated and inverse problem (looking for conductivity versus depth distribution) is solved. We consider physical aspects of EM sounding, discuss its limitation and principal source of error — the asymmetry of daytime and nighttime near-the Moon plasma.

Введение — основные вехи исследования недр Луны. До середины XX в. Луну изучали с помощью телескопов и спектрального анализа изображений в телескопе, к началу 1960-х методом радиоастрономии был оценен тепловой поток из недр Луны. Комплексное геофизическое исследование Луны началось с появлением космических аппаратов.

В январе 1959 г. аппарат "Луна-1" прошел над поверхностью Луны и установил, что на Луне нет магнитного поля, сопоставимого с земным. Осенью 1959 г. "Луна-2" доставила

на Луну вымпел СССР, а "Луна-3" передала на Землю первые снимки обратной стороны Луны. "Луны-4—8" отрабатывали методику мягкой посадки и, наконец, "Луна-9" в феврале 1966 г. выполнила мягкое прилунение, произвела фотографирование и исследование свойств грунта. Оказалось, что на Луне нет ожидавшегося мощного слоя пыли. Последующие "Луны" продолжали фотографирование, исследование механических и химических свойств грунтов в различных пунктах посадки. "Луна-16" (1970) взяла керн с лунным

грунтом (350 мм) из моря Изобилия и вернулась на Землю. "Луна-17" (1970) доставила на поверхность Луны "Луноход-1", который работал 10,5 месяцев, прошел 11 км, обследовал площадь 80 тыс. кв. м, снял 200 панорам, 20 тыс. пейзажей, исследовал химический состав грунта. "Луноход-2" (1973) прошел 37 км, измеряя дополнительно магнитное поле, исследовал кратеры и разломы на пути следования. Последние "Луны" (1972—1976) отбирали образцы грунта в различных пунктах и доставляли их на Землю для всестороннего исследования.

США, по началу, сильно отставали от СССР, и только в 1965 г. их "Зонд-3" облетел Луну, сделав снимки ее обратной стороны. Однако если СССР на Луне использовал только роботы, США сделали ставку на участие живых людей и получили значительно большие возможности в исследовании Луны. В частности, они установили сейсмические и магнитные станции. 20 июля 1969 г. три американских астронавта достигли окололунной орбиты. Затем лунный модуль с двумя астронавтами (Н. Армстронгом и Э. Олдрином) прилунились в море Спокойствия. Астронавты установили сейсмостанцию и взяли образцы лунных пород. На "Аполлоне-12" 19 ноября 1969 г. астронавты Конрад и Бин высадились в океане Бурь. Они собрали образцы пород, выполнили сейсмические и электромагнитные наблюдения. "Аполлоны-14, 15, 16, 17" с посадкой астронавтов (1971—1972): установка сейсмографов, отбор лунных пород, изучение магнитного поля, электропроводности лунного грунта, теплового потока, силы тяжести.

С 1959 по 1976 г. к Луне было послано 54 корабля, из них 18 совершили мягкую посадку, на Землю доставлено 400 кг лунных пород, многие тысячи фотографий и телевизионных снимков, огромный объем записей сейсмографов, магнитометров, измерений гравитационного поля и теплового потока.

В середине 70-х годов усилия космических держав переключились на исследования планет и спутников Юпитера, геофизические измерения на Луне были почти приостановлены. Сейчас намечается активизация исследований на Луне, в которых кроме США и России участвуют Китай, Япония, Европейское космическое агентство, Индия.

Ниже дан краткий обзор результатов исследований Луны космохимическими и различными геофизическими методами, следуя в основном монографиям [Галкин, 1978; Рус-

кол, 1975], статьям из сборника [Космохимия ..., 1975] и работе [Шкуратов и др., 2004]. Далее рассмотрены и проанализированы результаты и перспективы исследования электропроводности Луны.

Селенохимические исследования. Образцы лунных пород собраны в районах морей (моря Спокойствия, Дождей, Ясности, Изобилия и океана Бурь) и в трех континентальных районах. Образцы всесторонне исследованы в лучших лабораториях Земли. Все лунные образцы являются изверженными базальтами, континентальные базальты более древние — возраст более 4 млрд лет, морские базальты более молодые, причем обширные излияния магм сохранились в виде равнин. Последние 3—3,5 млрд лет тектоническая активность на Луне предполагается слабой. При отсутствии атмосферы процессы выветривания на Луне не происходят и главной причиной сравнительно небольших изменений рельефа и метаморфизма приповерхностных пород считается падение метеоритов. Ударное взрывное воздействие падающих метеоритов сопровождается локальным подъемом температуры до нескольких тысяч градусов и остеклянием частичек бывшего базальта. Частицы, разнообразные по форме и окраске с размером зерен в доли миллиметра, образуют реголит — породу с совершенно необычными для земных пород свойствами. Это уникальное пористое образование — продукт метеоритного "вспахивания" и "обдувания" солнечным ветром. Он отличается от земных пород чрезвычайно низкой теплопроводностью $[(0,2—5) \cdot 10^{-5} \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})]$ и электропроводностью $[10^{-7}—10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}]$. Плотность реголита 1,4—1,8 г/см³ при пористости порядка 50%. В условиях глубокого лунного вакуума частицы лунного грунта благодаря активации поверхности приобретают высокую когезионную способность (примерно 500 Н/м²), поэтому пыль не поднимается при езде луноходов и хождении астронавтов. Однако, будучи перенесенными в земную атмосферу и даже в атмосферу инертных газов, реголит сразу обращается в пыль.

Реголит покрывает всю поверхность Луны слоем от 2 до 12 м, ниже него находится также результат метеоритного метаморфизма — слой брекчий, не столь мелкодисперсный, как реголит. Эти слои обеспечивают сохранение тепла в недрах Луны, поскольку температурный градиент у поверхности Луны 1—4 °С/м (на Земле ≈ 0,03 °С/м). Интересно сравнить

состав морских и континентальных базальтов. Морские имеют повышенное содержание FeO (25 % — вдвое больше земных базальтов) и TiO₂ (до 13 % — почти на порядок больше чем в земных базальтах и на 2 порядка больше чем в хондритах (каменных метеоритах)). Континентальные базальты (изучены слабо: всего по 3 районам, хотя континенты занимают более 70 % поверхности Луны) имеют высокое содержание CaO и Al₂O₃ и низкое содержание FeO и TiO₂. Получен также богатейший материал по другим элементам и соединениям, по микроэлементам и радиоактивным элементам. Благодаря сохранению образцов в течение миллиардов лет, лунные данные в определенных отношениях представительнее земных и являются ценнейшим дополнением к ним для построения теории эволюции планет земной группы.

Сейсмические исследования. Сейсмические наблюдения на Луне начались 21 июля 1969 г. Первая станция проработала около месяца. Миссии "Аполлон-12, 14, 15 и 16" установили на видимой стороне Луны четыре сейсмические станции. Три из них размещены в вершинах равностороннего треугольника со сторонами около 1000 км, четвертая — в 180 км от одной из них (рис. 1). Возможности исследования на такой сети ограничены, тем не менее удалось определить параметры ряда лунотрясений и получить зависимость скорости сейсмических волн от глубины.

Во время экспедиций "Аполлонов" также были проведены сейсмические исследования верхней части разреза. Первое детальное исследование скоростей продольных волн в лунном грунте было проведено в континентальном районе Фра-Мауро во время экспедиции "Аполлон-14". Три сейсмометра записали постукивание астронавтов по грунту на расстоянии до 100 м. Сейсмограммы при больших разносах были получены при взлете лунной кабины и с помощью специальных гранат, взорванных после отлета астронавтов по команде с Земли.

Похожий эксперимент был проведен астронавтами "Аполлон-16" в континентальном районе кратера Декарт. Были изучены глубины до 200 м. Наконец, во время экспедиции "Аполлон-17" в морском районе Тавр-Литтров удалось "осветить" строение верхних слоев до глубины 1,5 км.

Лунотрясения можно разделить на четыре группы:

1. *Приливные.* Глубина очагов от 600 до

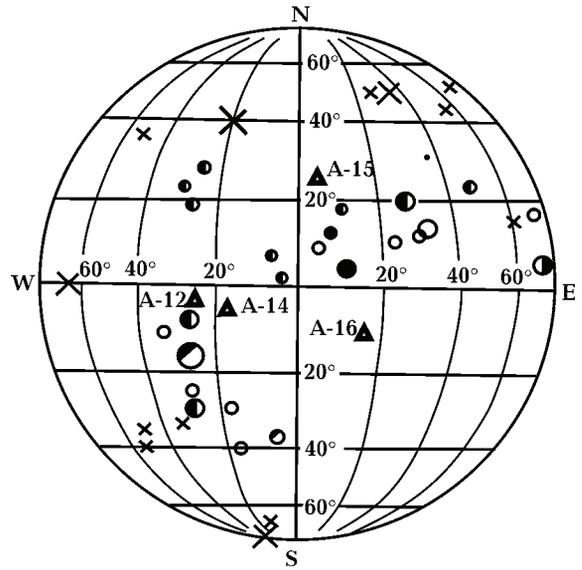


Рис. 1. Карта эпицентров лунотрясений. Кружки — приливные, крестики — тектонические, малый кружок — число лунотрясений менее 5 % от общего, средний — менее 10 %, большой — более 20 %, полый кружок — глубина не определена, залитый на четверть — глубина 500—600 км, залитый наполовину — 600—700 км, залитый полностью — глубина 700—900 км. Треугольниками с соответствующими номерами показаны сейсмические станции "Аполлонов".

800 км, они концентрируются вдоль двух пересекающихся вытянутых зон шириной 100—300 км и длиной 2000 км. Зоны приурочены к окраинам лунных морей (рис. 1, 2). Число зарегистрированных приливных лунотрясений порядка 700 в год. Их активность обнаруживает изменения с периодом 13,6 дней (половина сидерического месяца) и 206 дней (солнечные возмущения перигея Луны). Энергия, выделяемая в очаге, варьирует от 10⁷ до 10⁹ эрг (магнитуда 0,5—1,3), суммарная энергия за год составляет 10¹⁰—10¹² эрг.

2. *Тектонические.* За первые два года наблюдений было зафиксировано лишь 11 толчков, вероятно имеющих тектоническую природу (см. рис. 1, 2). Характерная особенность их записей — высокочастотность, чем они резко отличаются как от приливных лунотрясений, так и от ударов метеоритов. Энергия тектонических лунотрясений на несколько порядков выше, чем у приливных: магнитуда достигает 4, за год выделяется энергия порядка 10¹⁵ эрг. Записи тектонических лунотрясений (наряду с ударами крупных метеоро-

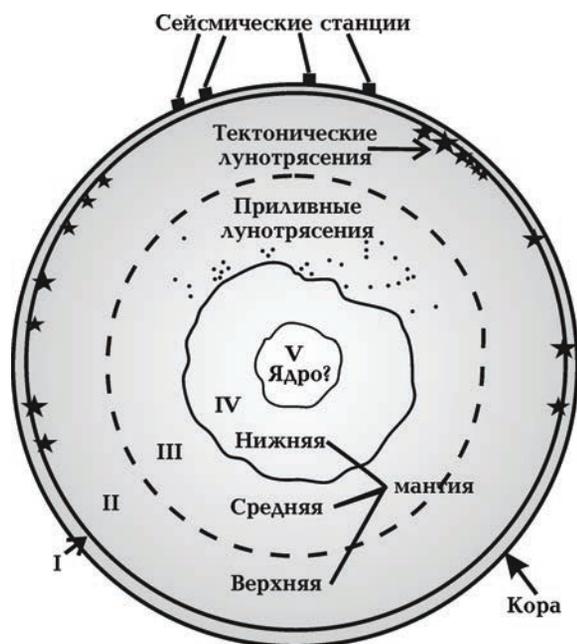


Рис. 2. Структура Луны по сейсмическим данным миссий "Аполлон" [Adams, 2009].

ритов) использованы для изучения глобальной скоростной структуры Луны.

Все выявленные тектонические лунотрясения оказались вне сети лунных сейсмических станций на расстояниях больше 600 км: 10 из 11 были зафиксированы всеми станциями, для 4 из 11 определены лишь азимут и расстояние, для 7 — координаты (с точностью 5°). Девять эпицентров расположены на периферии видимой стороны Луны, два — на обратной (без явной связи с поверхностными структурами). Глубина очагов определена неточно, по характеру записи одного из сильных тектонических лунотрясений получена максимальная оценка глубины его очага — 300 км, минимальная оценка глубины очагов 25 км.

3. *Метеоритные* — от падения метеоритов, а также остатков космических модулей весом до нескольких тонн. Поскольку координаты падений точно известны, по этим событиям получены основные результаты о глубинном строении Луны.

4. *Термальные* — от резкого разогрева лунной поверхности после восхода Солнца, интенсивность малая, наблюдаются локально.

Основные результаты сейсмических исследований на Луне:

- поверхность Луны покрывает реголит толщиной 2—12 м со скоростью распро-

странения продольных сейсмических волн порядка 100 м/с и высокой сейсмической добротностью, его плотность составляет 1,4—1,8 г/см³;

- под реголитом залегают брекчии толщиной 18—38 м со скоростью распространения продольных волн порядка 300 м/с. Эти породы похожи на обломочные породы вблизи вулканических кратеров, их плотность 1,8—1,9 г/см³;

- под реголитом и брекчиями скорость растет, иногда скачкообразно. На глубине 200 м скорость составляет примерно 500 м/с, на полутора километрах — 1 км/с, еще ниже в лунной коре скорость имеет величину 4—6 км/с.

Ответ на вопрос "есть ли у Луны кора?" можно было дать только после хорошего удара о лунную поверхность. 13 мая 1972 г. в 142 км от сейсмостанции А-14 упал метеорит размером 2 м со скоростью 20 км/с. Удар был настолько силен, что образовался кратер диаметром 100 м. Приборы на сейсмостанциях А-12 и А-14 зашкалили, а на станциях А-15 и А-16 (расположенных соответственно в 967 и 1026 км) получили записи, обработка которых показала, что кора на Луне есть. Она слоиста, сложена, по-видимому, кальциево-алюминиевыми породами и имеет высокий градиент скорости. Толщина коры Луны в среднем составляет 60 км, изменяясь от 0 км под морем Кризисов до 107 км в северной части кратера Королева на обратной стороне Луны.

На границе кора — мантия скорость продольных волн скачком увеличивается до 6—9 км/с в зависимости от региона, в среднем до 8 км/с (рис. 3). Далее с глубиной скорости не увеличиваются, как на Земле, а по данным отдельных авторов, уменьшаются. Слой пониженных скоростей, предполагаемый в литосфере, соответствует верхней половине средней мантии, расположенной на глубине 280—500 км (см. рис. 2, 3).

Для Луны, как и для Земли, применяются понятия литосферы (каменной сферы) и астеносферы. В понятии литосфера Луны объединяются кора, верхняя и средняя мантия, а под астеносферой понимают нижнюю мантию, ее верхняя граница находится на глубине 800 км. В нижней мантии поперечные волны не проходят, из чего делается вывод о жидком или размягченном состоянии недр Луны глубже 800 км, на это же указывает отсутствие там лунотрясений. Некоторые ав-

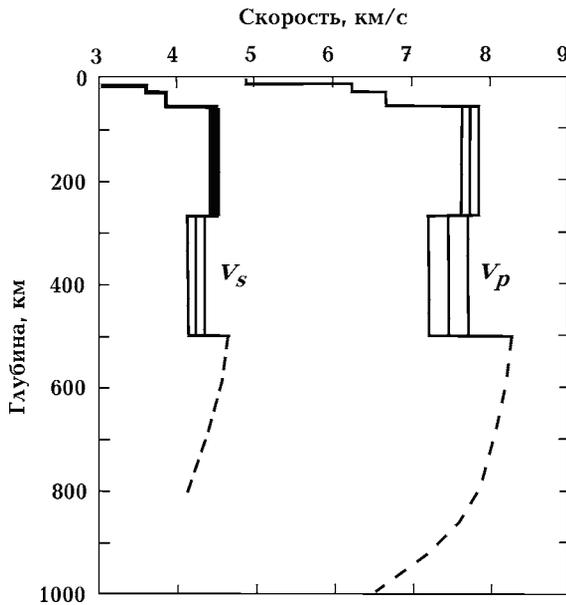


Рис. 3. Схематизированное изменение скорости продольных V_p и поперечных V_s сейсмических волн с глубиной ([Adams, 2009] с учетом данных [Дайел и др., 1975]).

торы предполагают, что Луна имеет расплавленное сульфидо-железное ядро размером приблизительно 0,2 радиуса Луны, скорость продольных волн в нем резко падает. Однако по мнению космохимиков [Космохимия ..., 1975] на Луне нет железо-никелевого ядра. Во-первых, средняя плотность Луны $3,34 \text{ г/см}^3$, т. е. ниже чем у хондритов ($3,58\text{—}3,6 \text{ г/см}^3$), рассматриваемых как исходный материал образования Луны и планет. Во-вторых, комплекс селенохимических данных показывает, что на Луне недостаточно железа для образования ядра. В-третьих, момент инерции Луны примерно таков, как у тел с однородной плотностью.

В результате всех исследований установлено, что верхняя часть Луны состоит из отдельных слоев, в которых скорость сейсмических волн скачкообразно увеличивается с глубиной. Верхних два слоя имеют свойства, сходные в различных регионах, удаленных друг от друга и сложенных разными породами. Это объясняется их одинаковым происхождением: разброс обломков при ударах крупных метеоритов и их последующее дробление мелкими метеоритами.

Гравитационное поле Луны исследовалось при полетах космических аппаратов вокруг Луны ("Луна-10", "Лунар Орбитер" и др.)

по вариациям параметров их орбиты: при подлете к избыточной массе скорость спутника возрастает, после пролета — уменьшается, при этом высота орбиты меняется на десятки и сотни метров. Особенностью лунного поля являются крупные положительные аномалии величиной $100\text{—}200 \text{ мГал}$ с характерными размерами $50\text{—}300 \text{ км}$, приуроченные к круглым морям. Избыточные массы, ответственные за аномалии, были названы масконами. Наиболее массивные масконы обнаружены на границе видимой и обратной сторон Луны, а самый большой с диаметром более 1000 км — в экваториальной зоне центра обратной стороны Луны. Суммарная избыточная масса, соответствующая положительным аномалиям силы тяжести, превышает 10^{-4} массы Луны. Глубины залегания избыточных масс достигают первых сотен километров, что свидетельствует о резко выраженной неоднородности коры и верхней мантии Луны. Ряд отрицательных аномалий приурочен к лунным горам. Сопоставление данных гравиметрических и топографических наблюдений выявило смещение центра масс Луны в сторону Земли на 2 км относительно центра фигуры Луны.

Магнетизм Луны. Собственное магнитное поле Луны как небесного тела практически неразлично на фоне межпланетного магнитного поля, имеющего напряженность $5\text{—}15 \text{ нТл}$. В то же время магнитометры, передвигавшиеся по лунной поверхности, выявили обширные участки Луны с полями до $30\text{—}40 \text{ нТл}$, а в одном пункте 327 нТл . Высокая остаточная намагниченность была обнаружена при исследовании образцов лунного грунта. Ее объясняют существованием у Луны на ранней стадии эволюции магнитных полей высокой интенсивности. Еще одним слабым источником современного магнитного поля Луны могут быть электрические токи, текущие по поверхности полости в так называемом следе Луны.

Тепловой поток измерен в двух пунктах посадки "Аполлон-15 и 17". В результате тщательных наблюдений в течение 3,5 и 2 лет получены следующие значения: $3,1 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$ в море Дождей и $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$ в горах Тавр-Литтр близ моря Ясности (Любимова, в работе [Космохимия ..., 1975]). Различие превышает погрешность. Для всей Луны тепловой поток был оценен по радиоастрономическим наблюдениям [Кротиков, Троицкий, 1963] и получился в 1,5 раза выше. Таким образом, по первым оценкам тепловой поток из недр Луны

всего примерно в 2 раза меньше чем из недр Земли.

Оценки температуры и вязкости. По гипотетическим профилям электропроводности и лабораторным данным о зависимости проводимости мантийных пород от температуры оценена температура внутри Луны для разного состава мантии. Во всех случаях до глубины 600—700 км температура лежит ниже температуры плавления базальтов, а на больших глубинах достигает или превышает ее. Сопоставление глубинных температур с температурами плавления пород при различных давлениях позволило оценить коэффициент вязкости. Верхняя 200—300-километровая оболочка Луны имеет очень большой коэффициент вязкости 10^{26} — 10^{27} пуаз, что на 2—3 порядка выше, чем на соответствующих глубинах Земли. На глубине 500 км вязкость уменьшается на 2—3 порядка и в астеносфере Луны уменьшается до значений, свойственных астеносфере Земли (10^{20} — 10^{21} пуаз).

В существующих моделях тепловой истории Луны можно наметить следующие общие черты: ранний разогрев и частичное расплавление верхней толщи в несколько сотен км; последующее отступление зоны расплава на глубину — остывание и затверждение лито-

сферы; высокая начальная концентрация радиоактивных изотопов, их вынос в ходе эволюции в лунную кору; образование центральной расплавленной зоны и ее постепенное сокращение.

Электромагнитные зондирования. Особенности исследования электропроводности недр Земли и Луны. Для изучения глубинной электропроводности Земли и Луны используются 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 порядка 5 нТл.

Наличие у Земли сильного геомагнитного поля (до 60 000 нТл на поверхности и убывающего до нескольких нТл на расстоянии 12—15 земных радиусов) приводит к захвату частиц солнечного ветра магнитосферой Земли. Вносимое солнечным ветром электрическое поле возбуждает сложную систему магнитосферно-ионосферных токов. Благодаря очень высокому сопротивлению нижней атмосферы (порядка 10^{13} — 10^{14} Ом · м при сопротивлении верхних слоев Земли $0,2$ — 10^5 Ом · м) эти токи практически не втекают из ионосферы в землю. Таким образом, переменные

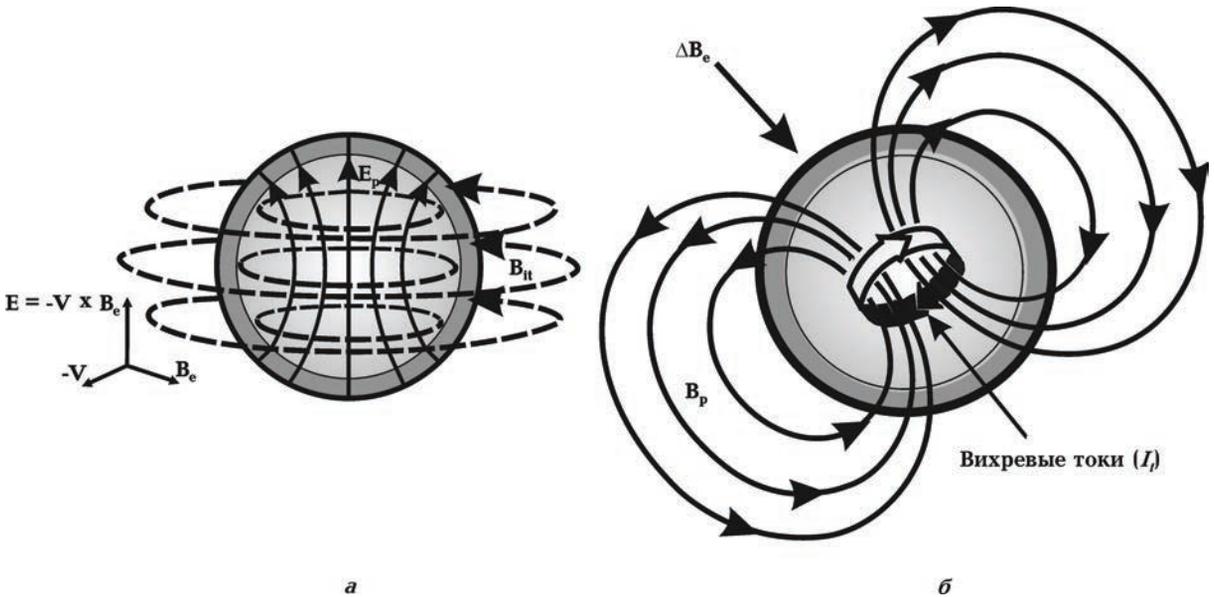


Рис. 4. Тороидальное магнитное поле токов под действием электрического поля $-V \times B_e$, возникающего в результате движения Луны относительно магнитного поля B_e набегающего солнечного ветра (кондуктивная мода) (а) и полоидальное поле B_p , индуцированное изменениями внешнего магнитного поля ΔB_e (вихревая мода) (б). Поля даны в предположении, что Луна со всех сторон окружена непроводящей средой.

геомагнитные поля, наблюдаемые на поверхности Земли, имеют индукционное происхождение (вихревая или 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 и анализируя их, можно сделать определенные выводы о распределении электропроводности земных недр, при этом кондуктивной или электрической (ТМ) модой обычно пренебрегают [Паркинсон, 1986; Рокитянский, 1981].

На Луне нет ни атмосферы, ни глобального магнитного поля, поэтому плазма солнечного ветра с высокой проводимостью непосредственно сталкивается с лунной поверхностью и поглощается ею. Казалось бы преимущество при EM зондировании Луны может быть отдано кондуктивной моде (рис. 4, а). Рассмотрим естественные EM поля, которые могут быть использованы для изучения электропроводности Луны.

1. $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$. В сферически симметричной Луне поле \mathbf{E} создает полоидальную систему токов со вторичным тороидальным магнитным полем \mathbf{B}_{it} (см. рис. 4, а) — кондуктивная мода ТМ. Осью симметрии полей является направление \mathbf{E} .

2. Изменения межпланетного магнитного поля $\Delta\mathbf{B}$ индуцируют в проводящих слоях Луны вихревые тороидальные токи с их вторичным полоидальным магнитным полем \mathbf{B}_{ip} (рис. 4, б) — вихревая мода ТЕ. Осью симметрии полей является направление $\Delta\mathbf{B}$, которое в общем случае не совпадает с направлениями \mathbf{B} и \mathbf{E} .

На рис. 5 магнитные поля двух мод даны вместе. Ось кондуктивной моды на рис. 4, а была направлена вверх, на рис. 5 она перпендикулярна плоскости чертежа (кружок с точкой — к нам, кружок с крестиком — от нас), поле \mathbf{V}_e направлено произвольно в плоскости чертежа. На рис. 5 представлено три разных направления $\Delta\mathbf{V}_e$, все в плоскости чертежа, откуда видно, что полоидальное поле на одной стороне токового кольца складывается с тороидальным полем, на другой — вычитается, что приводит к дополнительной асимметрии. Нахождение трех векторов (\mathbf{V} , \mathbf{V}_e и $\Delta\mathbf{V}_e$) в одной плоскости является частным случаем. В общем случае число вариантов наложения двух мод существенно увеличивается, происходят изменения во времени,

в результате зоны усиления (ослабления) суммарного вторичного поля мигрируют по поверхности Луны.

На рис. 4 взаимодействие вторичных магнитных полей с солнечным ветром не учиты-

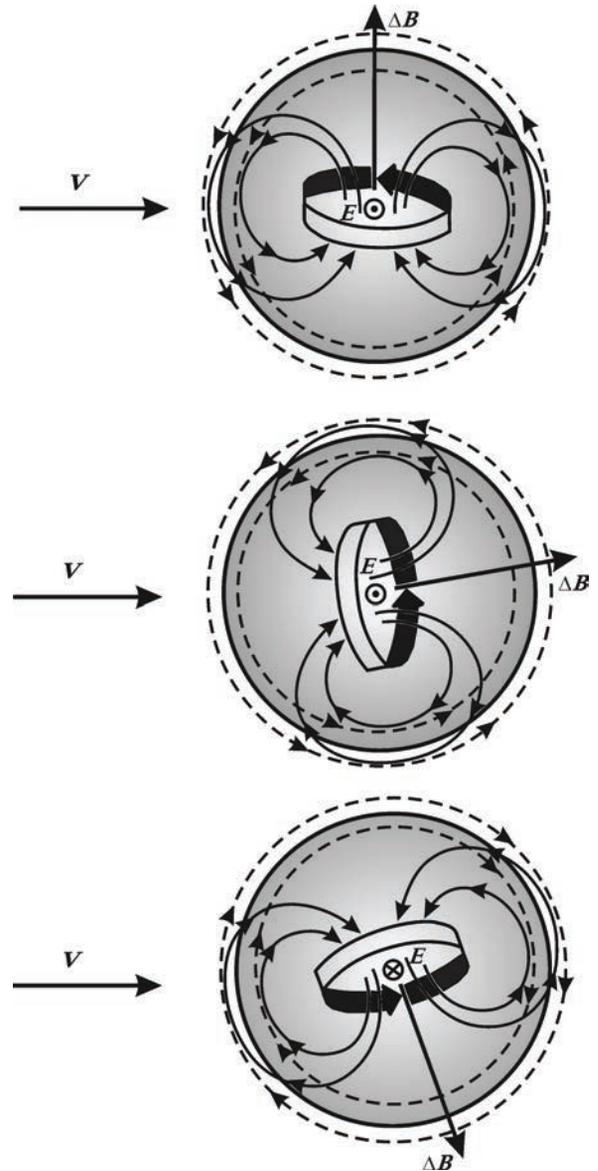


Рис. 5. Суперпозиция магнитных полей кондуктивной моды (окружности, представленные пунктиром) и вихревой моды (полоидальные поля, представленные сплошными линиями). Ось симметрии кондуктивной моды \mathbf{E} перпендикулярна плоскости чертежа, т. е. изображены частные случаи, когда \mathbf{V}_e и $\Delta\mathbf{V}_e$ лежат в плоскости чертежа. В противоположность рис. 4 поля даны в предположении, что Луна со всех сторон окружена хорошо проводящей средой, препятствующей выходу магнитных полей внутреннего происхождения далеко за пределы лунной поверхности.

валось — поля свободно выходили за пределы Луны. На самом деле внутренние магнитные поля индуцируют в проводящей плазме солнечного ветра вихревые токи, магнитное поле которых складывается с индуцирующим внутренним полем. В результате нормальная к поверхности Луны компонента внутреннего магнитного поля стремится к нулю, а тангенциальная усиливается. Все это препятствует выходу магнитного поля во внешнее пространство. Это явление называют "обжатием" внутреннего поля солнечным ветром. На рис. 5 внутренние магнитные поля практически не выходят за поверхность Луны, что соответствует симметричному всестороннему "обжатию", и только для такого случая выполнены количественные оценки эффекта "обжатия". Однако солнечный ветер налетает с одной стороны, и эффективное "обжатие" происходит только на обращенной к Солнцу стороне Луны. На ночной стороне солнечного ветра нет, образуемая за Луной полость рассматривается как вакуум, в который внутренние поля проникают беспрепятственно (рис. 6). Такая асимметричная задача не рассчитана. Из качественного рассмотрения конфигураций, подобных рис. 6, ясно, что использование конфигурации рис. 5 для дневной стороны и конфигурации рис. 4 для ночной стороны является весьма грубым описанием реальных ситуаций (см. рис. 6), могущим привести к большим ошибкам в оценке электропроводности.

Другой возможный источник большой погрешности — пренебрежение кондуктивной

модой. Правильным было бы найти из данных обе моды. И если вихревая мода содержит информацию о продольной проводимости наиболее проводящих слоев недр Луны, то кондуктивная мода — информацию о глобальном поперечном сопротивлении наименее проводящего верхнего слоя Луны, что имеет большое научное и, вполне вероятно, практическое значение. Однако для разделения мод одной станции на поверхности Луны не достаточно, нужны три синхронно работающих магнетометра.

Анализ полученных временных рядов позволил выделить периоды более 30 с, т. е. индукционные зондирования "проваливаются" сразу на глубину 100—200 км. О сопротивлении верхних 100 км известно следующее: из самого верхнего слоя, реголита, имеющего мощность всего 2—12 м, было взято несколько образцов, доставлено на Землю и в земных лабораториях получены удельные сопротивления 10^7 — 10^{10} Ом·м. Обобщать эти сопротивления на весь верхний слой мощностью, пусть, 100 км нет веских оснований. Мы приписали 100-километровому слою сопротивление 10^7 Ом·м (поперечное сопротивление слоя равно 10^{12} Ом·м²) и получили вторичное тороидальное магнитное поле, равное 7 нТл, т. е. того же порядка величины, как и наблюдаемые на Луне поля. Пренебречь тороидальным полем (кондуктивной модой) можно только при поперечном сопротивлении верхнего слоя более 10^{14} Ом·мм². Его оценка является трудной, но престижной задачей будущих миссий.

Итак, кондуктивная мода на Луне будет содержать информацию о проводимости только слоя с максимальным сопротивлением, влияние на ток и вторичное магнитное поле хорошо проводящих глубинных слоев будет пренебрежимо мало. Все сказанное относится к концентрически слоистой модели. Индукционная мода, напротив, чувствительна к наиболее проводящим слоям, т. е. содержит информацию о глубинной электропроводности Луны.

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 с λ , равным диаметру Луны (около 3500 км), соответствует периоду порядка 0,01 с, неоднородность, равная расстоянию от Луны до Земли (в среднем 384 400

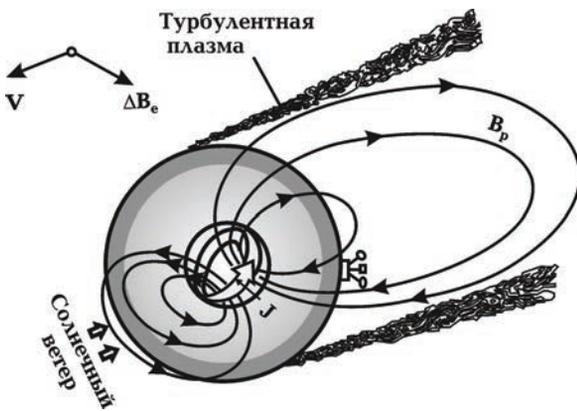


Рис. 6. Полоидальное поле вихревой моды в реалистичных условиях асимметричного "обжатия" солнечным ветром — качественная картина из работы [Dyal, Parkin, 1971].

км), — периоду 1 с. Следовательно, для длиннопериодных вариаций $T > 1$ с внешнее индуцирующее поле \mathbf{V}_e можно с хорошим приближением считать однородным в пределах Луны. Флуктуации $\Delta \mathbf{V}_e$ межпланетного магнитного поля проникают в Луну и индуцируют в ее проводящих слоях вихревые тороидальные токи и полоидальное магнитное поле \mathbf{V}_{ip} (см. рис. 4, б). Наблюдаемое на поверхности Луны магнитное поле есть сумма $\mathbf{V}_e + \mathbf{V}_i$ плюс других компонент, таких как поле остаточной намагниченности горных пород. Однако они имеют другой спектр и легко выделяются. Обтекающий Луну солнечный ветер благодаря высокой проводимости экранирует магнитные поля внутреннего происхождения. Поэтому магнитометр на околулунной ор-

бите, пребывая в солнечном ветре, регистрирует \mathbf{V}_e в чистом виде. Вычитая его из поля на поверхности Луны, получаем индуцированное поле \mathbf{V}_i .

На рис. 7 дана проекция лунной орбиты на плоскость эклиптики. Три недели каждого лунного месяца Луна находится в зоне действия солнечного ветра и в течение недели дважды проходит турбулентные области переходного плазменного слоя со средним уровнем магнитного поля приблизительно 8 нТл и геомагнитный хвост с полем ± 9 нТл.

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

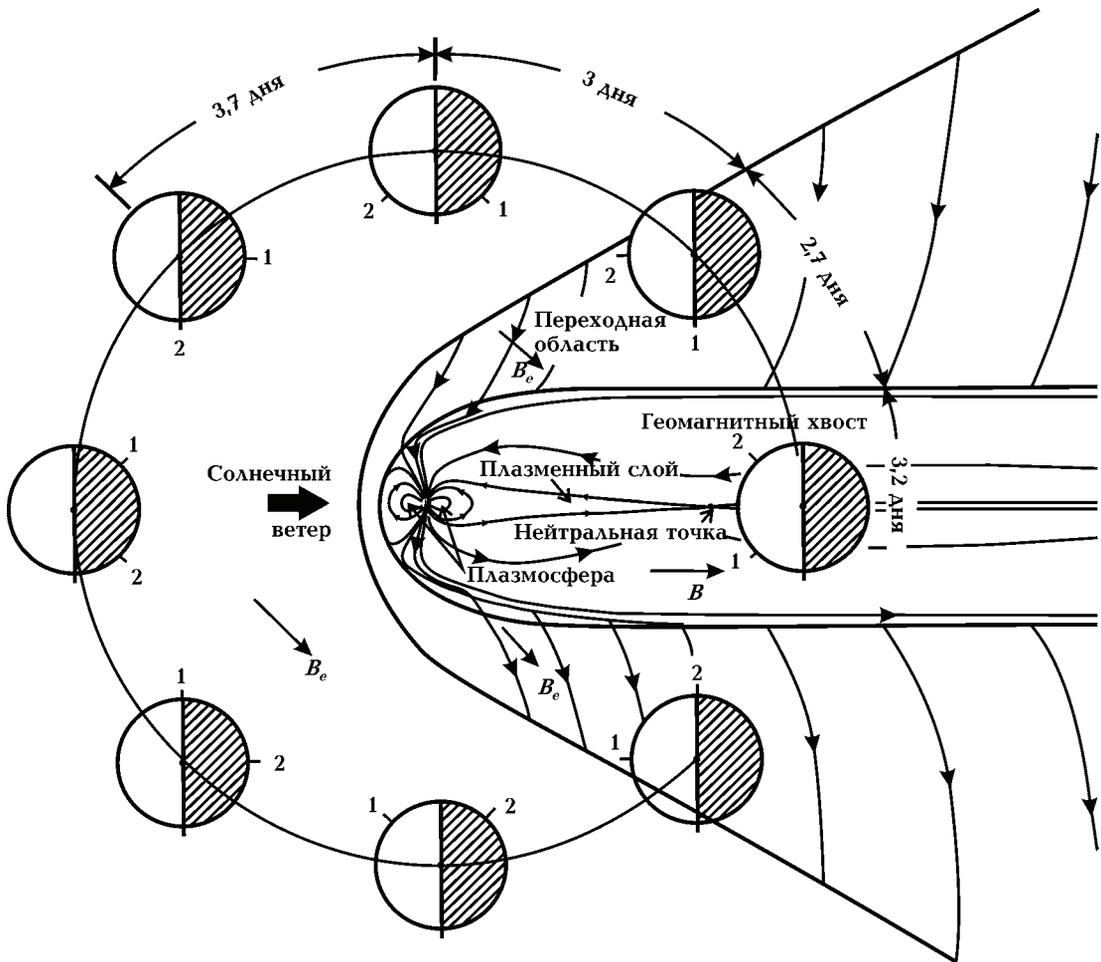


Рис. 7. Кинематика движения Луны вокруг Земли. Почти 3 недели она обдувается невозмущенным солнечным ветром (с его несимметричным "обжатием" и кондуктивной модой), 3,2 дня находится в относительно стабильном поле долей геомагнитного хвоста магнитосферы Земли (без "обжатия" с его асимметрией, без кондуктивной моды). В разнесенные пункты 1 и 2 на обращенной к Земле стороне Луны могут быть установлены магнитометры.

1. Индуцирующим полем является поле солнечного ветра, лунный день. Индуцированное поле зажато солнечным ветром в полость, ограниченную с дневной стороны поверхностью Луны (см. рис. 6).

2. Индуцирующим полем является поле солнечного ветра, лунная ночь. Вне Луны среда рассматривается как вакуум.

3. Токи в Луне индуцирует магнитное поле геомагнитного хвоста. Оно стабильнее чем поле солнечного ветра, в нем эффекты плазменного "обжигания" минимальны, рассмотрение индуцированного поля в вакууме более оправданно, и главное, кондуктивная мода практически не возникает. Время пролета Луны через геомагнитный хвост порядка 3 суток.

На солнечной стороне Луны вертикальная компонента внутреннего поля обращается в нуль. Следовательно, можно использовать лишь горизонтальную компоненту переменного магнитного поля, тогда как на ночной стороне информацию о глубинной электропроводности содержат обе компоненты.

Рассмотрим опубликованные данные наблюдений в частотной области, собранные в

обзорной работе [Sonett, 1977] и представленные на рис. 8. Вращение функций отклика обнаруживает их анизотропию, направление максимума совпадает с постоянным магнитным полем в точке наблюдения "Аполлон-12". Сонетт предполагает, что увеличение функций отклика в этом направлении обусловлено воздействием солнечного ветра и выбирает для нахождения модели электропроводности лунных недр минимальную кривую, считая ее свободной от помех. Здесь возникает ряд сомнений. Во-первых, как может влиять постоянное поле на переменное в условиях малых полей Луны. Во-вторых, как отмечает и Сонетт, анизотропия наблюдается и на ночной стороне, в плазменном слое и геомагнитном хвосте, где нет воздействия солнечного ветра. В земных условиях анизотропия функций отклика обычно обусловлена крупными неоднородностями в распределении электропроводности. Подобные неоднородности вполне возможны и на Луне, причем они должны обнаруживать себя по характерной частотной зависимости функций отклика. Однако высокий уровень возможных помех в лун-

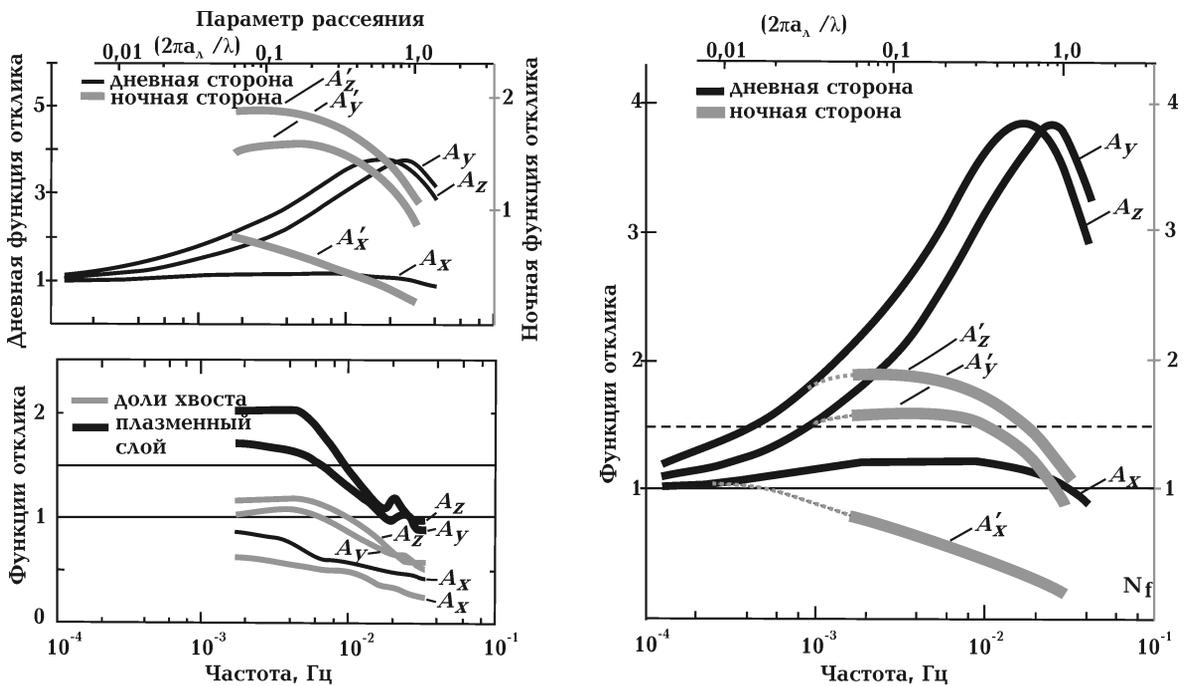


Рис. 8. Функции отклика Луны $A_k(f) = \mathbf{V}_{ek}(f) + \mathbf{V}_{ik}(f) / \mathbf{V}_{ek}(f)$ (где f — частота, k — одна из координат локальной системы (x, y, z) на поверхности Луны: орт x направлен вверх, y — на восток, z — на север). Левая половина скопирована из работы [Sonett, 1977]. Яркие кривые получены на дневной стороне Луны, блеклые (серые) — на ночной (верхний рисунок) и соответственно в плазменном слое и геомагнитном хвосте — нижний рисунок. Правый рисунок повторяет левый верхний, но дневные и ночные данные представлены в одинаковом масштабе.

ных данных делает такой анализ преждевременным. Рассмотрим более внимательно кривые, представленные на рис. 8. В оригинале кривые, полученные на дневной и ночной сторонах Луны, когда она находится в зоне действия солнечного ветра, представлены в разных масштабах. Для удобства сравнения мы перечертили их в одинаковом масштабе (см. рис. 8, правый график) и сразу увидели, что ночные данные хорошо сопрягаются с дневными на длинных периодах. Как известно из теории электромагнитной индукции, на сферически симметричном шаре [Sill et al., 1970; Рокитянский, 1981; Шуман, 2005] вторичное индуцированное полоидальное магнитное поле \mathbf{B}_A на поверхности шара не может превышать первичное индуцирующее однородное внешнее поле \mathbf{B}_e в вертикальной компоненте, а в тангенциальной компоненте не может превышать его половину. Следовательно, функция отклика A_k , представленная на рис. 8, должна находиться в следующих пределах:

вертикальная компонента вторичного поля направлена противоположно первичному полю:

$$0 < A_x < 1, \quad (1)$$

горизонтальные компоненты вторичного поля направлены вдоль первичного поля и усиливают его (фазовые сдвиги в районе максимума функций отклика невелики):

$$1 < A_{y,z} < 1,5. \quad (2)$$

На рис. 8 видно, что вертикальная компонента A_x удовлетворяет условию (1) в трех зонах и не удовлетворяет при наблюдении на стороне, бомбардируемой солнечным ветром. Последнее может быть объяснено неточностью ориентации, при которой резко усиленное "обжатием" горизонтальное поле может дать вклад в вертикальную компоненту, наблюдаемая частотная зависимость соответствует этому объяснению. Вертикальная компонента функции отклика, отсчитываемая вниз от единицы, увеличивается от значений 0,2—0,3 на частоте $2 \cdot 10^{-3}$ Гц до значений 0,6—0,8 на частоте $3 \cdot 10^{-2}$ Гц. Горизонтальная компонента значительно хуже соответствует своим ограничениям (2), предсказываемым теорией. Если кривая на дневной стороне, облучаемой солнечным ветром, усиливается "обжатием" по меньшей мере в 6 раз, то ее исходная величина будет соответствовать (2), а частотная зависимость будет приблизительно соответствовать поведению вертикальной компоненты в трех других зонах, рассмотренно-

му выше. Согласно этим данным максимальный отклик Луны наблюдается на частоте порядка $2 \cdot 10^{-2}$ Гц, причем спад в сторону низких частот определяется длинными участками кривых, спад в сторону высоких частот только намечается. В других зонах горизонтальные компоненты функций отклика не удовлетворяют условию (2): на ночной стороне в зоне солнечного ветра и в плазменном слое A_{yz} превышает уровень 1,5 на низких частотах, в геомагнитном хвосте A_{yz} меньше 1 — на высоких частотах. Причины описанных несоответствий не ясны. Однако интересно отметить, что частотная зависимость горизонтальных функций отклика в трех зонах обнаруживает максимум примерно на одной частоте $3 \cdot 10^{-3}$ Гц, что на порядок отличается от вышеприведенной оценки и при интерпретации даст совсем другое распределение проводимости недр Луны. Имея в виду возможные существенные погрешности от пренебрежения асимметрии "обжатия" и кондуктивной моды, мы не пытаемся строить новые модели электропроводности, а приведем на рис. 9 опубликованные результаты с единственным комментарием, что они могут быть существенно смещены от истинного распределения.

Обзор опубликованных моделей распределения электропроводности Луны. Советскими [Ваньян и др., 1973; Долгинов и др., 1975] и зарубежными [Дайел и др., 1975; Dyal, Parkin, 1971] исследователями построены различные модели электропроводности Луны. 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; глубже залегает слой пониженного сопротивления (10^3 Ом · м) мощностью 150—200 км, до 600 км сопротивление возрастает на порядок и далее опять убывает до 10^3 Ом · м на глубине 800 км. В более поздних работах [Dyal, Parkin, 1973; Sonett, 1977] приводятся модели с монотонным ростом проводимости с глубиной, хотя модели с пиком проводимости на глубине 200—400 км рассматриваются как возможные, удовлетворяющие данным наблюдений. На рис. 9 представлено обобщение Сонетта нескольких моделей электропроводности лунных недр.

Выводы. Что же мы достоверно знаем об электропроводности Луны? Очень высокое сопротивление ($10^7—10^{10}$ Ом · м по разным

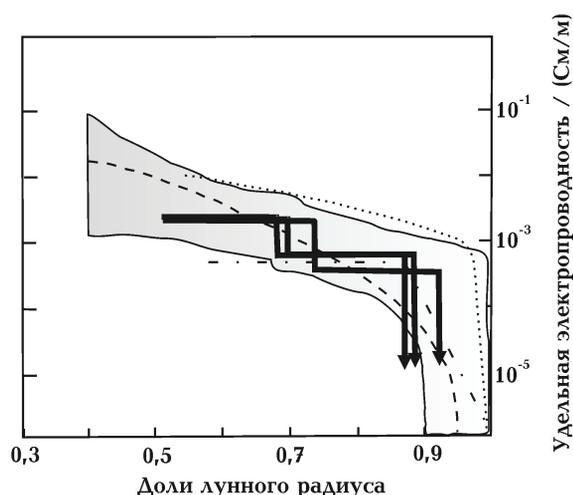


Рис. 9. Модели электропроводности Луны по данным работы [Sonett, 1977].

литературным источникам) реголита, имеющего мощность 2—12 м, причем замеры выполнены всего на нескольких образцах, доставленных на Землю. Индукционные зондирования сразу "проваливаются" на глубину 100—200 км, поскольку функции отклика получены только на частотах менее $4 \cdot 10^{-2}$ Гц, но и на этих частотах они ведут себя не взаимно согласованно, что ставит под сомнение достоверность полученных оценок глубинной электропроводности.

Предложения к новым экспериментам.

А. Усовершенствовать индукционные зондирования.

1. Увеличить точность и частоту измерений. Например, феррозондовые магнитометры, разработанные во Львовском центре Института космических исследований под руководством В.Е. Корепанова имеют чувствительность 0,01 нТл, частоту опроса 0,1 с, малые габариты и экономичны в работе.

Список литературы

Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Егоров И.В., Красс М.С., Окулесский Б.А., Фадеев В.Е. Кажущееся электрическое сопротивление Луны и его интерпретация // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1973. — № 11 — С. 3—12.

Космохимия Луны и планет / Под ред. А.П. Виноградова. — Москва: Наука, 1975. — 698 с.

2. Установить на Луне несколько синхронно работающих магнитометров. Имея три магнетометра, можно ставить задачу раздельного определения полей кондуктивной и индукционной мод и, следовательно, глобально осредненного поперечного сопротивления верхнего слоя высокого сопротивления (по кондуктивной моде) и параметров наиболее хорошо проводящих слоев мантии Луны (по вихревой моде).

Б. Организовать исследование электропроводности верхнего слоя лунных пород до глубины десятки—сотни метров активными методами. Решение этой задачи целесообразно вести двумя способами.

1. Дистанционное глобальное зондирование Луны на разных частотах с борта окололунных спутников.

2. Локальное индукционное зондирование с искусственным возбуждением поля с борта специализированного лунохода. Зондирующая установка может включать набор магнитных петель и электрических антенн, управляемых специальными программами и сигналами с Земли. Питание от солнечных батарей и других источников. "Луноход-1" в 1970 г. в течение 10,5 месяцев прошел 11 км и выполнил огромное количество съемок, "Луноход-2" прошел 37 км. Современный луноход для ЕМ зондирования сможет покрыть ЕМ съемкой значительную территорию Луны. Поскольку сопротивление верхних слоев Луны очень высокое, а уровень помех низкий, глубинность зондирования может достигать сотен метров, а при наличии двух согласованных разнесенных установок и более. Можно не сомневаться, что на этом пути будут получены важные научные и практические результаты.

Работы группы Б наверняка дадут достоверные результаты, в работах группы А предстоит исследовать ряд сложных проблем и скорый успех не очевиден.

Галкин И.Н. Геофизика Луны — Москва: Наука, 1978. — 176 с.

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.

- градова. — Москва: Наука, 1975. — С. 323—340.
- Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н., Шарова В.А., Внучков Г.А., Окулесский Б.А., Базилевский А.Т., Ваньян Л.Л., Егоров И.В., Файнберг Э.Б. Магнетизм и электропроводность Луны по данным "Лунохода-2" // Космохимия Луны и планет / Под ред. А.П. Виноградова. — Москва: Наука, 1975. — С. 314—322.
- Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Обнаружение потока тепла из недр Луны // Астроном. журн. — 1963. — **40**. — С. 1076.
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. — Москва: Мир, 1986. — 527 с.
- Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. — Киев: Наук. думка, 1981. — С. 297.
- Рускол Е.А. Происхождение Луны. — Москва: Наука, 1975. — С. 189.
- Шкуратов Ю.Г., Кислюк В.С., Литвиненко Л.Н., Яцкив Я.С. Модель Луны 2004 для проекта "Укрселена" // Косм. наука і техн. — 2004. — **10**, № 2 (додаток). — С. 3—51.
- Шуман В. Н. Бимодальная структура функций отклика в слабопроводящей атмосфере и обобщенная модель глобального электромагнитного зондирования Земли // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 5. — С. 708—715.
- Adams J. International lunar network update. NASA report 9.01.2009 www.lpi.usra.edu/pss/jan92009/presentations/ilnStatuspss.pdf.
- Dyal P., Parkin C. W. Electrical Conductivity and Temperature of the Lunar Interior from Magnetic Transient-Response Measurements // J. Geophys. Res. — 1971. — **76**, № 25. — P. 5947—5969.
- Dyal P., Parkin C. W. Global electromagnetic induction in the Moon and planets // Phys. Earth Planet. Int. — 1973. — **7**, № 3. — P. 251—265.
- Sill W. R., Blank J. L. Method for Estimating the Electrical Conductivity of the Lunar Interior // J. Geophys. Res. — 1970. — **75**, № 1. — P. 201—210.
- Sonett C. P. Some Consequences of Solar Wind Induction in the Moon // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. — 1977. — **285**. — P. 537—547.