

Особенности исследования глубинной электропроводности Луны и Земли

И. И. Рокитянский, А. В. Терешин, 2020

Институт геофизики им. С. И. Субботна НАН Украины,
Киев, Украина

Поступила 20 января 2020 г.

Глубинну електропровідність Землі і Місяця досліджують шляхом вимірювання та аналізу природних електромагнітних (ЕМ) полів, збуджуваних сонячним вітром, що вносить електричне поле порядку 2 мВ/м, прикладене до меж магнітосфери Землі або безпосередньо до поверхні Місяця. Для концентрично шаруватої сфери з електропровідністю $\sigma = \sigma(r)$ ЕМ-поля можуть бути зображені у вигляді суми двох мод: електричної з тороїдальним магнітним полем і магнітної з полоїдальним магнітним полем. Кожна з мод зв'язана з електропровідністю різними співвідношеннями і характеризується різними можливостями дослідження електропровідності всередині небесного тіла. Прийнято вважати, що на Землі струми з меж магнітосфери спускаються уздовж силових ліній до іоносфери, але до Землі не доходять унаслідок дуже високого опору приземного шару повітря (до 10^{14} Ом · м) і в твердій Землі індуються тільки полоїдальні поля магнітної моди. Розгляд даних за глобальним електричним колом показує, що вертикальні струми проникають з атмосфери в Землю і електрична мода не дорівнює нулю. Вертикальні потоки характеризуються сильною просторово-часовою варіабельністю. Поділ мод за даними спостережень не виконували. На Місяці шар високого опору — це літосфера з реголітом і брекчіями з питомим опором 10^7 — 10^{12} Ом · м, що виходять на його поверхню. Розглянуто відомі види неоднорідностей Місяця і зроблено висновок щодо їх інтенсивності й численності. З огляду на аналіз просторового розподілу припливних і тектонічних луноотрусів, припущено, що вони трасують квазівертикальні структури типу плумів. Наведено результати спостережень вулканізму і швидкопрохідних місячних явищ, які отримані в останні роки орбітальними місіями з апаратурою високого розділення і які засвідчують досить інтенсивну дегазацію Місяця. Все це дає змогу зробити висновок стосовно наявності у Місяця квазівертикальних провідників, що підтримують формування електричної моди. Обґрунтовано і сформульовано пропозиції щодо оптимізації нових досліджень електропровідності Місяця. Глибинні дослідження електропровідності засновані на теоретичній моделі магнітної моди, існування електричної моди заперечується, а фактично вона потрапляє у невідомі перешкоди, які в результаті когерентного аналізу і багатоступінчастої обробки значною мірою відсіваються і моделі електропровідності більш-менш правильно відображають реальну геоелектричну будову Землі, проте з ймовірними систематичними похибками. Виділення і вивчення електричної моди слід розглядати як додатковий канал інформації в ЕМ-дослідженнях планет.

Ключові слова: електропровідність Місяця і Землі, сонячний вітер, магнітосфера, іоносфера, дегазація Землі і Місяця, глобальний електричний ланцюг.

Предисловие. С 1959 по 1976 г. к Луне было послано 54 космических корабля, из них 18 совершили мягкую посадку, в 5 из них были установлены трехкомпонентные магнетометры и сделаны первые (с исполь-

зованием ряда предположений) оценки глубинной электропроводности Луны. В последующие 25 лет исследования Луны почти не проводились. В начале 21 века происходит активизация исследований

Луны, кроме США и России наметилось участие Китая, Европейского космического агентства, Индии, Японии, Украины (Проект «Укрселена»). Встал вопрос о новых магнитометрах и формулировке оптимальной методики измерений, которая позволит более надежно оценить электропроводность недр Луны.

Введение. Исследования глубинной электропроводности Земли и Луны проводятся путем измерения и анализа естественных электромагнитных (ЕМ) полей, возбуждаемых солнечным ветром — потоком заряженных частиц, летящих от Солнца со средней скоростью $V = 400$ км/с, несущих «вмороженные» магнитные поля порядка $B_e \approx 5$ нТл и при столкновении с Землей/Луной вносящих электрическое поле

$$E = -V \times B_e \approx 2 \text{ мВ/м.} \quad (1)$$

Приведенные величины зависят от активности Солнца и в интервалы его повышенной активности могут увеличиваться в несколько раз.

Согласно теории векторных полей [Morse, Feshbach, 1953] для сферы с электропроводностью $\sigma = \sigma(r)$ ЕМ-поля могут быть представлены в виде суммы двух мод:

1) электрической, в которой электрические токи содержат радиальную составляющую (полоидальная токовая система), а магнитное поле не содержит радиальной составляющей ($B_r = 0$) и является тороидальным, т. е. всюду параллельно земной поверхности. Эту моду называют также поперечно-магнитной или ТМ (transverse-magnetic);

2) магнитной или поперечно-электрической ТЕ: $E_r = 0$ и электрические токи в концентрически слоистом проводнике всюду текут параллельно земной поверхности, образуя тороидальную токовую систему, которой соответствует полоидальное магнитное поле.

Каждая из мод связана с электропроводностью разными соотношениями, имеет различные импедансы и характеризуется различными возможностями исследования электропроводности внутри небесного

тела. Токи магнитной моды текут параллельно поверхности, концентрируются в наиболее проводящих горизонтальных слоях, что обеспечивает наиболее достоверное их выделение и изучение. Величина вертикальных токов электрической моды определяется сопротивлением наименее проводящего сферического слоя, что позволяет определить его поперечное сопротивление (т. е. интегральное сопротивление в вертикальном направлении). На Земле таким слоем максимального сопротивления является тропосфера и особенно ее нижняя часть — 2 км приземной атмосферы. Электропроводность этого слоя доступна прямым измерениям с Земли, на шарах зондах, со спутников и не нуждается в использовании поля геомагнитных вариаций. На Луне таким слоем является лунная кора от поверхности до неизвестной пока глубины порядка 100—200 км. Изучить ее поперечное электрическое сопротивление — интересная и необходимая задача. Но для этого надо измерить электрическую моду на Луне, выделив ее из наблюдаемого суммарного поля двух мод (или используя искусственные поля). Задача разделения мод трудна даже на Земле с ее развитой системой наблюдения геомагнитных вариаций. Что же (и как?) можно сделать на Луне при эпизодических точечных наблюдениях? Этот вопрос будет обсужден ниже в конце данной статьи.

Магнитосфера Земли и токи в ней. Магнитосфера — это область пространства вокруг небесного тела, в котором поведение окружающей тело межпланетной плазмы определяется магнитным полем этого тела. Постоянное геомагнитное поле величиной до 60 000 нТл на поверхности Земли на расстоянии порядка 10 земных радиусов убывает до значений 5—10 нТл, присущих солнечному ветру, и взаимодействует с ним. При этом солнечный ветер «вносит» в систему координат, связанную с Землей (т. е. на границу магнитосферы), электрическое поле $E = -V \times B_e \approx 2$ мВ/м (1), которое после интегрирования по диаметру магнитосферы дает разность потенциалов ΔU порядка 100 кВ, различающуюся

для разных направлений \mathbf{V}_e и активностей Солнца. Эта разность потенциалов возбуждает сложную систему магнитосферно-ионосферных токов, сложную благодаря анизотропии проводимости атмосферных слоев. Рис. 1 составлен по данным нескольких источников, в основном по работе первого автора [Рокитянский, 1981, гл. 1], и здесь подробно не описывается. На высотах более 300 км проводимость вдоль силовых линий геомагнитного поля на порядки больше проводимости перпендикулярно магнитному полю и продольные токи с малыми потерями переносят ΔU на ионосферу, расположенную на высотах 60—300 км. С увеличением концентрации частиц в ионосфере увеличивается частота их столкновений и появляются специфические проводимости Педерсона и Холла. Не излагая детали, описанные во многих работах (например, [Рокитянский, 1981, гл. 1; Chave, Jones, 2012, гл. 3В; Алексеев, Калегаев; Olsen, Stolle, 2017 и многих других]), отметим, что электропроводность ионосферы анизотропна, и величина ее горизонтальных компонент, проинтегрированных по всей высоте ионосферы, изменяется от единиц до тысячи См в зависимости от направления, места, времени суток, солнечно-геомагнитной активности, а также в зависимости от воздействий снизу от процессов в литосфере и тропосфере Земли. Последние будут рассмотрены в следующем разделе.

Итак, мы проследили путь токов от границы магнитосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля до ионосферы. Далее силовые линии проходят через стратосферу и тропосферу в хорошо проводящую землю. Но ток, по мнению большинства ученых, не проходит вследствие очень высокого сопротивления приземного слоя воздуха (до 10^{14} Ом·м), а обходит по длинной цепи меньшего сопротивления, включающей полярную ионосферу, затем более внутренние силовые линии геомагнитного поля, выводящие в частично кольцевой радиационный слой на расстоянии 3—5 радиусов от поверхности Земли и далее по подобному пути к противоположной гра-

нице магнитосферы (см. рис. 1). Эти токи принято рассматривать как тороидальную структуру, которая возбуждает полоидальное магнитное поле с $V_r \neq 0$.

Глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) расположена между твердой / жидкой земной поверхностью и ионосферой, т. е. между двумя проводниками, разделенными плохо проводящими в среднем нейтральными слоями тропосферы и стратосферы. Непосредственные измерения показывают, что у поверхности Земли вертикальная компонента электрического поля E_z при ясной погоде имеет величину порядка 100 В/м и направлена вниз, т. е. Земля заряжена отрицательно. С высотой E_z быстро уменьшается на высоте 2 км в 2 раза, на высоте 13 км в 20 раз. Обусловлено это соответствующим уменьшением удельного сопротивления ρ воздуха, максимального на уровне моря: $\rho \approx 10^{14}$ Ом·м. Отсюда обобщенная оценка плотности вертикального тока в атмосфере $j_z = E_z / \rho \approx 2 \cdot 10^{-12}$ А/м². При интегрировании по всей земной поверхности получаем суммарный ток порядка 1000 А. Верхний положительный заряд распределен в так называемой электросфере на высотах порядка 40—70 км. Оценивая электрические параметры R и C сферического конденсатора, образованного положительно заряженной электросферой и отрицательно заряженной землей, получим $R \approx 1000$ Ом, $C \approx 0,1$ Ф, что дает постоянную времени саморазряда глобального конденсатора порядка 100 с. Такова электростатическая оценка.

Поддержание заряда электросферы осуществляется сторонними силами, реализуемыми в грозовых облаках [Имянитов, Колоколов, 1976]. Грозовые облака возникают в тропосфере, содержащей холодный воздух в верхних слоях и теплый влажный — в нижних слоях (континент, лето, полдень). При подъеме теплого воздуха влага конденсируется в капельки воды и частицы льда, происходит разделение зарядов: верхняя часть облака в большинстве случаев заряжается положительно, нижняя — отрицательно. По данным прямых измерений над или под облаком одна

молния несет ток порядка 1 А (\pm порядок величины). На Земле одновременно происходит в среднем более 1000 молниевых разрядов, которые дадут суммарный ток

подзарядки электросферы порядка 1000 А, что соответствует суммарному току ее разрядки на территориях вне поля действия грозовых генераторов.

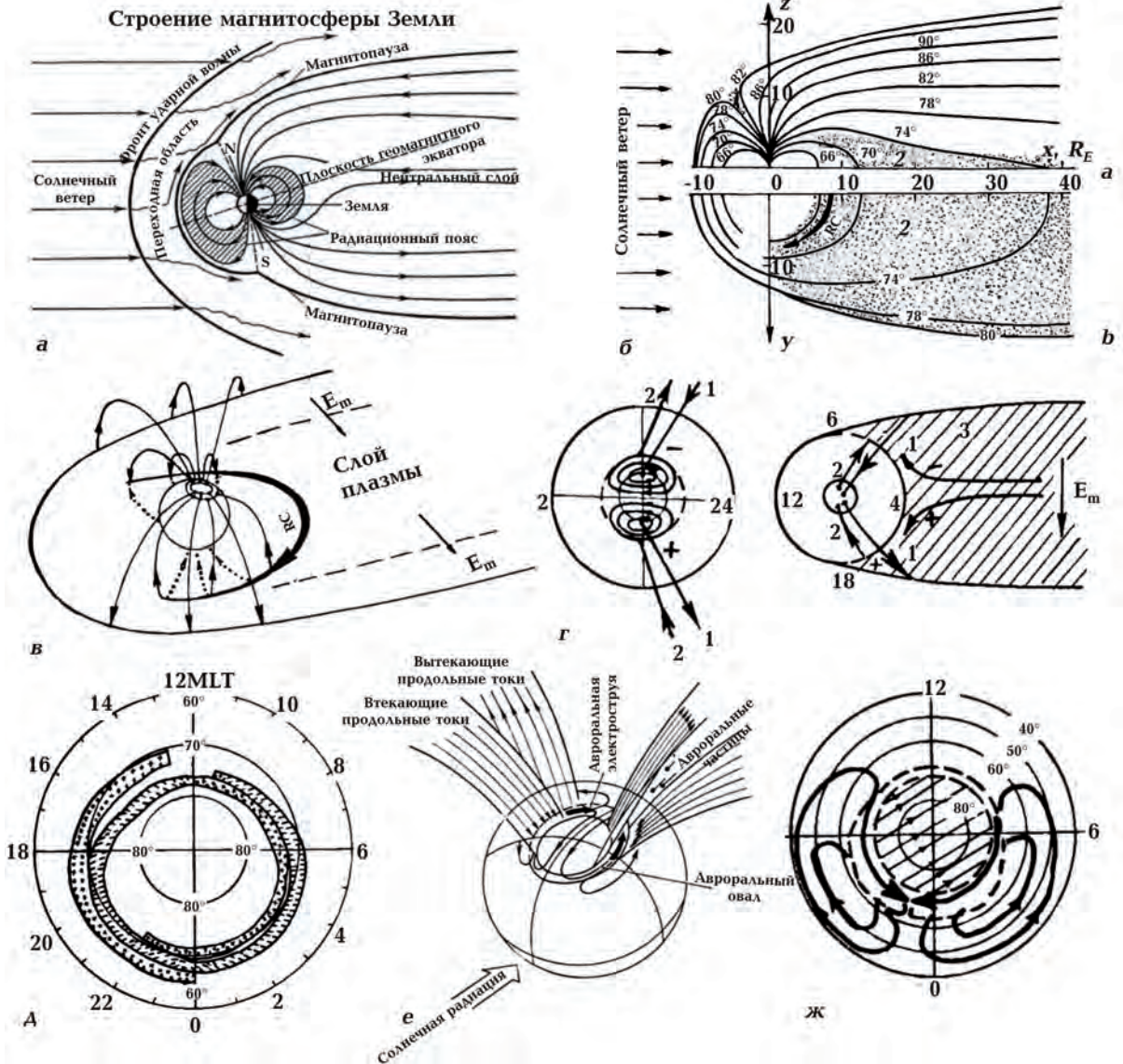


Рис. 1. Магнитное поле в магнитосфере Земли и токи в ней: *а* — сечение магнитосферы плоскостью полуденного меридиана (СМППМ); *б* — СМППМ (*а*) и сечение плоскостью геомагнитного экватора (*б*) (цифры у линий геомагнитного поля обозначают геомагнитные широты, на которых эти линии пересекают ионосферу и поверхность Земли); *в* — объемная картина продольных магнитосферных токов с границы магнитосферы до ионосферы и далее к радиационному поясу на расстояниях 3—5 земных радиусов; *г* — трехмерные продольные токи стационарной магнитосферной конвекции в проекции на экваториальную плоскость и ионосферу (правый рисунок) и на полярную ионосферу (левый рисунок и рисунки *д*, *е*, *ж*) (1 — силовые линии от магнитопаузы до внутреннего (высокоширотного) кольца зоны полярных сияний, 2 — силовые линии от поляризованных участков плазменного слоя 4 (частично кольцевого слоя RC (ring current) на рис. *б* и *в*) до внешнего кольца зоны полярных сияний, 3 — плазменный слой); *д* — зоны втекания (плюсы) и вытекания (минусы) продольных токов в/из ионосферы по данным спутника «Триад»; *е* — системы продольных токов и полярных электроструй; *ж* — токовая система полярной суббури с токами растекания в средние широты.

Распределение гроз на Земле весьма неоднородно. Представление о нем по годовым данным видим на рис. 2. Над океанами и пустынями (Сахара) грозы редко наблюдаются. В работе авторов рис. 2 подобные карты представлены для 4 сезонов, из которых видно, что в июне—августе глобальное количество гроз примерно в полтора раза больше, чем в декабре—феврале, что объясняется преобладанием континентов (и летних гроз) в северном полушарии. Количество гроз изменяется от года к году в зависимости от изменений

климата, солнечной активности и других факторов. Аналогично, количество гроз изменяется и в течение суток, достигая максимума в 13—14 часов UT. Это приводит к суточной вариации заряда и потенциала электросферы и тока в ГЭЦ. Эта вариация наблюдается каждый день и называется унитарной вариацией. Она зависит от многих факторов и изменяется в значительных пределах.

На рис. 3 представлено два варианта схемы ГЭЦ. Не описывая их в деталях, отметим следующее. Нарисованные источни-

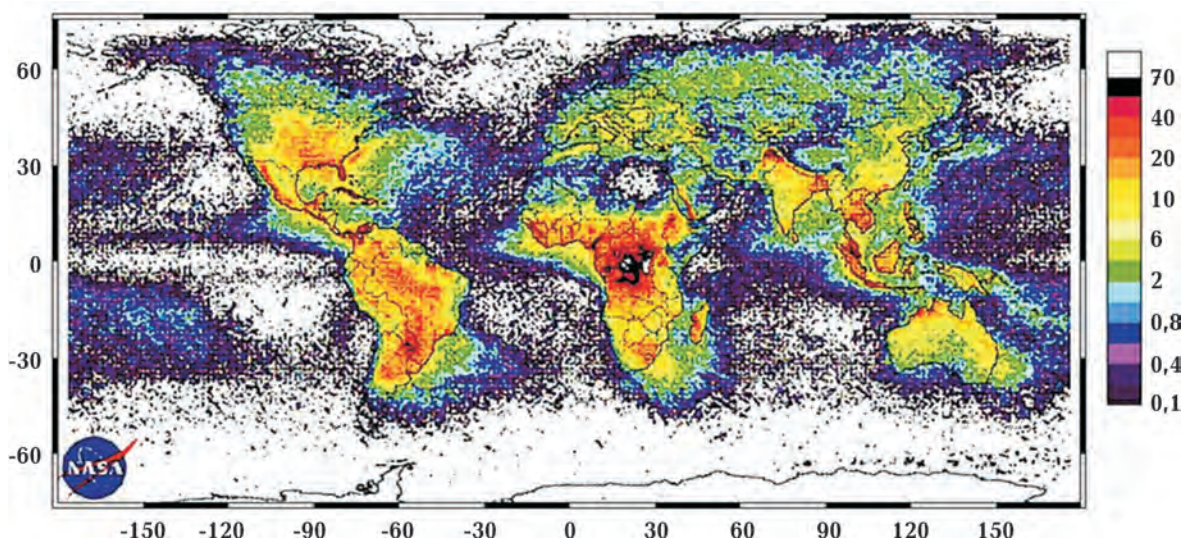


Рис. 2. Распределение молниевых вспышек на поверхности земного шара по результатам оптических наблюдений со спутников OTD и LIS [Christian et al., 2003]. На цветовой шкале отложено количество вспышек на 1 кв. км земной поверхности за 1 год.

Fig. 2. Worldwide distribution of lightning flashes according to the results of optical observations from OTD and LIS satellites [Christian et al., 2003]. On the color scale, the number of flashes per 1 sq. km of the Earth's surface during 1 year.

←
Fig. 1. Magnetic field in the magnetosphere of the Earth and currents in it: *a* — cross-section of the magnetosphere by the plane of the midday meridian (CMPMM); *b* — CMPMM — the upper figure and the section of the plane of the geomagnetic equator — the lower figure. The numbers at the lines of the geomagnetic field indicate the geomagnetic latitudes at which these lines intersect the ionosphere and the Earth's surface; *B* — longitudinal magnetospheric currents from the boundary of the magnetosphere to the ionosphere and further to the radiation belt at a distance of 3—5 earth radii; *r* — three-dimensional longitudinal currents of stationary magnetospheric convection in projection onto the equatorial plane and the ionosphere (right figure) and on the polar ionosphere (left figure and figures *d*, *e*, *ж*) (1 — lines of force from the magnetopause to the inner (high-latitude) ring of the aurora zone, 2 — lines of force from the polarized sections of the plasma layer 4 (partially ring current in Figs. *b* and *B*) to the outer ring of the aurora zone, 3 — plasma layer; *d* — the zones of inflow (pluses) and outflow (minuses) of longitudinal currents to/from the ionosphere according to the data of the Triad satellite; *e* — systems of longitudinal currents and polar electrojets; *ж* — the polar substorm current system with spreading currents at mid latitudes.

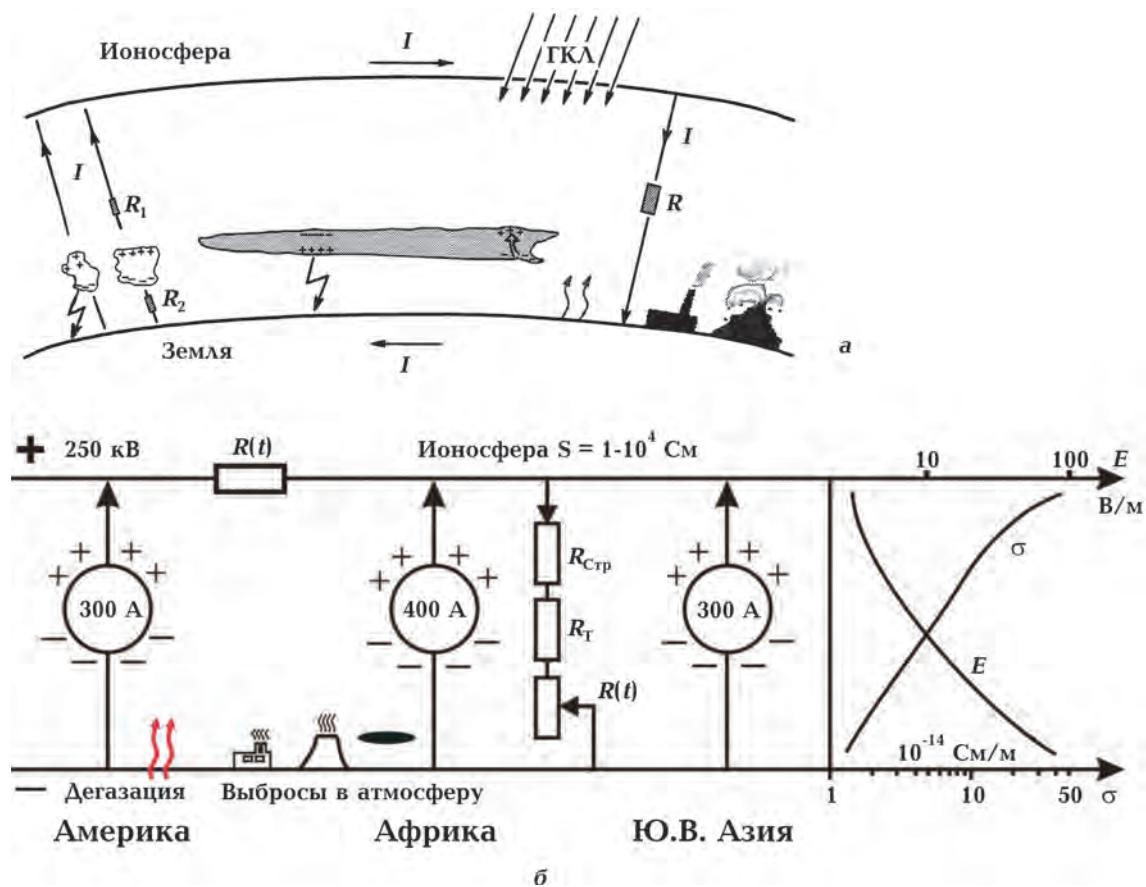


Рис. 3. Схема глобальной электрической цепи [Мареев, 2010] (а) и эквивалентная схема ГЭЦ (б).

Fig. 3. Scheme of the global electric circuit [Mareev, 2010] (a); equivalent scheme of the GEC (b).

ки дыма и пепла, а также аэрозоли, пыль в результате песчаных бурь в пустынях и другие явления могут увеличивать сопротивление и без того плохо проводящих слоев нижней атмосферы. Объясняется это уменьшением подвижности зарядов (главным образом, электронов) при их адсорбции на более тяжелые нейтральные частицы пыли, пепла ... Дегазация Земли может давать и противоположные эффекты. Особенно сильно влияет поступление радона, который создает дополнительную ионизацию приземного воздуха и увеличивает его электропроводность, что быстро изменяет параметры ионосферы над зоной поступления радона из недр Земли. Аномалии радона часто связаны с тектонической активизацией, и они являются перспективным предвестником землетрясений. На поверхности Земли трудно организо-

вать повсеместный мониторинг радона, а непрерывный мониторинг параметров ионосферы уже существует, в частности, как побочный продукт работы систем GPS.

Спутниковые измерения, как и традиционные радиоволновые зондирования с поверхности Земли, фиксируют значительные неоднородности параметров ионосферы (потенциала, заряда) и их вариации. Спутниковая система GPS дает весьма детальную картину изменений полного (т. е. проинтегрированного по высоте) электронного содержания ТЕС (Total Electron Content) ионосферы. Большой интерес представляют сопоставления дифференциальных карт ТЕС с различными явлениями в других геосферах. Рис. 4 и 5 иллюстрируют отклик ТЕС ионосферы на относительно локальные изменения электропроводности приземной атмосферы.

На рис. 4 показано, как извержение вулкана на юге Исландии в апреле 2010 г. выбросило на высоты 5—15 км значительное количество пепла, на несколько недель приостановившее полеты самолетов в се-

верной половине Европы. На уменьшение проводимости воздуха на указанных высотах ионосфера ответила положительной аномалией ТЕС, причем пространственно-временной анализ развития и затухания

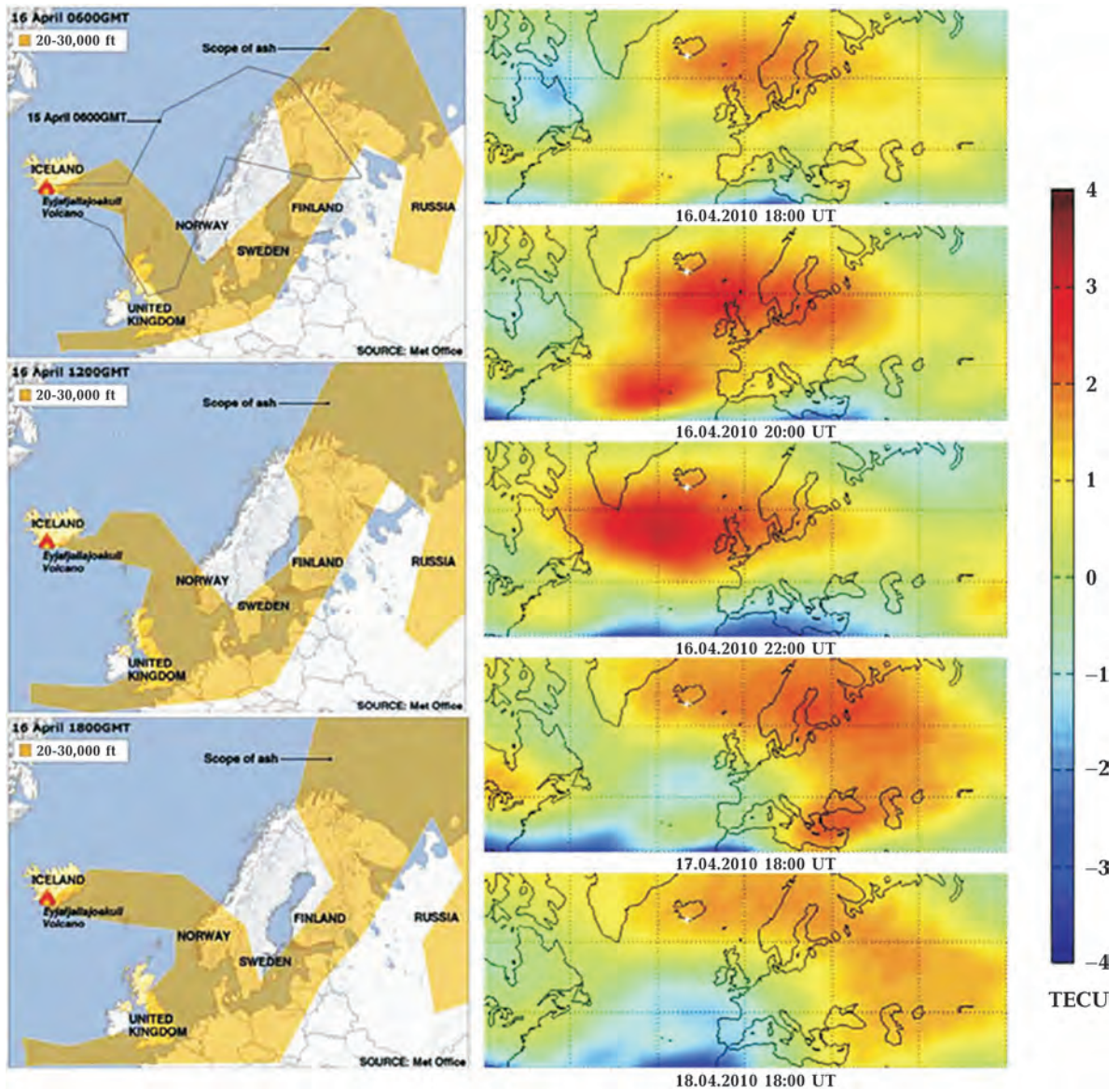


Рис. 4. Три карты **слева** описывают последовательное положение облака пепла на высоте 5—15 км, извергаемого вулканом Эйяфьятлайокудль на юге Исландии. Справа в эти же дни пять последовательных карт Евро-Атлантического региона показывают положительную аномалию дифференциального ТЕС — полного электронного содержания (Total Electron Content) ионосферы [Davidenko, Pulinets, 2014].

Fig. 4. **Left** panel — the temporal sequence of diagrams showing the spatial distribution of ash deposited in atmosphere from the Eyjafjallajökull volcano on 16 Apr 2010; right panel — the differential TEC maps over Europe for 16—18 Apr 2010 [Davidenko, Pulinets, 2014].

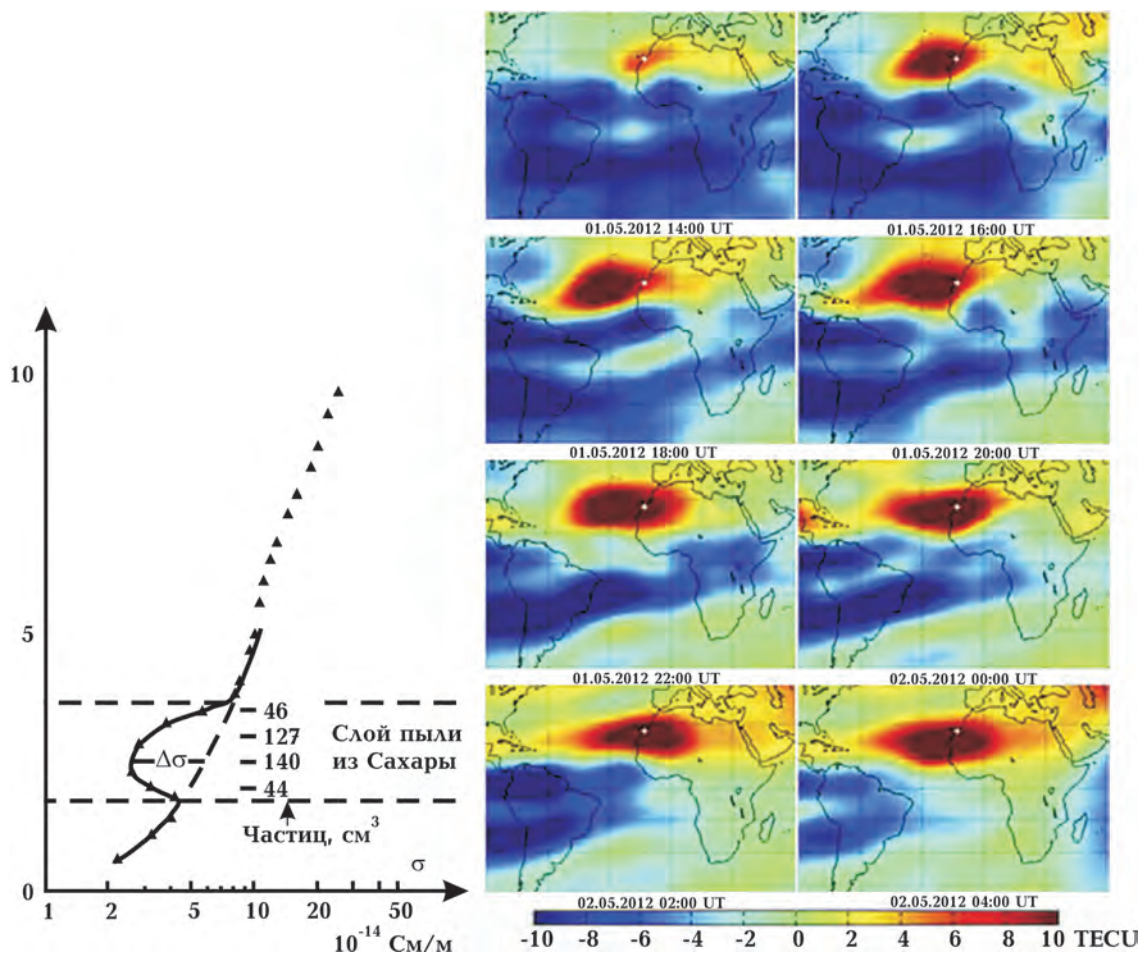


Рис. 5. Вариация электропроводности воздуха с высотой во время пылевой бури (треугольники и сплошная кривая) по данным измерения с баллона, запущенного на западном побережье Африки (белая точка на картах справа) (а), 8 последовательных дифференциальных карт ТЕС ионосферы во время сильной песчано-пылевой бури в Сахаре [Davidenko, Pulinets, 2014] (б).

Fig. 5. Left panel — balloon profile of atmosphere conductivity during Sahara dust storm on 26 Nov 1973 (after [Gringel, Mühleisen, 1978]); right panel — the sequence of differential TEC maps during Sahara dust storm 1—2 May 2012 [Davidenko, Pulinets, 2014].

этого события может дать интересную информацию о параметрах ионосферы и динамике их изменения. На рис. 5 показан отклик ионосферы на песчано-пылевую бурю в пустыне Сахара в начале мая 2012г. Облако пыли располагалось на высоте 1,5—4 км (ниже исландского пепла) и поэтому более сильно, чем в предыдущем примере, ослабляло вертикальный ток разряда ионосферы. Много конкретных примеров, связанных с процессами подготовки землетрясений, приведено в работе [Davidenko, Pulinets, 2019].

Таким образом, видно, что ионосфера очень неоднородна, динамична, подвержена сильным влияниям как сверху (от вносимой солнечным ветром разности потенциалов 100—500 кВ, фокусируемой через касп на полярную ионосферу), так и снизу (от неоднородно распределенного грозового генератора, непрерывно подзаряжающего нижнюю часть ионосферы до потенциала $+250 \pm 100$ кВ относительно поверхности Земли. Локальные «пробои» нижней атмосферы вертикальными токами проводимости несомненно существуют,

особенно в зоне полярных сияний (силовое воздействие сверху), есть они в зонах грозовой активности (инициация в тропосфере), а возможно, источников вариаций вертикальных токов и на интенсивных аномалиях постоянного магнитного поля [Рябов и др., 2019].

Локальные и региональные инициации литосферы в виде EM-эмиссии, гравитационных/акустических волн, эманации радиоактивных газов, аэрозолей дополняют список источников вариаций вертикальных токов. В последние десятилетия начали развиваться теоретические и натурные исследования процессов в системе литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера. Интересные результаты представлены в работах [Davidenko, Pulnits, 2019; Rapoport et al., 2020], а также в работах, на которые ссылаются эти авторы.

Таким образом, электрическая мода на сферической Земле не равна нулю, она присутствует. Возникает проблема, как ее выделить из полного наблюдаемого поля. В литературе распространено мнение, что эксперименты дирекционного анализа [Четаев, 1985] по регистрации наклонного и горизонтального распространения ЭМ полей (дирекционный анализ) можно трактовать как подтверждение двумодальности. Мы считаем, что в дирекционном анализе показано только то, что модель вертикально падающей ЭМ волны, лежащая в основе магнитотеллурики, в природе во многих случаях не выполняется, а задача разделения мод в дирекционном анализе не представлена. Выполнить требуемое разделение мод может адекватный анализ синхронных вариаций, записанных на сети геомагнитных обсерваторий.

Sq-вариации. При анализе поля геомагнитных вариаций в непроводящем воздухе уравнения Максвелла приводят к уравнению Лапласа (а не Гельмгольца, как в проводящей среде), геомагнитное поле выражается через скалярный потенциал и называется потенциальным. При глобальном анализе длиннопериодных вариаций с использованием скалярного потенциала (например, Sq) обычно выделяется и

«непотенциальная» часть, достигающая значительной части полного поля [Van Vleeten, 1917; Бенькова, 1941; Аксенов, 1997]. Этот результат Аксенов использовал как «Экспериментальное подтверждение ...» своих противоречащих физике формальных математических построений (введение дополнительного члена в уравнения Максвелла, причем без соблюдения размерности величин), в которых проводимость воздуха приравнивалась нулю. Наш вывод следующий: результаты трех перечисленных работ, в которых выполнен сферический гармонический анализ и разделение полей по материалам мировой сети геомагнитных обсерваторий за 1898, 1933 и 1958 годы, могут дать подтверждение двумодальности поля Sq и оценку величины и структуры каждой моды. Для этого необходимо проверить теоретическую правильность использованного алгоритма разделения полей и, если он правилен, применить его к новым более точным натурным наблюдениям.

Геоэлектрика. При исследовании глубинной электропроводности Земли электрической модой принято пренебрегать, полагая, что на поверхности Земли наблюдается только магнитная TE-мода, состоящая из первичного внешнего поля ионосферных и магнитосферных токов, и вторичного внутреннего поля токов, индуцированных в проводящих слоях Земли и содержащих информацию о распределении электропроводности внутри Земли. Регистрируя электромагнитные поля на Земле и околоземных спутниках и анализируя их, получены интересные весьма достоверные результаты о распределении электропроводности земных недр — предмет науки геоэлектрики [Рокитянский, 1981; Бердичевский и др., 1979; Chave, Jones, 2012 и др.]. При этом в геоэлектрике господствует мнение, что электрическая мода пренебрежимо мала. Наш обзор показывает, что это неправильно. Но практически магнитотеллурика работает. Она основана на простой модели Тихонова—Каньяра, которая для части наблюдений, периодов, вариаций, реализаций

приблизительно выполняется. В процессе изоцирковой многоступенчатой обработки, основанной на когерентном анализе (см., например, [Varentsov, 2007]), по-видимому, удастся отсеять вклад электрической моды и других помех.

Формирование электромагнитных полей на Луне. На Луне нет атмосферы и глобального магнитного поля, поэтому высокопроводящая плазма солнечного ветра непосредственно сталкивается с лунной поверхностью и поглощается ею. Солнечный ветер имеет очень высокую анизотропную электропроводность (порядка 10 См/м — поперечная к магнитному полю компонента и 10^4 — 10^5 См/м — продольная) и электрическое поле в нем практически равно нулю. В системе координат, связанной с Луной, появляется электрическое поле $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{V}_e$. (Если магнитное поле заморожено в солнечный ветер почти параллельно его скорости, то векторное произведение приближается к нулю и тороидальная мода магнитного поля становится малой; такие интервалы наиболее благоприятны для глубинного зондирования Луны, использующего магнитную моду, особенно если магнетометр окажется в лунной полночи.) Полагая $\mathbf{V} = 400 \text{ км/с}$ и $\mathbf{V}_e = 5 \text{ нТл}$, получаем $\mathbf{E} \approx 2 \text{ мВ/м}$ и, интегрируя по диаметру Луны, получаем разность потенциалов ΔU , приложенную к Луне, равную $\approx 7000 \text{ вольт}$. В концентрически слоистой Луне возникает полоидальная система токов с отличными от нуля радиальной и меридианальной компонентами (ось симметрии системы направлена вдоль вектора \mathbf{E}) и соответственно тороидальное вторичное внутреннее (индекс \mathbf{i}) магнитное поле \mathbf{V}_{it} , имеющее только азимутальную компоненту (пунктир на рис. 6, а). Согласно имеющимся данным и представлениям, наиболее высокое удельное сопротивление имеет верхний слой Луны и именно он, будучи «подключенным» последовательно к внутренним более проводящим слоям, определяет суммарный полоидальный ток электрической моды.

Изменения межпланетного магнитного поля $\Delta \mathbf{V}_e$ индуцируют в проводящих слоях

Луны вихревые тороидальные токи с их вторичным внутренним полоидальным магнитным полем \mathbf{V}_{ip} (рис. 6, б) — магнитная мода ТЕ. Осью симметрии полей этой моды является направление $\Delta \mathbf{V}_e$, которое в общем случае не совпадает с направлениями \mathbf{V}_e и \mathbf{E} , т. е. с осью симметрии полей электрической моды. Варианты соотношения симметрий двух мод на поверхности Луны теоретически очень многообразны, они рассмотрены в работе [Рокитянский, Терешин, 2010б и в ссылках к ней].

Наблюдаемое на Луне переменное магнитное поле предполагается чисто полоидальным и как таковое используется для глубинного зондирования. Если тороидальное поле присутствует, то при существовавшей системе наблюдений оно не могло быть выделено и исключено и, следовательно, могло вносить ошибку в результаты зондирования электропроводности Луны. Этот вопрос был рассмотрен в работе [Рокитянский, Терешин, 2010а], в которой верхнему плохопроводящему слою приписывалось поперечное (интеграл радиального удельного сопротивления по толщине слоя) сопротивление 10^{12} и $10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$. В первом случае амплитуда электрической моды достигала $7,7 \text{ нТ}$, т. е. такого же порядка величины, как и максимальные вариации магнитной моды, во втором случае — $0,77 \text{ нТ}$, т. е. тоже вполне измеримая величина. Был сделан вывод о том, что только при поперечном сопротивлении $10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ электрической модой можно пренебречь. Все расчеты делались для однородного верхнего слоя. Однако данные о неоднородности верхнего слоя и более глубоких слоев имеются.

Горизонтальные неоднородности внутри Луны. Лучше всего известны плотностные неоднородности, изучаемые со спутников, вращающихся по окололунным орбитам. Гравитационное поле оказалось резко аномальным с десятками крупных положительных аномалий величиной 100 — 200 мГал с характерными размерами 50 — 300 км , приуроченных в основном к круглым морям. Избыточные массы, ответственные за аномалии, были названы

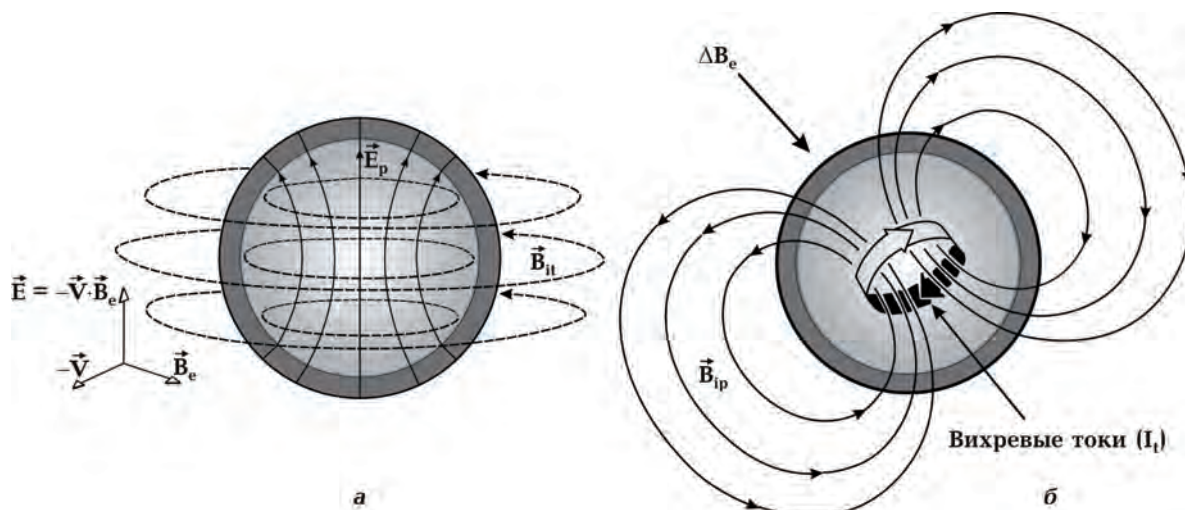


Рис. 6. Генерация переменных магнитных полей на концентрически слоистой $\sigma = \sigma(r)$ Луне: *a* — торoidalное \mathbf{B}_{it} магнитное поле токов под действием полоидального электрического поля $\mathbf{E}_{pol} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$, возникающего в результате движения Луны относительно магнитного поля \mathbf{B}_e набегающего солнечного ветра (электрическая ТМ-мода); *б* — полоидальное поле \mathbf{B}_{ip} вихревых токов \mathbf{I}_{it} , индуцированных изменениями внешнего магнитного поля $\Delta \mathbf{B}_e$ (вихревая ТЕ-мода). Поля изображены в предположении, что Луна со всех сторон окружена непроводящей средой.

Fig. 6. Generation of alternating magnetic fields on a concentrically layered $\sigma = \sigma(r)$ Moon: *a* — toroidal \mathbf{B}_{it} magnetic field of the currents arising under the action of a poloidal electric field $\mathbf{E}_{pol} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}_e$, resulting from the movement of the moon relative to the magnetic field \mathbf{B}_e of the incident solar wind (electric TM mode); *b* — the poloidal field \mathbf{B}_{ip} of toroidal eddy currents \mathbf{I}_{it} induced by changes of the external magnetic field $\Delta \mathbf{B}_e$ (eddy TE mode). The fields are shown under the assumption that the moon is surrounded on all sides by a nonconducting medium.

масконами. Глубина их залегания достигает сотен километров, что свидетельствует о существенной неоднородности коры и верхней мантии Луны.

Стратиграфия недр Луны построена по сейсмическим данным. В лунной коре скорость продольных волн скачкообразно изменяется с глубиной [Виноградов, 1975; Галкин, 1978; Шкуратов, 2006; Adams, 2009 и др.].

Мощность лунной коры в среднем составляет 60 км, изменяясь от 0 под морем Кризисов до 107 км в северной части кратера Королева на обратной стороне Луны. Параметры, полученные в разных регионах лунной поверхности, заметно различаются для одних и тех же глубин, что указывает на латеральные неоднородности скоростей сейсмических волн. В некоторых обзорных источниках астеносферу помещают на глубину более 800 км, полагая верхние 800 км твердой кристаллической

литосферой. Одновременно приводятся данные в пользу существования на глубине 250—500 км понижения скоростей сейсмических волн на $\approx 10\%$ [Adams, 2009] и повышения электропроводности [Ваньян и др., 1973].

Особенно интересны и убедительны данные о распределении двух основных типов лунотрясений (ЛТ). **Приливные** ЛТ происходят на глубине 800—1100 км, где предполагается контакт твердой и (полу)жидкой (частично расплавленной) фаз. Приливная волна с хорошо известной периодичностью глобально пробегает по телу Луны, а приливные ЛТ происходят не глобально, а только вдоль отдельных локальных вытянутых структур. На глубинах 300—800 км ЛТ не наблюдались. На глубинах 50—300 км происходят **тектонические** ЛТ. Они более редкие, но более сильные (по-видимому, потому, что литосфера менее вязкая на этих глубинах и может

накапливать большие напряжения). Самое интересное состоит в том, что тектонические ЛТ концентрируются в тех же регионах, где происходят приливные ЛТ. Это подводит к предположению, что на Луне существуют и широко распространены субвертикальные структуры типа плюмов, по которым наиболее активно происходят дегазация и вынос тепловой энергии, возможно, с участием вулканизма. Такие структуры должны обладать повышенной электропроводностью и по ним могут протекать вертикальные токи.

Итак, по нашим оценкам получилось, что тороидальное поле может давать ощутимый вклад в наблюдаемое на Луне магнитное поле, особенно, если существуют локальные каналы или области пониженного сопротивления, на существование которых указывают многочисленные косвенные данные: неоднородность 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.

Исследование геоэлектрических неоднородностей почти не описано из-за малого количества синхронных наблюдений и большой неопределенности в выборе интерпретационных моделей. Заслуживает внимание краткая информация солидного коллектива авторов [Бердичевский и др., 1979]: «Синхронные наблюдения в районе кратеров Лемонье и Декарта указывают на существование региональных аномалий переменного магнитного поля, связанных с повышением сопротивления лунной материи под круговыми морями». К сожалению, найти, где этот результат описан более подробно (если вообще он описан), пока не удалось.

Вулканизм и дегазация Луны. Наиболее убедительным доказательством существования вертикальных каналов повышенной электропроводности являются данные о наличии вулканической активности и дегазации из недр Луны. Вулканическая активность на Луне была открыта

Н. А. Козыревым путем целенаправленного (предсказанного им в его причинной или несимметричной механике) наблюдения центрального пика кратера Альфонс диаметром 120 км (рис. 7). Этот кратер был выбран потому, что он был расщелен широким разломом, из которого поднимался центральный пик высотой ≈ 1400 м и склонами, похожими на земные вулканы. После многократного наведения большого телескопа Крымской астрофизической обсерватории на центральный пик кратера Альфонс Н. А. Козырев уловил аномальное изменение, записал его спектр и после тщательного анализа (включавшего анализ спектров земных извержений и анализ флюоресценции извергаемых газов под воздействием жесткой радиации солнечного ветра) привел неоспоримые доказательства вулканизма на Луне [Козырев, 1959; Козырев, 1963]: «Утром 3 ноября 1958 г. в центральном пике кратера Альфонс произошло извержение: сначала был выброшен пепел, а затем, как обычно, выделились газы из поднявшейся к поверхности магмы (газы были адсорбированы на глубине при высоком давлении)». Английские астрономы П. Уилкинс и Ф. Бриун 19 ноября 1958 г. на этом же пике наблюдали красное пятно, которого не было до ноября 1958 г. По-видимому, это была свежеизлившаяся магма. Эти быстро проходящие лунные явления TLP (transient lunar phenomena) наблюдались редко, поскольку в XX в. и ранее мониторинг всей лунной поверхности с высоким разрешением не проводился. С начала XXI в. несколько орбитальных аппаратов (NASA Clementine and Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), Japanese Selene (Kaguya), Indian Chandrayaan-1 missions и другие) проводят мониторинг лунной поверхности с более высоким разрешением и количество сообщений о TLP резко возросло [Crotts, Hummels, 2009; Basilevsky et al., 2012; Ivanov, 2012 и др.].

Наличие действующего вулканизма, изотопный анализ поверхностных образований, свойства TLP и их обилие однозначно свидетельствуют о существовании проводящих каналов от поверхности Луны

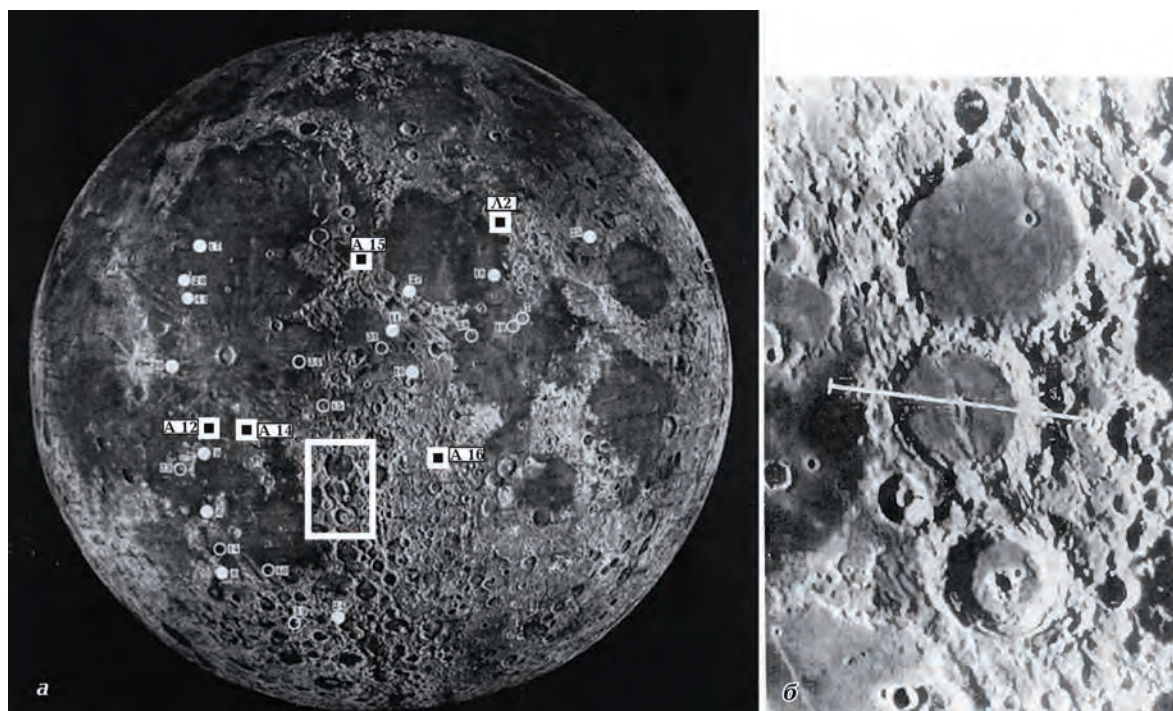


Рис. 7. Видимая сторона Луны. Левая панель (а). Лунный рельеф: темные большие равнины — лунные «моря» и множество кратеров с диаметром от долей метра до сотен километров. Показаны места посадки и работы магнитометров на поверхности Луны: миссий Аполлон (А12, А14, А15 и А16) и Лунохода 2 (Л2). Светлым прямоугольником выделена площадь, на которой находятся три кратера, показанные на правой панели (б). Кратеры сверху вниз: Птоломей, Альфонс и Арзахель — все древнего происхождения, но по ним проходит ряд молодых (не древнее 200—400 млн лет [Shkuratov et al., 2018]) меридиональных разломов. Белая черта — проекция щели спектрографа на центральный пик кратера Альфонс при наблюдениях Н.А. Козырева [Козырев, 1959; Kozurev, 1963].

Fig. 7. The visible side of the moon. Left panel (а) lunar topography: dark large plains — lunar «seas» and many craters with diameters from fractions of a meter to hundreds of kilometers. The places of landing and operation of magnetometers on the lunar surface are shown: missions Apollo (A12, A14, A15 and A16) and Lunokhod 2 (Л2). The white rectangle shows the area where three craters are presented in the right panel (б). Craters from top to bottom: Ptolemy, Alphonse and Arzakhel are all of ancient origin, but a number of young (not older than 200—400 million years [Shkuratov et al., 2018]) meridional faults pass through them. The white line is the projection of the slit of the spectrograph onto the central peak of the Alphonse crater during the observations of N.A. Kozurev [Козырев, 1959; Kozurev, 1963].

в ее недра и, следовательно, о существовании полоидальных токов и тороидального магнитного поля (кондуктивная мода). Для оценки величины этих токов пока данных не достаточно. Не ясно также, будут ли магнитные поля этой моды глобально сглаженными или проявятся локальные квазикруговые концентрические аномалии вокруг отдельных наиболее хорошо проводящих каналов.

Предложения к новым исследованиям электропроводности Луны. Таковые предложения были представлены в работе

[Рикитянский, Терешин, 2010б]. Здесь они будут кратко повторены с уточнениями и дополнениями, вытекающими из представленных в настоящей статье новых данных.

А. Усовершенствование зондирований с использованием естественных вариаций:

- 1) магнитометры с более высокой чувствительностью и частотой опроса;
- 2) синхронные трехкомпонентные магнитные наблюдения на поверхности Луны (длительные обсерватории) и на переставляемых/перемещающихся платформах (луноходах);

Б. Исследования с использованием искусственных ЕМ полей:

- 1) дистанционное глобальное ЕМ зондирование Луны на разных частотах с борта окололунных спутников;
- 2) локальные индукционные зондирования с борта специализированных луноходов, например по методике «петля в петле». Благодаря высокому сопротивлению верхних слоев Луны и низкому уровню помех, глубинность зондирования может достигать сотен и тысяч метров, а при наличии двух согласованных разнесенных установок и значительно больше.

Работы группы Б наверняка дадут интересные достоверные результаты. В работах группы А неизбежны предположения, от которых будет зависеть достоверность результата.

Выводы. 1. В наиболее плохо проводящих сферических оболочках Земли (тропосфера и особенно ее нижний слой приземной атмосферы) и Луны (реолит, брекчии, кора, возможно, большая часть литосферы) электропроводность невелика, но все-таки конечна, т. е. не равна нулю, поэтому вертикальные токи существуют и электрическая мода не равна нулю и может быть измерена.

2. Вертикальные токи на Земле распределены неоднородно. Их максимальные ве-

личины следует ожидать в зонах полярных сияний и при вторжении интенсивных космических лучей (внешние воздействия), а также в зонах максимальной грозовой активности и зонах повышенного выхода газов из недр Земли (внутренние воздействия). Все эти факторы характеризуются пространственно-временной вариабельностью, включая наличие суточного хода.

3. Глубинные исследования электропроводности основаны на теоретической модели магнитной моды, существование электрической моды отрицается, а фактически она попадает в неопознанные помехи, которые в результате когерентного анализа и изоцированной многоступенчатой обработки в значительной мере отсеиваются и модели электропроводности более-менее правильно отражают реальное геоэлектрическое строение Земли, однако с возможными систематическими погрешностями.

4. Учет взаимодействия геосфер, в частности учет электрической моды, может усилить геоэлектромагнитные исследования как в смысле повышения достоверности геоэлектрических моделей, так и расширения вовлеченности сообщества, объединяемого IAGA Division VI, в проблему взаимодействия геосфер, важную для изучения глобальных изменений (климата, ...) и многих проблем жизнедеятельности человека.

Список литературы

- Аксенов В.В. Тороидальное поле в атмосфере Земли. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 1997. 133 с.
- Алексеев И.И., Калегаяев В.В. Магнитосфера Земли и магнитосферы планет-гигантов <http://textarchive.ru/c-2624473-pall.html>.
- Бенькова Н.П. Спокойные солнечно-суточные вариации. Москва—Ленинград: Гидрометеиздат, 1941. 71 с.
- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Дмитриев В.И., Жданов М.С., Файнберг Э.Б., Харин Е.П. Международный симпозиум по электромагнитной индукции в Земле и Луне. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1979. № 7. С. 103—110.
- 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.
- Виноградов А.П. (ред.). Космохимия Луны и планет. Москва: Наука, 1975. 765 с.

- Галкин И.Н. Геофизика Луны. Москва: Наука, 1978. 176 с.
- Имянитов И.М., Колоколов В.П. Проблема происхождения электрического поля атмосферы и современные представления об атмосферном электричестве. В кн.: Атмосферное электричество. Ленинград: Гидрометиздат, 1976. С. 5—22.
- Козырев Н.А. Вулканическая деятельность на Луне. *Природа*. 1959. № 3. С. 84—87.
- Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи. *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180. № 5. С. 527—534. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201005h.0527>.
- Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. Киев: Наук. думка, 1981. 296 с.
- Рокитянский И.И., Терешин А.В. Глубинное магнитовариационное зондирование Луны. *Космічна наука і технологія*. 2010а Т. 16. № 4. С. 57—65.
- Рокитянский И.И., Терешин А.В. Исследование электропроводности Луны (итоги и перспективы). *Геофиз. журн.* 2010б Т. 32. № 5. С. 69—81.
- Рябов М.И., Сухарев А.Л., Орлюк М.И., Собишняк Л.И., Роменец А.А. Сравнительный анализ геомагнитной возмущенности в зоне Одесской магнитной аномалии в 24 цикле солнечной активности. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2019. Т. 24. № 1. С. 68—79.
- Четаев Д.Н. Дирекционный анализ магнитотеллурических наблюдений. Москва: Изд. ИФЗ АН СССР, 1985. 203 с.
- Шкуратов Ю.Г. Луна далекая и близкая. Харьков: Изд. ХНУ, 2006. 184 с.
- Adams, J. (2009). *International lunar network update*. NASA report 9.01.2009. Retrieved from www.lpi.usra.edu/pss/jan92009/presentations/ilnStatuspss.pdf.
- Basilevsky, A.T., Abdrakhimov, A.M., & Dorofeeva, V.A. (2012) Water and Other Volatiles on the Moon: A Review. *Solar System Research*, 46(2), 89—107. <https://doi.org/10.1134/S0038094612010017>.
- Chave, A.D., & Jones, A.G. (Eds.). (2012). *The Magnetotelluric Method*. Cambridge: Cambridge University Press., 584 p. doi: 10.1017/S009781139020138.002.
- Crotts, A.P.S. & Hummels, C. (2009) Lunar outgassing, transient phenomena, and the return to the moon. II. Predictions and tests for outgassing. *The Astrophysical Journal*, 707(2), 1506—1523; doi: 10.1088/0004-637X/707/2/1506.
- Christian, H.J., Blakeslee, R.J., Boccippio, D.J., Boeck, W.L., Buechler, D., Driscoll, K.T., Goodman, S.J., Hall, J.M., Koshak, W.J., & Mach, D.M. (2003). Global Frequency and Distribution of Lightning as Observed from Space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, 108(D1), ACL4-1—ACL4-15. <https://doi.org/10.1029/2002JD002347>.
- Davidenko, D. & Pulinets, S. (2019). Deterministic variability of the ionosphere on the eve of strong ($M \geq 6$) earthquakes in the regions of Greece and Italy according to long-term measurements data. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59(4), 493—508. <https://doi.org/10.1134/S001679321904008X>.
- Ivanov, A.V. (2014). Volatiles in Lunar Regolith Samples: A survey. *Solar System Research*, 48, 113—129. <https://doi.org/10.1134/S0038094614020038>.
- Kozyrev, N.A. (1963). Volcanic Phenomena on the Moon. *Nature*, 198, 979—980. <https://doi.org/10.1038/198979a0>.
- Morse, P.M., & Feshbach, H. (1953). *Methods of theoretical physics*. New-York: Mc Graw-Hill, 1978 p.
- Olsen, N. & Stolle, C. (2017). Magnetic Signatures of Ionospheric and Magnetospheric Current Systems During Geomagnetic Quiet Conditions—An Overview. *Space Science Reviews*, 206, 5—25. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0279-7>.
- Pulinets, S. & Davidenko, D.V. (2014). Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. *Advances in Space Research*, 53(5), 709—723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>.
- Rapoport, Yu., Grimalsky, V., Krankowski, A., Pulinets, S., Fedorenko, A., & Petrishchevskii, S. (2020). Algorithm for modeling electromagnetic channel of seismo-ionospheric coupling (SIC) and the variations in the electron con-

- centration. *Acta Geophysica*, 68, 253—278. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00385-0>.
- Shkuratov, Y.G., Ivanov, M.A., Korokhin, V.V., Kaydash, V.G., Basilevsky, A.T., Videen, G., Hradyska, L.V., Velikodsky, Y.I., Marchenko, G.P. (2018). Characterizing dark mantle deposits in the lunar crater Alphonsus. *Planetary and Space Science*, 153, 22—38. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.12.010>.
- Van Vleuten, A. (1917). *Over de dagelijksche variatie van het Ardmagnetisme* (pp. 5—30). Koninklijk Ned. Meteor. Institut. № 102, Utrecht (in Dutch).
- Varentsov, Iv.M. (2007). Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. In V.V. Spichak (Ed.), *EM sounding of the Earth's interior* (Vol. 40, pp. 259—273). Amsterdam: Elsevier.

Особенности исследования глубинной электропроводности Луны и Земли

И. И. Рокитянский, А. В. Терешин, 2020

Исследования глубинной электропроводности Земли и Луны производятся путем измерения и анализа естественных электромагнитных (ЭМ) полей, возбуждаемых солнечным ветром, вносящим электрическое поле порядка 2 мВ/м, приложенное к границам магнитосферы Земли или непосредственно к поверхности Луны. Для концентрически слоистой сферы с электропроводностью $\sigma = \sigma(r)$ ЭМ-поля могут быть представлены в виде суммы двух мод: электрической с тороидальным магнитным полем и магнитной с полоидальным магнитным полем. Каждая из мод связана с электропроводностью разными соотношениями и характеризуется различными возможностями исследования электропроводности внутри небесного тела. Принято считать, что на Земле токи с границы магнитосферы спускаются вдоль силовых линий до ионосферы, но до Земли не доходят вследствие очень высокого сопротивления приземного слоя воздуха (до 10^{14} Ом · м), и в твердой Земле индуцируются только полоидальные поля магнитной моды. Рассмотрение данных по глобальной электрической цепи показывает, что вертикальные токи проникают из атмосферы в Землю и электрическая мода не равна нулю. Вертикальные токи характеризуются сильной пространственно-временной вариабельностью. Разделение мод по данным наблюдений не проводилось. На Луне слой высокого сопротивления — это литосфера с выходящими на ее поверхность реголитом и брекчиями с удельным сопротивлением 10^7 — 10^{12} Ом · м. Рассмотрены известные виды неоднородностей Луны и сделан вывод об их интенсивности и многочисленности. Исходя из анализа пространственного распределения приливных и тектонических лунотрясений, сделано предположение, что они трассируют квазивертикальные структуры типа плюмов. Приведены результаты наблюдений вулканизма и быстропроходящих лунных явлений, полученные в последние годы орбитальными миссиями с аппаратурой высокого разрешения и свидетельствующие о весьма интенсивной дегазации Луны. Все это позволяет сделать вывод о наличии в Луне квазивертикальных проводников, поддерживающих формирование электрической моды. Обоснованы и сформулированы предложения по оптимизации новых исследований электропроводности Луны. Глубинные исследования электропроводности основаны на теоретической модели магнитной моды, существование электрической моды отрицается, а фактически она попадает в неопознанные помехи, которые в результате когерентного анализа и многоступенчатой обработки в значительной мере отсеиваются и модели электропроводности более-менее правильно отражают реальное геоэлектрическое строение Земли, однако с вероятными систематическими погрешностями. Выделение и изучение электрической моды следует рассматривать как дополнительный канал информации в ЭМ-исследованиях планет.

Ключевые слова: электропроводность Луны и Земли, солнечный ветер, магнитосфера, ионосфера, дегазация Земли и Луны, глобальная электрическая цепь.

Some peculiarities of the deep electrical conductivity study on the Moon and Earth

I. I. Rokityansky, A. V. Tereshyn, 2020

Studies of the deep electrical conductivity of the Earth and the Moon are carried out by measuring and analyzing the natural electromagnetic (EM) fields excited by the solar wind, introducing an electric field of the order of 2 mV/m applied to the boundaries of the Earth's magnetosphere or directly to the surface of the Moon. For a concentrically layered sphere with electrical conductivity $\sigma = \sigma(r)$, the EM fields can be represented as the sum of two modes: electric with a toroidal magnetic field and magnetic with a poloidal magnetic field. Each of the modes is associated with electrical conductivity by different ratios/formulas and is characterized by different possibilities for studying the electrical conductivity inside a celestial body. It is generally accepted that currents from the boundary of the Earth's magnetosphere descend along the geomagnetic field lines to the ionosphere, but do not reach the Earth due to the very high resistance of near-the-surface air layer (up to 10^{14} Ohm · m) and only poloidal fields of the magnetic mode are induced in the solid Earth. A review of the data on the global electric circuit shows that vertical currents penetrate from the atmosphere into the Earth and the electric mode is not equal to zero. Vertical currents are characterized by strong spatio-temporal variability. Separation of the modes from observation data was not carried out. On the Moon, the high-resistance layer is the lithosphere with regolith and breccias on its surface with a resistivity of 10^7 — 10^{12} Ohm · m. Spatial inhomogeneities of the Moon interior are considered and a conclusion is made about their multitude and intensity. Based on the analysis of the spatial distribution of tidal and tectonic moonquakes, it was suggested that they trace quasi-vertical structures like a plume. The results of observations of volcanism and transient lunar phenomena, obtained in recent years by orbital missions with high-resolution equipment, indicate an intense degassing of the moon. All this allows us to conclude that in the Moon there are quasi-vertical conductors supporting an electric mode. Proposals for the optimization of new studies of the electrical conductivity of the moon are substantiated and formulated. Deep studies of electrical conductivity are based on a theoretical model of the magnetic mode, the existence of the electrical mode is neglected, and it falls into unidentified noise, which by means of coherent analysis and multi-stage processing is largely eliminated and the conductivity models more or less correctly describe the real geoelectric structure of the Earth, but with probable systematic errors. Separation and study of the electric mode should be considered as an additional channel of information in EM studies of planets.

Key words: electrical conductivity of the Moon and the Earth, solar wind, magnetosphere, ionosphere, degassing of the Earth and the Moon, global electric circuit.

References

- Aksenov, V.V. (1997). *Toroidal field in the Earth's atmosphere*. Novosibirsk: Ed. of the Institute Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, 133 p. (in Russian).
- Alekseev, I.I., & Kalegaev, V.V. *The magnetosphere of the Earth and the magnetosphere of giant planets*. Retrieved from <http://tex-archive.ru/c-2624473-pall.html>.
- Benkova, N.P. (1941). *Calm sunny diurnal variations*. Moscow—Leningrad: Gidrometeoizdat, 71 p. (in Russian).
- Berdichevskiy, M.N., Vanyan, L.L., Dmitriev, V.I., Zhdanov, M.S., Faynberg, E.B., & Kharin, E.P. (1979). International Symposium on Electromagnetic Induction in the Earth and the Moon. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, (7), 103—110 (in Russian).
- Vanyan, L.L., Berdichevskiy, M.N., Yegorov, I.V., Krass, M.S., Okuleskiy, B.A., & Fadeev, V.E. (1973). The apparent electrical resistance of the moon and its interpretation. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, (11), 3—12 (in Russian).
- Vinogradov, A.P. (Ed.). (1975). *Cosmochemistry of the Moon and planets*. Moscow: Nauka, 765 p. (in Russian).

- Galkin, I.N. (1978). *Geophysics of the Moon*. Moscow: Nauka, 176 p. (in Russian).
- Imyanitov, I.M., & Kolokolov, V.P. (1976). The problem of the origin of the electric field of the atmosphere and modern ideas about atmospheric electricity. In *Atmospheric electricity* (pp. 5—22). Leningrad: Gidrometizdat (in Russian).
- Kozyrev, N.A. (1959). *Volcanic activity on the Moon*. *Priroda*, (3), 84—87 (in Russian).
- Mareev, E.A. (2010). Achievements and prospects of research of the global electric circuit. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 180(5), 527—534. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201005.h.0527> (in Russian).
- Rokityansky, I.I. (1981). *Induction sounding of the Earth*. Kiev: Naukova Dumka, 296 p. (in Russian).
- Rokityansky, I.I., & Tereshin, A.V. (2010a). Deep magnetovariational sounding of the moon. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, 16(4), 57—65 (in Russian).
- Rokityansky, I.I., & Tereshin, A.V. (2010b). The study of the electrical conductivity of the Moon (results and prospects). *Geofizicheskii zhurnal*, 32(5), 69—81 (in Russian).
- Ryabov, M.I., Sukharev, A.L., Orlyuk, M.I., Sobitnyak, L.I., & Romenets, A.A. (2019). Comparative analysis of geomagnetic disturbances in the Odessa magnetic anomaly area in the 24th solar activity cycle. *Radiofizika i radioastronomiya*, 24(1), 68—79 (in Russian).
- Chetaev, D.N. (1985). *Directional analysis of magnetotelluric observations*. Moscow: Ed. of the Institute of Physics of the Earth, Academy of Sciences of the USSR, 203 p. (in Russian).
- Shkuratov, Yu.G. (2006). *Moon distant and near*. Kharkov: Ed. of Kharkov National University, 184 p. (in Russian).
- Adams, J. (2009). *International lunar network update*. NASA report 9.01.2009. Retrieved from www.lpi.usra.edu/pss/jan92009/presentations/ilnStatuspss.pdf.
- Basilevsky, A.T., Abdrakhimov, A.M., & Dorofeeva, V.A. (2012) Water and Other Volatiles on the Moon: A Review. *Solar System Research*, 46(2), 89—107. <https://doi.org/10.1134/S0038094612010017>.
- Chave, A.D., & Jones, A.G. (Eds.). (2012). *The Magnetotelluric Method*. Cambridge: Cambridge University Press., 584 p. doi: 10.1017/CBO9781139020138.002.
- Crotts, A.P.S. & Hummels, C. (2009) Lunar outgassing, transient phenomena, and the return to the moon. II. Predictions and tests for outgassing. *The Astrophysical Journal*, 707(2), 1506—1523; doi: 10.1088/0004-637X/707/2/1506.
- Christian, H.J., Blakeslee, R.J., Boccippio, D.J., Boeck, W.L., Buechler, D., Driscoll, K.T., Goodman, S.J., Hall, J.M., Koshak, W.J., & Mach, D.M. (2003). Global Frequency and Distribution of Lightning as Observed from Space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, 108(D1), ACL 4-1—ACL 4-15. <https://doi.org/10.1029/2002JD002347>.
- Davidenko, D. & Pulinets, S. (2019). Deterministic variability of the ionosphere on the eve of strong ($M \geq 6$) earthquakes in the regions of Greece and Italy according to long-term measurements data. *Geomagnetism and Aeronomy*, 59(4), 493—508. <https://doi.org/10.1134/S001679321904008X>.
- Ivanov, A.V. (2014). Volatiles in Lunar Regolith Samples: A survey. *Solar System Research*, 48, 113—129. <https://doi.org/10.1134/S0038094614020038>.
- Kozyrev, N.A. (1963). Volcanic Phenomena on the Moon. *Nature*, 198, 979—980. <https://doi.org/10.1038/198979a0>.
- Morse, P.M., & Feshbach, H. (1953). *Methods of theoretical physics*. New-York: Mc Graw-Hill, 1978 p.
- Olsen, N. & Stolle, C. (2017). Magnetic Signatures of Ionospheric and Magnetospheric Current Systems During Geomagnetic Quiet Conditions—An Overview. *Space Science Reviews*, 206, 5—25. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0279-7>.
- Pulinets, S. & Davidenko, D.V. (2014). Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit. *Advances in Space Research*, 53(5), 709—723. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>.
- Rapoport, Yu., Grimalsky, V., Krankowski, A., Pulinets, S., Fedorenko, A., & Petrishchevskii, S. (2020). Algorithm for modeling electromagnetic channel of seismo-ionospheric coupling (SIC) and the variations in the electron concentration. *Acta Geophysica*, 68, 253—278. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00385-0>.
- Shkuratov, Y.G., Ivanov, M.A., Korokhin, V.V., Kaydash, V.G., Basilevsky, A.T., Videen, G., Hradyska, L.V., Velikodsky, Y.I., Marchenko, G.P. (2018). Characterizing dark mantle deposits in the lunar crater Alphonsus. *Planetary and Space Science*, 153, 22—38. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.12.010>.
- Van Vleuten, A. (1917). *Over de dagelijche variatie van het Ardmagnetisme* (pp. 5—30). Koninklijk Ned. Meteor. Instit. № 102, Utrecht (in Dutch).
- Varentsov, Iv.M. (2007). Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. In V.V. Spichak (Ed.), *EM sounding of the Earth's interior* (Vol. 40, pp. 259—273). Amsterdam: Elsevier.