



УДК 550.337

ВОЗМОЖНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИН.Л. Шустов¹, П.Ю. Пушкарев¹, Т.В. Гудкова^{1,2}, С.В. Панферов¹¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
²Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

Горные породы на Марсе и Луне обладают более высокими удельными электрическими сопротивлениями, чем на Земле, где низкие сопротивления обусловлены водонасыщением. В этих условиях наиболее эффективны, в том числе для поиска подповерхностных вод на космических телах, геофизические методы, использующие переменные электромагнитные поля. Это методы глубинного магнитовариационного зондирования (ГМВЗ), магнитотеллурического зондирования (МТЗ), зондирования становлением поля (ЗС), частотного зондирования (ЧЗ), радиоволнового просвечивания (РВП) и георадиолокации. В статье рассмотрены их основы, особенности и возможности применения на Марсе и Луне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ГЕОФИЗИКИ, ПОИСК ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД, МАРС, ЛУНА

DOI 10.5425/2304-7380_2023_41_16

<https://elibrary.ru/msavey>**1. ВВЕДЕНИЕ**

Электроразведкой принято называть раздел разведочной геофизики, объединяющий геофизические методы, использующие электромагнитные (ЭМ) поля. Под космической электроразведкой мы понимаем её направление, связанное с изучением космических тел, в первую очередь Марса и Луны.

По скорости изменения ЭМ полей выделяют три основные группы методов электроразведки: постоянного тока, низкочастотные и высокочастотные [1]. По природе возбудителей ЭМ поля методы делятся на использующие естественные поля и поля искусственных источников.

Электроразведочные методы позволяют различать горные породы, обладающие разными значениями ЭМ свойств. Основным из них является электропроводность, на практике часто используется обратная величина - удельное электрическое сопротивление (УЭС). На высоких частотах ЭМ поле зависит от диэлектрической проницаемости (ДП) горных пород. Электропроводность и диэлектрическая проницаемость водонасыщенных горных пород существенно больше, чем сухих, что делает методы электроразведки эффективными способами поиска подповерхностных вод на космических телах.

Электронная почта авторов для переписки:

Шустов Николай Львович, e-mail: nickshus@gmail.com
Пушкарев Павел Юрьевич, e-mail: pavel_pushkarev@list.ru
Гудкова Тамара Васильевна, e-mail: gudkova@ifz.ru
Панферов Семен Валерьевич, e-mail: svp74@bk.ruАдрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Методы постоянного тока основаны на гальваническом возбуждении тока в земле. Для этого к батарее или генератору подключается питающая линия, заземлённая металлическими стержневыми электродами А и В (рис. 1А). На Земле горные породы чаще всего водонасыщены и сопротивление заземления (между стержнем и землей) составляет от первых десятков до первых тысяч Ом. В сухом грунте, характерном для Марса и Луны, сопротивление оказывается существенно выше, и ток в среде практически не течёт.

В низкочастотных методах гальванический контакт не обязателен. Можно использовать индукционное возбуждение, с помощью разложенной на поверхности и подключенной к генератору переменного тока петли (рис. 1Б). При этом, если в изучаемой среде присутствуют проводящие объекты, токи в них индуцируются за счёт явления ЭМ индукции. Этот подход более предпочтителен при изучении Марса и Луны и может, по крайней мере, определить отсутствие или наличие проводников, а в последнем случае – также оценить их УЭС и геометрию границ.

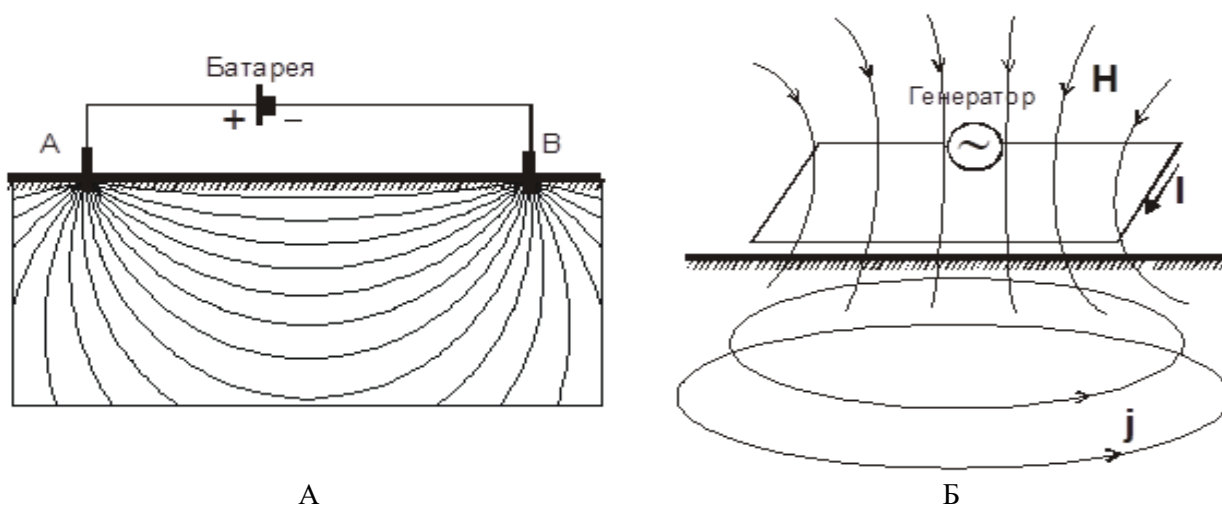


Рис. 1. Гальваническое возбуждение в методах постоянного тока (А) и индукционное возбуждение в низкочастотных методах (Б). А и В – питающие электроды, на них начинаются и заканчиваются токовые линии. I, H и j – сила тока в петле, напряжённость магнитного поля и плотность индуцированного тока [2]

Распространение низкочастотного (или квазистационарного) ЭМ поля в среде описывается уравнением диффузии (или теплопроводности), это поле токов проводимости [3]. Высокочастотное (или радиоволновое) поле имеет иную структуру, описываемую волновым уравнением, это поле токов смещения. Оно распространяется наподобие сейсмических волн и может описываться законами геометрической оптики. Причём, как уже отмечалось, на высоких частотах поле зависит от ДП горных пород, в частности, на границах со скачком её значений происходит отражение ЭМ волн. Наиболее распространённым высокочастотным методом электроразведки является метод георадиолокации.

Частотные диапазоны, в которых применимы квазистационарное и волновое приближения, разделены областью частот, где ЭМ поле имеет наиболее сложную структуру и описывается телеграфным уравнением. Её положение зависит от УЭС среды, для относительно проводящих условий Земли она располагается в районе частоты 1 МГц, а для высокоомных разрезов Марса и Луны её можно ожидать на частотах порядка 1 кГц.

Вследствие затухания ЭМ поля в проводящих средах, которое тем выше, чем выше частота колебаний поля, в наземных условиях высокочастотные методы обеспечивают глубинность исследования до нескольких метров, а низкочастотные – до нескольких сотен метров (и больше, но при использовании громоздких мощных генераторов). В условиях и Марса и Луны глубинность этих методов возрастает до сотен метров при использовании высоких частот и до километров на низких частотах (с относительно лёгкими генераторами). Тем самым, используя разные диапазоны частот, можно зондировать разные подповерхностные слои.

Существенно большую глубинность обеспечивают ЭМ методы, использующие естественные низкочастотные поля. Строго говоря, решаемые ими задачи не относятся к разведочным, это методы глубинной геофизики, позволяющие на Земле изучать глубокие горизонты коры и мантию. Они

заслуживают отдельного подробного рассмотрения, однако в этой статье мы их также вкратце представим.

Далее мы рассмотрим методы зондирования с искусственными источниками, вначале низкочастотные (квазистационарные), затем высокочастотные (радиоволновые). В конце мы подведём итоги и оценим перспективы электроразведки на Марсе и Луне.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ С ЕСТЕСТВЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Естественные низкочастотные ЭМ поля хорошо изучены и широко используются для ЭМ зондирований на Земле. На частотах ниже 1 Гц основным возбудителем поля является нестационарная токовая система в магнитосфере и ионосфере Земли, формирующаяся под воздействием порывов «солнечного ветра» (потока ионизированных частиц) [4]. Эти внешние, по отношению к Земле, токи по закону Био-Савара-Лапласа создают переменное магнитное поле, которое в свою очередь, по закону ЭМ индукции Фарадея, возбуждает внутренние (земные, теллурические) токи, зависящие как от интенсивности и структуры внешнего возбудителя, так и от распределения УЭС в Земле. На частотах выше 1 Гц ЭМ поле в первую очередь обусловлено удалённой грозовой активностью, в основном локализованной в тропических широтах [5]. Возникающие при этом ЭМ поля (атмосферики) распространяются практически вдоль всей поверхности Земли.

Геофизические методы, использующие естественные ЭМ поля, основаны на анализе различных отношений компонент поля, которые зависят от УЭС Земли, но не зависят от интенсивности источника. Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) использует отношение горизонтальных электрической и магнитной составляющих [6]. Компоненты электрического поля измеряется с помощью заземлённых линий, магнитного – с помощью многовитковых индукционных датчиков. Метод МТЗ, в зависимости от используемой аппаратуры, охватывает диапазон частот примерно от 20 кГц до 0.0001 Гц и широко применяется при изучении глубин от десятков метров до десятков километров.

При глубинном магнитовариационном зондировании (ГМВЗ) задействуются вертикальная и горизонтальная составляющие магнитного поля. Если вариации электрического поля удастся измерять на периодах до нескольких часов, то магнитные вариации регистрируются с помощью магнитометров на периодах до многих суток, соответственно, по сравнению с МТЗ, метод ГМВЗ обеспечивает большую глубинность и позволяет исследовать электропроводность мантии Земли. Компоненты магнитного поля могут регистрироваться как на поверхности Земли (в геомагнитных обсерваториях или временных пунктах), так и с помощью спутников, обеспечивающих более регулярное покрытие земной поверхности и более однородный массив данных. Так, с 2013 года на орбитах находятся три спутника проекта Swarm Европейского Космического Агентства с трёхкомпонентными магнитометрами.

Первая оценка электропроводности Земли по данным ГМВЗ была выполнена в 1889 году Британскими учёными А. Шустером и Г. Лэмбом. В дальнейшем метод ГМВЗ прошёл путь сначала до сферически-симметричных (одномерных) моделей электропроводности мантии Земли, а в последнее время – до трёхмерных (рис. 2). На фоне повышения электропроводности с глубиной, выявляются региональные аномалии, например, в районе Китая и Австралии.

Низкочастотные ЭМ поля других планет и спутников Солнечной системы изучены гораздо слабее и мало использовались для глубинных ЭМ зондирований их недр. Наибольший (после Земли) объём исследований был выполнен на Луне. Как известно, у этого спутника нет собственного дипольного магнитного поля. Особенностью Луны является то, что часть оборота вокруг Земли она находится в её магнитосфере, а часть – под воздействием «солнечного ветра».

Было предложено несколько подходов к глубинному ЭМ зондированию Луны, основанных на использовании различных компонент поля. Прежде всего, это традиционное МТЗ с измерением электрического и магнитного полей на поверхности, а также относительные измерения компонент магнитного поля на поверхности и на орбите, где поле можно считать чисто первичным [7]. Двухточечные измерения магнитного поля проводились в начале 1970-х годов с помощью магнитометров миссий Explorer на орбите, Apollo и Луноход на поверхности. По измерениям в поле «солнечного ветра» на поверхности и на орбите или в двух точках поверхности была оценена глубинная электропроводность Луны до глубин порядка 1000 км, которая оказалась существенно

меньше земной [8]. Позднее эти оценки были уточнены по данным орбитальных миссий Lunar Prospector и Kaguya/Selene, полученным в хвосте магнитосферы Земли, где магнитное поле можно считать потенциальным и применим стандартный подход к ГМВЗ [9].

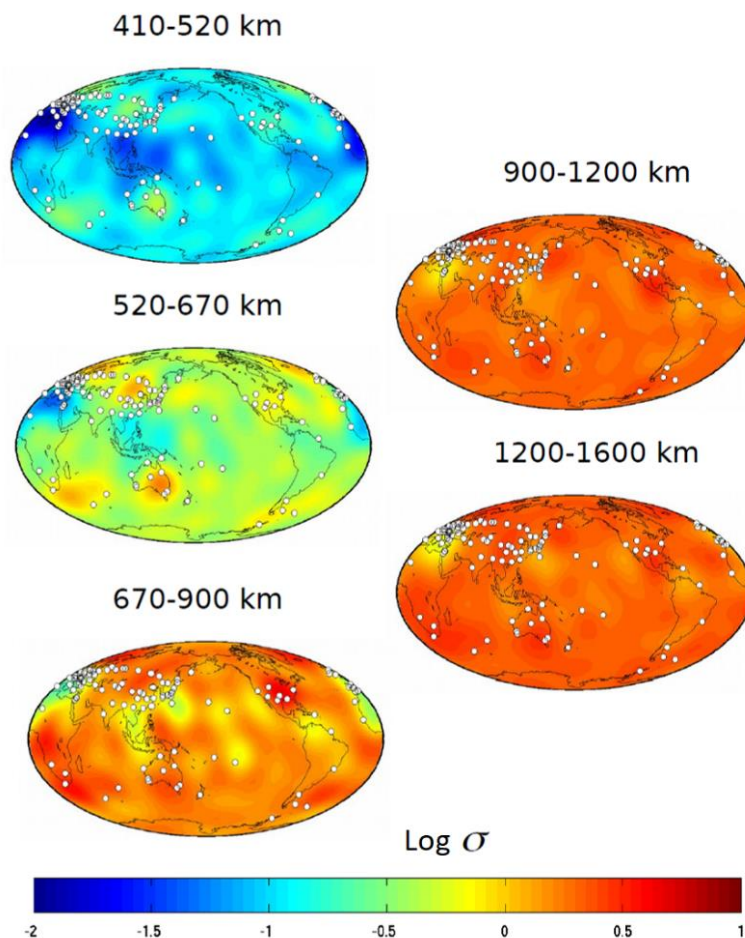


Рис. 2. Электропроводность мантии Земли на различных глубинах по данным ГМВЗ (3D инверсия) по сети геомагнитных обсерваторий INTERMAGNET [10]

Метод МТЗ пока нигде, кроме Земли, на практике не применялся, хотя Американскими геофизиками планируется соответствующий эксперимент на Луне уже в 2024 году. Для этого ими была разработана портативная измерительная станция с феррозондовыми магнитометрами и электрическими линиями с электродами, отстреливаемыми в разные стороны на расстояние 20 м [11]. Предполагается, что в дальнейшем на Луну отправятся пилотируемые экспедиции и астронавты смогут устанавливать аппаратуру более эффективно.

3. ЗОНДИРОВАНИЕ СТАНОВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Методы низкочастотного ЭМ зондирования с искусственным источником широко применяются при относительно малоглубинных исследованиях, требующих небольшой мощности источника. Эти методы не зависят от естественных полей и их особенностей на каждой планете или спутнике, оно могут применяться практически одинаково, например, на Земле, Марсе и Луне. Наиболее существенным отличием является то, что на Земле вследствие повсеместного распространения водонасыщенных горных пород разрез обычно является более проводящим. Однако и на Земле есть места, например, вулканические массивы, с условиями, похожими на марсианские и лунные, и благоприятные для опробования методов.

На Земле применяются методы зондирования с искусственным источником, работающие как в частотной, так и во временной области [12]. В первом случае глубинность исследования зависит от частоты колебаний поля (метод частотного зондирования, ЧЗ), во втором – от времени становления

поля, истекшего с момента выключения импульса тока (метод зондирования становлением поля, ЗС). При изучении планет и спутников, очевидно, удобно использовать компактные установки, с близко расположенными или даже совмещёнными источником и приёмником (т.е. работать в ближней зоне источника). В методе ЧЗ такая установка малоинформативна, поскольку первичное поле гармонического источника вблизи него существенно превышает вторичное поле, связанное с токами в изучаемой среде. В методе ЗС измерения проводятся в то время, когда источник выключен и существует только вторичное поле. По этой причине при планируемых исследованиях на Марсе и Луне предпочтение отдаётся методу ЗС.

В методе ЗС создаваемые генератором прямоугольные импульсы тока подаются в питающую петлю, раскладываемую в форме квадрата со стороной размером от 20 м и более. Чем больше площадь петли, тем на больших временах после выключения импульса можно зарегистрировать сигнал, соответственно, тем больше и глубинность исследования. Измеритель регистрирует ЭДС в приёмной петле, пропорциональную скорости изменения вертикальной компоненты магнитного поля. Часто используются соосные петли (рис. 3), хотя возможны и другие варианты взаимного расположения петель. При интерпретации данных полученную зависимость сопротивления от глубины относят к центру приёмной петли.

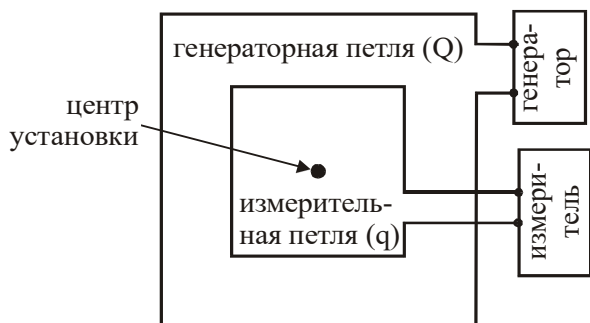


Рис. 3. Схема установки ЗС с соосными петлями [2]

наибольшей технологичностью и простотой установки, что немаловажно в условиях роботизированной раскладки. К сожалению, аппаратура так и не была отправлена на Марс, но широко применялась при малоглубинных геофизических исследованиях на Земле [15].

Аппаратура и технология ЗС для применения на Марсе была также разработана в США [16]. Параметры аппаратуры и методики были выбраны на основе моделирования возможных водонасыщенных объектов в верхней части марсианского разреза. Интересным решением является автоматическая раскладка петли в форме равностороннего треугольника с размером стороны 70 м путём выстреливания грузов, закреплённых на двух её углах. Технология была опробована на Гавайях, где высокоомные вулканические горные породы подстилаются горизонтом, насыщенным морской водой, и показала результат, аналогичный полученному со стандартным наземным аппаратурным комплексом.

4. МЕТОДЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ИСКУССТВЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Как уже отмечалось, в методах гармонических полей (т.е. меняющихся во времени по синусоидальному закону) эффективно разносить источник и приёмник на большие расстояния. На Марсе и Луне представляется перспективным использовать стационарные источники, а относительно лёгкую измерительную аппаратуру перемещать по профилям с помощью беспилотных наземных, а для Марса – летательных аппаратов (БПЛА). Учитывая опыт эксплуатации американского беспилотного вертолёта Ingenuity на Марсе, такие зондирования могут производиться быстро и обеспечивать глубинность исследования до сотен метров.

Использование в источнике свип-сигнала (т.е. с меняющейся частотой) позволит проводить частотные зондирования (ЧЗ). В качестве источника целесообразно использовать незаземлённую петлю, как в рассмотренном выше методе ЗС. Чем больше будет её размер и мощность генератора, тем

Наибольшее внимание уделялось применению метода ЗС на Марсе, где есть основания обнаружить подземную воду, что является идеальной задачей для метода вследствие низкого УЭС минерализованной воды. В СССР и позднее в России разрабатывалась соответствующая технология проведения ЗС на Марсе [13, 14]. Была создана уникальная по своей компактности аппаратура TEM-Fast, сочетающая в себе генераторный и измерительный блоки, подключаемые к питающей и приёмной петлям, либо к одной петле, выполняющей функции вначале источника, затем – приёмника (совмещенная петля). Совмещенная петля обладает

больше будут глубинность исследования и размер планшета, который можно отснять при одном положении петли. Измерения на частотах порядка 100 кГц и выше могут проводиться с помощью емкостных линий (электрические компоненты) и небольших индукционных датчиков (магнитные компоненты) [17].

Поскольку параметры источника (размер петли, сила тока) нам известны, для интерпретации можно использовать любую из компонент поля (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z). Но более эффективны отношения компонент (E_x/H_y , H_z/H_x), в частности, они более чувствительны к разрезу под точкой наблюдения [18].

При использовании частот порядка 100 кГц на Земле влиянием токов смещения ещё можно пренебречь, но в высокоомных условиях Марса и Луны их влияние может быть существенным и даже доминирующим. Это усложняет структуру поля, но делает возможным получение информации как о УЭС, так и ДП горных пород [19].

Актуальность поиска электрически проводящих объектов (в частности, обводнённых) делает интересным использование на Марсе и Луне метода радиоволнового просвечивания (РВП) [20]. Этот метод основан на излучении ЭМ поля в диапазоне частот от 150 кГц до 40 МГц и приеме этого сигнала на некотором расстоянии. Таким образом можно просвечивать высокоомные массивы горных пород между скважинами и горными выработками, а также точками на поверхности, разделёнными повышениями рельефа (рис. 4). Особые перспективы метода РВП мы связываем с развитием беспилотной транспортной техники на поверхности планет.

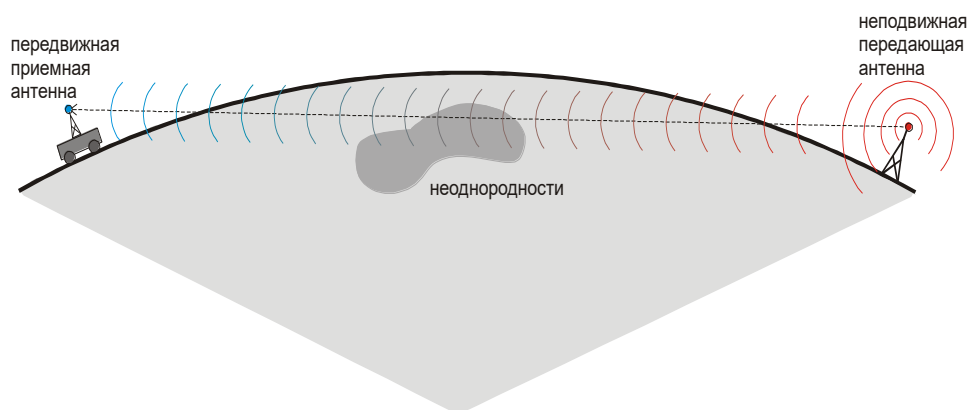


Рис. 4. Принципиальная схема проведения съемки методом радиоволнового просвечивания

5. ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ (ГЕОРАДАР)

Георадар – один из наиболее технологичных и производительных геофизических методов, используемых на Земле в первую очередь для решения инженерных и геологоразведочных задач на небольших глубинах (до первых десятков метров) [21]. Метод георадара основан на отражении ЭМ волн высокой частоты (сотни мегагерц – гигагерцы) от границ слоев геологического разреза с разными значениями ДП. Используя известные приемы обработки сейсмических данных, можно определить глубину до границ отражений и, в ряде случаев, выделять отдельные трехмерные объекты.

В условиях высоких УЭС горных пород на Марсе и Луне, глубина исследования может достигать первых сотен метров и даже первых километров. Это связано с явлением скин-эффекта – быстрым затуханием поля с глубиной на высоких частотах. Но чем выше частота работы георадара, тем большей детализации изучаемого разреза можно достигнуть.

Радиолокационное зондирование может выполняться как с использованием орбитальных систем, так и с оборудованием на поверхности планеты. В последнем случае, безусловно, детальность исследований повышается.

Идея применения георадара на поверхности планет не нова. Так, для миссии EхоMars 2016 был разработан георадар для ЭМ исследования недр (EISS), использовавший идею бистатических (с разнесёнными источником и приёмником) радиолокационных измерений [22]. При этом одна приемопередающая система с дипольной антенной (два монополя длиной 35 м каждый) должна была

располагаться на стационарном спускаемом аппарате, а еще одна приемная система для измерения магнитного поля в трех направлениях – на подвижном марсоходе. Миссия не увенчалась успехом.

В 2021 году китайский марсоход Zhurong в рамках миссии «Tianwen-1» выполнил георадарные работы на профиле длиной 1171 м с глубиной исследования до 100 м [23]. Целевым объектом послужил кратер Утопия на Марсе (рис. 5).

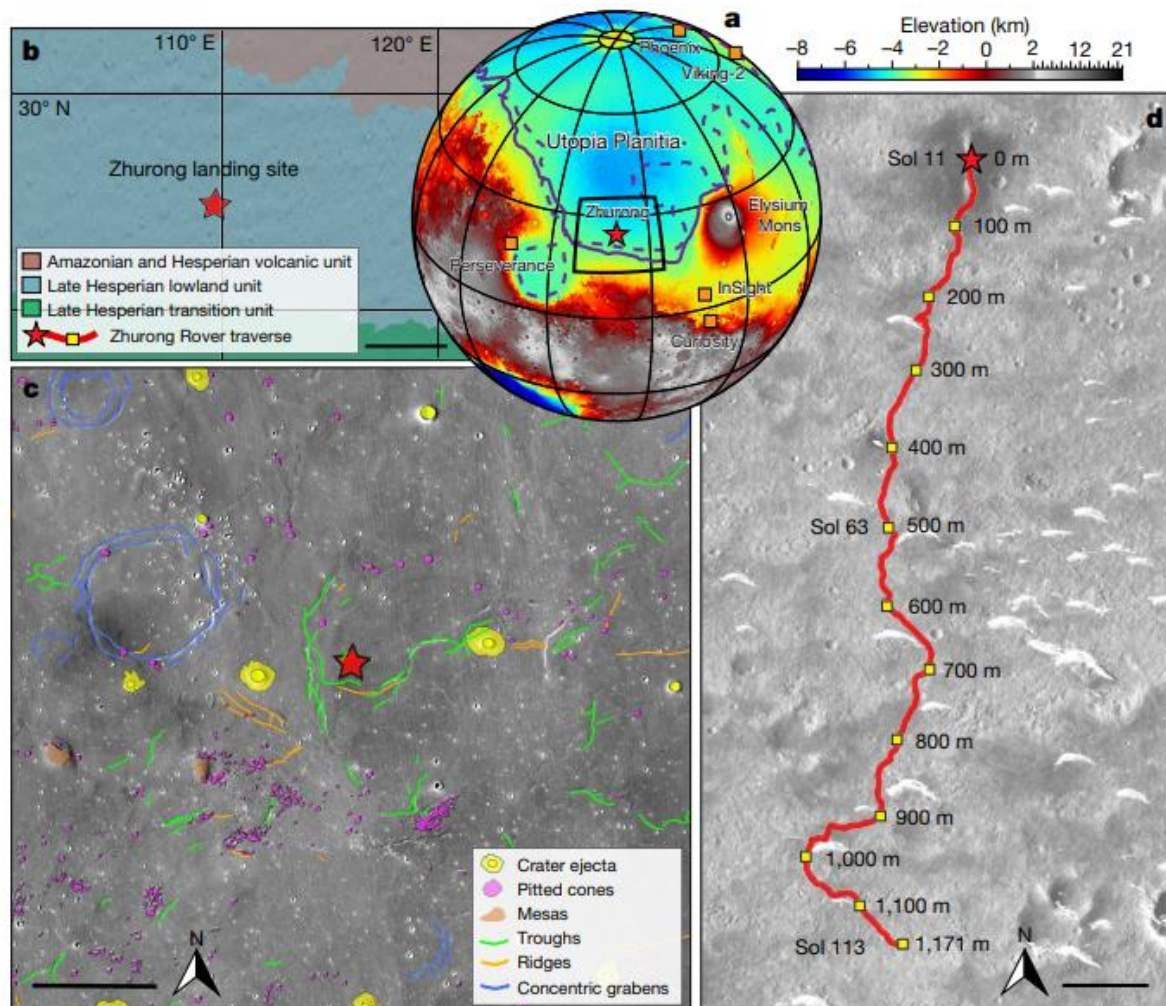


Рис. 5. Место посадки (отмечено красной звездой) и схема движения марсохода Zhurong при проведении георадарной съемки [23]

При георадарной съемке в миссии «Tianwen-1» использовался двухчастотный георадар (450–2150 МГц и 15–95 МГц), что позволило получить очень высокую детализацию верхней части разреза и достаточно большую глубину исследований.

На рисунке 6 представлены результаты обработки и интерпретации данных радара в миссии «Tianwen-1». Получен разрез до глубины 100 м при длине профиля более 1 км с выделяемыми по различной ДП четыремя слоями. Самый верхний слой – это реголит. Далее вниз по разрезу выделяются два слоя со скальными породами различной зернистости. Подстилающий слой – базальт. Таким образом, бортового запаса энергии марсохода вполне достаточно для оперативного построения разреза на достаточно большом удалении.

Георадарные наблюдения с орбиты, с одной стороны, ограничены мощностью передающих систем, с другой стороны, в условиях отсутствия атмосферы на Луне и слабой атмосферы на Марсе, уменьшается затухание высокочастотного излучения. Помимо поиска потенциальных полезных ископаемых, интерес могут представлять и погребенные лавовые потоки с полостями внутри [24] покрытые базальтом, пустоты в лавовых потоках могут послужить основой для сооружения защищенных убежищ при освоении Марса и Луны.

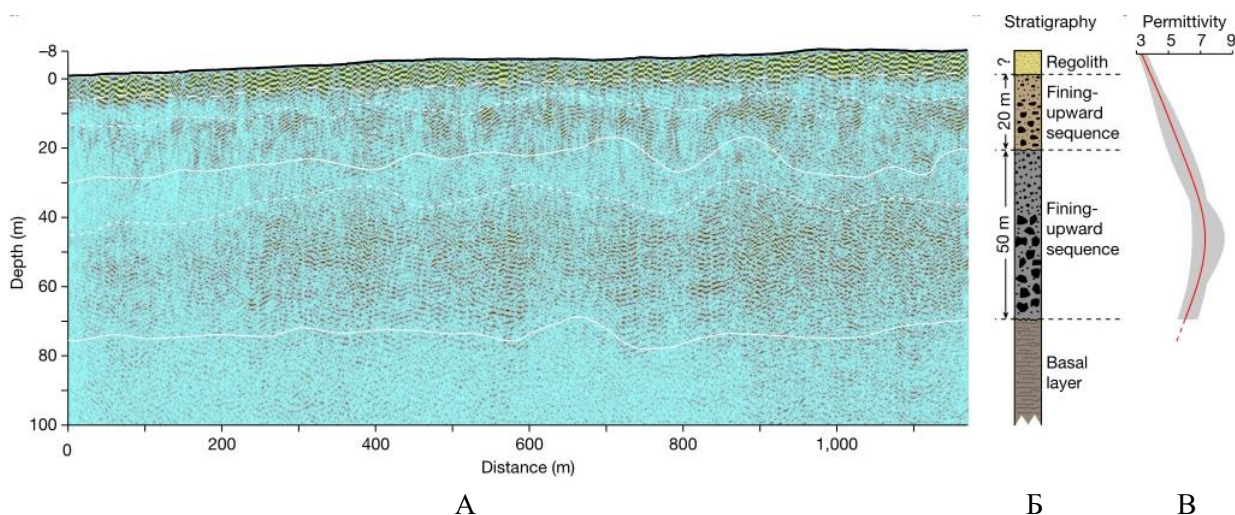


Рис. 6. Результат визуализации и интерпретации данных георадара на Марсе [23]:
 А – Радарограмма профиля наблюдений с высотой рельефа (черная линия) и выделенными границами слоев (белые линии); Б – Литологическая привязка выделенных слоев; В – Распределение ДП с глубиной (красная линия – осредненная кривая)

Так, в 1972 в рамках проекта «Аполлон-17» георадар применялся с орбиты Луны на частотах 5, 15 и 150 МГц. Позже радар подповерхностного зондирования «SHARAD» работал с орбиты Марса, используя длинный пульсирующий сигнал, линейно модулированный по частоте, обеспечивающий разрешение до 7 м вдоль трассы при глубинности до 1 км. Георадар «MARSIS», работавший на частотах 1-5 МГц, позволил получить глубину исследования до 5 км, но с ограниченным разрешением [24].

На рисунке 7 показаны результаты работы орбитальных георадаров на северном полюсе Марса. Выделены границы базальтовых пород и границы чередующихся слоев базальтового песка и водяного льда. Такие чередования, видимо, связаны с изменением угла наклона оси Марса к орбите и, соответственно, разными температурными режимами.

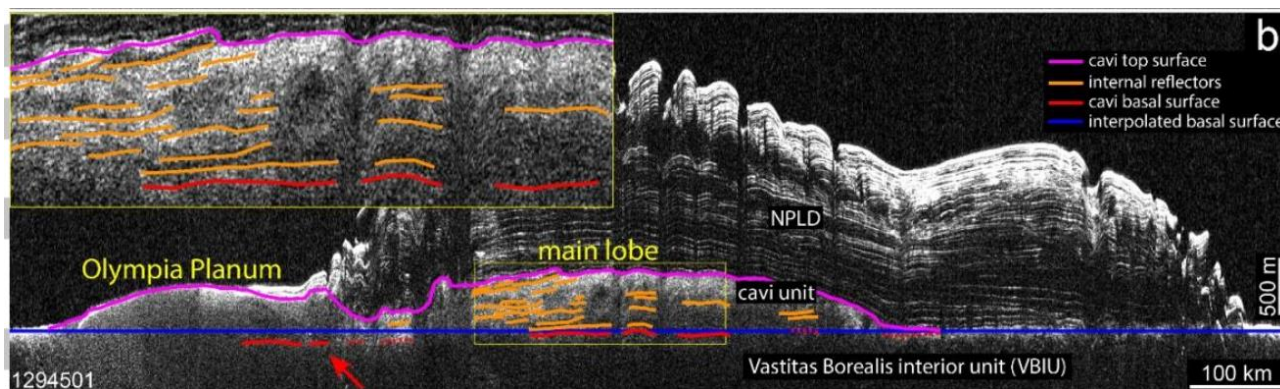


Рис. 7. Данные и результаты качественной интерпретации по профилю орбитального георадара на северном полюсе Марса [25]. NPLD – North Polar Layered Deposits – слоистые отложения на северном полюсе: красная линия – граница базальтов, розовая линия – граница залежей песка и водяного льда

Решение обратной задачи геофизики в целом и радиолокационного зондирования в частности усложняется некорректностью задачи, обладающей множеством решений. Для сужения класса решений обратной задачи необходимы априорные данные, которых в условиях Марса и Луны крайне мало. Так, радар орбитального аппарата «Марс Экспресс» в районе марсианских полярных шапок обнаружил объект, похожий на подледное озеро [25]. Но некоторые отложения осадочных пород тоже могли дать аналогичную картину на радарограммах. Накопление информации, использование комплекса геофизических методов может помочь уточнить и точно определить объекты в разрезе.

Важным аспектом применения систем радиолокационного подповерхностного зондирования является тип применяемых антенн. Так как оптимальной согласованной антенной для передачи и приема ЭМ излучения является установка с линейными размерами, пропорциональными четверти длины волны, такие антенны обладают достаточно большими размерами (первые метры – первые десятки метров). Это делает затруднительным их использование как с орбитальных космических аппаратов, так и с транспортных средств, передвигающихся по поверхности планеты. В связи с этим, особый интерес приобретают импульсные системы излучения, основанные на накоплении энергии и затем передачи ее в виде короткого импульса.

6. ПЕРСПЕКТИВЫ КОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В таблице 1 подведены итоги и перечислены некоторые перспективные для исследований на Марсе и на Луне электроразведочные методы. Для них указаны варианты расположения источника и приёмника, примерный диапазон изучаемых глубин, а также ЭМ свойства горных пород, которые могут быть оценены в результате интерпретации данных.

Очевидно, что ряд методов фактически уже успешно работает и дает результаты (ГМВЗ, георадар). Для этих методов можно накапливать информацию, увеличивать детальность, выполнять комплексную интерпретацию данных. Некоторые методы ещё требуют проведения опытно-методических работ сначала на Земле, потом на поверхности других планет.

Важнейшим вопросом применения электроразведочных методов на Марсе и Луне является оптимизация габаритных размеров, веса оборудования и энергопотребления. Эти параметры зависят от выбора методики решения конкретно поставленной задачи, необходимой глубинности исследований и их детальности.

В заключение отметим, что преимуществом электроразведки, в сравнении с геофизическими методами потенциальных полей, является возможность изменения параметра глубинности (частоты колебаний или времени становления поля) и осуществления зондирования, что позволяет строить достаточно надёжные и детальные глубинные разрезы вдоль профилей, а при наличии площадной съёмки – объёмные модели среды.

Таблица 1. Сравнение методов космической электроразведки

Метод	Источник	Приёмник	Глубинность	Свойства	Применялся
ГМВЗ	-	П, О	100 – 1000 км	УЭС	+
МТЗ	-	П	10 – 100 км	УЭС	-
ЗС	П	П	10 м – 10 км	УЭС	-
ЧЗ	П	П, А	10 м – 10 км	УЭС, ДП	-
РВП	П	П, А	10 м – 1 км	УЭС, ДП	-
Георадар	О	О	10 м – 1 км	ДП	+
Георадар	П	П	1 – 100 м	ДП	+

*(П – поверхность, А – аэро-вариант, О – орбита)

Высокие электрические сопротивления горных пород Марса и Луны затрудняют применение методов постоянного тока, но позволяют использовать индукционные методы зондирования, одновременно обеспечивая большую глубинность исследований. Причём эти методы обладают высокой чувствительностью к зонам низкого сопротивления, таким образом, представляя собой эффективный способ поиска подземных вод.

Наибольшую информативность обеспечивает комплексирование электроразведки и других геофизических методов (гравиразведки, магниторазведки, сейсморазведки, терморазведки, ядерной геофизики). Использование, помимо электропроводности, других физических свойств массивов горных пород, позволяет точнее характеризовать их состав, строение, флюидный и термальные режимы, историю формирования и современное геодинамическое состояние.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского университета в рамках Соглашения № 23-Ш01-13.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмелевской В.К. Электроразведка. М: Изд-во МГУ, 1984, 422 с.
2. Электроразведка. Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Том I. Под ред. Модина И.Н. и Яковлева А.Г. Тверь: ПолиПРЕСС, 2018. 276 с.
3. Альпин Л.М. Теория поля. М: Недра, 1966, 384 с.
4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Том 1. Морфология и теория магнитного поля Земли и его вариаций. Л: ЛГУ, 1964, 445 с.
5. Garcia X., Jones A.G. Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding. *Geophysics*, 2002, 67, p. 448-458.
6. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. М: Недра, 1992, 250 с.
7. Бердичевский М.Н., Красс М.С. Расчёт переменного электромагнитного поля Луны. *Физика Земли*, 1976, № 10, с. 73-83.
8. Vanyan L.L. The electrical conductivity of the Moon. *Geophysical Surveys*, 1980, No. 4, p. 173-185.
9. Mittelholz A., Grayver A., Khan A., Kuvshinov A. The global conductivity structure of the Lunar upper and midmantle. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(11).
10. Semenov A., Kuvshinov A. Global 3-D imaging of mantle electrical conductivity based on inversion of observatory C-responses – II. Data analysis and results. *Geophysical Journal International*, 2012, 191, p. 965-992.
11. Grimm R.E., Delory G.T., Espley J.R., Stillman D.E. A magnetotelluric sounder to probe terrestrial planet and satellite interiors. 51st Lunar and Planetary Science Conference, 2020, No. 1568.
12. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М: Недра, 1965, 109 с.
13. Каменецкий Ф.М., Линкин В.М., Новиков П.В., Озорович Ю.Р. Возможности индукционного зондирования криолитозоны Марса. М: ИКИ АН СССР, 1988, 15 с.
14. Ozorovich Y.R., Linkin V.M., Smythe W.D. Mars electromagnetic sounding – MARSSES. *Proceedings of LPI Conference*, Houston, 1999.
15. Barsukov P.O., Fainberg E.B., Khabensky E.O. Shallow investigations by TEM-FAST technique: methodology and examples. In “Electromagnetic sounding of the Earth’s interior: theory, modeling, practice” (Edited by V.V. Spichak), Elsevier, 2015, p. 47-78.
16. Grimm R.E., Berdanier B., Warden R., Harrer J., Demara R., Pfeiffer J., Blohm R. A time-domain electromagnetic sounder for detection and characterization of groundwater on Mars. *Planetary and Space Science*, 2009, 57, p. 1268-1281.
17. Saraev A., Simakov A., Shlykov A., Tezkan B. Controlled-source radiomagnetotellurics: a tool for near surface investigations in remote regions. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 146, p. 228-237.
18. Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Опыт частотных электромагнитных зондирований на Русской плите. *Известия ВУЗов (Геология и разведка)*, 1999, № 3, с. 106-114.
19. Хмелевской В.К., Петрухин Б.П., Пушкарев П.Ю. Магнитотеллурика и радиоволновые интерференционные зондирования. *Физика Земли*, 2010, № 9, с. 11-14.
20. Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике. М: Недра, 1971, 224 с.
21. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М: Изд-во МГУ, 2004, 153 с.
22. Biancheri-Astier M., Ciarletti V., Reineix A., Corbel C. Modeling the Configuration of HF Electrical Antennas for Deep Bistatic Subsurface Sounding. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3), p. 1082-1091.

23. *Chao Li, Yikang Zheng, Xin Wang, Jinhai Zhang, Yibo Wang, Ling Chen, Lei Zhang, Pan Zhao, Yike Liu, Wenmin Lv, Yang Liu, Xu Zhao, Jinlai Hao, Weijia Sun, Xiaofeng Liu, Bojun Jia, Juan Li, Haiqiang Lan, Wenzhe Fa, Yongxin Pan, Fuyuan Wu.* Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar. *Nature*, 2022, Vol. 610, p. 308-312.
24. *Sood R., Melosh J., Howell K.* Lunar Advanced Radar Orbiter for Subsurface Sounding (LAROSS): Lava Tube Exploration mission. 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference, 2016.
25. *Nerozzi S., Holt J.W.* Buried Ice and Sand Caps at the North Pole of Mars: Revealing a Record of Climate Change in the Cavi Unit With SHARAD. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46, p. 7278–7286.

POSSIBILITIES OF SPACE ELECTROMAGNETIC EXPLORATION

Shustov N.L., Pushkarev P.Yu., Gudkova T.V., Panferov S.V.

Rocks on Mars and the Moon have higher electrical resistivities than on Earth, where low resistivities are due to water saturation. Under these conditions, geophysical methods using alternating electromagnetic fields are the most effective, in particular, for subsurface waters exploration on cosmic bodies. These are the methods of deep magnetovariation sounding (DMVS), magnetotelluric sounding (MTS), time-domain sounding (TS), frequency sounding (FS), radio-frequency surveying and ground penetrating radar. The paper discusses their fundamentals, features and possibilities of application on Mars and the Moon.

KEYWORDS: SPACE ELECTROMAGNETIC EXPLORATION, ELECTROMAGNETIC GEOPHYSICAL METHODS, SUBSURFACE WATER EXPLORATION, MARS, MOON