



УДК 550.837.6

**МНОГОЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА ПЛАНЕТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

Н.Л. Шустов¹, И.Н.Модин¹, М.Н.Марченко¹, А.Ю.Паленов,¹
П.Ю. Пушкарев¹, Т.В. Гудкова², С.В. Панферов²

¹Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Факультет космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В статье обсуждаются возможности использования мультислотного зондирования геологической среды с борта беспилотного носителя. В качестве источника электромагнитного поля применяется незаземленная петля, создающая вертикальную компоненту магнитного поля. Малый вес регистрирующей системы «АЭРОН» делает возможным применение комплекса для исследований на Марсе и на Луне. Высокие электрические сопротивления горных пород на Марсе и Луне обуславливают увеличение глубинности исследований на планетах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, МАРС, ЛУНА

EDN: HJRDUY

1. ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие беспилотных систем обуславливает активное их внедрение в различные области деятельности, в том числе в геофизические исследования. Магниторазведочные исследования уже достаточно распространены в применении с беспилотными системами. Сейморазведочные работы ограничены для беспилотных систем в связи с принципиальными требованиями к датчикам. В этой связи очень перспективной видится электроразведка с ее большим количеством методов для получения электрических параметров разреза с применением искусственного или естественного электромагнитного поля.

Одним из важнейших требований предъявляемых беспилотными воздушными судами к геофизической аппаратуре является минимизация массы используемой аппаратуры и датчиков. Небольшая масса аппаратуры является и одним из требований, предъявляемых к аппаратуре для съемки на поверхности планет Солнечной системы. Кроме того, высокие электрические сопротивления горных пород на Марсе и на Луне способствуют перспективе развития на планетах индукционных методов, обладающих большей глубинностью при высоких электрических сопротивлениях разреза и не требующих гальванического заземления приемных и генераторных систем. Таким образом, развитие электроразведочных методов с использованием беспилотных воздушных судов на Земле позволяет задумываться об использовании таких систем на Марсе и на Луне.

Электронная почта авторов для переписки:

Шустов Николай Львович, e-mail: nickshus@gmail.com<https://elibrary.ru/hjrduy>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С НЕЗАЗЕМЛЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПЛАНЕТ

Среди электроразведочных методов на данный момент в беспилотном варианте достаточно активно используются методы георадиолокации (волновые принципы), метод зондирования становлением поля (квазистационарное приближение, переходные процессы), методы радиоманнитотеллурики (в высокочастотном варианте). Еще одной группой методов, позволяющих изучать разрез с использованием компактных и легких датчиков, является группа гармонических методов, где в качестве источника используется многочастотный сигнал (свип-сигнал) от искусственного источника [Ваньян, 1965].

Перспективной системой наблюдения, как на Земле так и на Луне и Марсе, представляется использование искусственного источника гармонических колебаний установленного на поверхности среды и расположенной на беспилотном устройстве (в том числе на беспилотном летательном аппарате) системе датчиков высокочастотного электромагнитного поля (многовитковые рамки). При этом сигнал в источнике представляет собой свип-сигнал в диапазоне частот от 1 до 25 КГц. Такая система наблюдений хорошо защищена от помех за счет фильтрации несущей частоты, а разные частоты и разные расстояния от источника до приемника (дистанционно-частотные зондирования) позволяют получать информацию с разных глубин.

Важной особенностью такого подхода является ограничение по глубинности исследований за счет затухания высокочастотного сигнала в электрически проводящей среде, однако в условиях высокоомных разрезов актуальных для Марса и Луны, где сопротивление горных пород достигает первых тысяч Ом·м, глубинность существенно возрастает.

Для получения электрических характеристик среды (электрического сопротивления) и для оценки глубинности исследований, необходимо учитывать частоту сигнала, электрическую проводимость разреза и расстояние от источника до приемника. Несколько условно, исходя из вышеперечисленных параметров, можно говорить о наличии трех зон в зависимости от соотношения kr , где k – волновое число $k = \sqrt{-i\omega\sigma\mu_0}$, (ω – круговая частота, σ – электрическая проводимость, μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме), а r – расстояние от источника до приемника. При $kr \ll 1$ говорят о так называемой ближней зоне, в которой вертикальная компонента магнитного поля преобладает над горизонтальной. В средней зоне ($kr = 1$), где соизмеримы горизонтальные и вертикальные магнитные компоненты, по их соотношению можно получить электрическое сопротивление среды. В дальней зоне ($kr \gg 1$) вертикальная компонента практически отсутствует, работает так называемый скин-эффект (зависимость глубины проникновения электромагнитного поля от частоты), однако сигнал с увеличением расстояния сильно затухает. В условиях ближней и средней зоны глубина проникновения электромагнитного поля зависит от геометрии установки. Тем не менее, за счет увеличения сопротивления разреза размер средней зоны увеличивается и, таким образом, увеличивается глубина проникновения поля [Хмелевской, 1984].

Наиболее просто электрическое сопротивление разреза можно получить, если измерять еще и электрическую компоненту. Однако, для этого необходим гальванический контакт со средой, что сложно технологически, а в условиях высоких сопротивлений поверхности делает это практически невозможным. Поэтому необходимо использовать методы, где можно перейти к электрическим характеристикам разреза без использования гальванического контакта со средой. Это возможно учитывая расстояние от источника до приемника и диапазон частот.

Среди преимуществ гармонических методов также необходимо отметить более простые и менее энергоемкие способы регистрации сигналов (при работе на переходных процессах требуется слишком большая частота дискретизации) и большую помехозащищенность. При использовании незаземленной горизонтальной петли в качестве источника (создаются вертикальная магнитная компонента) технология расстановки достаточно простая и легко автоматизируется [Шустов и др., 2023; Алексанова и др., 2018].

3. ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА АЭРОН С ЗАЗЕМЛЕННЫМ И НЕЗАЗЕМЛЕННЫМ ИСТОЧНИКАМИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве прототипа беспилотной системы наблюдения при гармонических методах электроразведки предлагается использовать измеритель «АЭРОН». Разработка измерительной системы «АЭРОН» продолжается на кафедре Геофизики Геологического факультета МГУ с 2022 г. В состав разработчиков входят сотрудники кафедры: И.Н. Модин, М.Н. Марченко, А.Ю. Паленов, Н.Л. Шустов и И.С. Волков. Испытания прототипа аппаратно-программного комплекса проводятся на учебно-научном полигоне кафедры Геофизики «Александровка» (Юхновский р-н, Калужской обл.). В качестве носителя используются как электрические беспилотные воздушные суда (БВС), например, G1000, разработки КБ Горбунова, г. Санкт-Петербург, так и БВС гибридного типа.

Измерительная платформа «АЭРОН» состоит из трех ортогональных рамочных датчиков, каждый из которых состоит из пары параллельных многовитковых рамок см. рисунок 1. Фактически это система из трех индукционных датчиков для измерения напряженности переменного магнитного поля. Аппаратурный отсек (усилители, АЦП) расположен в верхней части платформы для уменьшения помех. Важным преимуществом такой системы датчиков является небольшой вес (около 1 кг).

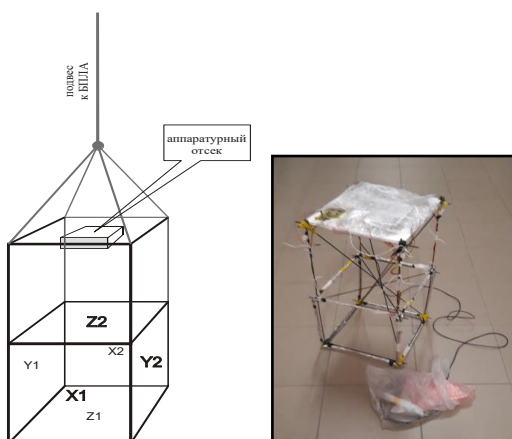


Рис. 1. Измерительная платформа системы «АЭРОН»

Принципиальная схема измерительной платформы приведена на рисунке 2. Помимо сигналов с трех датчиков поля, на АЦП поступает также сигнал с секундными метками системы спутниковой навигации для синхронизации времени измерений. Для учета помех, связанных с изменением пространственного положения датчиков, используются инклинометры. Запись данных в файлы и управление аппаратурой обеспечивается малогабаритным компьютером.

После проведения полевых опытно-методических работ с аппаратурой «АЭРОН» в январе-феврале 2024 г., и доработки системы обработки данных в апреле 2024 г., в октябре 2024 г. и в январе 2025 г. были проведены дополнительные испытания комплекса в условиях использования разных систем наблюдения. Все получаемые результаты сопоставляются с эталонными данными о строении геологического разреза,

полученными ранее на этом участке комплексом наземных геофизических методов, опирающиеся, в свою очередь, на результаты бурения.

Разработка методики измерений проходит в три этапа. На первом этапе в качестве источника электромагнитного поля использовалась заземленная питающая линия (в электроразведке называется линия АВ). Такой источник позволяет проводить испытания комплекса на основе достаточно простой модели электромагнитного поля бесконечно длинного кабеля. Однако, заземленная питающая линия скорее всего будет неприемлема в условиях Марса и Луны из-за высокого сопротивления верхней части геологического разреза и технологически сложно реализуемой системой заземлений.

На рисунке 3 показана карта изолиний соотношения горизонтальной и вертикальной компонент напряженности поля при использовании в качестве источника горизонтальной заземленной электрической линии. В качестве носителя платформы с датчиками использовалось беспилотное воздушное судно на высоте 20 м. Распределение низких и высоких значений соотношения хорошо коррелирует с распределением электрического сопротивления на глубине первых метров.

Проблема заключается в том, что заземленная питающая линия, хоть и является достаточно мощным источником электромагнитного поля, обладает существенными недостатками: она очень сложна технологически при установке, требует низких электрических сопротивлений заземления и обладает большим энергопотреблением. Такие условия практически неосуществимы на Луне и на Марсе, поэтому на следующих этапах, опытно-методические работы проводились с использованием горизонтальной незаземленной петли в качестве источника. Такой источник обеспечивает генерацию вертикальной магнитной компоненты электромагнитного поля и, в силу своего малого электрического сопротивления, существенно меньше потребляет энергии, чем заземленная электрическая линия.

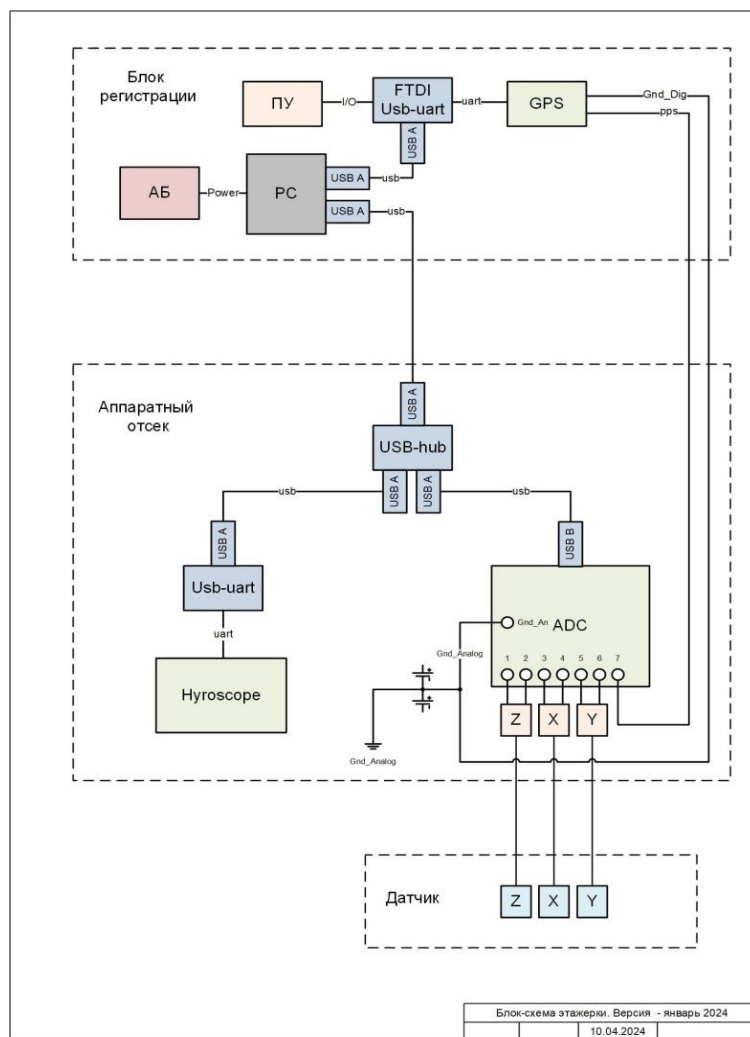


Рис. 2. Принципиальная схема измерителя «АЭРОН». АБ – аккумуляторная батарея, PC – малогабаритный одноплатный персональный компьютер, ADC – аналого-цифровой преобразователь, Hyroscope – инклинометры

В горизонтальную незаземленную петлю подается свип-сигнал в диапазоне частот от 1 КГц до 20 КГц. Для этого в 2024 г. был разработан специальный генератор. На втором этапе (осень 2024г.) была использована петля размером 500 на 500 метров. Измерения обеспечивались в условиях ближней зоны (внутри петли и вне петли). Так как электромагнитное поле, создаваемое петлей в такой конфигурации, относительно легко можно рассчитать, то обработка велась методом вычитания первичного поля петли из измеренного поля. Таким образом, получали аномальные значения поля, зависящие от распределения электропроводности в разрезе см. рисунок 4.

Несмотря на достаточно хорошее совпадение полученных результатов с результатами наземных наблюдений, большие размеры питающей петли делают ее технологически неудобной при раскладке. В январе 2025г. были проведены эксперименты с использованием относительно небольшой (размер 50 на 50 м) петли. При этом измерения возможны на разных расстояниях от питающей петли. В зависимости от расстояния между центром петли и точкой измерения, будет меняться и идеология обработки данных (соответственно в ближней, средней и дальней зоне). Так, в средней зоне, возможно получение электрического сопротивления геологического разреза из соотношения вертикальной и горизонтальных компонент переменного магнитного поля. В дальней зоне получить геоэлектрический разрез можно по горизонтальной компоненте, но в этом случае, необходим контроль за соотношением сигнал-шум. Распределение интенсивности переменного магнитного поля на разных расстояниях от генераторной петли показано на рисунке 5.

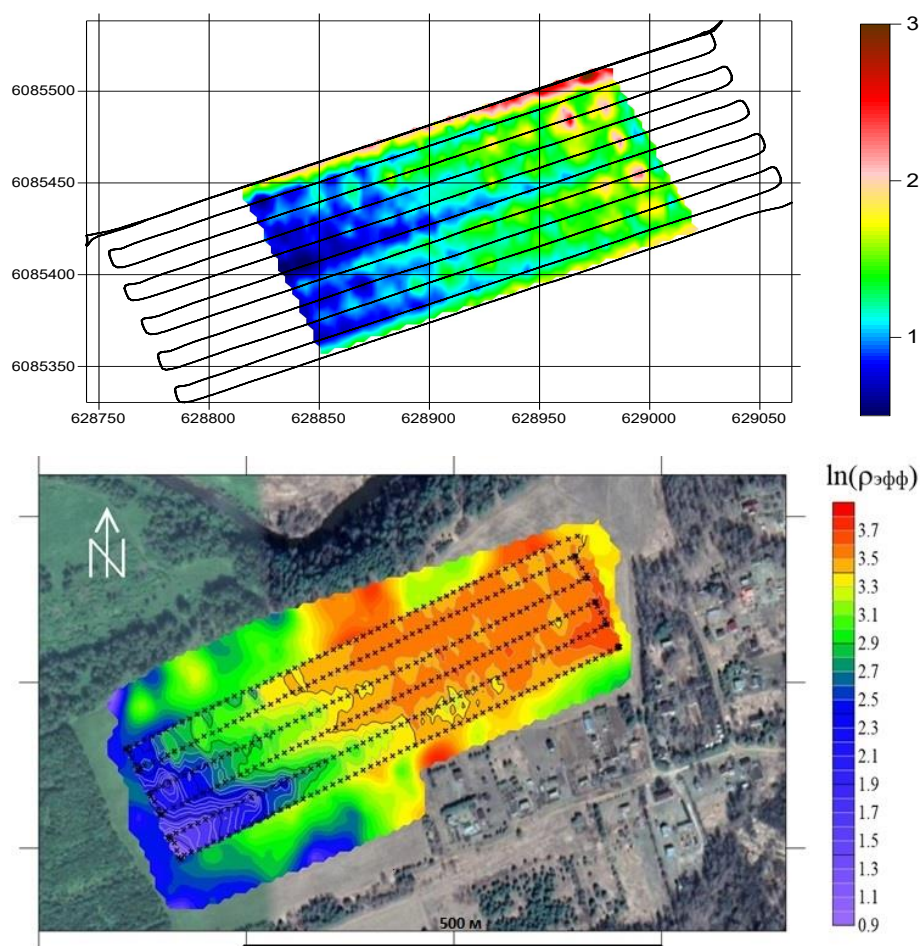


Рис. 3. Карта изолиний соотношения H_r/H_z (вверху, шкала в условных единицах) и карта распределения электрического сопротивления по априорным данным (внизу)

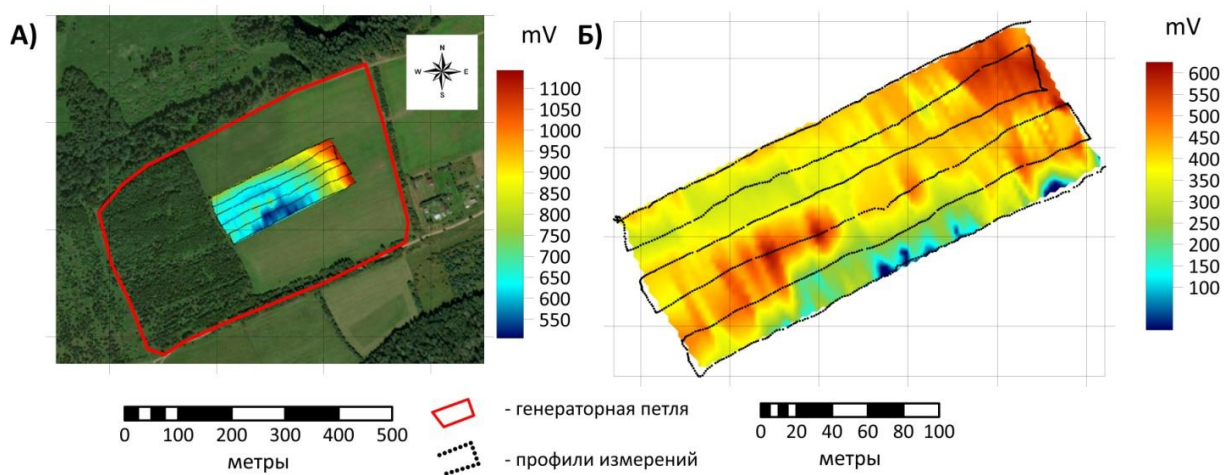


Рис. 4. Карта фактического материала (А) с нанесенными исходными значениями поля и карта аномальных зон (Б) после вычитания первичного поля из исходных значений

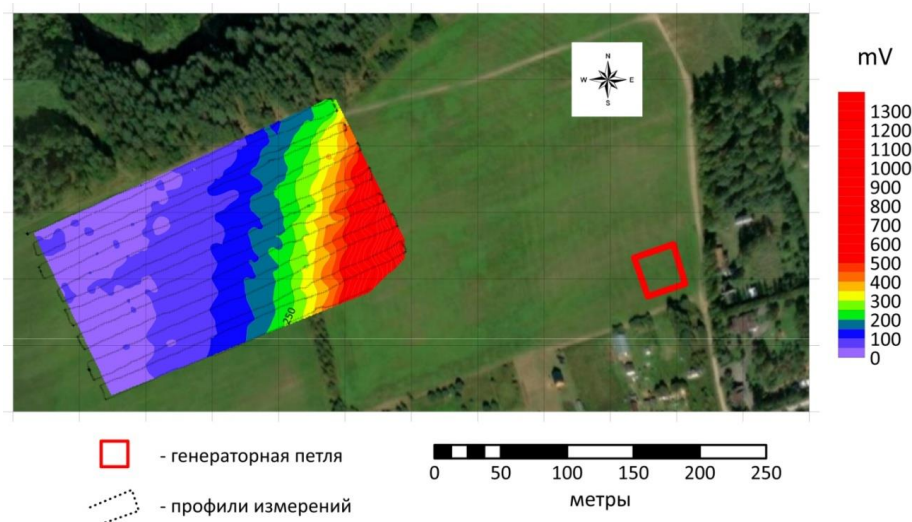


Рис. 5. Карта значений с датчика вертикальной магнитной компоненты при удаленном в среднюю зону размещении питающей петли

Дальнейшая обработка полученного результата заключается в обработке калибровочных данных с целью пересчета значений с датчика в единицы измерений магнитного поля. Затем будет произведен расчет значений электрического сопротивления. Для решения этих задач в настоящее время разрабатывается специализированный программный комплекс и проводится моделирование для различных геологических объектов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потенциальная перспективность данного комплекса, как одного из возможных геофизических методов для работы на поверхности Марса обуславливается успешными экспериментами с БВС «Ingenuity» (экспедиция «Марс-2020»). Электроразведка с борта БВС позволяет существенно увеличить исследуемые площади и значительно ускорить сроки проведения работ. С учетом в целом высоких электрических сопротивлений горных пород в верхней части разреза на Марсе, глубина исследования такими индукционными методами будет достигать первых сотен метров (в отличие от первых десятков метров на Земле). Наибольшей чувствительностью данная методика обладает к объектам с пониженными электрическими сопротивлениями. К таким объектам относятся электропроводящие элементы и, конечно, увлажненные породы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

ЛИТЕРАТУРА

- Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. —М: Недра, 1965, 109 с.
- Хмелевской В.К. Электроразведка. —М: Изд-во МГУ, 1984, 422 с.
- Шустов Н.Л., Пушкарев П.Ю., Гудкова Т.В., Панферов С.В. Возможности космической электроразведки // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 41, 16-26, 2023
- Алексанова Е.Д., Бобачев А.А., Епишкин Д.В., Зорин Н.И., Куликов В.А., Модин И.Н., Пушкарев П.Ю., Шевнин В.А., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г. Электроразведка. Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Том 1. Под ред. И.Н. Модина и А.Г. Яковлева – Тверь: ПолиПРЕСС, 2018. – 274 с.

MULTI-FREQUENCY MEASUREMENTS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD FOR STUDYING OF THE GEOLOGICAL SECTION ON THE SOLAR SYSTEM PLANETS

Shustov N.L., Modin I.N., Marchenko M.N., Palenov A.Yu., Pushkarev P.Yu., Gudkova T.V., Panferov S.V.

The paper discusses the possibilities of using multi-frequency sounding of the geological environment from onboard unmanned carrier. A horizontal loop is used as the source of the electromagnetic field to create a vertical magnetic component. The low weight of the developed “AERON” receiving system makes it possible to use it also on the Mars and Moon. The high rock electrical resistances on Mars and Moon will allow for sufficiently deep exploration.

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