

УДК 523

## ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕРМО-ЛР НА ПОСАДОЧНОМ АППАРАТЕ ЛУНА-27: ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛУННОГО ГРУНТА

© 2021 г. Е. Н. Слюта<sup>а, \*</sup>, М. Я. Маров<sup>а</sup>, А. Г. Дунченко<sup>а</sup>, В. Ю. Маковчук<sup>а</sup>, О. В. Морозов<sup>а</sup>,  
А. И. Назаров<sup>а</sup>, В. В. Иванов<sup>а</sup>, В. И. Погонин<sup>а</sup>, Е. Г. Роскина<sup>а</sup>, В. В. Сафронов<sup>а</sup>,  
Б. Н. Харлов<sup>а</sup>, Л. П. Тацкий<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

\*e-mail: slyuta@geokhi.ru

Поступила в редакцию 31.03.2021 г.

После доработки 22.06.2021 г.

Принята к публикации 23.06.2021 г.

Прибор разрабатывается для эксперимента ТЕРМО-ЛР на лунном посадочном космическом аппарате Луна-27 и предназначен для контактных геофизических измерений различных свойств лунного грунта на поверхности и на глубину до 3 м. Рассматриваются научные задачи эксперимента по исследованию физико-механических (плотность, механические и деформационные характеристики), теплофизических (теплопроводность, теплоемкость) и электромагнитных (диэлектрическая проницаемость, магнитная восприимчивость) свойств лунного грунта и внутреннего теплового потока Луны. Приводятся описание конструкции и технические характеристики, функциональная схема и режимы работы прибора, который состоит из трех основных блоков – блока глубинных исследований с глубинным каротажным зондом, блока поверхностных исследований и блока электроники. В состав каротажного зонда входят самоуглубляющийся молоток пенетратор, датчик диэлектрической проницаемости, датчик магнитной восприимчивости и лента с термодатчиками для измерения распределения температуры в грунте и внутреннего теплового потока. В состав блока поверхностных исследований входят термодатчики для измерений в пассивном и активном режимах теплофизических свойств лунного грунта на поверхности. Рассматриваются испытания и калибровка термодатчиков блока поверхностных исследований, которые подтвердили высокие эксплуатационные характеристики датчика и надежность интерпретации измерений.

**Ключевые слова:** Луна, лунный грунт, реголит, ТЕРМО-ЛР, Луна-27, каротажный зонд, физико-механические свойства, теплофизические свойства, электромагнитные свойства, внутренний тепловой поток

DOI: 10.31857/S0320930X21050054

### ВВЕДЕНИЕ

Первые данные о свойствах лунного грунта были получены по результатам дистанционных исследований с Земли ее оптического, теплового и радиоизлучений. На основе этих исследований было сделано предположение, что “вещество во всем двадцатиметровом слое находится в одинаковом сильно пористом состоянии и, по-видимому, не может быть пылью” (Кротиков, Троицкий, 1963). Существовало также и достаточно распространенное мнение (гипотеза Голда), что из-за малой силы тяжести поверхность Луны может быть покрыта многометровой пушистой рыхлой пылью. Знание физико-механических свойств лунного грунта было критически важным для инженерных расчетов лунных посадочных аппаратов. Сергей Павлович Королев разрешил эту не-

определенность, написав карандашом соответствующую справку от 28 октября 1964 г., которая гласила: “Посадку ЛК следует рассчитывать на достаточно твердый грунт типа пемзы. Вертикальная скорость  $\approx 0$  м/с при спуске на  $h = 1$  м..., дата, подпись”. Таким образом, первые контактные исследования физических свойств лунного грунта непосредственно на лунной поверхности начались в 1966 г. 3 февраля с момента первой мягкой посадки КА Луна-9 в экваториальной области Луны в Океане Бурь (Первые панорамы лунной поверхности, 1966).

Первые инструментальные контактные измерения физических и теплофизических свойств лунного грунта были сделаны в месте посадки КА Луна-13 в декабре 1966 г. На борту КА для изучения свойств грунта были установлены: грунто-

мер-пенетромтр для оценки механической прочности верхнего слоя; радиационный плотномер для определения плотности верхнего слоя глубиной до 15 см; радиометр для измерения теплового потока, излучаемого поверхностью грунта; динамограф для регистрации длительности и величины импульса динамической перегрузки, которая возникла при посадке станции на поверхность Луны и зависела от жесткости грунта; и телевизионная система для получения панорамных изображений поверхности (Первые панорамы лунной поверхности, 1969).

На борту первого американского КА Surveyor I, совершившего мягкую посадку в Океане Бурь 2 июня 1966 г., были установлены датчики напряжения опор при посадке, которые дали информацию о механических свойствах лунного грунта (Surveyor I mission report, 1966). В дополнение с телевизионной камеры были получены снимки глубины погружения опоры в лунный грунт и проведены эксперименты с воздействием на грунт реактивной струи двигателя (Surveyor I mission report, 1966). Механические и общезфизические свойства лунного грунта, его статическая и динамическая несущая способность, сыпучесть и относительное содержание частиц по фракциям в грунте изучались с помощью выносного механизма в виде гармошки-стрелы с миниатюрным экскаваторным ковшом-захватом объемом 15 см<sup>3</sup> и общим весом 8.2 кг, который был установлен на борту КА Surveyor III (апрель 1967 г., побережье Моря Познания) и Surveyor VII (январь 1968 г.) (Scott, 1967; Surveyor III mission report, 1967; Surveyor VII mission report, 1968). С помощью  $\alpha$ -анализатора, установленного на борту КА Surveyor V, -VI и -VII изучался химический состав лунного грунта в местах посадок в Море Спокойствия, в районе Центрального Залива и в материковом районе в окрестностях кратера Тихо, соответственно (Surveyor V mission report, 1967; Surveyor VI mission report, 1968; Turkevich и др., 1968). Для изучения магнитных свойств грунта и количества железа в грунте на посадочной опоре в поле зрения телевизионной камеры, а на КА Surveyor VII и на ковше с выносным устройством, устанавливались магнитная и немагнитная пластины. На КА Surveyor V неоднократно запускались не на полную тягу двигатели ЖРД для изучения воздействия на грунт реактивной струи и образования воронок и облаков пыли, которые могли затруднить посадку и взлет будущих экспедиций по программе Apollo. Следы воздействия на грунт фиксировались на телевизионную камеру (Surveyor V mission report, 1967). Аналогичный эксперимент был проведен в месте посадки КА Surveyor VI в ноябре 1967 г. Станция поднялась на высоту 3 м и опустилась через 8.5 с на расстоянии 2.4 м от первоначального места посадки. Глубина следов посадочных опор в месте первоначальной по-

садки и глубина образованных реактивной струей кратеров не превышала нескольких см (Surveyor VI mission report, 1968). Выброшенные реактивной струей частицы лунного реголита были обнаружены на магнитной пластине, тогда как немагнитная пластина осталась чистой. По характеру отражения сигнала радиолокационных альтиметров посадочных КА Surveyor изучались электромагнитные свойства лунного грунта (Lunar surface electromagnetic properties, 1968).

Инструментальные исследования физико-механических свойств на глубину до 76 см в местах посадок пилотируемых экспедиций Apollo проводились с помощью ручного самозаписывающего пенетратора с максимальным усилием от 111 (Apollo-15) до 215 Н (Apollo-16), а также по данным бурения и отбора проб ручной колонковой трубкой (Mitchell и др., 1971; 1972a; 1972b; 1973). В качестве наконечников для пенетраторов использовались два сменных конуса с углом 30° и пластина. Данные записывались самописцем на золотой цилиндр, который возвращался на Землю. Была выявлена хорошо выраженная корреляция сопротивляемости грунта со слоистостью реголита с учетом данных буровой установки и ручных колонковых трубок, что позволило построить стратиграфические профили и разрезы в районе посадок.

Первые эксперименты по измерению в буровых скважинах распределения температуры, теплофизических свойств грунта, суточного хода температур и внутреннего теплового потока были проведены в районе борозды Хэдди в Море Дождей и в долине Литтроу (Littrow) в Море Ясности в местах посадок Apollo-15 и -17, соответственно. Два температурных зонда в виде тонкого стержня для исследования внутреннего теплового потока и теплофизических свойств лунного грунта размещались в двух скважинах, специально пробуренных для эксперимента (Langseth и др., 1972; 1973). Каждый зонд состоял из двух почти идентичных тонких секций длиной по 50 см. В каждой секции размещалось по два дифференциальных термометра, которые измеряли разность температур с точностью  $\pm 0.001$  К между точками на расстояниях 47 и 28 см от поверхности. Первые измерения показали, что Луна внутри является более горячей, чем это ожидалось. Позднее в результате уже более длительного исследования изменения температуры в скважине величина теплового потока была скорректирована примерно в полтора раза в меньшую сторону (Langseth и др., 1976).

Первая электроразведка на лунной поверхности с целью изучения диэлектрической проницаемости и в целом геоэлектромагнитной структуры лунного грунта была выполнена экипажем КА Apollo-17 в декабре 1972 г. (Simmons и др., 1973). Комплект аппаратуры состоял из маломощного передатчика, двух скрещенных дипольных антенн

длиной 70 м в развернутом состоянии и приемника с трехкомпонентной ортогональной ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) антенной и с магнитофоном для записи данных на магнитную ленту, которая после эксперимента изымалась и возвращалась на Землю для обработки данных. Приемник устанавливался на лунный ровер. Эксперимент показал, что верхний слой мощностью около 7 м состоит из материала с диэлектрической постоянной  $\sim 3.8$  и соответствует рыхлому слою реголита с плотностью около  $2 \text{ г см}^{-3}$  (Стренгвей и др., 1975). Ниже этого слоя диэлектрическая постоянная скачком изменяется до 7.5 и соответствует более плотным лунным породам. Признаков жидкой воды в верхнем слое мощностью до 2 км обнаружено не было. Рассеяние электромагнитных волн в диапазоне частот от 1 до 32 МГц оказалось несущественным. Параллельно электромагнитные свойства грунта изучались с помощью трехчастотного радиоимпульсного радиолокатора с частотной модуляцией, установленного на орбитальном модуле КА Apollo-17 в отсеке с научными приборами (Phillips и др., 1973). Исследования проводились на трех частотах — 5, 15 и 150 МГц. Радар использовался в трех основных режимах: зондирования, профилирования и изображения. В режиме зондирования измерялось изменение диэлектрической постоянной в слое реголита. Глубина проникновения электромагнитного импульса и, соответственно, толщина исследуемого слоя реголита зависела от частоты сигнала — чем меньше частота, тем глубже проникал сигнал. Режим профилирования и изображения соответствовал обычной радиолокации поверхности и обеспечивал получение метрических и топографических данных, включая альбедные характеристики.

Для исследования остаточного лунного магнитного поля и его взаимодействия с межпланетным магнитным полем и магнитосферой Земли, а также для измерения магнитной проницаемости, электрической проводимости и температуры лунных пород в районе посадок пилотируемых экспедиций Apollo-12, -15 и -16 устанавливались стационарные трехкомпонентные магнитометры, измерения которых синхронизировались с магнитометрами на окололунных малых спутниках, запущенных с КА Apollo-15 и -16, и на орбитальном КА Explorer-35 (Dyal и др., 1970; 1972a; 1972b; Coleman и др., 1972a; 1972b). Магнитометры измеряли сумму трех типов магнитных полей — внешнее солнечное магнитное поле, магнитное поле в лунных недрах, индуцированное вариациями солнечного магнитного поля, и магнитное поле, вызванное взаимодействием солнечного ветра с остаточным магнитным полем лунных пород. Долговременные наблюдения по сети магнитометров на лунной поверхности и на орбите позволили провести инструментальное измерение внутренней электрической проводимости, тем-

пературы и магнитной проницаемости пород лунной коры и мантии, и остаточных магнитных полей на поверхности. На основе зависимости электропроводности от температуры было установлено, что в недрах Луны на глубине около 90 км температура резко возрастает с 850 до 1050 К, далее до глубины около 1000 км постепенно увеличивается до 1200–1500 К, а на глубине более 1000 км превышает 1500 К (Dyal и др., 1972b). В геологических маршрутах использовался портативный магнитометр для измерения суммарной векторной компоненты постоянного остаточного магнитного поля и окружающего переменного поля на лунной поверхности в точках наблюдений (Dyal и др., 1971; 1972c). Впоследствии данные по переменному магнитному полю в районе посадки, полученные при синхронном измерении с помощью стационарного магнитометра, вычитались из показаний портативного магнитометра для оценки остаточной намагниченности лунных пород в точке наблюдений.

Физико-механические свойства лунного грунта также исследовались вдоль трассы движения советских луноходов Луноход-1, и -2 на лунной поверхности в 1971 и 1973 гг. (Черкасов, Шварев, 1975). Комплект оборудования для оценки проходимости лунохода и изучения физико-механических свойств лунного грунта включал: датчик тока тяговых электродвигателей мотор-колесо самоходного шасси; датчик крена и дифферента лунохода; датчик оборотов ведущих колес; датчик фактически пройденного пути (девятое колесо) и прибор для внедрения и поворота в грунте конусно-лопастного штампа (Леонович и др., 1971; 1978). Усилие внедрения штампа достигало 20 кГ, глубина внедрения — 50–100 мм, угол поворота штампа — до  $90^\circ$ , вращающий момент на штампе — до 0.5 кГм. Научный комплекс аппаратуры на Луноходе-2 был дополнен трехкомпонентным феррозондовым магнитометром с автоматическим расширителем диапазона с чувствительностью в диапазоне  $\pm 580\gamma$ , который позволил оценить среднее значение магнитного поля в заливе Лемонье в Море Ясности, равное 20–30 $\gamma$ , и обнаружить аномалии магнитного поля, приуроченные к ударным кратерам размером более 50 м (Долгинов и др., 1975). Глубинное электромагнитное зондирование на основе измерений индуцированного магнитного поля в результате скачков межпланетного магнитного поля позволило выделить слой с повышенной проводимостью в интервале глубин 200–400 км и оценить среднее значение температурного градиента в районе исследований около  $1.5 \text{ град км}^{-1}$ .

После 40-летнего перерыва изучение геоэлектромангнитной структуры лунного грунта на лунной поверхности в декабре 2013 г. возобновил китайский луноход Yutu, доставленный на поверхность Луны КА Chang'E-3. На луноходе впервые

был установлен широкополосный двухканальный георадар для электромагнитного зондирования лунного грунта (Fang и др., 2014). Один канал с частотой 60 МГц для зондирования грунта на глубину до 100 м с разрешением в несколько метров. Второй канал с частотой 500 МГц и временным окном 640 нс для зондирования грунта на глубину до 30 м с разрешением около 0.3 м. По данным георадара, на основе изменения диэлектрической постоянной по глубине, в структуре реголита в районе посадки в северо-западной части Моря Дождей было выделено три основных слоя: верхний рыхлый слой толщиной 0.95 м, средний слой толщиной 2.3 м, представленный слоем выбросов из рядом расположенного ударного кратера диаметром 450 м, и третий слой толщиной около 4 м, насыщенный крупными обломками подстилающих пород, представленных базальтами (Lai и др., 2016; Feng и др., 2017).

Прибор ТЕРМО-ЛР разрабатывается для контактных геофизических измерений (физико-механических, теплофизических и электромагнитных свойств) лунного грунта на поверхности и на глубину до 3 м в Южной полярной области в районе посадки космического аппарата Луна-27. В его основе лежит опыт создания ГЕОХИ РАН совместно с ИПМ им. М.В. Келдыша РАН прибора "Термофоб" для прямых исследований теплофизических свойств поверхности спутника Марса Фобоса с борта посадочного модуля КА Фобос-Грунт. В работах (Маров и др., 2010; Мануйлов, 2011) приведены детальное описание конструкции прибора и методика интерпретации результатов измерений с учетом теоретического анализа, модельных оценок и данных лабораторных испытаний.

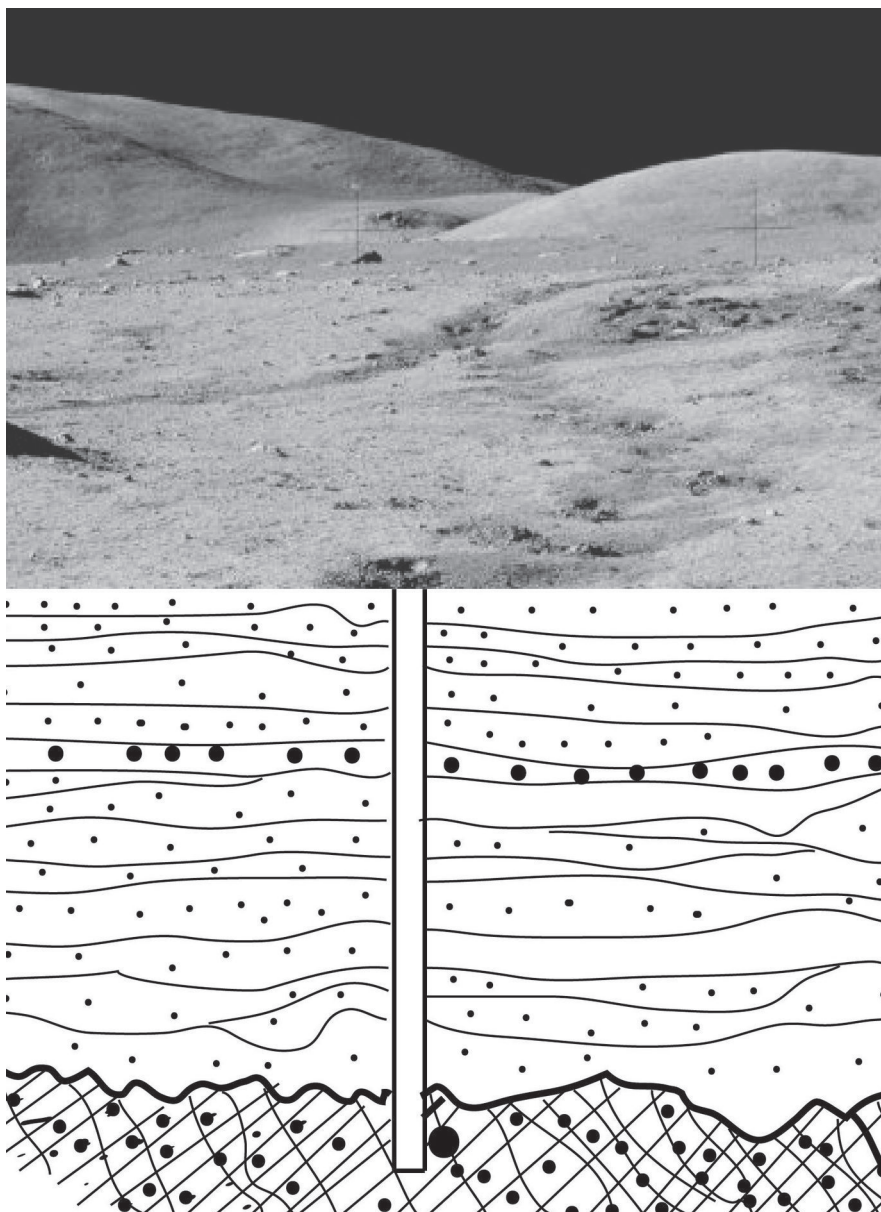
Полярные области Луны по составу лунных пород, степени освещенности и температурному режиму кардинально отличаются от экваториальных морских областей Луны, исследованных ранее (Алифанов и др., 2014). Материковые породы, распространенные в полярных областях, состоят из анортозитов, характеризующихся высоким содержанием Са, Al, Si и низким содержанием Mg, Ti. Среди основных породообразующих минералов доминирует в качестве диэлектрика основной плагиоклаз (анортит, битовнит), практически отсутствует рудный минерал ильменит, в незначительном количестве присутствуют железосодержащие парамагнетики пироксены и оливин. В полярных областях распространены наиболее древние лунные анортозиты Донектарского периода, реголит которых характеризуется высокой степенью зрелости и, соответственно, повышенным содержанием агглютинатов и мелкодисперсного железа в частицах и минералах реголита. Солнце в полярных районах светит по касательной, степень освещенности определяется рельефом, что обеспечивает существование мало освещенных территорий с экстремально низкими температурами на поверхности и, соответственно, в грунте. Наличие в лунном грунте замороженных летучих компонентов, как предполагается, преимущественно водяного льда, в зависимости от концентрации также может изменять физические и электромагнитные свойства грунта (Кошурников и др., 2019). Исследование физико-механических, теплофизических и электромагнитных свойств лунного грунта и внутреннего теплового потока в полярных областях и, прежде всего, на участках с содержанием замороженных летучих является главной научной задачей при-бора.

### ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ГРУНТА

Физико-механические свойства лунного грунта активно изучались непосредственно на поверхности Луны в пилотируемых и автоматических экспедициях и в экспериментальных лабораторных исследованиях лунного грунта, доставленного на Землю, и включают такие основные параметры, как плотность и пористость, гранулометрический состав, когезия и адгезия, угол внутреннего трения, прочность рыхлого грунта на сдвиг, деформационные характеристики (модуль деформации, коэффициент поперечной деформации), сжимаемость, несущая способность и др. (Слюта, 2014).

От района к району физико-механические свойства лунного грунта на поверхности могут изменяться в значительной степени, например, в межкратерной области и на рыхлых валах относительно свежих ударных кратеров диаметром в десятки и сотни метров. Такое различие обусловлено, главным образом, вариациями гранулометрического состава и плотности в зависимости от геоморфологического типа местности. Физические свойства лунного грунта также изменяются в глубину. Лунный реголит формировался с момента образования подстилающих пород и имеет сложное слоистое строение (рис. 1).

Слои представляют собой стратифицированную последовательность отложений выбросов из окрестных ударных кратеров, расположенных на расстояниях от первых метров до нескольких сотен километров в зависимости от размера этих кратеров. Каждый слой может отличаться валовым химическим и минеральным составом, возрастом экспозиции, степенью зрелости реголита, размерами частиц и, соответственно, физическими свойствами. В доставленной экспедицией Apollo-12 колонке реголита, длина которой составляла 41.3 см, содержится как минимум 10 различных слоев реголита, различающихся цветом, размерами частиц и составами (The Lunar sample preliminary examination team, 1970). При бурении скважины на глубину до 2.4 м на КА Apollo-15 бы-



**Рис. 1.** Схематический разрез строения рыхлого слоя лунного реголита с буровой скважиной в центре. Отдельные слои реголита показаны горизонтальной штриховкой, подстилающие породы показаны поперечной штриховкой (описание см. в тексте). Вверху фотопанорама с места посадки пилотируемой экспедиции Apollo-17 (NASA).

ла получена стратифицированная колонка лунного реголита весом 1.33 кг, в которой было выделено 58 индивидуальных слоев мощностью от 0.5 до 21 см (The Lunar sample preliminary examination team, 1972). Хорошо выраженное слоистое строение наблюдалось и в колонке, доставленной экспедицией Apollo-16 из материкового района (Hörz и др., 1972) и Apollo-17 из морского района (The lunar sample preliminary examination team, 1973). Сложную стратификацию, характеризующуюся разным гранулометрическим составом, возрастом экспозиции, степенью зрелости реголита и т.д., имеет и колонка реголита из Моря

Кризисов, доставленная автоматической станцией Луна-24 (Роде и др., 1980).

С неоднородным изменением физических свойств грунта с глубиной непосредственно столкнулись практически все экипажи экспедиций Apollo, когда с помощью ручной колонковой трубки, забиваемой молотком, пытались отобрать стратифицированную колонку реголита в различных точках наблюдений (The Lunar sample preliminary examination team, 1970; 1972; 1973). Не всегда удавалось отобрать пробу грунта на полную или почти полную длину двух состыкованных трубок по 35 см, т.е. на 70 см. Повышенная грубозерни-

**Таблица 1.** Удельная теплоемкость лунного грунта в зависимости от температуры (Hemingway и др., 1973)

Температура, $T$ , К	Удельная теплоемкость, $c$ , Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
100	275.7
150	433.9
250	672.4
300	758.1
350	848.9

стость некоторых слоев реголита значительно снижала адгезионные и когезионные свойства лунного грунта, и в таких случаях часть реголита во время вытаскивания трубок высыпалась назад. Изменение физико-механических свойств лунного грунта на глубину до 76 см в местах посадок Apollo-15, -16 и -17 также были исследованы с помощью самозаписывающего ручного пенетрометра с тремя сменными конусами-наконечниками. Была выявлена хорошо выраженная корреляция сопротивляемости грунта при пенетрации в глубину со стратиграфией и слоистостью отобранных колонок реголита, что позволило построить стратиграфические профили и разрезы, например, в районе посадки Apollo-16 (Mitchell и др., 1972b).

В результате исследований наиболее полно были изучены физико-механические свойства лунного грунта на поверхности (Слюта, 2014). Относительно хорошо известны физико-механические свойства и их изменение на глубину до 60 см. Очень немного данных о физико-механических свойствах на глубинах до 2 м, и почти ничего неизвестно о грунте на глубинах более 2 м. Отсутствуют данные о физико-механических свойствах лунного грунта с различным содержанием замороженных летучих в полярных областях, характеризующихся постоянной низкой температурой. Одной из задач прибора ТЕРМО-ЛР является изучение изменения плотности и физико-механических свойств лунного грунта по слоям реголита в зависимости от глубины.

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ГРУНТА

Теплопроводность и теплоемкость горных пород являются функцией многих переменных, таких как минеральный состав, структура, содержание рудных минералов, плотности и др. Теплоемкость лунного реголита может быть рассчитана на основе удельной теплоемкости каждого компонента (минерала) и его массовой концентрации по формуле (Авдеевский и др., 1974)

$$c = \sum c_i x_i, \tag{1}$$

где  $c_i$  – удельная теплоемкость  $i$ -го компонента,  $x_i$  – массовая концентрация этого компонента. Теплоемкость как кристаллических (интрузивных), так и стеклосодержащих (эффузивных) горных пород с повышением температуры растет (Winter, Saari, 1969). Эмпирическая зависимость удельной теплоемкости для горных пород и породообразующих минералов в диапазоне температур  $T$  примерно от 10 до 500 К может быть представлена следующим выражением в единицах Дж кг<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>

$$c(T) = -34T^{1/2} + 8T - 0.2T^{3/2}. \tag{2}$$

Экспериментальные данные по удельной теплоемкости лунных горных пород были получены для образцов лунного грунта, доставленных с мест посадок Apollo-11 и -12 (Robie и др., 1970; Robie, Hemingway, 1971), Apollo-14, -15 и -16 (Hemingway и др., 1973), Луна-16 (Авдеевский и др., 1974) и Луна-20 (Головкин и др., 1979). Зависимость удельной теплоемкости от температуры по данным для четырех образцов лунного реголита со средним квадратичным отклонением менее 10% в диапазоне температур от 90 до 350 К (табл. 1) может быть представлена следующим выражением в единицах Дж кг<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup> (Hemingway и др., 1973)

$$c = -23.173 + 2.1270T + 1.5009 \times 10^{-2}T^2 - 7.3699 \times 10^{-5}T^3 + 9.6552 \times 10^{-8}T^4. \tag{3}$$

Теплопроводность грунта увеличивается с ростом размера зерен минералов, содержанием проводящей компоненты (рудных минералов), плотности, но уменьшается с увеличением пористости и аморфной фазы (включая вулканическое и ударное стекло, характерное для лунного грунта). Модель лунного грунта обычно рассматривается в виде квазинепрерывной среды, в которой теплопроводность является функцией от температуры (Munsey, 1963; Linsky, 1966). В этом случае в эффективной теплопроводности ( $K_e$ ) лунного реголита в вакууме выделяется две основные компоненты (Winter, Saari, 1969):

$$K_e = K_c + K_r, \tag{4}$$

где  $K_c$  – контактная теплопроводность, а  $K_r$  – лучистый перенос тепла. Температурная зависимость лучистого переноса тепла (компонента  $K_r$ ) определяется выражением

$$K_r = AT^3, \tag{5}$$

где  $A$  – постоянный коэффициент лучистого переноса, который определяется либо экспериментальным путем (Wechsler, Simon, 1966; Pilbeam, Vaisnys, 1973), либо теоретически (Godbee, 1966; Winter, Saari, 1969).

Значительное влияние на теплопроводность лунного реголита оказывает не только площадь

контакта между частицами, которая зависит от размера и формы частиц, но и количество контактов, число которых существенно изменяется от всестороннего давления. Контактная проводимость ( $K_c$ ) лунного реголита с учетом зависимости от давления может быть представлена следующим общим выражением (Pilbeam, Vaisnys, 1973)

$$K_c = CK_s p^{3/5}, \quad (6)$$

где  $p$  – всестороннее давление,  $K_s$  – проводимость материала частицы,  $C$  – коэффициент, который зависит от упругих свойств частиц, от геометрии упаковки частиц, от количества и типа контактов, от направления теплового потока и подбирается в зависимости от наблюдаемых и экспериментальных данных. Конечное выражение контактной проводимости лунного реголита с подобранным коэффициентом имеет вид (Pilbeam, Vaisnys, 1973)

$$K_c = 1.66 \times 10^{-2} z^{3/5}, \quad (7)$$

где  $z$  – глубина от поверхности лунного реголита, являющаяся функцией всестороннего давления.

Общее аналитическое выражение эффективной теплопроводности лунного грунта преимущественно базальтового состава по данным измерений в местах посадок в экваториальной области Луны в морских районах (табл. 2) с подобранными коэффициентами может быть представлено следующим уравнением в единицах  $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$  (Pilbeam, Vaisnys, 1973)

$$K_e(T) = (1.66 \times 10^{-2} z^{3/5}) + (8.4 \times 10^{-11} T^3). \quad (8)$$

Это выражение справедливо для лунного грунта базальтового состава в естественных условиях высокого вакуума. Лунный грунт характеризуется высокой пористостью и невысоким объемным весом, а теплопроводность породообразующих минералов лунного грунта характеризуется достаточно низкими значениями. Поэтому вклад теплопроводности даже небольшого количества газовой компоненты может оказать доминирующее влияние. Это подтверждается экспериментальными измерениями теплопроводности лунного грунта в среде гелия (Авдеевский и др., 1974; Голвкин и др., 1979).

Теплопроводность лунного грунта в поверхностном слое 1–2 см сильно зависит от температуры и характеризуется экстремально низкими значениями. При средней температуре лунной поверхности в районе посадки Apollo-17 в 220 К теплопроводность составляет около  $1 \times 10^{-3} \text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$  (Лангсет, 1975). На глубине около 2 см теплопроводность реголита возрастает на порядок до  $(1.4–3.0) \times 10^{-2} \text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$ . Такое увеличение теплопроводности в основном обусловлено резким увеличением плотности грунта с глубиной.

Суточные колебания температуры в лунном грунте в экваториальной области составляют ме-

**Таблица 2.** Расчетные значения теплопроводности лунного грунта в экваториальной области (Pilbeam, Vaisnys, 1973)

Глубина, см	Температура, К	Теплопроводность, $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$
50	251.2	$1.2 \times 10^{-2}$
80	252.0	$1.6 \times 10^{-2}$
90	252.2	$1.7 \times 10^{-2}$
140	253.1	$2.2 \times 10^{-2}$

нее 6 К на глубине 35 см и полностью затухают на глубине 80 см. Годовые колебания температуры прослеживаются на всей глубине измерения до 2 м (Langseth и др., 1976). При долгосрочных наблюдениях в течение 3.5 лет выяснилось, что на полное восстановление равновесного состояния температурного режима лунного грунта, нарушенного вмешательством при проведении подготовительных работ и измерений, требуется 5–7 лет (рис. 2). Долгосрочные наблюдения позволили учесть этот эффект при получении окончательных данных по тепловым свойствам реголита.

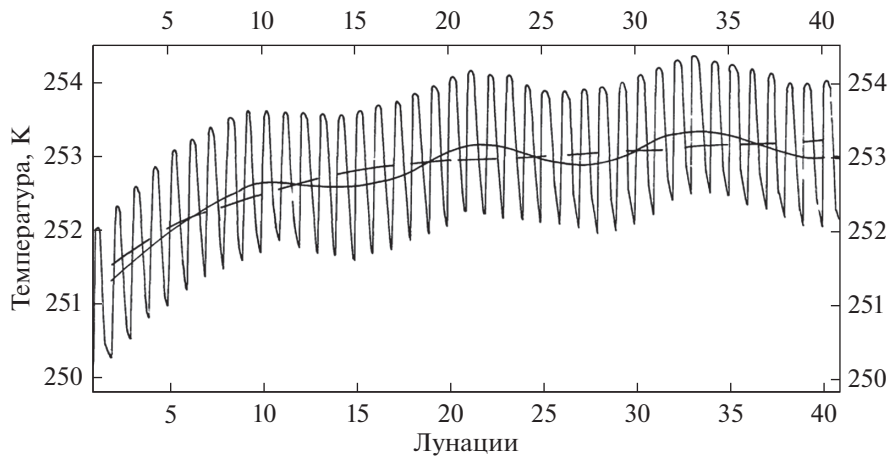
Скорректированные значения измеренной валовой теплопроводности лунного реголита находятся в пределах  $0.9–1.3 \times 10^{-2} \text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$  для всех четырех станций наблюдений. Это на 30–50% меньше предварительных значений, полученных при краткосрочных наблюдениях. При всех расчетах теплопроводности лунного реголита использовалось значение теплоемкости при температуре 250 К (табл. 1). Плотность реголита для оценки его теплопроводности на станции Apollo-15 принималась равной  $1.75–1.90 \text{г см}^{-3}$ , а на станции Apollo-17 –  $1.83–2.09 \text{г см}^{-3}$ .

Одной из задач прибора ТЕРМО-ЛР является измерение *in situ* на поверхности теплопроводности лунного грунта преимущественно анортозитового состава, а также изучение распределения и суточного хода температур в лунном грунте в зависимости от степени освещенности на поверхности в Южном полярном районе Луны.

## ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК

Величина внутреннего теплового потока является важным граничным условием для восстановления тепловой эволюции Луны и накладывает определенные ограничения на геофизические и геохимические модели ее внутреннего строения (Toksoz, Solomon, 1973; Кусков, Кронрод, 2008; 2009). Изучение латерального глобального (видимая и обратная стороны Луны) и регионального распределения внутреннего теплового потока необходимо также для исследования глобальных и региональных неоднородностей в строении лун-





**Рис. 2.** Суточный ход температуры на глубине 45 см в течение 38 лунаций (лунных суток) по данным (Langseth и др., 1976). Сглаженная сплошная линия отражает годовые флуктуации температуры за вычетом суточных вариаций с разрешением  $\pm 0.015$  К. Штриховая линия после вычета годовых вариаций температуры отражает переход к равновесному состоянию, нарушенному активностью астронавтов на поверхности.

ной коры и мантии. Непосредственные измерения теплового потока, которые были выполнены на научных станциях в местах посадок пилотируемых экспедиций Apollo-15 и -17, подтвердили высокую плотность теплового потока из недр Луны, измеренную по данным дистанционных наблюдений (Тихонова, Троицкий, 1969). Первые оценки измеренного теплового потока в районе восточного побережья Моря Дождей (Apollo-15) и в районе восточного побережья Моря Ясности (Apollo-17) на основе краткосрочных наблюдений составили  $3.1 \times 10^{-6}$  и  $2.8 \times 10^{-6}$  Вт см $^{-2}$  соответственно (Лангсет, Кейм, 1975). Скорректированные оценки величины теплового потока по данным долгосрочных наблюдений в районе восточного побережья Моря Дождей и в районе восточного побережья Моря Ясности оказались меньше на 30–50% предварительных значений и составили  $2.1 \times 10^{-6}$  и  $1.6 \times 10^{-6}$  Вт см $^{-2}$  соответственно (Langseth и др., 1976). С учетом поправки на топографию величина регионального теплового потока в районе Борозды Хэдли (Hadley Rille) (Apollo-15) осталась той же, а в районе станции Apollo-17 величина регионального теплового потока составила  $1.4 \text{ Вт} \times 10^{-6} \text{ см}^{-2}$ . В связи с влиянием возможных артефактов (инструментальных погрешностей) на точность получаемых данных прямые измерения этого параметра сопряжены с большими трудностями.

Средняя величина теплового потока, рассчитанная с учетом содержания тория в лунной коре, соответствует  $1.8 \times 10^{-6}$  Вт см $^{-2}$ , а с учетом “слоистой” структуры верхнего горизонта лунной коры, характеризующегося пониженной теплопроводностью и приводящего к экранированию теплового потока и повышению градиента температуры, средняя глобальная оценка может быть снижена

до  $1.2 \times 10^{-6}$  Вт см $^{-2}$  (Hagermann, Tanaka, 2006). Таким образом, зависимость от моделей структуры и состава верхнего горизонта лунной коры приводит к значительной неопределенности в оценке глобального теплового потока и требует дополнительных измерений, которые должны рассматриваться в комплексе с другими геофизическими и геохимическими данными. Для сравнения, исходя из единицы объемов Земли и Луны, расчетное значение для Луны при одинаковых тепловых потоках соответствует  $1.5 \times 10^{-6}$  Вт см $^{-2}$  (Галкин, 1978). Измеренная величина теплового потока в местах посадок пилотируемых экспедиций Apollo-15 и -17, которые расположены друг от друга на расстоянии около 900 км, различается почти на 30%, что превышает погрешности измерений и характеризует неоднородное региональное распределение теплового потока. Вероятная связь величины теплового потока с содержанием долгоживущих радиоактивных изотопов означает латеральное изменение состава и мощности лунной коры и мантии.

Необходимо продолжение исследований распределения теплового потока не только в морских, но и в материковых районах, включая место будущей посадки КА Луна-27, где мощность лунной коры значительно больше, и она существенно отличается по минеральному и химическому составу и содержанию основных радионуклидов К, U и Th от базальтовой коры морских районов. Найденная зависимость восстановления нарушенного равновесного состояния температурно-режима от времени позволяет учитывать вклад этого возмущения в системе при измерениях, например, в течение года. Исследование основных геофизических параметров, имеющих фундаментальное значение и необходимых для понимания



происхождения, состава, внутреннего строения и эволюции Луны, входит в список самых приоритетных задач на современном этапе лунных исследований (Shearer и др., 2007). Измерение *in situ* внутреннего теплового потока в материковой области в месте посадки КА Луна-27 является одной из главных задач прибора ТЕРМО-ЛР.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ГРУНТА

Диэлектрические свойства грунта зависят от химического и минерального состава, от гранулометрического состава и плотности, от содержания замороженных летучих (например, водяного льда), от температуры грунта и частоты электромагнитного импульса измерительного оборудования. Анализ данных по диэлектрической проницаемости четырех образцов лунного реголита, доставленных экспедициями Apollo-11, -12, -14, -15 и -17 показал, что диэлектрическая постоянная сухого лунного грунта почти не зависит от частоты электромагнитного импульса и в основном зависит только от его плотности (Стренгвей и др., 1975). Зависимость диэлектрической постоянной  $\epsilon$  от плотности  $\rho$  достаточно хорошо аппроксимируется следующим простым соотношением

$$\epsilon = (1.93 \pm 0.17)\rho. \quad (9)$$

Диапазон тангенса потерь для лунного грунта зависит не только от плотности, но и от проводящей компоненты в виде содержания рудного минерала ильменита ( $\text{FeTiO}_3$ , Fe – 36.8%, Ti – 31.6%), который является полупроводником дырочного типа (Соминский, 1967). Следует отметить, что содержание ильменита в морских лунных базальтах может изменяться в широких пределах от 0.1–1 вес. % в низкотитанистых базальтах (Tarasov и др., 1977; Барсуков и др., 1980) до 15–20 вес. % в высокотитанистых базальтах (Cast и др., 1973). В анортозитовых породах материковых областей, которые распространены в Южной полярной области, содержание ильменита, как правило, менее 0.1–0.2 вес. % (Виноградов, 1979).

Зависимость тангенса потерь от плотности и содержания проводящей компоненты также может быть представлено в виде следующего простого соотношения (Стренгвей и др., 1975)

$$\text{tg}\delta = [(0.00053 \pm 0.00056) + (0.00025 \pm 0.00009)C]\rho, \quad (10)$$

где  $C$  – содержание  $\text{FeO} + \text{TiO}_2$ . Типичное значение тангенса потерь для лунного реголита составляет меньше 0.005, а для твердых горных пород находится в пределах 0.005–0.03. По данным дистанционного зондирования диэлектрическая постоянная на поверхности Луны находится в пределах 1.5–3.0 (Nagfors, 1970). По данным элект-

рической разведки в месте посадки Apollo-17 слой реголита толщиной  $7 \pm 1$  м характеризуется диэлектрической постоянной  $3.8 \pm 0.2$  и тангенсом потерь  $0.008 \pm 0.004$  и согласуется со средней плотностью слоя реголита около  $2.0 \text{ г см}^{-3}$  (Simmons, 1974). На глубине более 7 м диэлектрическая постоянная скачком увеличивалась до  $7.5 \pm 0.5$ , а тангенс потерь до  $0.035 \pm 0.025$ , что соответствует твердым, но сильно раздробленным подстилающим породам с низкой скоростью сейсмических волн около  $280 \text{ м с}^{-1}$ . Лабораторные изучения образцов лунного грунта, доставленных миссиями Луна-16, -20 и экспедициями Apollo, также подтвердили, что диэлектрическая проницаемость при частоте  $10^6$  Гц находится в пределах от 2 до 4, а тангенс потерь изменяется в пределах  $(0.06–2.5) \times 10^{-2}$  (Головкин и др., 1979).

Следует отметить, что в отличие от диэлектрической постоянной, которая практически не зависит от частоты, тангенс потерь при увеличении частоты электромагнитного поля в диапазоне от 10 Гц до 10 ГГц убывает в зависимости от содержания проводимой компоненты, достигая минимума на частотах  $10^6–10^8$  Гц, и далее снова возрастает, что объясняется появлением поляризационных эффектов в структурных единицах вещества (электроны, ионы, полярные и неполярные молекулы, кристаллы и др.) на высоких частотах (Юшкова и др., 2020).

Магнитные свойства грунта определяются содержанием ферромагнитных минералов и частиц (магнетит, металлическое железо) и парамагнитных породообразующих минералов с содержанием в составе железа  $\text{Fe}^{+2}$ . Единственным ферромагнитным материалом в образцах лунного грунта и лунных пород является металлическое железо, иногда в сплавах с никелем (камасит метеоритного происхождения), которое также является основным носителем остаточной намагниченности. Для сравнения, в земных породах основным носителем остаточной намагниченности является магнетит ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ , Fe 72.4%), который в лунных породах практически отсутствует. Главным лунным парамагнитным минералом является силикат железа пироксен с  $\text{Fe}^{+2}$ . Главный рудный минерал морских базальтов ильменит ( $\text{FeTiO}_3$ ) и составляющая пироксенов молекула  $\text{FeSiO}_3$  являются антиферромагнетиками. В морских лунных базальтах пироксен является одним из главных породообразующих минералов, в отличие от материковых анортозитов, в которых главным породообразующим минералом является алюмосиликат основной плагиоклаз (анортит, битовнит). Поэтому величина парамагнитной восприимчивости у реголита морских базальтов вдвое выше, чем у реголита преимущественно анортозитового состава в материковых районах (Горшков и др., 1979).

В лунном реголите присутствует два основных типа металлического железа, — отдельные зерна размером в десятки и сотни микрон преимущественно метеоритного происхождения, и тонкодисперсное железо размером в десятки и первые сотни нанометров в поверхностных слоях частиц реголита. Как правило, металлическое железо в лунном реголите находится в суперпарамагнитном состоянии (Горшков и др., 1979). Основная часть металлического железа  $Fe^0$  присутствует в минералах и стеклах реголита в виде наносферул сферической формы (Housley и др., 1973). Наносферулы металлического железа наблюдаются в конденсатных и радиационно-индуцированных аморфных пленках на поверхности частиц реголита (Keller, McKay, 1997) и в стеклах агглютинатов (Basu и др., 2003), являющихся продуктом метеоритной бомбардировки.

Предполагается, что химически восстановленное железо образовалось при метеоритной бомбардировке в расплаве в результате обогащения и восстановления ионами солнечного ветра (Housley и др., 1974). Последние экспериментальные данные показали, что металлическое железо  $Fe^0$  может формироваться без участия восстановителя (имплантированных ионов водорода солнечного ветра), а также минуя процесс конденсации железа из ударно-образованного пара. Образование цепочек сферул нанофазного железа в стеклах и на поверхности частиц и минералов происходит термовосстановительным путем при прохождении ударной волны в ударном расплаве в результате метеоритной и микрометеоритной бомбардировки (Сорокин и др., 2020).

Таким образом, образование этого типа железа связано с процессами экзогенной переработки лунных пород и реголита и его содержание зависит от степени зрелости реголита. С увеличением степени зрелости реголита уменьшается размер частиц грунта, реголит становится более монодисперсным и более зрелым, и значительно увеличивается количество агглютинатов, содержание которых в зрелом реголите достигает 50% (Слюта, 2014). Содержание тонкодисперсного металлического железа в частицах реголита с уменьшением их размеров также увеличивается (Иванов и др., 1980). Увеличение степени зрелости реголита отражает увеличение времени его экспозиции на поверхности и, соответственно, более высокую степень восстановления  $Fe^0$ .

Одной из задач прибора ТЕРМО-ЛР является исследование контактным методом геоэлектромагнитной структуры лунного грунта, которая определяется относительным изменением диэлектрической проницаемости и содержанием тонкодисперсного металлического железа по слоям реголита в зависимости от их валового минерального и гранулометрического состава, сте-

пени зрелости, плотности, температуры. Планируется изучение изменения степени зрелости реголита с глубиной в зависимости от стратификации и относительного возраста образования отдельных слоев.

## КОНСТРУКЦИЯ И СОСТАВ ПРИБОРА ТЕРМО-ЛР

Прибор ТЕРМО-ЛР состоит из трех основных блоков: блока глубинных измерений (БГИ) (рис. 3) и блока для измерений на поверхности (БПИ) (рис. 4), которые с помощью соединительных кабелей подключаются к блоку электроники управления прибором (БЭ). БЭ содержит управляющую электронику, устанавливается на термостабилизированной платформе КА и подключается к бортовым фидерам питания и связи через блок управления научной информацией (БУНИ). Блоки БГИ и БПИ на кронштейнах устанавливаются на платформе посадочного аппарата в вертикальном положении на расстоянии от поверхности лунного грунта до 0.3 м (рис. 5).

БГИ включает глубинный каротажный зонд (ГКЗ), который размещается в корпусе откидывающего устройства (ОУ). ОУ обеспечивает сохранность прибора при транспортировке на борту КА в условиях стартовых и посадочных перегрузок, опускает прибор на поверхность с борта посадочного аппарата и с заданным усилием обеспечивает надежный контакт платформы ГКЗ с грунтом (рис. 6).

ГКЗ состоит из самозаглубляющегося молотка-пенетратора, датчиков диэлектрической проницаемости (ДДП) и магнитной восприимчивости (ДМВ), и барабана с соединительной гибкой полиимидной лентой с токопроводящими дорожками и расположенными на ленте термодатчиками (рис. 7).

Измерение основных параметров физико-механических свойств *in situ* до глубины нескольких метров осуществляется в зависимости от скорости заглубления молотка-пенетратора с известной массой, энергией удара и геометрическими параметрами конусного наконечника. Скорость заглубления молотка-пенетратора определяется с помощью многообортного потенциометром на барабане с лентой. Относительное изменение основных параметров физико-механических свойств каждого из слоев реголита будет измеряться с высокой степенью разрешения по глубине вплоть до первых миллиметров (глубина погружения молотка-пенетратора за один удар).

Термодатчики, установленные на ленте с интервалом 0.5 м, позволят изучить распределение температуры и суточный ход температур в лунном грунте в зависимости от степени освещенности

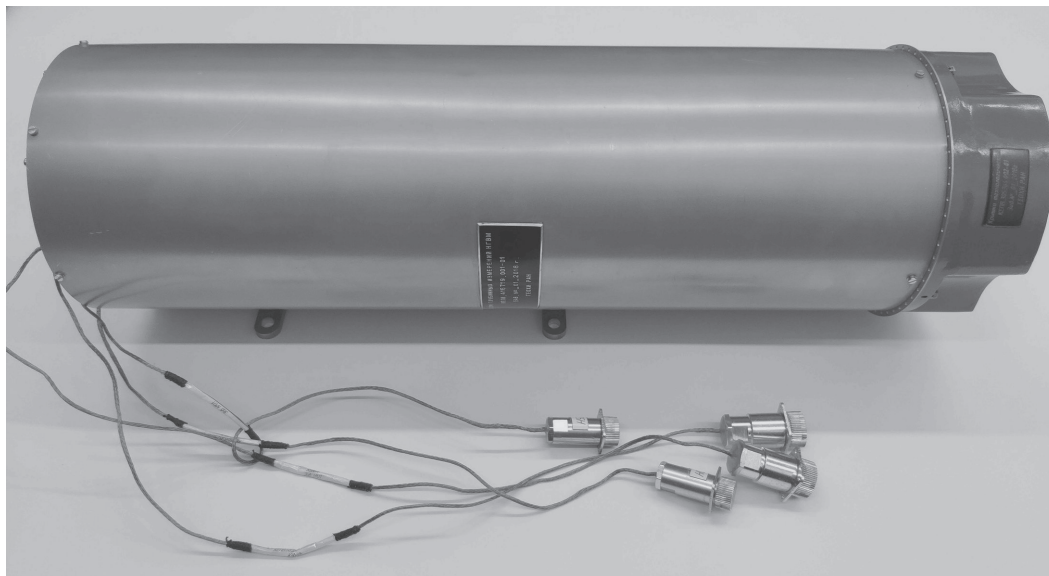


Рис. 3. Общий вид макета БГИ с защитной крышкой и соединительными кабелями.

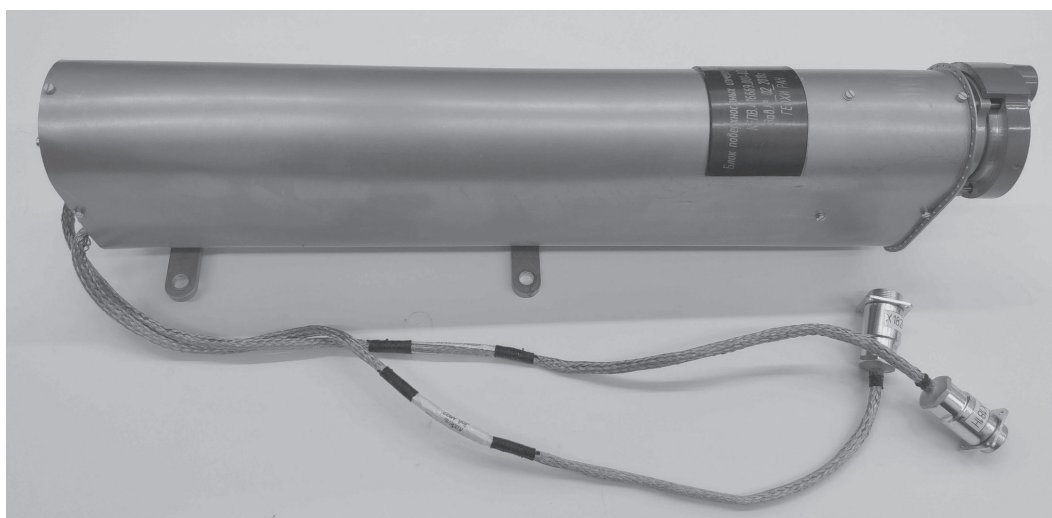


Рис. 4. Общий вид макета БПИ с защитной крышкой и соединительными кабелями.

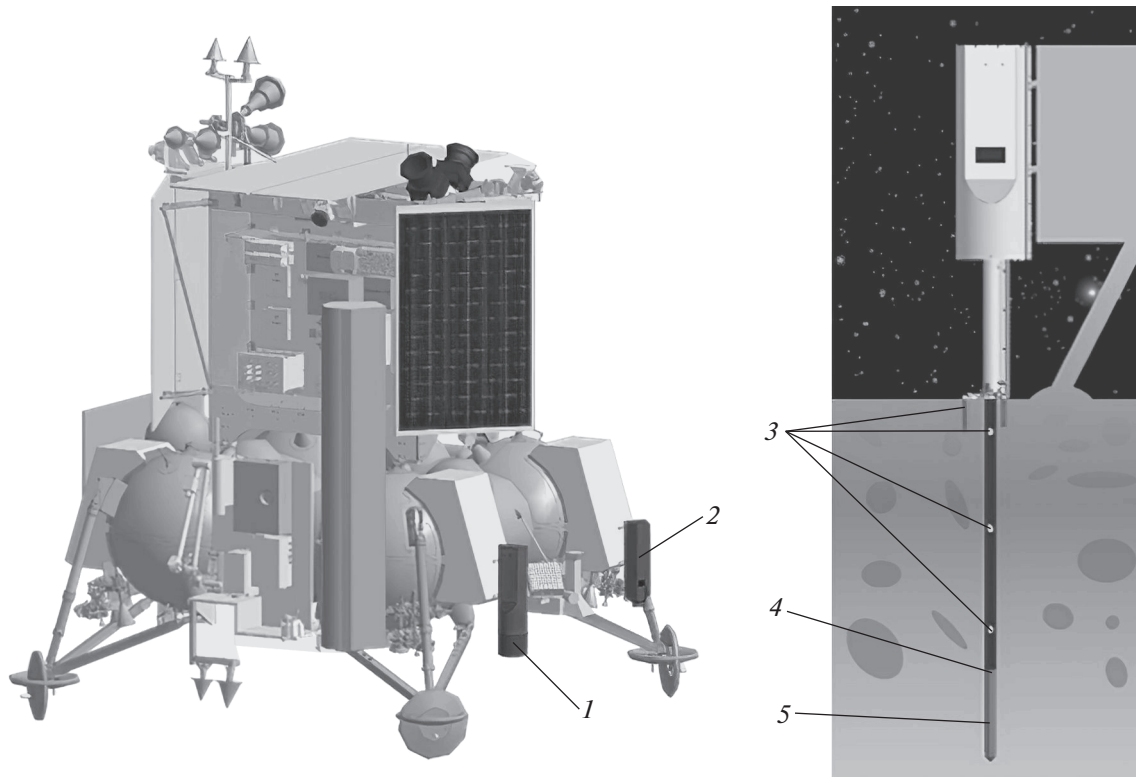
на поверхности и измерить внутренний тепловой поток в материковой области.

Датчики диэлектрической проницаемости (ДДП) и магнитной восприимчивости (ДМВ), установленные в нижней части каротажного зонда (рис. 7), позволят контактным методом изучить на глубину до 3 м геоэлектromагнитную структуру лунного грунта, которая определяется относительным изменением диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости различных слоев реголита.

Задача датчика диэлектрической проницаемости (ДДП) — определение коэффициента диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$ . В последующем ре-

зультаты измерений  $\epsilon_r$ , совместно с данными других датчиков будут использоваться для анализа и оценок свойств реголита, его минерального состава, распределения слоев в грунте, их плотности. Датчик представляет собой конденсатор, сформированный двумя проводниками, намотанными бифилярно на диэлектрическую основу в форме цилиндра диаметром 30 мм и высотой 25 мм (рис. 8). Исходная емкость датчика составляет 25–30 пФ.

Датчик питается от опорного генератора высокой частоты (2.5 МГц) и формирует вокруг себя переменное электрическое поле. ДДП представляет собой цилиндрический конденсатор в бифи-



**Рис. 5.** Схема размещения прибора ТЕРМО-ЛР борту космического аппарата (слева) и БГИ после внедрения ГКЗ (справа): 1 – БГИ; 2 – БПИ; 3 – термодатчики; 4 – датчики электромагнитных измерений; 5 – молоток пенетратор.

лярном исполнении и входит в состав последовательного LC-контура, исходно настроенного на более высокую частоту (2.7–3 МГц). Опорная частота попадает на спад резонансной кривой измерительного контура. При изменении характеристик диэлектрического окружения датчика меняется его собственная частота, а также величина тока опорной частоты, протекающего через измерительный LC-контур. Этот ток выделяется на опорном резисторе, детектируется и в форме постоянной составляющей по ленте подается на АЦП микроконтроллера. Таким образом, изменения выходного напряжения ДДП отражают изменения диэлектрических характеристик среды, в которую он погружен. Для исключения паразитного влияния проводников ленты, емкость которых оценивается значением 80–100 пФ на погонный метр, все элементы схемы ДДП, включая генератор высокой частоты и детектор, размещаются внутри корпуса ДДП.

Предварительные измерения показали, что в окружении кварцевого песка изменение емкости ДДП, выполненного из различных диэлектриков, составляют 2–6 пФ, а соответствующие изменения резонанса измерительного контура – 50–100 КГц. При предварительной калибровке ДДП с набором различных типовых материалов можно решать обратную задачу по определению диэлек-

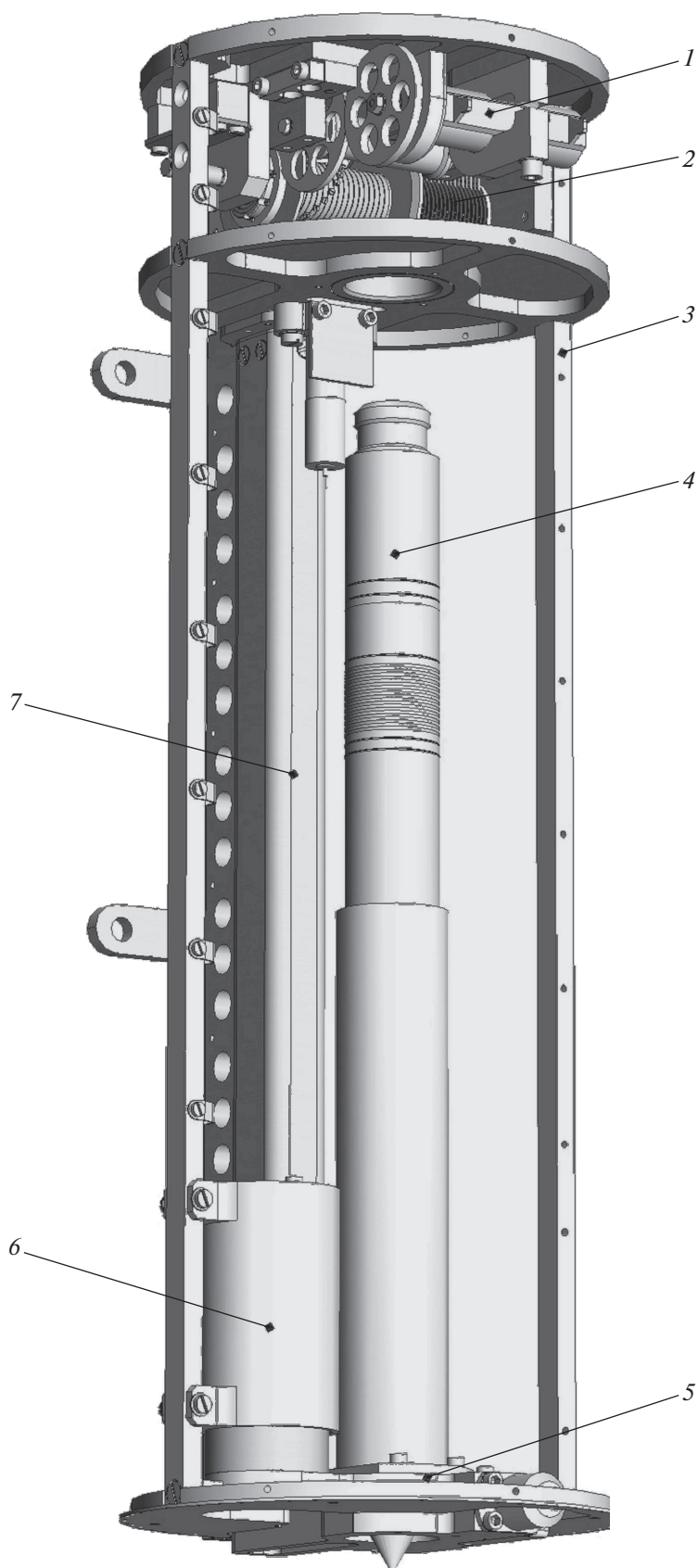
трической проницаемости окружения и коррелированности получаемых результатов с теми или иными материалами.

Принцип работы датчика магнитной восприимчивости, ДМВ, базируется на изменении резонансной частоты электромагнитного контура при попадании металлических частиц в открытый магнитный зазор индуктора (относительная магнитная проницаемость вакуума  $\mu_{\text{вак}} = 1$ ). Для частиц реголита, содержащих железо, относительная магнитная проницаемость  $\mu_{\text{рег}}$  предположительно может находиться в интервале  $1E2-1E4$  ед. При попадании магнитной частицы в область магнитного поля зазора произойдет относительный скачок индуктивности  $d(L/L_0)$  и соответствующее снижение резонансной частоты контура:

$$d(F/F_0) = -0.5d(L/L_0), \quad (11)$$

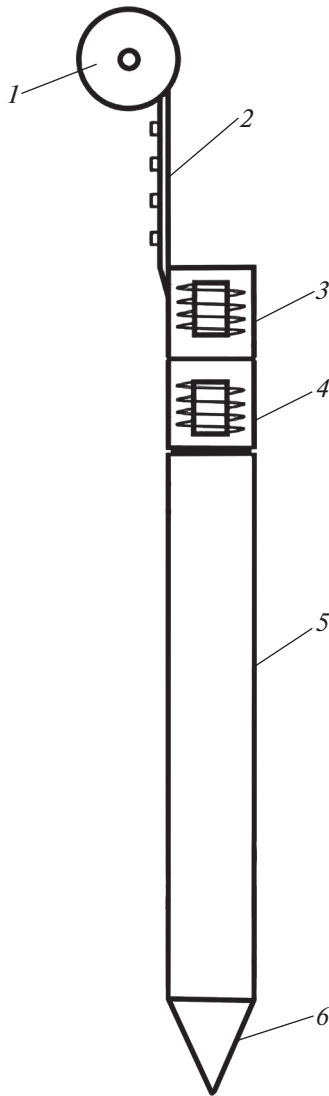
где  $F_0$  и  $L_0$  – исходные значения в вакууме.

Конструктивно датчик ДМВ (рис. 9) выполнен в форме пустотелого цилиндра и представляет собой два вложенных друг в друга металлических кольца высотой 25 мм, между которыми располагаются 6–8 сердечников с обмотками, формирующими встречные полюса, S и N. Малое стальное кольцо объединяет внутренние полюса сердечников, замыкая магнитное поле индуктора. Внеш-



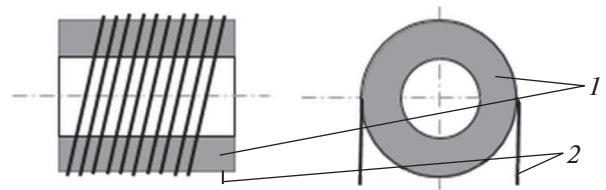
**Рис. 6.** Схема устройства ОУ БГИ: 1 – многооборотный потенциометр с зубчатой передачей; 2 – барабан с лентой и вращательным контактным устройством; 3 – рама опорная; 4 – ГКЗ; 5 – узел расчеховки; 6 – обойма кабеля расчеховки; 7 – поступательный привод спуска нижней платформы с ГКЗ.





**Рис. 7.** Принципиальная схема глубинного каротажного зонда (ГКЗ). 1 – катушка с лентой; 2 – гибкая лента с термодатчиками; 3 – датчик диэлектрической проницаемости (ДДП); 4 – датчик магнитной восприимчивости (ДМВ); 5 – самозаглубляющийся молоток-пенетратор; 6 – конусный наконечник.

нее большое титановое кольцо диаметром 30 мм не препятствует формированию магнитного поля индуктора на внешней стороне ДМВ и защищает конструкцию датчика. Все обмотки сердечников включены последовательно и включены встречно друг к другу. Такая конструкция обеспечивает формирование открытых магнитных зазоров и чередование полюсов по периметру датчика. Диаметр ДМВ соответствует диаметру молотка, образуя с ним единое тело цилиндрической формы. Рабочая частота ДМВ выбирается низкой (5–10 кГц), что позволяет исключить паразитное влияние ленты на характеристики колебательного контура ДМВ при прямом измерении резонансной частоты



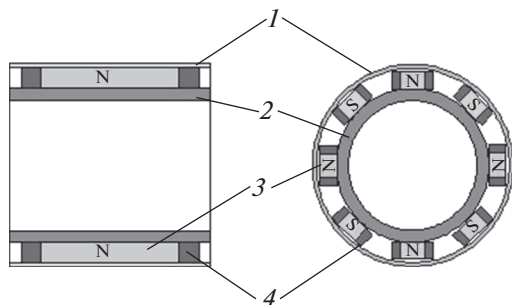
**Рис. 8.** Конструктивная схема датчика ДДП: 1 – диэлектрик (полиимид); 2 – медный провод.

ты аналоговой схемой микроконтроллера. Изменения частоты при погружении ГКЗ позволяют судить о наличии магнитных материалов в грунте на различных глубинах. По центральной части ДМВ проходят коммуникации к другим узлам зонда. Датчики работают циклически в паузах между ударами молотка пенетратора, что исключает влияние силовой проводки молотка на их показания. Пространственное разрешение ДМВ и ДДП по глубине определяется высотой этих датчиков.

Блок поверхностных измерений (БПИ) предназначен для измерения температуры на поверхности и теплофизических свойств (тепловой инерции, теплоемкости, теплопроводности) поверхностного слоя лунного грунта. БПИ состоит из откидывающего устройства (ОУ) и опускаемой платформы с блоком термодатчиков для измерения теплофизических свойств грунта на поверхности (рис. 10). Блок термодатчиков состоит из двух независимых датчиков – основного и дополнительного (рис. 11). Основной термодатчик позволяет определить только тепловую инерцию грунта. Дополнительный термодатчик использует метод проникающего зонда и позволяет определить теплопроводность и другие производные теплофизических свойств грунта. Эти данные смогут служить калибровочными для дистанционных измерений. Определение температурной зависимости коэффициента теплопроводности реголита также позволит оценить степень его дисперсности.

Конструкция основного термодатчика аналогична конструкции термодатчика прибора ТЕРМОФ ОБ, включая все подробности строения и особенности его сборки (Маров и др., 2010; Мануйлов, 2011). Термодатчик состоит из нагревателя и зоны нагрева грунта, которые размещены на мембранах из полиимидной пленки и соединяются теплопроводом, выполняющим функцию основного теплоемкого элемента конструкции (рис. 12). Теплопровод выполнен в виде жгута сечением 0.36 мм<sup>2</sup> и длиной 208 (200 + 4 + 4) мм из 120 медных проволок, свитых с шагом 20 мм. Платиновые термометры сопротивления Pt1000 Hereaus C420 размещаются на теплопроводе на расстояниях 15, 115 и 195 ± 0.2 мм от точки крепления





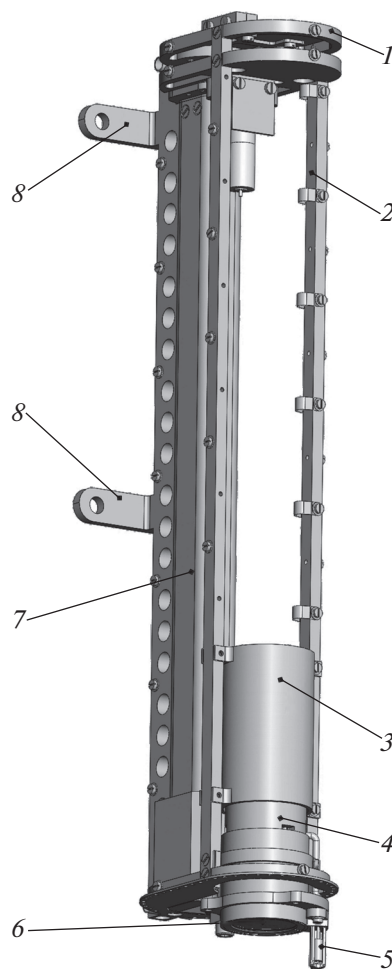
**Рис. 9.** Конструктивная схема датчика магнитной восприимчивости ДМВ: 1 – внешнее большое титановое кольцо; 2 – малое стальное кольцо; 3 – сердечники; 4 – обмотки.

теплопровода к нагревателю и фиксируются отрезками термоусадочной трубки и уретановым компаундом.

Нагреватель (чип-резистор 20 кОм) и теплопровод крепятся на фольгированной полиимидной пленке толщиной 15 мкм, которая является элементом гальванической развязки и одновременно осуществляет тепловой контакт между нагревателем и теплопроводом. Собранный узел нагревателя изолируется прокладками из полиимидной пленки толщиной 8 мкм.

Зона нагрева грунта собирается из полиимидной пленки (мембраны) толщиной 25 мкм, закрепленной на опорном кольце. Мембрана может деформироваться под действием давления грунта до  $1 \text{ кг см}^{-2}$ . Центральная область мембраны диаметром 20 мм со стороны теплопровода покрыта медной фольгой толщиной 6 мкм, а со стороны грунта покрыта аморфным углеродом с коэффициентом черноты 0.9 в диапазоне длин волн 0.5–20 мкм. Для теплоизоляции термодатчика выбран материал ЭВТИ-В с рабочей температурой до  $+150^\circ\text{C}$ .

Конструкция дополнительного термодатчика представлена двумя штырями длиной 20 мм с нагревателем и терморезистором (рис. 11), которые внедряются в лунный грунт на всю длину. Оптимальное расстояние между штырями определяется в результате экспериментальных и калибровочных исследований на экспериментальном образце, в котором оно может изменяться в пределах 0–10 мм. В качестве нагревателя используется резистор С2-33Н-0.5-2.7 кОм, а в качестве датчика температуры – платиновый терморезистор Honeywell 701-101ВАА-В00. Штырь терморезистора и опорный фланец изготавливаются из стеклотекстолита ВФТ-С-2.0-0.80 ГОСТ 10292-74. Монтаж штырей в направляющих пазах опорного фланца осуществляется заливкой компаунда.

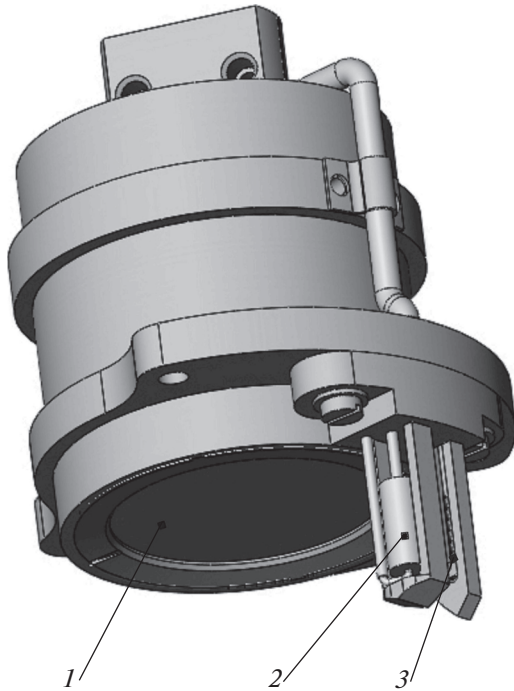


**Рис. 10.** Схема устройства ОУ БПИ: 1 – опорная рама БПИ; 2 – кабель термодатчика; 3 – обойма спирального кабеля термодатчика; 4 – основной термодатчик; 5 – дополнительный термодатчик; 6 – чувствительный элемент основного термодатчика; 7 – поступательный привод спуска; 8 – крепежные кронштейны.

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРИБОРА

Блок БЭ подключается к бортовым фидерам питания и связи КА Луна-27 через блок управления научной информацией (БУНИ). Блок питания в блоке БЭ формирует напряжения с номиналами “+5В”, “+27В” и обеспечивает питание аналоговых и цифровых схем датчиков ДТ, ДМВ и ДДП в ГКЗ через соответствующие фильтры и разъемы. Для управления блоками БГИ, БПИ и ГКЗ блок БЭ содержит следующие функциональные устройства (рис. 13):

1. Микроконтроллер на базе ATmegaS-128 CZ-VS;
2. Штатный и резервный интерфейсы RS-485 связи с бортом аппарата Луна-Ресурс-1, построенные на двух микросхемах 5559ИН25У;



**Рис. 11.** Внешний вид блока термодатчиков: 1 – чувствительная мембрана основного термодатчика; 2 – штырь с нагревателем дополнительного термодатчика; 3 – штырь с терморезистором дополнительного термодатчика.

3. Трехфазный драйвер управления электродвигателями в БПИ, БГИ и системой электромагнитов ударного воздействия на молоток пенетратора в каротажном зонде;

4. Формирователь шины данных БГИ;

5. Формирователь шины (адреса) выбора исполнительных устройств в БГИ;

6. Формирователь мультиплицированной шины данных/адреса (выбора) исполнительных устройств БГИ;

7. Термостат для подогрева и стабилизации температуры внутреннего объема БЭ.

Функциональные устройства блока БГИ (рис. 13):

1. Электродвигатель подмотки ленты каротажного зонда;

2. Инкрементный датчик углового положения (энкодер) ротора электродвигателя;

3. Резистивный датчик длины ленты каротажного зонда;

4. Контактный датчик опоры;

5. Формирователь данных датчиков температуры (ДТ) по глубине скважины;

6. Формирователь данных датчика магнитной восприимчивости (ДМВ) грунта в скважине;

7. Формирователь данных датчика диэлектрической проницаемости (ДДП) грунта в скважине;

8. Формирователь сигналов возбуждения электромагнитов ударного воздействия на молоток пенетратора;

9. Термостат для подогрева и стабилизации температуры внутреннего объема БГИ.

Функциональные устройства каротажного зонда ГКЗ (рис. 13):

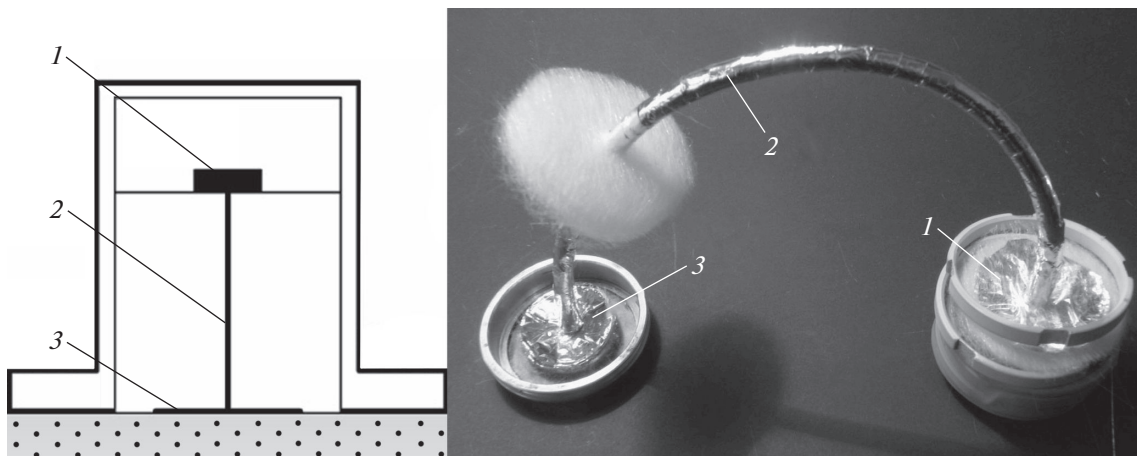
1. Система электромагнитов ударного воздействия на молоток пенетратора;

2. Датчик линейного положения молотка пенетратора;

3. Контактный датчик натяжения сигнальной ленты;

4. Датчики температуры (ДТ) по глубине скважины;

5. Датчик магнитной восприимчивости (ДМВ) грунта в скважине;



**Рис. 12.** Схема (слева) и общий вид внутреннего устройства (справа) основного термодатчика: 1 – нагреватель; 2 – теплопровод; 3 – зона нагрева грунта.

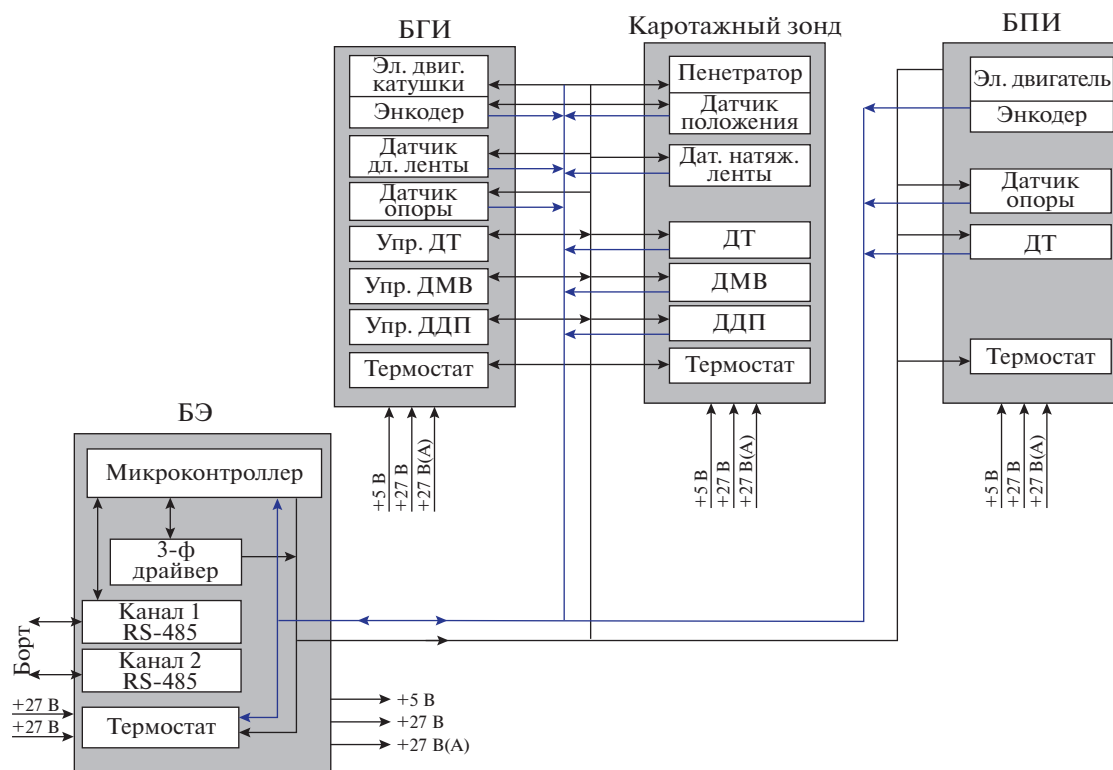


Рис. 13. Функциональная схема прибора ТЕРМО-ЛР.

6. Датчик диэлектрической проницаемости (ДДП) грунта в скважине;

7. Термостат для подогрева и стабилизации температуры внутреннего объема зонда.

Функциональные устройства блока БПИ (рис. 13):

1. Электродвигатель позиционирования по высоте над грунтом;

2. Инкрементный датчик углового положения (энкодер) ротора электродвигателя;

3. Контактный датчик опоры;

4. Датчики (ДТ) температуры поверхности грунта;

5. Термостат для подогрева и стабилизации температуры внутреннего объема БЭ.

Режимами работы прибора управляет микроконтроллер в блоке БЭ, который взаимодействует с БУНИ по интерфейсу RS-485 (рис. 13). В режиме подготовки прибора к выполнению эксперимента микроконтроллер БЭ включает термостаты для подогрева и стабилизации температуры в блоках БЭ, БГИ и БПИ. Затем проводится диагностика работоспособности всех функциональных устройств. Результаты диагностики по интерфейсу RS-485 передаются на борт космического аппарата Луна-27.

В режиме опускания платформ БГИ и БПИ на грунт по команде с борта аппарата Луна-27 микроконтроллер БЭ, используя электродвигатель,

данные энкодера и контактных датчиков опоры в БГИ и БПИ, выполняет программу следящего привода и позиционирует платформы блоков прибора на поверхности грунта.

Блок поверхностных измерений (БПИ) проводит измерения по заданной циклограмме в активном и пассивном режимах работы. В пассивном режиме основной термодатчик измеряет температуру на поверхности реголита, а дополнительный термодатчик на глубине около 2 см. При активном режиме измерений в обоих термодатчиках используется нагреватель, что позволяет оценить теплофизические свойства грунта за счет измерения потока тепла.

В режиме заглабления каротажного зонда ГКЗ, который выполняется по команде с борта КА Луна-27 микроконтроллером БЭ, используются трехфазный драйвер в БЭ, электродвигатель катушки подмотки ленты каротажного зонда в БЭ, датчик длины ленты каротажного зонда в БЭ, электромагнитные системы ударного воздействия на молоток-пенетратор в ГКЗ и датчик натяжения ленты в ГКЗ. Для обеспечения заглабления каротажного зонда без критического натяжения ленты, по которой передается вся информация, по мере необходимости с помощью электродвигателя катушки подмотки в БГИ, резистивного датчика длины ленты в БГИ и контактного датчи-

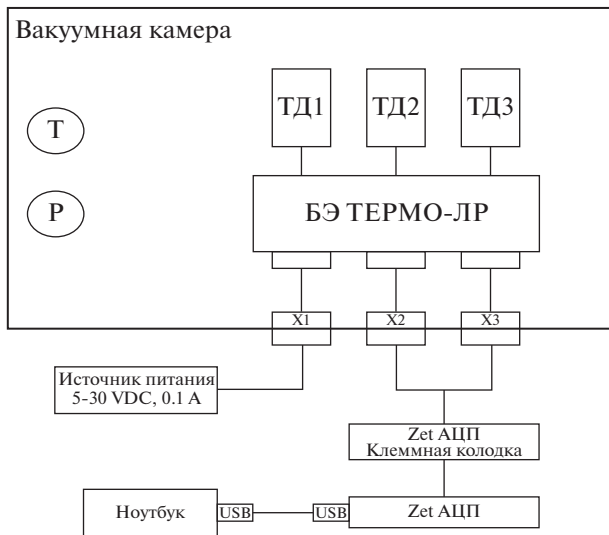


Рис. 14. Принципиальная схема подключения термодатчиков в вакуумной камере.

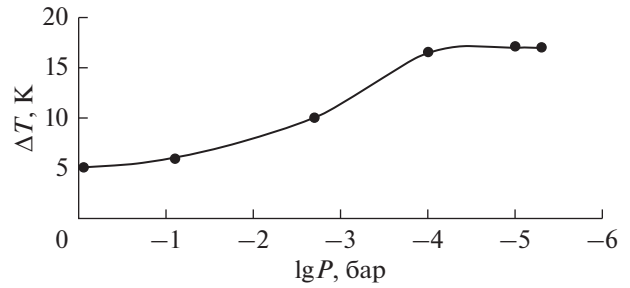


Рис. 15. Распределение температуры термодатчиков в зависимости от давления в вакуумной камере.

ка натяжения ленты в ГКЗ производится ее размотка.

ДМВ и ДДП работают только в процессе заглупления ГКЗ. Измерения магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости грунта выполняются в паузах между ударами молотка. После удара делается пауза для затухания переходных процессов в силовых цепях молотка. Затем последовательно включаются датчики ДДП и ДМВ, оставляя паузу перед следующим ударом. Такая циклограмма работы позволит минимизировать взаимные негативные влияния всех элементов прибора. После заглупления ГКЗ прибор проводит периодические измерения температуры грунта в скважине датчиками, расположенными на ленте через определенные интервалы. Такие измерения проводятся с заданной периодичностью в течение всего срока активного существования КА Луна-27.

### ИСПЫТАНИЯ И КАЛИБРОВКА ТЕРМОДАТЧИКОВ БПИ

При градуировке датчиков используется метод испытаний в режиме холостого хода (ХХ) при отсутствии теплового контакта датчика с теплопроводящей массой и в режиме короткого замыкания (КЗ) при контакте датчика с теплопроводящей массой. В режиме ХХ поверхность датчика располагается на поверхности специально изготовленной под форму датчика фторопластовой пластины, которая препятствует отводу тепла от нагревателя. В режиме КЗ для максимального отвода тепла от нагревателя используется медная пластина, тепловой контакт которой с поверхностью датчика обеспечивается пастой КПП-8.

Исследование влияния давления и температуры среды на показания термодатчиков БПИ проводилось в вакуумной камере и в камере тепла и холода (КТХ). В качестве аналого-цифрового преобразователя использовалась аппаратура Zet Sigma и программное обеспечение, разработанное ZetLab-Studo (рис. 14). Контрольная аппаратура обеспечивала измерение давления в вакуумной камере с погрешностью  $\pm 20\%$ . Температура в вакуумной камере измерялась в трех точках, а в КТХ в 12 точках с погрешностью 0.5 К. Сигналы прибора регистрировались с частотой 1 Гц 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем и вводились в компьютер. Приведенная погрешность преобразования не превышала 2 мВ.

Измерения в вакуумной камере проводились при следующих значениях давления:  $5 \times 10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $2 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-2}$  и  $10^{-1}$  бар. Испытания термодатчиков проводились в активном режиме, нагрев длился 300 с. Испытания подтвердили зависимость показаний прибора от давления, характерную для перехода от конвективного к молекулярному и, далее, вакуумному режиму теплопереноса. Показания прибора стабилизируются при давлении ниже  $10^{-4}$  бар (рис. 15).

Испытания термодатчиков в вакууме с синхронными измерениями температуры в реперных точках позволили провести температурную градуировку датчиков прибора. Испытания термодатчиков в пассивном режиме в камере КТХ позволили определить индивидуальные вольт-температурные характеристики датчиков прибора и построить модели для пересчета из напряжения в температурные показатели.

Для сравнительного анализа образцов с разными теплофизическими свойствами и оценки надежности и достоверности результатов измерений проведены аналогичные испытания основного термодатчика БПИ с эталонными образцами и имитатором лунного грунта. В качестве эталонных образцов с известными теплофизическими свойствами также были использованы медная и фторопластовая пластины толщиной 2 см (рис. 16).





**Рис. 16.** Фторопластовая (вверху) и медная (внизу) пластины с термодатчиками БПИ для испытаний методами холостого хода и короткого замыкания.

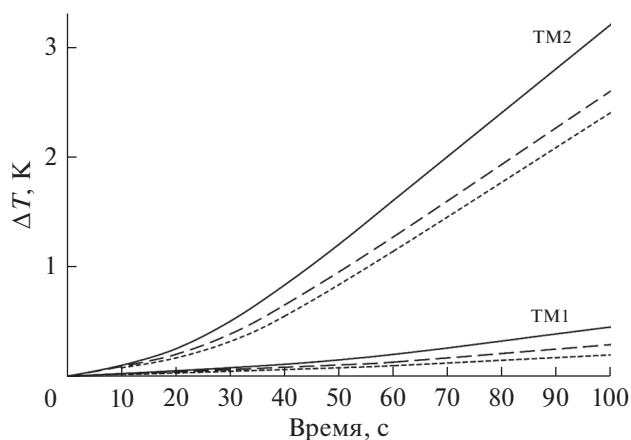
В качестве имитатора лунного грунта использовались однородные по химическому составу стеклянные шарики диаметром 3 мм, применяемые в стоматологии. Для исключения погрешности, связанной с возникновением воздушной подушки между чувствительной мембраной датчика и пластинами, использовалась термопаста. При измерениях на аналоге грунта эластичная мем-

брана выгибалась и создавала надежный контакт с исследуемым образцом. Каждый цикл испытаний записывался не менее 3000 с для получения стационарного режима работы, при котором не происходит значительного изменения температурных показателей каждого из датчиков. Испытания проводились при давлении  $2-3 \times 10^{-5}$  бар, и температуре  $20^\circ\text{C}$ .

Полученные данные относительного распределения температурных показаний датчиков на образцах с различными теплофизическими свойствами (рис. 17) подтвердили высокие эксплуатационные характеристики термодатчика и надежную интерпретацию и воспроизводимость измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прибор ТЕРМО-ЛР, который разрабатывается в лаборатории геохимии Луны и планет в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, включен в состав комплекса научной аппаратуры лунного посадочного аппарата Луна-27. Прибор предназначен для комплексных контактных геофизических исследований различных свойств лунного грунта. Блок поверхностных измерений (БПИ) оснащен термодатчиками для измерений теплофизических свойств грунта на поверхности. Основной термодатчик БПИ позволяет определить тепловую инерцию грунта, дополнительный термодатчик использует метод проникающего зонда и позволяет определить теплопроводность и другие про-



**Рис. 17.** Распределение температуры датчиков в зависимости от времени нагрева в режимах холостого хода и короткого замыкания и на имитаторе лунного грунта. ТМ1 и ТМ2 платиновые термометры (термодатчики), расположенные на теплопроводе от зоны нагрева грунта соответственно. Измерения в режиме ХХ показаны сплошной линией, в режиме КЗ – пунктирной линией, измерения на грунте-аналоге – штриховой линией.

изводные теплофизических свойств грунта. В разработке методики измерений и конструкции прибора учтен опыт, полученный нами ранее при создании прибора ТЕРМОФ ОБ для исследований теплофизических свойств поверхности Фобоса.

Блок глубинных исследований прибора оснащен глубинным каротажным зондом с самозаглубляющимся молотком-пенетратором для измерений на глубину до 3 м. Измерение основных параметров физико-механических свойств *in situ* до глубины нескольких метров осуществляется в зависимости от скорости заглубления молотка-пенетратора с известной массой, энергией удара и геометрическими параметрами конусного наконечника. Термодатчики, установленные на ленте с определенным интервалом, позволяют изучить распределение температуры и суточный ход температур в лунном грунте в зависимости от степени освещенности на поверхности и измерить внутренний тепловой поток в полярной области. Датчики диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости, установленные в нижней части каротажного зонда, позволяют контактным методом изучить геоэлектромагнитную структуру лунного грунта, которая определяется относительным изменением диэлектрической проницаемости и содержанием тонкодисперсного металлического железа по слоям реголита в зависимости от их валового минерального и гранулометрического состава, степени зрелости, плотности, температуры. Планируется изучение изменения степени зрелости реголита с глубиной в зависимости от стратификации и относительного возраста образования отдельных слоев.

Испытания термодатчиков БПИ в вакууме с синхронными измерениями температуры в реперных точках позволили провести температурную градуировку датчиков прибора, а испытания термодатчиков в пассивном режиме в камере КТХ позволили определить индивидуальные вольт-температурные характеристики датчиков прибора и построить модели для пересчета из напряжения в температурные показатели. Испытания термодатчиков БПИ на образцах с различными теплофизическими свойствами подтвердили высокие эксплуатационные характеристики датчиков и надежную интерпретацию и воспроизводимость измерений. Испытания и калибровка молотка-пенетратора, термодатчиков БПИ и БГИ, а также датчиков ДДП и ДМВ продолжаются. Результаты испытаний и калибровки датчиков будут представлены в следующих публикациях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдеевский В.Р., Анфимов Н.А., Маров М.Я., Трескин Ю.А., Шалаев Р.П., Экономов А.П. Теплофизические свойства лунного вещества, доставленного на Зем-

лю автоматической станцией “Луна-16” // Лунный грунт из Моря Изобилия / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1974. С. 553–558.

Алифанов О.М., Анфимов Н.А., Беляев В.С., Бодин Б.В., Боярчук А.А., Галимов Э.М., Гальпер А.М., Головкин А.В., Григорьев А.И., Губайдуллин В.Ш., Губерт А.М., Елкин К.С., Захаров А.И., Зацепин В.И., Ильин В.К., Карабаджак Г.Ф., Кардашев Н.С., Ковков Д.В., Ковалев Ю.Ю., Кузнецов В.Д., Курт В.Г., Лукаш В.Н., Лутвинов А.А., Макаров Ю.Н., Мальченко А.Н., Манько А.С., Маров М.Я., Матафонов А.П., Милоков В.К., Михеева Е.В., Морук Б.В., Павлинский М.Н., Панасюк М.И., Паничкин Н.Г., Пикуз С.А., Пичхадзе К.М., Попов Г.А., Поповкин В.А., Прохоров М.Е., Райкунов Г.Г., Ревнивец М.Г., Слюта Е.Н., Смирнов А.В., Успенский Г.Р., Ушаков И.Б., Форт В.Е., Хартов В.В., Черепашук А.М., Шевченко В.В., Шустов Б.М. Фундаментальные космические исследования. Т. 2. Солнечная система / Ред. Райкунов Г.Г. М.: Физмат. лит., 2014. 456 с.

Барсуков В.Л., Дмитриев Л.В., Тарасов Л.С., Колесов Г.М., Шевалевский И.Д., Рамендик Г.И., Гаранин А.В. Геохимические и петрохимические особенности реголита и пород из Моря Кризисов // Лунный грунт из Моря Кризисов / Ред. Барсуков В.Л. 1980. С. 158–165.

Виноградов А.П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией “Луна-20” / Грунт из материкового района Луны / Ред. Барсуков В.Л., Сурков Ю.А. М.: Наука, 1979. С. 7–17.

Галкин И.Н. Геофизика Луны. М.: Наука, 1978. С. 176.

Головкин А.Р., Дмитриев А.Н., Духовской Е.А., Новик Г.Я., Петрович Р.Г., Ржевский В.В., Силин А.А., Шварев В.В. Результаты исследования тепловых и электрических свойств грунта Луны и его аналогов // Лунный грунт из Моря Изобилия / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1974. С. 559–562.

Горшков Э.С., Гуськова Е.Г., Иванов А.В., Почтарев В.И., Флоренский К.П. Естественные магнитные характеристики лунных образцов // Грунт из материкового района Луны / Ред. Барсуков В.Л., Сурков Ю.А. М.: Наука, 1979. С. 604–611.

Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жужлов Л.Н., Шарова В.А., Внучков Г.А., Окулевский Б.А., Базилевский А.Т., Ваннын Л.Л., Егоров И.В., Файнберг Э.Б. Магнетизм и электропроводность Луны по данным “Лунохода-2” // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 314–322.

Иванов А.В., Горшков Э.С., Почтарев В.И. Магнитная стратиграфия колонки реголита “Луны-24” // Лунный грунт из Моря Кризисов / Ред. Барсуков В.Л. М.: Наука, 1980. С. 72.

Кошурников А.В., Котов П.И., Агапкин И.А. Влияние засоленности на акустические и электрические свойства мерзлых грунтов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 6. С. 99–106.

Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Обнаружение потока тепла из недр Луны // Астрон. журн. 1963. Т. 40. № 6. С. 1076–1082.

Кусков О.Л., Кронрод В.А. Валовой состав Луны и размеры ядра // Проблемы зарождения и эволюции биосферы. М.: Либроком/УРСС, 2008. С. 317–327.



- Кусков О.Л., Кронрод В.А. Геохимические ограничения на модели состава и теплового режима Луны по сейсмическим данным // Физика Земли. 2009. № 9. С. 25–40.
- Лангсет М.С., Кейм С.Д. Непосредственные измерения теплового потока на Луне // Космохимия Луны и планет / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1975. С. 200–209.
- Леонович А.К., Громов В.В., Рыбаков А.В., Петров В.К., Павлов П.С., Черкасов И.И., Шварев В.В. Исследования механических свойств лунного грунта на самоходном аппарате “Луноход-1” / Передвижная лаборатория на Луне “Луноход-1”. Т. I. М.: Наука, 1971. С. 78–88.
- Леонович А.К., Иванов О.Г., Павлов П.С., Громов В.В., Наумов П.Н., Петров В.К., Яковлев Ф.П., Гарин И.С., Володин О.В., Грачев А.Ф., Комаров В.П., Борисов Б.М., Теплов В.Н., Гранник И.Н., Дмитриев А.Д., Шварев В.В. Самоходное шасси “Лунохода-1” как инструмент для исследования лунной поверхности // Передвижная лаборатория на Луне “Луноход-1”. Т. II. М.: Наука, 1978. С. 25–42.
- Мануйлов К.К. Активное тепловое зондирование грунта малых небесных тел. Метод, аппаратура, испытания (Эксперимент “Термофоб”) // Препр. № 74. М.: ИПМ РАН, 2011. 19 с.
- Маров М.Я., Колесниченко А.В., Мануйлов К.К., Осипов В.П. Эксперимент ТЕРМОФОБ: прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса // Астрон. вестн. 2010. Т. 44(5). С. 422–430.
- Первые панорамы лунной поверхности. М.: Наука, 1966. 101 с.
- Первые панорамы лунной поверхности. Т. II. М.: Наука, 1969. 71 с.
- Родэ О.Д., Иванов А.В., Тарасов Л.С. Литология и стратификация колонки “Луны-24” // Лунный грунт из Моря Кризисов / Ред. Барсуков В.Л. М.: Наука, 1980. С. 51–57.
- Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
- Соминский М.С. Полупроводники. Л.: Наука, 1967. 440 с.
- Сорокин Е.М., Яковлев О.И., Слюта Е.Н., Герасимов М.В., Зайцев М.А., Щербаков В.Д., Рязанцев К.М., Крашенинников С.П. Экспериментальная модель образования нанофазного металлического железа в лунном реголите // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492(2). С. 49–52.
- Стренгвей Д.В., Пирс Г.В., Олхофт Г.Р. Магнитные и диэлектрические свойства лунных образцов // Космохимия Луны и планет / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1975. С. 712–728.
- Тихонова Т.В., Троицкий В.С. Влияние потока тепла из недр Луны на ее радиоизлучение при изменении свойств вещества в глубину // Астрон. журн. 1969. № 1. С. 159–171.
- Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунт Луны. М.: Наука, 1975. 144 с.
- Юшкова О.В., Кибардина И.Н., Дымова Т.Н. Электрофизическая модель грунта Луны // Астрон. вестн. 2020. Т. 54(6). С. 520–528.
- Basu A., McKay D.S., Wentworth S.J. A critical examination of relative concentrations of volume-correlated and surface-correlated submicron globules of pure Fe<sup>0</sup> in lunar soils // Lunar and Planet. Sci. 2003. V. 34. #1159.
- Cast P.W., Phinney W.C., Hubbard N.J. et al. Preliminary examination of lunar samples // Apollo 17. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington D.C. 1973. P. 7-1–7-45.
- Coleman P.J., Schubert G., Russell C.T., Sharp L.R. Particles and fields subsatellite magnetometer experiment // Apollo 15. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1972a. P. 22-1–22-9.
- Coleman P.J., Lichtenstein B.R., Russell C.T., Schubert G., Sharp L.R. The particles and fields subsatellite magnetometer experiment // Apollo 16. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1972b. P. 23-1–23-13.
- Dyal P., Parkin C.W., Sonett C.P. Lunar surface magnetometer experiment // Apollo 12. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1970. P. 55–74.
- Dyal P., Parkin C.W., Sonett C.P., DuBois R.L., Simmons G. Lunar portable magnetometer experiment // Apollo 14. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1971. P. 227–238.
- Dyal P., Parkin C.W., Sonett C.P. Lunar-surface magnetometer experiment. In: Apollo 15. Preliminary Science Report. NASA. Washington, D.C. 1972a. P. 9-1–9-16.
- Dyal P., Parkin C.W., Colburn D.S., Schubert G. Lunar surface magnetometer experiment. In: Apollo 16. Preliminary Science Report. NASA. Washington, D.C. 1972b. P. 11-1–11-14.
- Dyal P., Parkin C.W., Sonett C.P., DuBois R.L., Simmons G. Lunar portable magnetometer experiment // Apollo 16. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1972c. P. 12-1–12-8.
- Fang G.Y., Zhou B., Ji Y.C., Zhang Q.Y., Shen S.X., Li Y.X., Guan H.F., Tang C.J., Gao Y.Z., Lu W., Ye S.B., Han H.D., Zheng J., Wang S.Z. Lunar penetrating radar onboard the Chang’e-3 mission // Res. Astron. and Astrophys. 2014. V. 14. P. 1607–1622.
- Feng Ji., Su Y., Ding C., Xing S., Dai S., Zou Y. Dielectric properties estimation of the lunar regolith at CE-3 landing site using lunar penetrating radar data // Icarus. 2017. V. 284. P. 424–430.
- Godbee H. Thermal conductivity of magnesia, alumina and zirconia powders in air at atmospheric pressure from 200-1500 F // Ph. D. Thesis. Georgia: Georgia Inst. of Technology, 1966.
- Hagermann A., Tanaka S. Ejecta deposit thickness, heat flow, and a critical ambiguity on the Moon // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L. 19203.
- Hagfors T. Remote probing of the Moon by infrared and microwave emission and by radar // Radio Sci. 1970. V. 5. P. 189–226.
- Hemingway B.S., Robie R.A., Wilson W.H. Specific heats of lunar soils, basalt, and breccias from the Apollo 14, 15, and 16 landing sites, between 90 and 350 K // Proc. Lunar Sci. Conf. 1973. V. 4. P. 2481.
- Horz F., Carrier W.D., III, Young J.W., Duke C.M., Nagle J.S., Fryxel R. Apollo 16 special samples. Part b // Apollo 16. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1972. P. 7-24–7-54.
- Housley R.M., Grant R.W., Pation N.E. Origin and characteristics of Fe metal in lunar glass welded aggregates //

- Proc. 4 Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston, USA, 1973. P. 2737–2749.
- Housley R.M., Cirlin E.H., Grant R.W.* Solar wind and micrometeorite alteration of the lunar regolith // 5th Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston, USA, 1974. Abstr. ID: 1133.
- Keller L.P., McKay D.S.* The nature and origin of rims on lunar soil grains // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. P. 1–11.
- Lai J., Xub Y., Zhang X., Tang Z.* Structural analysis of lunar subsurface with Chang'E-3 lunar penetrating radar // *Planet. and Space Sci.* 2016. V. 120. P. 96–102.
- Langseth M.G., Clark S.P., Chute J.L., Keihm S.J., Wechsler A.E.* Heat-flow experiment // Apollo 15. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1972. P. 11-1–11-23.
- Langseth M.G., Keihm S.J., Chute J.L.* Heat-flow experiment // Apollo 17. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1973. P. 9-1–9-24.
- Langseth M.G., Keihm S.J., Peters K.* Revised lunar heat-flow values // *Proc. Lunar Sci. Conf. 7th.* 1976. P. 3143–3171.
- Linsky J.L.* Models of the lunar surface including temperature-dependent thermal properties // *Icarus.* 1966. V. 5. P. 606–634.
- Lunar surface electromagnetic properties // Surveyor VII. Preliminary Report. NASA SP-173, Washington D.C. 1968. P. 187–206.
- Mitchell J.K., Bromwell L.G., Carrier W.D., Costese N.C., Scott R.F.* Soil mechanics experiment // Apollo 14. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1971. P. 87–108.
- Mitchell J.K., Bromwell L.G., Carrier W.D., Costese N.C., Houston W.N., Scott R.F.* Soil mechanics experiment // Apollo 15. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1972a. P. 7-1–7-28.
- Mitchell J.K., Carrier W.D., Houston W.N., Scott R.F., Bromwell L.G., Durgunoglu H.T., Hovland H.J., Treadwell D.D., Costese N.C.* Soil mechanics // Apollo 16. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1972b. P. 8-1–8-29.
- Mitchell J.K., Carrier W.D., Costese N.C., Houston W.N., Scott R.F., Hovland H.J.* Soil mechanics // Apollo 17. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1973. P. 8-1–8-22.
- Muncey R.W.* Properties of the lunar surface as revealed by thermal radiation // *Australian J. Physics.* 1963. V. 16. P. 24.
- Pilbeam C.C., Vaisnys J.R.* Contact thermal conductivity in lunar aggregates // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. P. 5223–5236.
- Phillips R.J., Adams G.K., Brown W.E., Eggleton R.E., Jackson P., Jordan R., Linlor W.L., Peeples W.J., Porcello L.J., Ryu J., Schaber G., Sill W.R., Thompson T.W., Ward S.H., Zelertka J.S.* Apollo Lunar Sounder Experiment // Apollo 17. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1973. P. 22-1–22-26.
- Robie R.A., Hemingway B.S., Wilson W.H.* Specific heats of Lunar surface materials from 90 to 350 degrees Kelvin // *Science.* 1970. V. 167(3918). P. 749–750.
- Robie R.A., Hemingway B.S.* Specific heats of the lunar breccia (10021) and olivine dolerite (12018) between 90\* and 350\* Kelvin // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 1971. V. 2. P. 2361.
- Scott R.F.* Soil mechanics surface sampler experiment for Surveyor // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. № 2. P. 827–830.
- Shearer C., Nel C., Borg L. et al.* Analysis of Lunar Sample Mass Capability for the Lunar Exploration Architecture // Unpublished white paper, posted May 2007 by the Curation and Analysis Planning Team for Extraterrestrial Materials (CAPTEM). 2007. 14 p. <http://www.lpi.usra.edu/captem/>
- Simmons G.* Final report on the surface electrical properties experiment // NASA Contract NAS-11540, CSR TR-74-1. March 15, 1974. 261 p.
- Simmons G., Stmngway D., Annan P., Baker R., Bannister L., Brown R., Cooper W., Cubleyfh D., de Bettencourt J., England A.W., Groener J., Kongf J., La Torraca G., Meyer J., Nanda V., Redman D., Rossiter J., Tsang L., Urner J., Watts R.* Surface Electrical Properties Experiment // Apollo 17. Preliminary Sci. Report. NASA. Washington, D.C. 1973. P. 15-1–15-14.
- Surveyor I mission report. Part II. Scientific data and results // *Techn. Rep. JPL, Calif. Inst. Techn., Pasadena, Calif.* 1966. P. 32–1023.
- Surveyor III mission report. Part II. Scientific data and results // *Techn. Rep. JPL, Calif. Inst. Techn., Pasadena, Calif.* 1967. P. 32–1177.
- Surveyor V mission report. Part II. Scientific data and results // *Techn. Rep. JPL, Calif. Inst. Techn., Pasadena, Calif.* 1967. P. 32–1246.
- Surveyor VI mission report. Part II. Scientific data and results // *Techn. Rep. JPL, Calif. Inst. Techn., Pasadena, Calif.* 1968. P. 32–1262.
- Surveyor VII mission report. Part II. Scientific data and results // *Techn. Rep. JPL, Calif. Inst. Techn., Pasadena, Calif.* 1968. P. 32–1264.
- Tarasov L.S., Nazarov M.A., Shevaleevsky I.D., Kudryashova A.F., Gaverdovskaya A.S., Korina M.I.* Mineralogy and petrography of lunar rocks from Mare Crisium (preliminary data) // *Proc. 8th Lunar. Sci. Conf.* 1977. V. 3. P. 3333–3356.
- The lunar sample preliminary examination team. Preliminary examination of lunar samples // Apollo 12. Preliminary Sci. Report. NASA SP-235. 1970. P. 189–216.
- The lunar sample preliminary examination team. Preliminary examination of lunar samples // Apollo 15. Preliminary Sci. Report. NASA SP-289. 1972. P. 6-1–6-25.
- The lunar sample preliminary examination team. Preliminary examination of lunar samples // Apollo 17. Preliminary Sci. Report. NASA SP-330. 1973. P. 7-1–7-46.
- Toksoz N., Solomon S.* Thermal history and evolution of the moon // *The Moon.* 1973. V. 7. P. 251–278.
- Turkevich A.L. et al.* Chemical analysis of the Moon at the Surveyor VII landing site: preliminary results // *Science.* 1968. V. 162. № 3849. P. 117–118.
- Wechsler A.E., Simon I.* Thermal conductivity and dielectric constant of silicate materials // Report under contract NAS 8-20076 with A. D. Little, Inc., Cambridge, Massachusetts. 1966.
- Winter D.F., Saari J.M.* A Particulate thermophysical model of the lunar soil // *Astrophys. J.* 1969. V. 156. P. 1135.