

УДК 53.086

МИКРОСКОП–СПЕКТРОМЕТР ПРОЕКТА ФОБОС–ГРУНТ

© 2010 г. О. И. Кораблев¹, А. В. Бондаренко², И. В. Докучаев², А. Ю. Иванов¹,
О. Е. Козлов¹, В. А. Котцов¹, А. Б. Киселев¹, Ж.-П. Бибринг³, Ж.-Ж. Фурмонд³

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²ООО “Растр Технолоджи”, Россия

³IAS (Институт космической астрофизики), Франция

Поступила в редакцию 26.04.2010 г.

Микроскопия и спектроскопия являются важными методами исследований. Применение микроскопа на космических аппаратах связано с появлением возможности приближения к объекту и переходом к методам измерения *in situ*. Сочетание получения изображения с возможностью спектрального анализа формирует новый тип приборов – видеоспектрометров. В состав научного комплекса КА Фобос–Грунт входит микроскоп–спектрометр, который предназначен для детального изучения состава грунта на поверхности Фобоса.

PACS: 96.12.Kz, 96.12. Ma

Одной из основных задач посадки на Фобос спускаемого аппарата, разрабатываемого для космического проекта Фобос–Грунт, является взятие проб грунта в месте посадки, анализ его научными приборами, находящимися на борту, и доставка образцов грунта на Землю. Для реализации этой задачи спускаемый аппарат оснащен манипулятором с целым набором специальных инструментов для научных исследований, в том числе средствами наблюдения. Одним из приборов, решающих эту задачу, является микроскоп–спектрометр.

Эксперимент с микроскопом–спектрометром подготовлен специалистами Института космических исследований (ИКИ РАН) и ООО “Растр Технолоджи” в кооперации с французскими специалистами Института космической астрофизики (IAS).

Микроскопия является важным инструментом исследований структуры и компонентного состава веществ в самых разных областях. Без микроскопа невозможно представить медико-биологические исследования. Все знают, что диагноз любого заболевания начинается с анализа микроскопии крови и тканей. Широкое распространение она получила в производственном контроле качества металлов, фармацевтических препаратов, промышленных алмазов, угля. Она применяется для гранулометрического анализа при производстве всех сыпучих веществ – муки, сахара, различных смесей. Разработано множество специализированных комплексов на основе применения микроскопии (Пантелеев и др., 2005).

Микроскопия вошла также и в космические исследования. Микроскопы стали важной составной частью научной аппаратуры, которая обеспечивает

изучение тонкой структуры вещества космических тел. Их включают в состав научных приборов, которые входят в непосредственный контакт с веществом на поверхности планет. По характеру микроструктуры полевой геолог сразу может отнести горную породу к одной из трех основных категорий (вулканическая, осадочная или метаморфная) и представить предыдущие геологические процессы. Появление микроскопа на космических аппаратах связано с переходом от методов дистанционного зондирования при наблюдении с орбиты к методам *in situ*, аналогичным применяемым в лаборатории. Это в некоторой степени может заменить сложные и дорогостоящие исследования, выполняемые с доставкой образцов на Землю. Они могут дать ответы на вопросы о происхождении планет, возможности существования на них жизни. Такие исследования предваряют появление человека на поверхности планет.

Спектроскопия также является широко используемым инструментом исследования в науке и промышленности. Она позволяет определить химический состав входящих в вещество элементов, осуществлять контроль технологических процессов производства. Анализ отраженного излучения служит основой методов дистанционного зондирования с самолетов и спутников для контроля состояния полей и лесов, выявления загрязнения окружающей среды и поиска полезных ископаемых. Спектроскопия обеспечивает идентификацию составных элементов различных образований, дает возможность исследования их природы (Шмидт, 2007).

Применение ее в микроскопии обеспечивает детальный компонентный анализ элементного состава природных объектов на микроуровне. Микро-

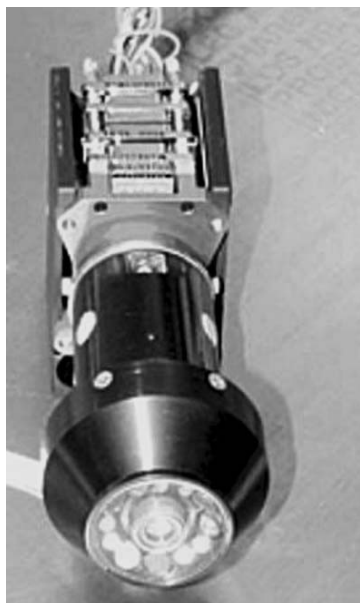


Рис. 1. Прототип микроскопа–спектрометра.

скоп–спектрометр принадлежит к новому, более эффективному классу инструментов называемых сегодня видеоспектрометрами или гиперспектрометрами, что подчеркивает качественное отличие их возможностей. Объединение этих двух методов (получение спектра в каждой точке формируемого изображения) дает принципиально новые возможности для более глубокого понимания состава и природы изучаемого объекта (Sellar и др., 2007).

Микроскоп входил в состав научного оборудования многих космических экспериментов, выполняемых на поверхностях планет в последнее время.

Микроскоп (Microscopic Imager) эффективно использовался на марсоходах Spirit и Opportunity, которые достигли марсианской поверхности в январе 2004 г. в составе американской миссии на Марс (Squyres и др., 2004). Они давали интересную информацию для сравнительных исследований различных районов планеты более четырех лет. Конструкция подвижного крепления микроскопа обеспечивала приближения его к объекту исследований. Специальный абразивный инструмент позволял удалять верхний слой горных пород с образца материала порядка 5 мм в окружности с диаметром 45 мм. Измерения выполнялись только при естественном освещении объекта. Микроскоп получал изображения поверхности грунта с разрешением 30 мкм/пиксель в спектральном диапазоне от 400 до 700 нм (Herkenhoff и др., 2004).

Космический аппарат NASA Phoenix Mars Lander успешно произвел мягкую посадку на поверхности Марса в мае 2008 г. по программе Mars Scout. На его борту находился исследовательский комплекс, включающий микроскоп, предназначенный для

изучения геологической роли воды в формировании марсианского грунта, а также исследования окружающей среды с целью выявления условий, благоприятных для жизни микроорганизмов (Staufer и др., 2006). Максимальное разрешение оптического микроскопа 4 мкм. Микроскоп снабжен системой подсветки, в ее состав входят красный, зеленый, синий и ультрафиолетовый источники, что существенно расширяет возможности исследований. Вид конструкции микроскопа–спектрометра показан на рис. 1, он служил прототипом для разрабатываемой модели.

В космическом круизе находится аппарат европейской миссии Rosetta Lander Philae, собирая информацию о формировании Солнечной системы на ранних стадиях. В процессе полета он должен выполнить наблюдения астероида Штейнс в 2009 г. и астероида Лютетия в июне 2010 г., а в 2014 г. достигнуть главной цели – кометы, открытой в 1969 г. киевскими астрономами К. Чурюмовым и С. Герасименко и названной их именем. Планируется высадка посадочного модуля на ее поверхность. Одним из основных приборов научного комплекса является оптический микроскоп, который позволит выполнить детальный анализ альбедо и микротекстуры поверхности, молекулярного и минералогического состава. Пространственное разрешение микроскопа 7 мкм в спектральном диапазоне (1–4 мкм) и спектральной выборке 5 нм позволяет идентифицировать большинство минералов, льдов и органики в каждом пикселе изображения размером 40 мкм (Vibring и др., 2007).

Инфракрасная отражательная спектроскопия дает хорошо изученный и мощный метод определения молекулярного и минералогического состава. Этот метод особенно перспективен при высоких пространственных и спектроскопических разрешениях, позволяя получать отдельные характерные спектры отдельных частиц неоднородного образца. Для микроскопа миссии Rosetta был выбран спектральный диапазон, в котором есть множество тонких, однозначно идентифицируемых спектральных профилей, которые можно использовать для определения концентрации химических компонент, составных частиц и связующих материалов образцов кометы. Позиция и форма таких профилей также позволяет судить о физическом состоянии наблюдаемых молекул.

Такие родительские молекулы как H_2O , NH_3 , NH_4SH_3 , H_2CO , CH_3OH , CH_3CN , HCN , H_2S , CO , CO_2 и CH_4 могут быть обнаружены в спектральном диапазоне 1–4 мкм. Профили спектров в основном узкие, а их вид и положение можно точно определить, что при высоком спектральном разрешении позволяет получить информацию о физическом состоянии минералов.

Наблюдения поверхности Марса, выполненные картографирующим видеоспектрометром OMEGA, который длительное время успешно работает на бор-

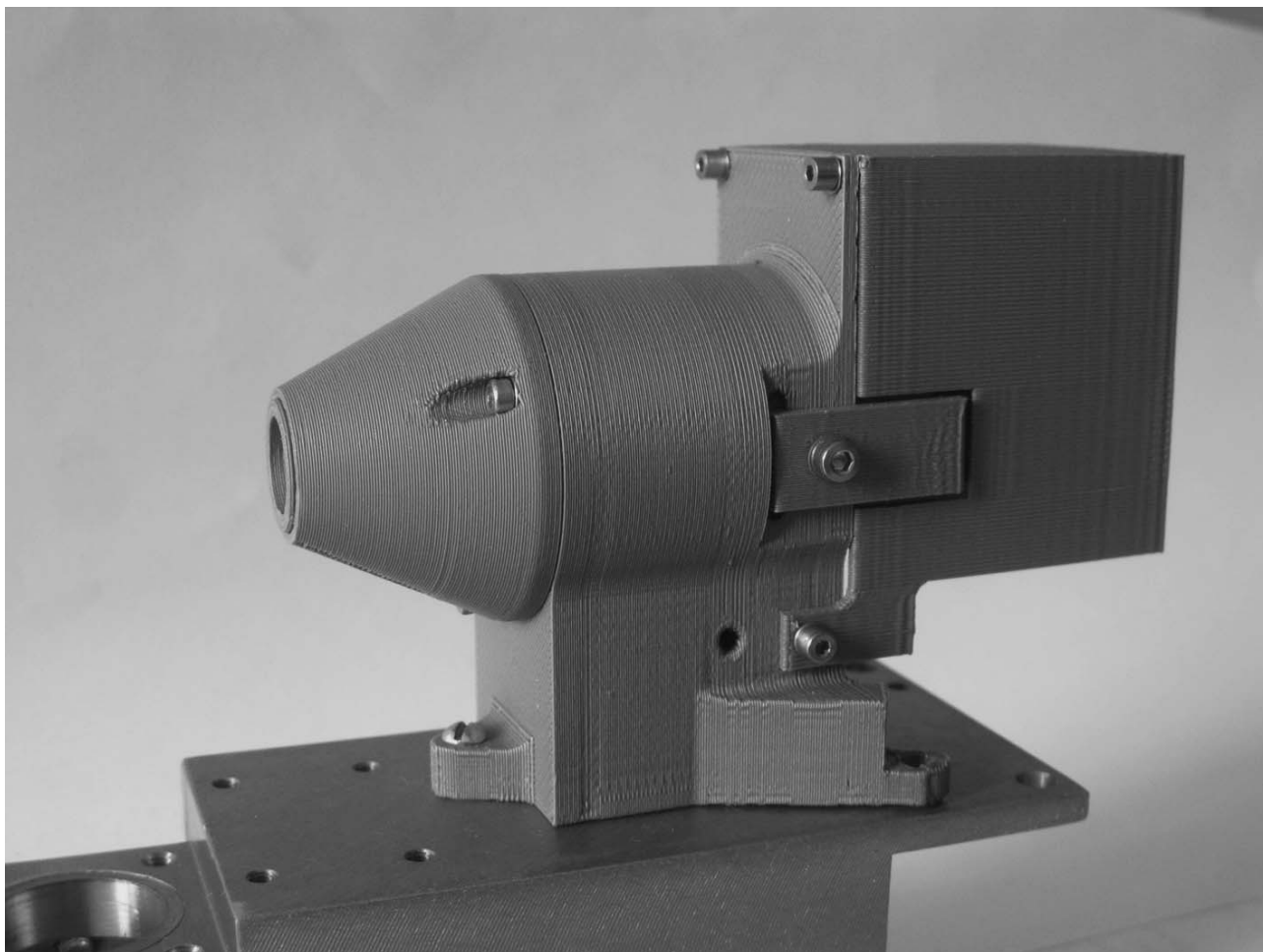


Рис. 2. Внешний вид оптического микроскопа–спектрометра для Фобоса.

ту европейского КА Mars Express, наглядно демонстрируют возможности отражающей спектроскопии (Bibring и др., 2006). В видимом и ИК-диапазоне: по полученным результатам легко обнаруживаются ледяные растворы H_2O и CO_2 ; железосодержащие силикаты, например оливин и пироксен, могут быть обнаружены благодаря их легко идентифицируемому профилю в полосах около 1 мкм и 2 мкм; гидратные минералы могут быть обнаружены по полосам 1.9 мкм и 3.0 мкм гидратной воды и выделяющейся своими металл-ОН переходами между 2 и 2.4 мкм. Видеоспектрометр позволяет проследивать их ареалы распространения в связи с природной средой.

Применение микроскопа на космическом аппарате Фобос–Грунт требует дополнительного оборудования для его обслуживания при выполнении исследований. Образец грунта необходимо выбрать, взять с поверхности и поместить в плоскость входного окна микроскопа, а затем, после выполнения наблюдений, очистить ее. Для взятия образца используется манипулятор, оснащенный механизмом захвата грунта. При этом выбор образца для иссле-

дований обеспечивается системой технического зрения. Телевизионная камера, установленная на манипуляторе, выполняет идентификацию образца грунта для взятия грунтозаборным устройством.

Микроскоп–спектрометр закреплен непосредственно у основания манипулятора. На рис. 2 показан общий вид микроскопа–спектрометра, размещенного на посадочном месте. В процессе разработки было рассмотрено несколько вариантов технологии загрузки и удаления грунта. Были предложены шнековый и щеточный варианты, вертикальное и горизонтальное размещение оси привода загрузчиков, применение разных материалов для сметания грунта. В выбранной схеме микроскоп установлен горизонтально относительно поверхности. Механическая конструкция приемного лотка, закрепленного на оси с двигателем, обеспечивает прижим образца грунта к входному окну микроскопа и последующее его удаление.

К оптической системе микроскопа предъявляются высокие требования. Она должна давать хорошее качество изображения микроструктуры образцов

грунта в рабочем диапазоне температур в вакууме. Для получения спектральной информации требуется проведение фотометрической калибровки светодиодов. Для обеспечения спектрометрии образцов на микроскопе требуется иметь хорошее пропускание в выбранном диапазоне длин волн. Объектив камеры должен работать без значимых искажений во всех пяти выбранных зонах спектра. Качество изображений должно обеспечивать правильное геометрическое совмещение снимков, полученных в разных зонах спектра. Входное окно не должно вносить искажений и иметь высокую твердость, чтобы не бояться механических повреждений частицами грунта.

Конструкция оптической части микроскопа выполнена из титана в виде конуса. В его крайней узкой части закреплено сапфировое входное окно, положение которого жестко фиксировано в плоскости фокусировки наблюдаемого объекта и термостабилизировано. Внутри самого конуса вокруг микрообъектива размещены светодиоды. Для оценки спектральных характеристик частиц грунта выбраны светодиоды пяти зон спектра со следующими эффективными длинами волн: 505, 600, 670, 750 и 880 нм. При разработке осветителя ставилось требование равномерности освещения и отсутствия зеркальных отражений внутри корпуса. Светодиоды распределены пятью симметричными группами по три светодиода с одинаковыми световыми характеристиками излучения. На рис. 3 показан электрический макет устройства со светодиодами вокруг объектива в процессе его отработки.

В фотоприемной части камеры использована ПЗС-матрица Thomson-CSF TH 888A французского производства фирмы Thomson. Применение одного твердотельного фотоприемника обеспечивает геометрически точное совмещение информации соответствующих точек в последовательности изображений, полученных для разных зон спектра.

Предусмотрена также возможность использования ИК-канала микроскопа, оптическая часть которого выполнена отдельным блоком с тем же фотоприемником. Спектральная селекция по длинам волн в этом канале обеспечивается использованием перестраиваемого осветителя на основе акустооптического фильтра.

Блок электроники представляет собой видеопроцессор с памятью, разработанный на основе ПЛМ. Он обеспечивает работу микроскопа и всех телевизионных камер системы технического зрения манипуляторного комплекса. Блок электроники осуществляет функциональный выбор устройства, управление заданной последовательностью выполнения операций съемки, обеспечивает накопление и хранение получаемой видеoinформации. В самом микроскопе он обеспечивает также управление работой светодиодов и загрузочного устройства. Информация накапливается в буферной памяти прибора и может считываться в заданное время для пе-

редачи ее на Землю. При необходимости, могут быть выполнены программы оптимизации качества, предварительной обработки и сжатия изображений. Возможно также использование программ идентификации при наведении на заданный объект как координатные метки на загрузочных лотках обслуживаемых приборов научного комплекса. Включение прибора осуществляется по подаче питания на блок электроники, а функциональный выбор осуществляется кодовой комбинацией команды управления.

Процесс наблюдений осуществляется следующим образом. По полученному обзорному стереоизображению поверхности специалисты выбирают интересующий объект и определяют его координаты. Манипулятор забирает пробу на участке поверхности, заданном координатами, контролируя выбор с помощью специальной телевизионной камеры. Затем он помещает образец грунта в приемный лоток микроскопа, засыпая предметное стекло перед объективом. Загруженный в лоток грунт закрывает внешний свет, обеспечивая условия для спектральных измерений. Образец грунта освещается снизу светодиодами, размещенными вокруг объектива. Формируемое оптическое изображение запоминается матричным фотоприемником как черно-белое изображение. Последовательное освещение анализируемого образца грунта в микроскопе светодиодами с разной длиной волны излучения дает набор из последовательности изображений. Это позволяет получить взаимно соответствующий набор оценок оптических спектральных характеристик микрочастиц составляющих компонентного состава грунта, которые характеризует их спектральные оптические свойства, определяемые природой минералогического состава, преобразуя микроскоп в видеоспектрометр. На рис. 4 показан набор изображений образца грунта, полученный в процессе подготовки прибора. После выполнения цикла наблюдений частицы грунта сметаются с предметного стекла поворотом загрузочного лотка.

В процессе наблюдения каждого образца грунта формируется трехмерный кадр, куб видеoinформации, который можно представить в виде многослойной структуры наложенных друг на друга черно-белых изображений наблюдаемого образца. Каждое из них дает монохроматическое отображение наблюдаемой пробы для длины волны, соответствующей используемому осветителю. Послойный набор значений яркости соответствующих точек формирует ее дискретную спектральную характеристику для пяти спектральных зон излучения.

Получаемая видеoinформация может быть представлена для рассмотрения в цветокодированном виде, например, выборками по три монохроматических изображения. Спектральные различия представимы в дифференциальном виде для пар изображений разных зон спектра. Для цифровой обработки видеoinформация может быть представлена в

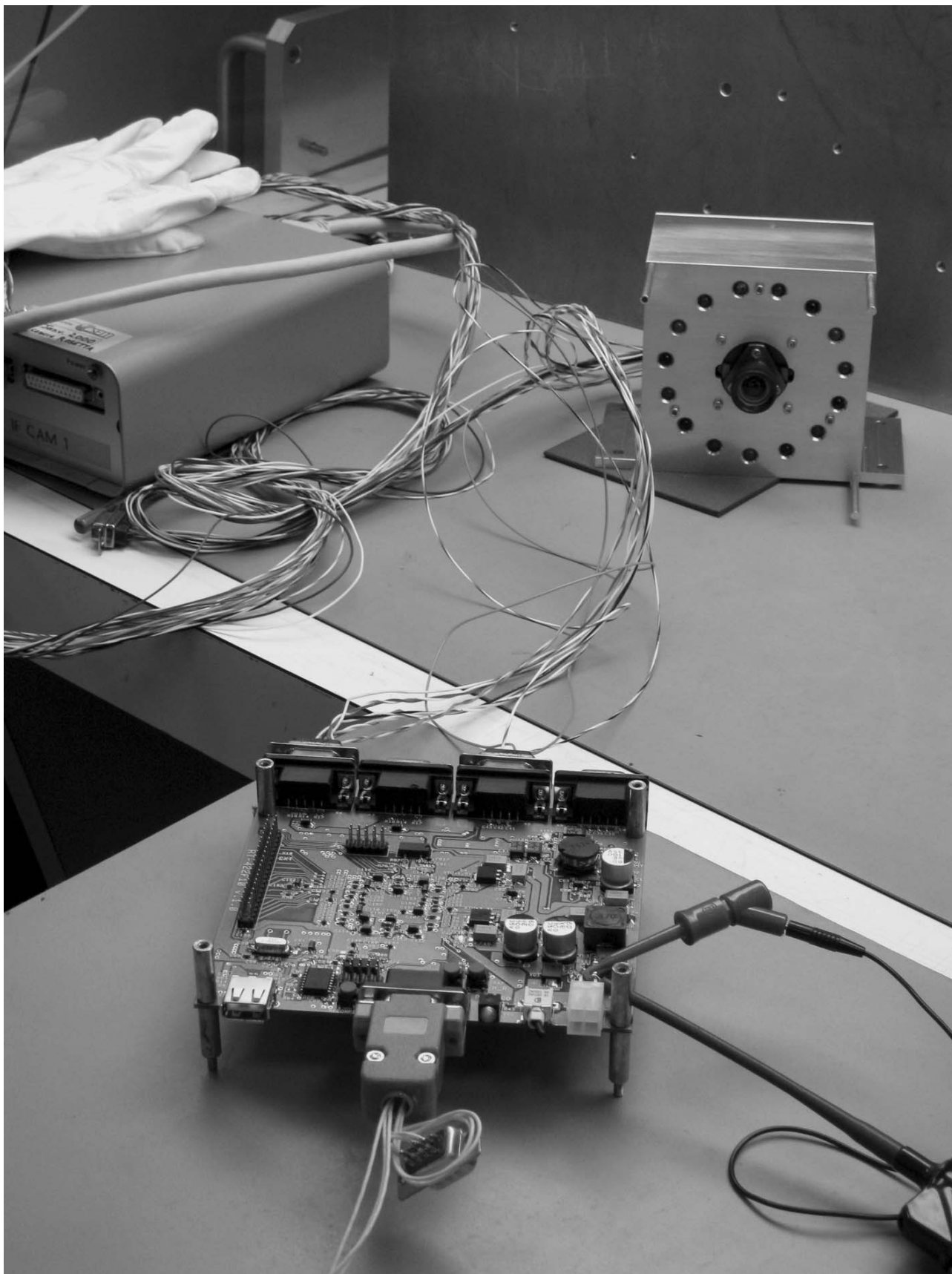


Рис. 3. Электрический макет микроскопа–спектрометра с электроникой управления на испытаниях.

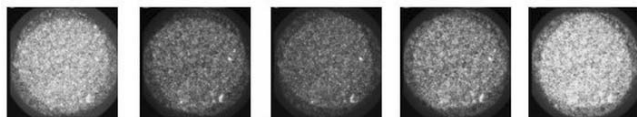


Рис. 4. Набор изображений образца грунта, полученный при освещении светодиодами с разной длиной волны.

векторной форме для многомерного векторного пространства спектральных факторов (в нашем случае пятимерного по числу светодиодов с разной длиной волны) и может анализироваться методами факторного или компонентного анализа для классификации содержания образцов грунта по спектральным классам.

При подготовке прибора выполняется настройка светимости источников излучения в микроскопе регулировкой тока в цепи питания для соответствующих групп светодиодов. Функциональная проверка работоспособности и калибровка микроскопа осуществляются по наблюдениям различных образцов с известными спектральными оптическими свойствами и оценкой правильности их идентификации.

В процессе разработки и изготовления микроскоп прошел весь требуемый цикл автономных и комплексных испытаний, включая оптические. На рис. 5 показан микроскоп–спектрометр на этапе оптических испытаний в вакуумной камере. Блок электроники также прошел цикл механических, термовакуумных и электрических испытаний. После прохождения испытаний прибор был поставлен для установки на борт КА Фобос–Грунт.

Микроскоп–видеоспектрометр подобного типа может быть использован не только в космических исследованиях. Он может быть полезен в разных областях науки и практики, требующих мобильности и оперативного контроля. В частности, он может быть использован для повышения эффективности медицинской диагностики по крови и тканям при массовых обследованиях, для автоматизации контроля производственных процессов. Аналогичная технология рассматривалась в качестве основы

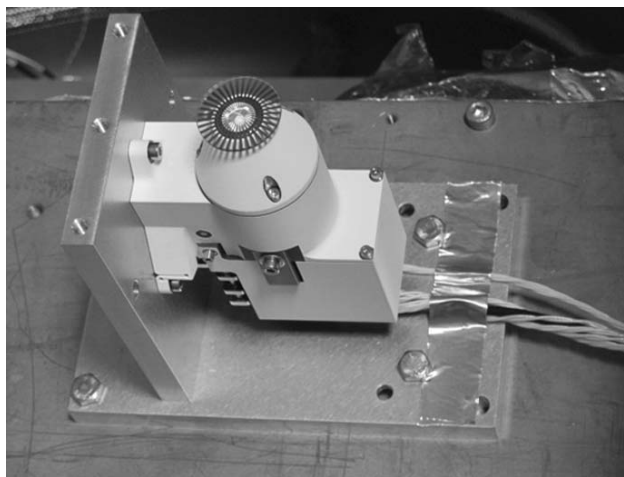


Рис. 5. Оптические испытания микроскопа–спектрометра в вакуумной камере.

для оперативного контроля качества продуктов питания в торговле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пантелеев В.Г., Егорова Д.В., Клыкова Е.И.* Компьютерная микроскопия. М.: Техносфера, 2005. С. 304.
- Шмидт В.* Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М.: Техносфера, 2007. С. 304.
- Sellar R.G., Farmer J.D., Gardner P., et al.* Improved spectrometric capabilities for in-situ microscopic imagers // Seventh International Conference on Mars. 2007.
- Squyres S.W., Arvidson R.E., Bell J.F., et al.* The Spirit rover's Athena science investigation at Gusev crater, Mars // Science. 2004. V. 305. P. 794–799.
- Herkenhoff K.E., Squyres S.W., Arvidson R., et al.* Textures of the soils and rocks at Gusev crater from Spirit's Microscopic Imager // Science. 2004. V. 305. P. 824–826.
- Staufer U., Parrat D., Gautsch S., et al.* The PHOENIX microscopy experiments // Fourth Mars Polar Science Conf. 2006.
- Bibring J.-P., Lamy P., Langevin Y., et al.* CIVA // Space Sci. Rev. 2007. V. 128. № 1–4. P. 397–412.
- Bibring J.-P., Langevin Y., Mustard J.F., et al.* Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data // Science. 2006. V. 312. P. 400–404.