

УДК 523

ЛУННЫЙ ИНФРАКРАСНЫЙ СПЕКТРОМЕТР С ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ПОДДЕРЖКОЙ РАБОЧЕГО ПОЛЯ МАНИПУЛЯТОРА (ЛИС-ТВ-РПМ)

© 2021 г. С. Н. Манцевич^{a, b, *}, Ю. С. Доброленский^a, Н. А. Евдокимова^a, О. И. Кораблёв^a, Ю. К. Калинин^c, Н. А. Вязоветский^a, И. А. Дзюбан^a, А. Г. Сапгир^a, А. В. Степанов^{a, b}, А. Ю. Титов^a, К. В. Александров^a, А. В. Бондаренко^a, И. В. Докучаев^a, М. Г. Князев^a, А. Я. Докучаев^d, Ф. В. Кулаков^d

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

^cВсероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская область, Россия

^dИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

*e-mail: manboxx@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2021 г.

После доработки 16.06.2021 г.

Принята к публикации 21.06.2021 г.

В работе представлен акустооптический лунный инфракрасный спектрометр (ЛИС), предназначенный для минералогического анализа и оценки гидратации реголита поверхности Луны вблизи посадочного модуля. Приведены его оптическая схема, характеристики, результаты калибровок и лабораторных измерений. Спектрометр ЛИС предназначен для регистрации спектра солнечного излучения, отраженного поверхностью Луны, и будет функционировать в составе комплекса научной аппаратуры посадочного аппарата Луна-25. Прибор монтируется на манипуляторе посадочного аппарата таким образом, что его поле зрения находится внутри поля зрения стереокамер телевизионной поддержки рабочего поля манипулятора (ТВ РПМ). Прибор работает в спектральном диапазоне 1.15–3.4 мкм, включающем полосы поглощения ОН/Н₂О, со спектральным разрешением порядка 25 см⁻¹. Принцип действия прибора основан на акустооптической спектральной фильтрации оптического излучения.

Ключевые слова: Луна-25, поверхность Луны, гидратация, ИК-спектроскопия, видеосъемка

DOI: 10.31857/S0320930X21060074

ВВЕДЕНИЕ

Преобладающее представление об абсолютной “сухости” лунной поверхности впервые пошатнулось с открытием повышенных концентраций водорода в полярных областях по данным нейтронного детектора КА Lunar Prospector (Feldman и др., 1998). Затем, по данным инфракрасного спектрометра МЗ на КА Chandrayaan-2 была обнаружена поверхностная гидратация реголита Луны на высоких широтах (Pieters и др., 2009). В то же время, в 2008–2009 гг. следы воды и других летучих компонентов были обнаружены в образцах лунного грунта, доставленных на Землю в ходе программы Apollo (Базилевский и др., 2012; Saal и др., 2008; Naug и др., 2009; Friedman и др., 2009). По современным представлениям, вода или гидроксильная группа ОН присутствует на Луне в трех формах: в недрах (в магматических породах), в тонком поверхностном слое реголита и, вероятно, в конденсированном виде, в полярных областях в холодных ловушках (Базилевский

и др., 2012). Вторая из этих форм – тонкий слой ОН/Н₂О на поверхности, – являясь продуктом взаимодействия солнечного ветра с верхним слоем реголита и представляя ничтожный интерес в плане практического использования, имеет большой научный интерес и является важным объектом исследования. Реголит, сохраняющий или отдающий летучие в течение лунного дня, может служить звеном гипотетического транспортного механизма, переносящего воду и другие летучие компоненты к аккумулялирующим их холодным ловушкам в постоянно затененных полярных областях. Считается, что поверхность Луны постоянно находится в состоянии динамического обмена летучими компонентами с экзосферой.

Основной идеей, стоящей за установкой прибора ЛИС на космический аппарат Луна-25, является изучение поверхностной гидратации лунного реголита посредством регистрации отраженного поверхностью Луны солнечного излучения в диапазоне длин волн от 1.15 до 3.4 мкм, включая

спектральный интервал около 3 мкм, который соответствует сильным полосам поглощения H_2O/OH в имплантированной, адсорбированной, конденсированной (лед) или связанной формах. Открытие на КА Chandrayaan-2 поверхности гидратации в ИК-диапазоне было подтверждено ИК-спектрометрами других космических аппаратов (Clark, 2009; Sunshine и др., 2009). Результаты МЗ, осложненные тем, что прибор регистрировал лишь коротковолновую часть 3-мкм полосы поглощения воды или OH группы, были подтверждены и уточнены (Clark и др., 2011; McCord и др., 2011). Недавно, по спектрам, полученным на обсерватории SOFIA в диапазоне ~ 6 мкм, удалось отождествить в составе реголита непосредственно H_2O (Honniball и др., 2021). Спектральный диапазон нашего прибора полностью перекрывает 3-мкм полосу гидратации, позволяя оценивать степень гидратации грунта вне зависимости от влияния теплового излучения поверхности. Выбранные районы посадки модуля Луна-25 (кратеры Богуславский (Ivanov, 2015) или Манцини (Ivanov и др., 2018)) не относятся к постоянно затемненным областям, и шанс обнаружить там свидетельства подповерхностных ледяных отложений невелик (Ivanov и др., 2015; Mitrofanov и др., 2012). Тем не менее эксперимент позволит в полной мере исследовать суточный цикл поверхностной воды/ OH – если таковой имеется – и охарактеризовать изменение стока летучих в течение лунного дня (Woehler и др., 2017; Grumpe и др., 2019).

Дополнительно, спектральный диапазон ЛИС может помочь провести оценку минерального состава поверхности и его разнообразие вблизи места посадки. Лунная кора в целом обеднена летучими веществами и богата тугоплавкими, что считается подтверждением ее горячего происхождения. И кора, и менее изученная мантия, обогащенная железом и магнием, сформировались на этапе океана магмы, за счет всплытия относительно более легкого плагиоклаза и опускания более плотных минералов, оливина и пироксена (Wood и др., 1970). Самым распространенным минералом лунной коры является плагиоклаз (Wiczorek и др., 2013). Крупнейшие ударные кратеры, такие как бассейн Южного полюса и Эйткена (SPA – South Pole Aitken), вероятно, проникают через кору и “опробуют” лунную мантию. Недавно луноход Yutu-2 китайского спускаемого аппарата Chang'E-4 получил свидетельства присутствия низкокальциевого ортопироксена и оливина, возможно, материалов лунной мантии на дне бассейна SPA (Li и др., 2019). Такие выводы сделаны на основе спектральных наблюдений спектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона (VNIS) 7 на борту Yutu-2 (He и др., 2019), прибора, по принципу схожего с ЛИС. Учитывая, что планируемые места посадки КА Луна-25 находятся ближе к краевой зоне SPA, можно ожидать, что преобладающими породами

на поверхности будут, прежде всего, продукты импактной переработки анортозитов, норитов, габбро и родственных пород (Pieters и др., 2001). Спектральные данные приборов на Kaguya и Chandrayaan-1 дают убедительные свидетельства региональных массивов кристаллических анортозитов (Ohtake и др., 2009; Cheek и др., 2013). ЛИС позволит провести быструю оценку преобладающего минерального состава поверхности, описать геологический контекст места посадки, а также наметить сценарии возврата проб в следующих проектах лунной программы.

В статье приведено описание приборного комплекса ЛИС-ТВ-РПМ, обоснование основных характеристик в соответствии с научными задачами, а также результаты лабораторных калибровок и измерений спектров некоторых минералов с характерными спектрами, демонстрирующих возможности прибора.

ПРИНЦИП И УСТРОЙСТВО ЛИС-ТВ-РПМ

В основе спектрометра ЛИС лежит принцип акустооптической фильтрации отраженного солнечного излучения в ИК-диапазоне спектра. Акустооптические (АО) перестраиваемые фильтры (АОПФ) нашли широкое применение при создании устройств спектрального анализа (Goutzoulis, Pape, 1994). Основной АОПФ является кристалл, на котором размещается пьезоэлектрический преобразователь. Наиболее часто применяется кристалл парателлуриата (диоксида теллура), прозрачный в диапазоне от 0.35 до 5 мкм. Через электрическую согласующую цепь на электроды преобразователя подается высокочастотный (ВЧ) сигнал с генератора электрических колебаний. Колебания пластины преобразователя создают в кристалле акустическую волну, перестраивая частоту которой, в соответствии с условием брэгговского синхронизма, можно управлять длиной волны дифрагировавшего в ультразвуковом поле светового излучения. Характеристики АО дифракции определяются выбранной геометрией и размером области взаимодействия. Высокая надежность, компактность, широкий температурный диапазон работы и малая потребляемая мощность являются основными преимуществами АОПФ, которые широко используются при создании научной аппаратуры для космических экспериментов (Bertaux и др., 2007; Pilorget, Vibration, 2013; Korablev и др., 2010; 2014; 2015; 2017; 2018), в том числе, дистанционного зондирования (Dekemper и др., 2012).

Спектрометр ЛИС состоит из двух блоков – оптического блока (ОБ) и блока электроники (БЭ), соединенных кабелем. На посадочном аппарате Луна-25 (Mitrofanov и др., 2013) спектрометр ОБ ЛИС установлен на манипуляторе, основная задача которого – взятие образцов лунного реголита для их исследования приборами научного комплекса КА Луна-25. Одной из функ-

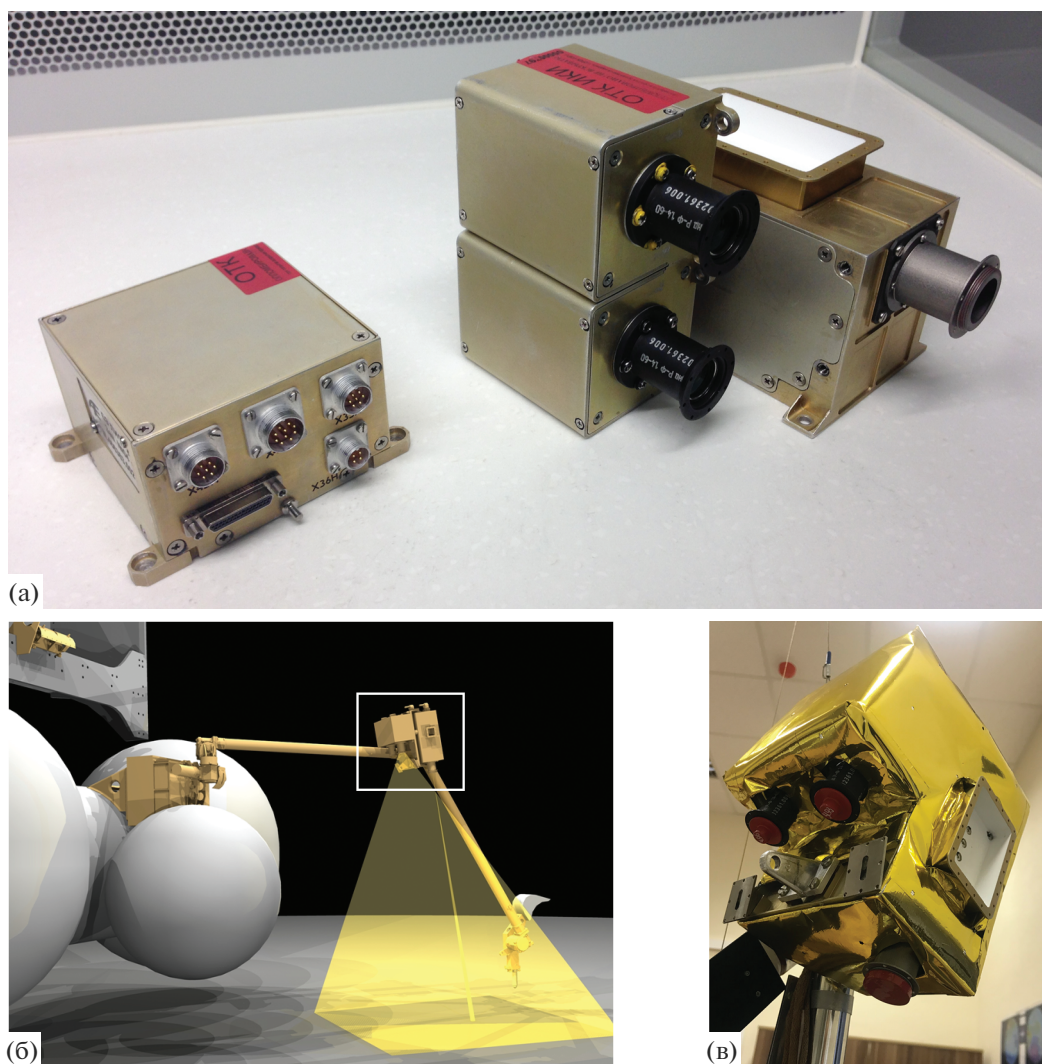


Рис. 1. (а) – фотография БЭ ЛИС (слева), камер ТВ-РПМ и ОБ ЛИС; (б) – фрагмент трехмерной модели посадочного аппарата Луна-25, показывающей манипулятор с установленной на нем ОЧ ЛИС-ТВ-РПМ (выделено белым квадратом), а также поля зрения ОБ ЛИС и ТВ-РПМ (желтые конус и пирамида соответственно); (в) – фотография ОЧ ЛИС-ТВ-РПМ в ЭВТИ, установленной на образце манипулятора для конструкторско-доводочных испытаний.

ций манипулятора является ориентация полей зрения ЛИС-ТВ-РПМ в желаемом направлении для выполнения исследования гидратации близлежащих к посадочному аппарату областей лунной поверхности. Оптический приборный комплекс размещен около центрального шарнира манипулятора таким образом, чтобы, в том числе, иметь возможность исследовать грунт в окрестности рабочего инструмента. БЭ ЛИС закреплен на корпусе аппарата. На рис. 1а приведена фотография блоков летного образца прибора ЛИС-ТВ-РПМ (слева – БЭ ЛИС, в центре – камеры ТВ-РПМ, справа – ОБ ЛИС). ОБ ЛИС и камеры ТВ-РПМ вместе образуют оптическую часть прибора ЛИС-ТВ-РПМ (ОЧ ЛИС-ТВ-РПМ). Расположение ОЧ ЛИС-ТВ-РПМ на манипуляторе, а также конфигурация полей зрения ОБ ЛИС и ТВ-РПМ представлены на рис. 1б. На рис. 1в приведена фотография ОЧ ЛИС-ТВ-РПМ

в рабочей конфигурации – на манипуляторе и в экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ).

Поскольку ЛИС является точечным спектрометром, в котором излучение со всего поля зрения регистрируется одним фотоприемником, то для привязки научных данных к местности он должен функционировать совместно с получающей изображения фотокамерой (фотокамерами). При этом поле зрения ЛИС должно находиться внутри поля зрения камеры и его положение должно быть известно с высокой точностью. Предпочтительным является наличие двух камер, образующих стереопару, т.е. позволяющих получать стереоизображение. Роль такой стереопары на космическом аппарате Луна-25 выполняют две панхроматические камеры телевизионной поддержки рабочего поля манипулятора (ТВ-РПМ).

Камеры также расположены на манипуляторе и закреплены в непосредственной близости от ОБ ЛИС. Поле зрения каждой из камер квадратное, размером $45^\circ \times 45^\circ$. Взаимное расположение полей зрения ОБ ЛИС (круглое диаметром 1°) и ТВ-РПМ показано на рис. 1б конусом и пирамидой соответственно. Детектором в камерах ТВ-РПМ служит ПЗС-матрица Кодак, содержащая 1024×1024 элемента, расположенная в фокальной плоскости объектива с эффективным фокусным расстоянием 9.8 мм и относительным отверстием 1 : 2.8.

НАУЧНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПРИБОРА

Спектральный диапазон

Как обсуждалось выше, основной научной задачей, определяющей параметры спектрометра ЛИС, является исследование гидратации лунного реголита, точнее поиск $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ -содержащих соединений и чистого водяного льда. Орбитальные спектроскопические исследования лунной поверхности показали систематическое усиление полосы поглощения в области 2.7–3 мкм от экватора к полюсам, свидетельствующее об обнаружении $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ в верхнем слое реголита (Pieters и др., 2009). Однако длинноволновый край спектрального диапазона прибора М3, выполнявшего данные измерения, резко обрывался на длине волны 3 мкм, что позволяло регистрировать только коротковолновый край полосы поглощения. Исследование дополнительно осложнялось неопределенностями, связанными с тепловым излучением поверхности Луны (Clark и др., 2011). Таким образом, требование к спектральному диапазону ЛИС состоит в том, чтобы перекрыть всю полосу гидратации, так что длинноволновый край рабочего диапазона должен быть не менее 3.3 мкм, а еще лучше 3.4 мкм. Коротковолновая граница, в идеале, должна обеспечивать детектирование широкой полосы поглощения с центром при 0.95 мкм, характерной для пироксена, оливина или закаленного стекла. Однако, во-первых, здесь вступают в силу ограничения, связанные с применением АОПФ. Дело в том, что эффективно согласовать импеданс пьезоэлектрического преобразователя АОПФ в широком диапазоне частот не представляется возможным. Во-вторых, и это является определяющим фактором, чувствительность детекторов, оптимизированных для регистрации светового излучения на длинах волн 3–4 мкм, резко падает при $\lambda < 1$ мкм. Следовательно, для эффективной работы спектрометра в коротковолновом диапазоне требуется второй детектор, например на основе InGaAs , что усложняет оптическую схему спектрометра, увеличивает его габариты и массу. Дополнительно, ограниченное спектрального диапазона длиной волны 1.1 мкм позволяет использовать оптические элементы на основе кремния. С учетом наличия второй полосы поглощения пироксена с центром при 1.95 мкм и

приоритета научных задач в полосе гидратации 3 мкм, был выбран более простой и компактный вариант прибора с одним детектором и спектральным диапазоном, перекрывающим интервал от 1.15 до 3.3 мкм.

Спектральное разрешение

Научные требования к спектральному разрешению для прибора, предназначенного для изучения поверхности Луны, дискусионны. Реальная поверхность Луны преимущественно представлена магматическими породами, не содержащими, в своем составе $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ (за исключением, быть может, амфибола), спектры поглощения которых содержат гладкие и достаточно широкие полосы поглощения породообразующих минералов, для регистрации которых достаточно спектрального разрешения 10–20 нм. Например, разрешение орбитальных приборов, предназначенных для решения сходных научных задач, составляет 10 нм для М3, 15–20 нм для OMEGA и ~14 нм для CRISM (Pieters и др., 2009; Bibring и др., 2006; Ehlmann и др., 2008). При измерении спектра с близкого расстояния, как запланировано в случае ЛИС, пространственное разрешение оказывается на порядок выше, чем у аналогичных орбитальных приборов. Широкая полоса поглощения около 3 мкм и остальные относительно узкие полосы поглощения $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ должны увереннее детектироваться в условиях Луны (по сравнению с Землей и Марсом) – при отсутствии там атмосферного поглощения.

В предельном случае, как планировалось для инфракрасного микроскопа-спектрометра MicroOmega (Pilorget, Bibring, 2013; Bibring и др., 2017a; 2017b), спектры чистых минералов с узкими линиями наблюдаются в масштабе зерен. Спектральное разрешение прибора MicroOmega, определяемое монохроматическим освещением, составляет 20 см^{-1} в диапазоне 0.9–3.5 мкм, или ~1.6 нм на длине волны 0.9 мкм и ~25 нм на длине волны 3.5 мкм. Учитывая, что поле зрения ЛИС будет охватывать площадь поверхности ~3 см^2 и более, участок грунта или образец в поле зрения будет, скорее всего, включать смесь нескольких минералов. Поэтому для спектрометра ЛИС было выбрано несколько более грубое приведенное спектральное разрешение 25 см^{-1} , что соответствует 3.3 нм на длине волны 1.15 мкм, 16 нм на 2.5 мкм и 30 нм на 3.45 мкм. Также, такой выбор позволяет улучшить отношение сигнал/шум и сократить время экспозиции, что важно при работе в условиях недостаточного освещения.

Чувствительность и время измерения

Стационарные или мобильные научные платформы хорошо подходят для длительных измерительных операций, как правило, обеспечивая значительное время накопления. Это является

особенно важным фактором для АО приборов, поскольку они регистрируют спектр последовательно, перестраивая частоту ультразвука в пределах заданного диапазона. Минимальное время измерения одной спектральной точки не может быть меньше времени распространения акустической волны по всей длине АОПФ. В ЛИС оно составляет порядка 20 мкс. Реальное минимальное время измерения составляет 1 мс за счет задержек управляющей электроники АОПФ и детектора. Кроме того, автоматическое вычитание темнового тока фотоприемника для каждой спектральной точки требует его измерения с той же длительностью. Таким образом, на полное измерение на одной частоте ультразвука необходимо минимум 2 мс. Время полного измерения одной точки ограничено сверху величиной 200 мс без учета усреднения, величина которого может изменяться в пределах от 1 до 256. Измерение с большим количеством усреднений и большей экспозицией в условиях слабого освещения требует значительного времени.

Максимальное количество измеряемых точек во всем спектральном диапазоне ЛИС составляет 5900. Минимальное их число можно оценить, следуя теореме Котельникова. При условии, что спектральный диапазон прибора от 1.15 до 3.3 мкм ($3030\text{--}8696\text{ см}^{-1}$), а спектральное разрешение 25 см^{-1} , получим 453 точки (512 с учетом запаса и удобства управления). В таком случае, если время экспозиции для каждой точки, с учетом усреднения, выбрать равным 1 с, то на измерение всего спектра потребуется 8.5 мин.

Спектры будут измеряться для различных ориентаций ОБ ЛИС. При этом сначала изображение исследуемой области поверхности Луны будет получено при помощи камер ТВ-РПМ, а обработка данных ЛИС будет сопровождаться построением трехмерной модели поверхности с учетом распределения освещенных и теневых участков. Продолжительность измерения одного спектра составляет не менее 2.5 мин; оптимальное время, по оценкам, составляет около 8 мин.

Орбитальные измерения коэффициента отражения лунного реголита дают значения от 5–7% на коротковолновой границе спектрального диапазона ЛИС до 15–25% на длине волны 3 мкм (Ohtake и др., 2013), а спектральная яркость лунной поверхности меняется от 10–25 до $\sim 1\text{ Вт м}^{-2}\text{ мкм}^{-1}\text{ ср}^{-1}$ соответственно (Pieters и др., 2013). Угол падения солнечного излучения в приполярных областях будет намного больше, чем типичный угол при орбитальных наблюдениях. Однако области измерений на поверхности будут выбраны после анализа изображений с камеры, и мы ожидаем, что разнообразие форм рельефа в местном масштабе компенсирует влияние угла падения солнечных лучей. В любом случае, ожидаемую яркость возможно оценить только с точностью до порядка, учитывая разнообразие фазовых углов, альbedo и пористости поверхности.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Оптическая схема

Оптическая схема, использованная в ОБ ЛИС (рис. 2), типична для АО спектрометров (Vertaux и др., 2007; Korablev и др., 2014). Входной оптический блок состоит из отражательного ахроматического входного телескопа с фокусным расстоянием 52 мм, включающего корректор (1) и два зеркала – сферическое (3) и плоское. Диаметр входного отверстия телескопа равен 20 мм. Диафрагма поля зрения (2) диаметром 1 мм обеспечивает угловую апертуру поля зрения в 1° . АОПФ (6), изготовленный на основе кристалла парателлурифта, помещен в квазипараллельный световой пучок между парой коллимирующих линз (4, 8) и парой поляризаторов (5, 7). Выходная коллимирующая линза (8) служит фокусирующим элементом для детектора (9). Детектор представляет собой одноэлементный InAs фотодиод Hamamatsu P10090-21, термоэлектрически охлаждаемый двухступенчатым охладителем Пельтье.

В АОПФ использована широкоугольная геометрия АО взаимодействия (Voloshinov, 1993). Диапазон перестройки частоты ультразвука 23–82 МГц позволяет перекрыть спектральный диапазон оптического излучения от 1.15 до 3.3 мкм. Селекция длины волны дифрагированного светового излучения осуществляется посредством перестройки частоты ультразвука. Падающая световая волна в кристалле является обыкновенной, а дифрагированная – необыкновенной (анизотропная брэгговская дифракция). Угол между прошедшим и дифрагированным оптическими лучами на выходе из АО кристалла составляет 6° . Пара поляризаторов со скрещенными плоскостями поляризации используется для подавления нулевого порядка дифракции.

Механическое исполнение

Как уже упоминалось, ЛИС состоит из двух блоков – блока электроники (БЭ) и оптического блока (ОБ), соединенных межблочным кабелем. ОБ ЛИС расположен непосредственно на манипуляторе, а БЭ ЛИС закреплен на корпусе посадочного аппарата, что позволяет уменьшить нагрузку на манипулятор. При этом во избежание наводок по кабелю не должны передаваться сигналы высокой частоты и слабые сигналы, поэтому ОБ включает не только оптическую часть, но также платы синтезатора радиочастоты и усилителя для АОПФ, а также платы интерфейсов и фотоприемника. БЭ содержит только элементы питания для ЛИС и ТВ-РПМ.

Внутреннее устройство ОБ ЛИС приведено на рис. 3. Здесь представлены входная бленда, корпус объектива, АО модуль в составе плат управления, синтезатора частоты и усилителя и АО кристалла. В прорезях механического крепления АОПФ можно увидеть оправки поляризаторов,

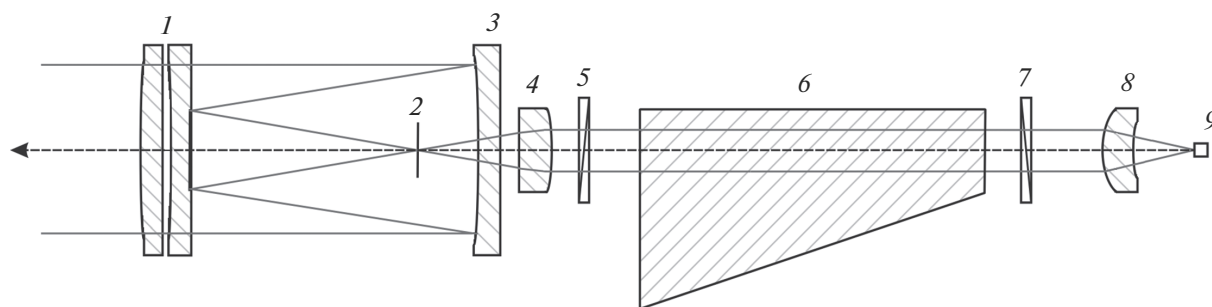


Рис. 2. Оптическая схема ОБ ЛИС. 1, 3 – входной телескоп; 2 – диафрагма поля зрения; 4, 8 – коллимирующие линзы; 5, 7 – поляризаторы; 6 – АОПФ; 9 – фотоприемник.

коричневым цветом отмечены плата интерфейсов и плата фотоприемника.

Результаты калибровок

Для управления длиной волны дифрагированного светового излучения в АОПФ используют перестройку частоты ультразвука. При этом между частотой ультразвука и длиной волны света существует однозначная связь определяемая выражением (Mantsevich и др., 2015; 2019):

$$f = \frac{V(T)}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_d^2 - n_i^2 \sin^2 \vartheta_B} - n_i \sin \vartheta_B \right\}, \quad (1)$$

где f – частота ультразвука, λ – длина волны светового излучения, V – скорость ультразвуковой волны вдоль выбранного направления в кристалле, определяемого величиной угла среза, T – температура кристалла, $n_i = n_o$ – показатель преломления среды для падающей световой волны (так как падающая волна является о-волной), n_d – показатель преломления для дифрагированной световой волны, T – температура, ϑ_B – угол Брэгга.

Определяющая соотношение между частотой ультразвука и длиной волны света зависимость (1) называется дисперсионной, или перестроечной кривой. Можно использовать соотношение (1), но более точные результаты дает проведение

спектральных калибровок, при которых значения частот АО синхронизма непосредственно измеряются для набора длин волн оптического излучения в спектральном диапазоне АО спектрометра, а затем интерполируются, с использованием параметрических аппроксимаций.

Дисперсионная кривая летного образца спектрометра ЛИС приведена на рис. 4. Измерения частот синхронизма проводились для длин волн излучения гелий-неонового лазера 1.15, 1.52 и 3.39 мкм, а также полупроводниковых лазеров с распределенной обратной связью. Экспериментальные данные отмечены на рис. 4 кружками. Аппроксимация экспериментальных данных проводилась с помощью гиперболической зависимости:

$$f = a - \frac{b}{(1 + c\lambda)^{1/d}}, \quad (2)$$

где $a = 222.8$, $b = -18685.6$, $c = 0.120$, $d = 0.782$ – коэффициенты аппроксимации, а длина волны λ измеряется в нм.

Проведенные измерения показали, что перестройка частоты ультразвука от 23 до 82 МГц позволяет перестраивать длину волны светового излучения от 3.67 до 1.11 мкм.

Еще одним важным моментом при проведении оптических калибровок АО спектрометров является измерение аппаратных функций прибора при различных длинах волн светового излучения. Спектр, регистрируемый установленным после АО фильтра фотоприемником, определяется выражением:

$$S(\lambda) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I_d(\lambda - \lambda_0) I_i(\lambda_0) d\lambda_0}{\int_{-\infty}^{\infty} I_d(\lambda - \lambda_0) I_c(\lambda_0) d\lambda_0}, \quad (3)$$

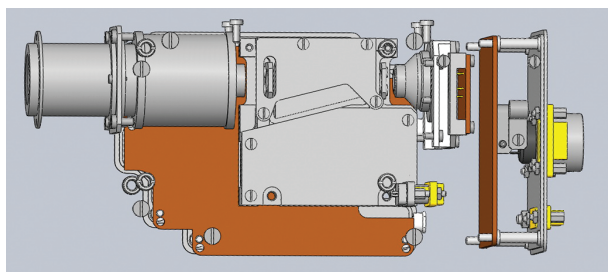


Рис. 3. Внутреннее устройство ОБ ЛИС.

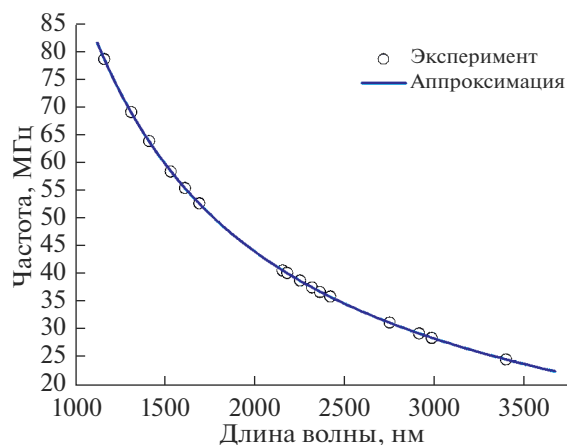


Рис. 4. Дисперсионная кривая ШО ЛИС.

где $I_i(\lambda)$ – непрерывный спектр падающего оптического излучения, $I_d(\lambda)$ – функция пропускания АОФФ, λ_0 – центральная длина волны функции пропускания, λ – переменная длина волны. Таким образом, форма функции пропускания определяет искажение спектра на выходе устройства.

Кроме того, спектральное разрешение АО спектрометра определяется по полуширине (ширине на половине высоты) основного максимума аппаратной функции.

На рис. 5 представлены результаты измерений функции пропускания АО спектрометра ЛИС для трех монохроматических длин волн оптического излучения: 1.15, 1.52 и 3.39 мкм. Значения уровня сигнала по вертикали нормированы на максимальную величину сигнала фотоприемника, по горизонтали отложена частота ультразвука в кГц.

Измерение аппаратной функции позволяет определить величину полосы пропускания в кГц, которая в первом приближении является инвариантом относительно длины волны, и пересчитать ее в см^{-1} . Для длин волн светового излучения 1.15 и 1.52 мкм полоса пропускания составила 180 кГц, а для 3.39 мкм – 185 кГц, что, в пределах погрешности дает значение спектрального разрешения 19 см^{-1} . Частоты акустооптического синхронизма для указанных длин волн оптического излучения оказались равными 79.20, 58.82 и 25.15 МГц соответственно.

Как следует из выражения (1), скорость акустической волны зависит от температуры среды АО взаимодействия (Silvestrova и др., 1981); следовательно, от температуры зависит и значение частоты АО синхронизма, а одной и той же частоте ультразвука, при разных температурах, будут соответствовать различные длины волн дифрагированного светового излучения (Mantsevich и др., 2015; 2019). При этом предполагается, что ОБ ЛИС должен функционировать в диапазоне температур от -40 до $+50^\circ\text{C}$ без температурной ста-

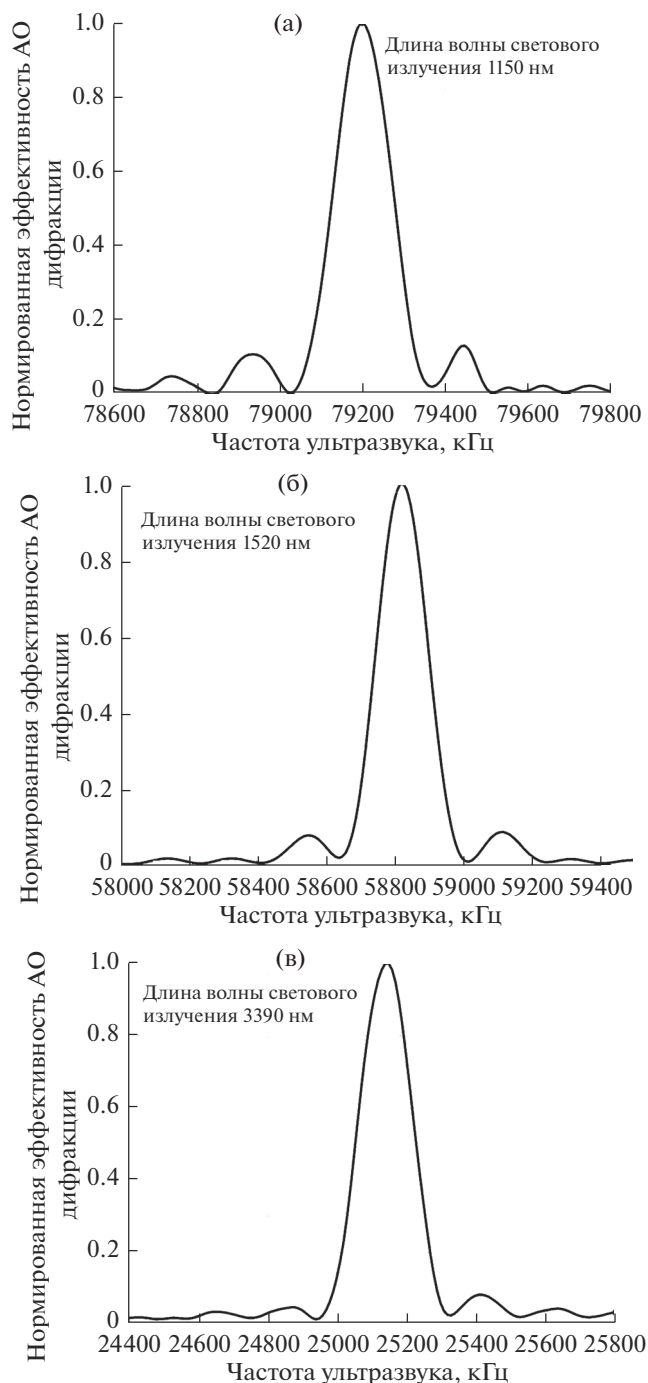


Рис. 5. Аппаратные функции ЛИС для трех длин волн оптического излучения: 1.15 мкм (а); 1.52 мкм (б); 3.39 мкм (в).

билизации. Для изучения вопроса влияния температуры на частоту АО синхронизма и форму аппаратных функций ЛИС были проведены испытания в термовакуумной камере, в которых измерялись сдвиги частоты АО синхронизма для трех длин волн оптического излучения, соответ-

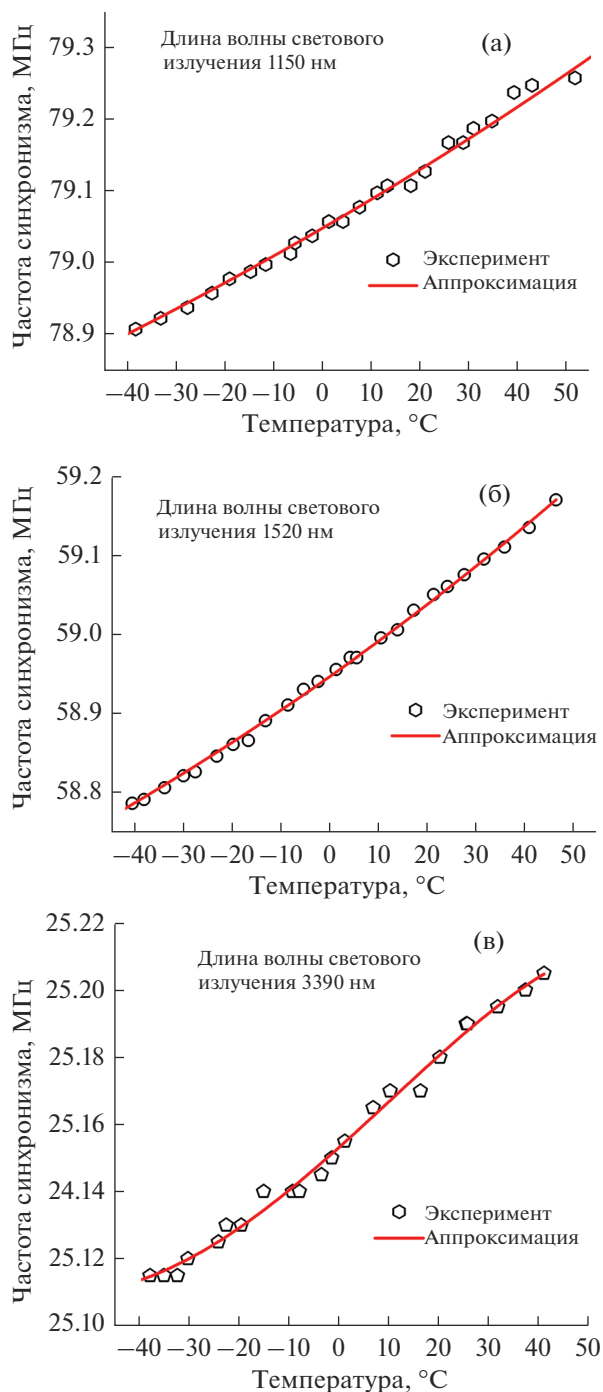


Рис. 6. Изменение частоты АО синхронизма с температурой для трех длин волн оптического излучения: (а) – 1.15 мкм, (б) – 1.52 мкм, (в) – 3.39 мкм.

ствующих краям и середине рабочего диапазона прибора (рис. 6). Такие измерения позволяют скорректировать дисперсионные кривые АО фильтра во избежание ошибок при обработке научных результатов.

По теории АО взаимодействия, зависимость частоты синхронизма от температуры должна иметь линейный вид (Mantsevich и др., 2019); на-

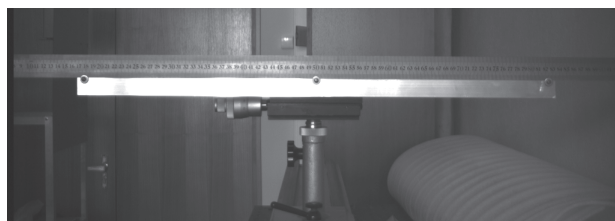
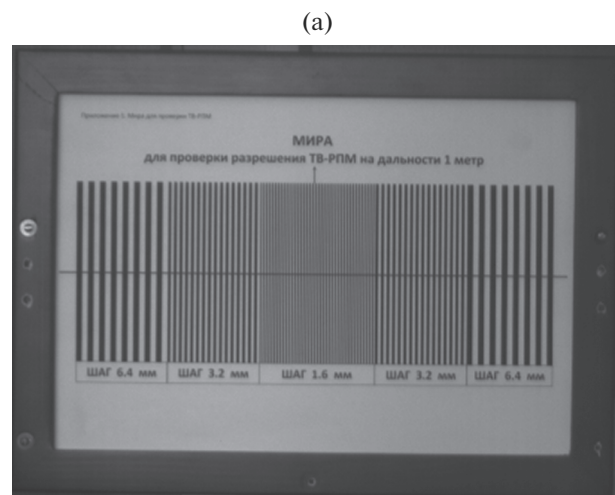
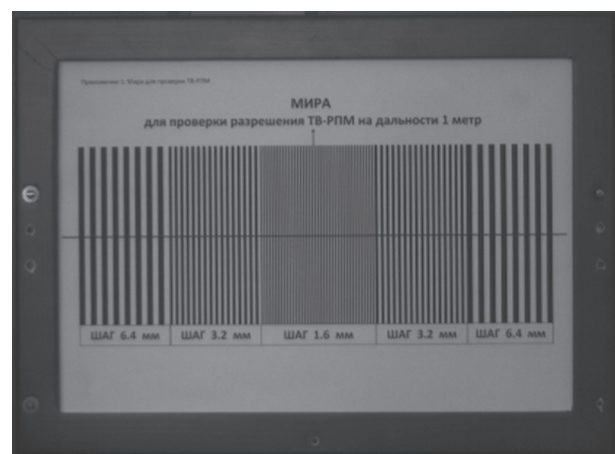


Рис. 7. Измерение поля зрения ТВ РПМ-1.



(а)



(б)

Рис. 8. Изображения мир для определения пространственного разрешения; (а) – ТВ РПМ-1, (б) – ТВ РПМ-2.

блюдаемые в эксперименте отклонения от линейного закона объясняются неравномерным нагревом акустооптического кристалла.

Измерения показали, что для длины волны оптического излучения 1.15 мкм частота синхронизма изменяется на 350 кГц при изменении температуры от +50 до -40 °C (температурный коэффициент сдвига 3.9 кГц/К). При этом полуширина

Основные характеристики ЛИС-ТВ-РПМ

Характеристика	Значение
Масса ОБ ЛИС, кг	0.74
Масса БЭ ЛИС, кг	0.315
Масса ТВ РПМ-1 и ТВ РПМ-2, кг	0.383 каждый
Суммарная масса соединительных кабелей, кг	0.63
Потребляемая ЛИС мощность в холостом режиме, Вт	4.9
Потребляемая ЛИС мощность в режиме измерений, Вт	10.3
Потребляемая ТВ РПМ мощность в холостом режиме, Вт	3.6
Потребляемая ТВ РПМ мощность в режиме измерений, Вт	3.7
Спектральный диапазон работы ОБ ЛИС, мкм	1.11–3.67
Спектральное разрешение ОБ ЛИС, см ⁻¹	19 ± 2
Поле зрения ОБ ЛИС, угл. град	1.03 ± 0.02
Угловое поле зрения ТВ РПМ-1, ТВ РПМ-2, угл. град	45.7° × 45.7° 44.9° × 44.9°
Диапазон спектральной чувствительности, мкм	0.40–0.95
Пространственное разрешение ТВ РПМ-1 и ТВ РПМ-2 на расстоянии 1 м, мм	0.8
Пространственное разрешение, пиксели	1000 × 1000
Физический размер пикселя, мкм	7.4 × 7.4
Количество градаций серого	4096 (при 12 бит)/256 (при 8 бит)
Физический размер кадра для каждого фотоприемного устройства, МБ	2 при 12 бит оцифровки 1 при 8 бит оцифровки

аппаратной функции составляет около 180 кГц. Для длины волны 1.52 мкм сдвиг частоты синхронизма для того же диапазона температур равен 400 кГц (4.4 кГц/К), для длины волны 3.39 мкм – 95 кГц (1.05 кГц/К).

Поскольку ЛИС не является видеоспектрометром, то без наличия фотокамеры не представляется возможным определить, спектр какого объекта он измеряет. Роль такой фотокамеры исполняет ТВ РПМ. При этом в ходе наземных калибровок проводятся операции, позволяющие определить положение поля зрения ЛИС в поле зрения обеих камер ТВ РПМ. Также в ходе наземных калибровок определялись размеры полей зрения и пространственное разрешение камер ТВ РПМ.

Изображение с камеры ТВ РПМ-1, полученное в процессе измерений поля зрения, приведено на рис. 7.

Изображения с камер ТВ РПМ-1 и ТВ РПМ-2, полученные при их измерении пространственного разрешения, показаны на рис. 8.

Основные характеристики ЛИС и ТВ РПМ приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ МИНЕРАЛОВ

Далее приведем результаты лабораторных измерений спектров отражения некоторых минера-

лов (хлорит IGE6028, магнезит IGE5864 и нонтронит M757), измельченных до порошкообразного состояния. В экспериментах образцы освещались галогеновой лампой ThorLabs SLS202L, падающее световое излучение направлялось перпендикулярно поверхности образца, а отраженное регистрировалось ОБ ЛИС, ориентированным под углом 45° к поверхности.

Сопоставление измеренных спектров с библиотечными из спектральной библиотеки орбитального ИК-спектрометра CRISM (КА MRO) приведено на рис. 9. Здесь по горизонтальной оси отложены длины волн, в диапазоне от 1.15 до 3.3 мкм, а по вертикальной – коэффициент отражения.

В качестве образцов для измерений были выбраны минералы, имеющие сильные полосы поглощения в спектральном диапазоне работы ЛИС.

Библиотечные спектры нонтронита NDJB26 (спектральная библиотека CRISM), как и спектры аналогичного образца M757, измеренные LIS (рис. 9а), проявляют сильные гармоники колебаний молекул гидроксила и воды возле 1.41 мкм и комбинированные полосы поглощения воды около 1.92 мкм (Bishop и др., 2008).

В районе 2.2–2.5 мкм нонтронит (как и остальные смектиты) имеет набор комбинированных полос поглощения, связанных с группой ОН (Bishop и др., 2008). Они могут быть отождествле-

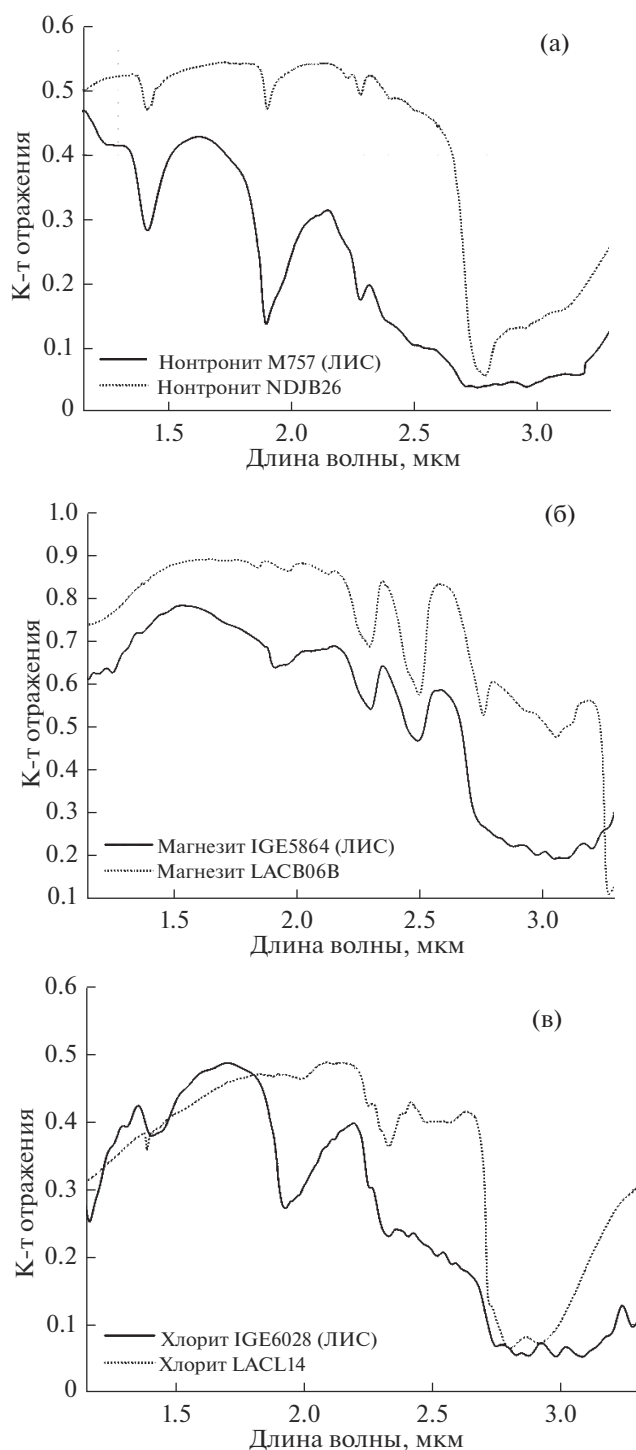


Рис. 9. Сопоставление измеренных и библиотечных спектров отражения минералов; (а) – нонтронит, (б) – магнезит, (в) – хлорит.

ны на приводимых спектрах – библиотечном и полученном спектрометром ЛИС (2.238, 2.286, 2.4 и на 2.5 мкм).

Библиотечный спектр магнезита LACB06B (спектральная библиотека CRISM), как и спектр

аналогичного образца IGE5864, измеренный ЛИС (рис. 9б), демонстрируют сильные полосы поглощения на длинах волн 2.3 и 2.5 мкм. Эти полосы являются гармониками фундаментальных валентных и вращательных колебаний С–О (Hunt, Salisbury, 1971). Кроме того, на библиотечном спектре присутствуют слабые полосы около 1.846, 1.97 и 2.13 мкм, при этом на спектре, полученном ЛИС, полоса 1.846 мкм не отождествляется, а вклад полос 1.97 и 2.13 мкм едва заметен. В данном спектральном диапазоне доминирует полоса поглощения на 1.9–2.0 мкм, по всей видимости, связанная со вкладом адсорбированной воды.

Библиотечный спектральный коэффициент отражения образца хлорита LACL14 (рис. 9в) имеет узкую слабую полосу около 1.39 мкм, которая, по-видимому, обусловлена валентными колебаниями гидроксильной группы (Mg_2OH) (Bishop, 2005; Bishop и др., 2008). Поглощение в районе 2 мкм, вероятно, обусловлено поглощением адсорбированной воды. На спектре образца IGE6028, полученном спектрометром ЛИС, широкие полосы поглощения с минимумами в районе 1.41 и 1.91 мкм связаны с присутствием большего, чем на библиотечном спектре, количества адсорбированной воды. На обоих спектрах (рис. 9в) наблюдается полоса поглощения на 2.33 мкм, наличие которой вызвано комбинированными колебаниями Mg_3-OH (Bishop и др., 2008). Очень слабые полосы поглощения в спектре, измеренном ЛИС в интервале 2.36–2.6 мкм и полоса на том же интервале в библиотечном спектре, вероятно, соответствуют слабым комбинационным полосам ОН, связанными с катионами Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} .

Спектры нонтронита и хлорита содержат также широкую насыщенную полосу поглощения воды с минимумом на 2.7 мкм, обусловленную, в первую очередь, валентными колебаниями гидроксил-группы ОН. Кроме того, вклад в поглощение в этой части спектра дают вращательные полосы поглощения H_2O на 3.1 мкм. Спектр магнезита также содержит в этой области полосу с минимумом на длинах волн больших 3 мкм, связанную с присутствием адсорбированной воды. Присутствие воды затрудняет использование спектральных признаков при $\lambda > 2.7$ мкм для отождествления минералов при помощи прибора ЛИС в лабораторных условиях.

Различная форма спектров, измеренных ЛИС, и спектров из спектральной библиотеки может быть объяснена в первую очередь различиями в микроструктуре библиотечных и исследуемых образцов (включая различия в степени дробления и форме частиц), разной геометрией измерений, а также присутствием разного рода примесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано описание акустооптического спектрометра ЛИС, оптический блок которого будет располагаться совместно с камерами ТВ РПМ

на манипуляторе посадочного аппарата Луна-25. Приведены его основные характеристики и результаты спектральных и температурных калибровок.

Сопоставление результатов лабораторных измерений спектров некоторых минералов с библиотечными данными показало, что выбранные характеристики позволяют получать достоверные спектральные данные для решения поставленных научных задач по исследованию минералогического состава лунного реголита и его гидратации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А. Т., Абдрахимов А. М., Дорофеева В. А. Вода и другие летучие на Луне (обзор) // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 2. С. 99–118. (Basilevsky A. T., Abdrakhimov A. M., Dorofeeva V. A. Water and other volatiles on the moon: A review // *Sol. Syst. Res.* 2012. V. 46. P. 89–107.)
- Кораблев О. И., Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Иванов А. Ю., Козлов О. Е., Котицов В. А., Киселев А. Б., Бибринг Ж.-П., Фурмонд Ж.-Ж. Микроскоп-спектрометр проекта “Фобос-Грунт” // *Астрон. вестн.* 2010. Т. 44. № 5. С. 431–436. (Korablev O. I., Ivanov A. Y., Kozlov O. E., Kottsov V. A., Kiselev A. B., Bondarenko A. V., Dokuchaev I. V., Bibring J. -P., Fourmond J. -J. Microscope spectrometer for the Phobos-Grunt mission // *Sol. Syst. Res.* 2010. V. 44. № 5. P. 403–408.)
- Bertaux J., Nevejans D., Korablev O., Villard E., Quémerais E., Neefs E., Montmessin F., Leblanc F., Dubois J. P., Dimarellis E., Hauchecorne A., Lefèvre F., Rannou P., Chaufray J. Y., Cabane M., Cernogora G., Souchon G., Semelin F., Reberac A., Van Ransbeek E., Berkenbosch S., Clairquin R., Muller C., Forget F., Hourdin F., Talagrand O., Rodin A., Fedorova A., Stepanov A., Vinogradov I., Kiselev A., Kalinnikov Yu., Durry G., Sandel B., Stern A., Gérard J. C. SPICAV on Venus Express: Three spectrometers to study the global structure and composition of the Venus atmosphere. // *Planet. and Space Sci.* 2007. V. 55. № 12. P. 1673–1700.
- Bibring J.-P., Langevin Y., Mustard J.F., Poulet F., Arvidson R., Gendrin A., Gondet B., Mangold N., Pinet P., Forget F., Berthé M., Gendrin A., Gomez C., Gondet B., Jouglet D., Poulet F., Soufflot A., Vincendon M., Combes M., Drossart P., Encrenaz T., Fouchet T., Mercurio R., Belluci G. C., Altieri F., Formisano V., Capaccioni F., Cerroni P., Coradini A., Fonti S., Korablev O., Kottsov V., Ignatiev N., Moroz V., Titov D., Zasova L., Loiseau D., Mangold N., Pinet P., Douté S., Schmitt B., Sotin C., Hauber E., Hoffmann H., Jaumann R., Keller U., Arvidson R., Mustard J.F., Duxbury T., Forget F., Neukum G. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data // *Science.* 2006. V. 312. № 5772. P. 400–404.
- Bibring J.-P., Hamm V., Pilorget C., Vago H.L., and the *MicrOmega Team.* The *MicrOmega* Investigation Onboard *ExoMars* // *Astrobiology.* 2017. V. 17. № 1–2. P. 621–626.
- Bibring J.-P., Hamm V., Langevin Y., Pilorget C., Arondel A., Bouzit M., Chaigneau M., Crane B., Darié A., Evesque C., Hansotte J., Gardien V., Gonnod L., Leclach J.-C., Meslier L., Redon T., Tamiatto C., Tosti S., Thoeres N. The *MicrOmega* Investigation Onboard *Hayabusa 2* // *Space Sci Rev.* 2017. V. 208. P. 401–412.
- Bishop J.L. Hydrated minerals on Mars // *Adv. in Astrobiology and Biogeophysics.* 2005. V. 4. P. 65–96.
- Bishop J.L., Lane M.D., Dyar M.D., Brown A.J. Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas // *Clay Minerals.* 2008. V. 43. № 1. P. 35–54.
- Cheek L.C., Donaldson Hanna K.L., Pieters C.M., Head J.W., Whitten J.L. The distribution and purity of anorthosite across the Orientale basin: New perspectives from Moon Mineralogy Mapper data // *J. Geophys. Res. Planets.* 2013. V. 118. P. 1805–1820.
- Clark R.N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon // *Science.* 2009. V. 326. № 5952. P. 562–546.
- Clark R.N., Pieters C.M., Green R.O., Boardman J.W., Petro N.E. Thermal removal from near-infrared imaging spectroscopy data of the Moon // *J. Geophys. Res. Planets.* 2011. V. 116. E00G16.
- Dekemper E., Loodts N., Van Opstal B., Maes J., Vanhellemont F., Matshvili N., Franssens G., Pieroux D., Bingen C., Robert C., De Vos L., Aballea L., Fussen D. Tunable acousto-optic spectral imager for atmospheric composition measurements in the visible spectral domain // *Appl. Opt.* 2012. V. 51. № 25. P. 6259–6267.
- Ehlmann B.L., Mustard J.F., Murchie S.L., Poulet F., Bishop J.L., Brown A.J., Calvin W.M., Clark R.N., Des Marais D.J., Milliken R.E., Roach L.H., Roush T.L., Swayze G.A., Wray J.J. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars // *Science.* 2008. V. 322. № 5909. P. 1828–1832.
- Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B., Barraclough B.L., Elphic R.C., Lawrence D.J. Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles // *Science.* 1998. V. 281. № 5382. P. 1496–1500.
- Friedman B., Saal A.E., Hauri E.H. et al. The volatile content of the Apollo 15 picritic glasses // *Lunar and Planet. Sci.* 2009. V. 41. Abs. 2444.
- Goutzoulis A.P., Pape D.R. Design and fabrication of acousto-optic devices. N.Y.: Marcel Dekker, 1994.
- Grumpe A., Wöhler C., Berezhnoy A.A., Shevchenko V.V. Time-of-day-dependent behavior of surficial lunar hydroxyl/water: Observations and modeling // *Icarus.* 2019. V. 321. P. 486–507.
- Hauri E.H., Saal A.E., Van Orman J. et al. New estimates of the water content of the Moon from Apollo 15 picritic glasses // *Lunar and Planet. Sci.* 2009. V. 40. Abs. 2344.
- He Z., Li C., Xu R., Lv G., Yuan L., Wang J. Spectrometers based on acousto-optic tunable filters for in-situ lunar surface measurement // *J. Appl. Remote Sensing.* 2019. V. 13. № 2. 027502.
- Honniball C.I., Lucey P.G., Li S., Shenoy S., Orlando T.M., Hibbitts C.A., Hurley D.M., Farrell W.M. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA // *Nat. Astron.* 2021. V. 5. P. 121–127.
- Hunt G.R., Salisbury J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III. Carbonates // *Modern Geology.* 1971. V. 2. P. 23–30.
- Ivanov M.A., Hiesinger H., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Head J.W., Pasckert J.-H., Bauch K., van der Bogert C.H., Gläser P., Kohanov A. Landing site selection for *Luna-Glob* mission in crater Boguslawsky // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 117. P. 45–63.
- Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Demidov N.E., Guseva E.N., Head J.W., Hiesinger H., Kohanov A.A., Krasilnikov S.S. Geological characterization of the three

- high-priority landing sites for the Luna-Glob mission // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 162. P. 190–206.
- Korablev O., Trokhimovskiy A., Grigoriev A.V., Shakun A., Ivanov Y.S., Moshkin B., Anufreychik K., Timonin D.N., Dziuban I., Kalinnikov Yu.K., Montmessin F. Three infrared spectrometers, an atmospheric chemistry suite for the ExoMars 2016 trace gas orbiter // *J. Appl. Remote Sensing.* 2014. V. 8. № 1. 084983.
- Korablev O., Ivanov A., Fedorova A., Kalinnikov Yu.K., Shapkin A., Mantsevich S., Viazovetsky N., Evdokimova N., Kiselev A.V. Development of a mast or robotic arm-mounted infrared AOTF spectrometer for surface Moon and Mars probes // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9608. P. 960807-1-10.
- Korablev O.I., Dobrolenskiy Yu., Evdokimova N., Fedorova A.A., Kuzmin R.O., Mantsevich S.N., Cloutis E.A., Carter J., Poulet F., Flahaut J., Griffiths A., Gunn M., Schmitz N., Martin-Torres J., Zorzano M.-P., Rodionov D.S., Vago J.L., Stepanov A.V., Titov A.Yu., Viazovetsky N.A., Trokhimovskiy A.Yu., Saggir A.G., Kalinnikov Yu.K., Ivanov Yu.S., Shapkin A.A., Ivanov A.Yu. Infrared spectrometer for ExoMars: a mast-mounted instrument for the Rover // *Astrobiology.* 2017. V. 17. P. 542–564.
- Korablev O.I., Belyaev D.A., Dobrolenskiy Y.S., Trokhimovskiy A.Y., Kalinnikov Yu.K. Acousto-optic tunable filter spectrometers in space missions [Invited]. *Appl. Opt.* 2018. V. 57. P. C103–C119.
- Li C., Liu D., Liu B., Ren X., Liu J., He Z., Zuo W., Zeng X., Xu R., Tan X., Zhang X., Chen W., Shu R., Wen W., Su Y., Zhang H., Ouyang Z. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials // *Nature.* 2019. V. 569. P. 378–382.
- Mantsevich S.N., Korablev O.I., Kalinnikov Yu.K., Ivanov A.Yu., Kiselev A.V. Examination of temperature influence on wide-angle paratellurite crystal acousto-optic filters operation // *Acta Physica Polonica A.* 2015. V. 127. № 1. P. 43–45.
- Mantsevich S.N., Kostyleva E.I. Examination of the temperature influence on phase matching frequency in tunable acousto-optic filters // *Ultrasonics.* 2019. V. 91. P. 45–51.
- McCord T.B., Taylor L.A., Combe J.-P., Kramer G., Pieters C.M., Sunshine J.M., Clark R.N. Sources and physical processes responsible for OH/H₂O in the lunar soil as revealed by the Moon Mineralogy Mapper (M³) // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. E00G05.
- Mitrofanov I.G., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M. Russian plans for the first stage of lunar robotic exploration // *LPI Contributions.* 2013. V. 1748. 7022.
- Ohtake M., Matsunaga T., Haruyama J., Yokota Y., Morota T., Honda C., Ogawa Y., Torii M., Miyamoto H., Arai T., Hirata N., Iwasaki A., Nakamura R., Hiroi T., Sugihara T., Takeda H., Otake H., Pieters C.M., Saiki K., Kitazato K., Abe M., Asada N., Demura H., Yamaguchi Y., Sasaki S., Kodama S., Terazono J., Shirao M., Yamaji A., Minami S., Akiyama H., Jossel J.-L. The global distribution of pure anorthosite on the Moon // *Nature.* 2009. V. 461. P. 236–240.
- Ohtake M., Pieters C.M., Isaacson P., Besse S., Yokota Y., Matsunaga T., Boardman J., Yamamoto S., Haruyama J., Staid M., Mall U., Green R.O. One Moon, many measurements 3: Spectral reflectance // *Icarus.* 2013. V. 226. № 1. P. 364–374.
- Pieters C.M., Head J.W., Gaddis L., Jolliff B., Duke M. Rock types of South Pole-Aitken basin and extent of basaltic volcanism // *J. Geophys. Res: Planets.* 2001. 106(E11). 28001–28022.
<https://doi.org/10.1029/2000je001414>
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N., Annadurai M., Boardman J., Buratti B., Combe J.-P., Dyar M.D., Green R., Head J.W., Hibbitts C., Hicks M., Isaacson P., Klimm R., Kramer G., Kumar S., Livo E., Luncheon S., Malaret E., McCord T., Mustard J., Nettles J., Petro N., Runyon C., Staid M., Sunshine J., Taylor L.A., Tompkins S., Varanasi P. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M³ on Chandrayaan-1 // *Science.* 2009. V. 326. № 5952. P. 568–572.
- Pieters C.M., Boardman J.W., Ohtake M., Matsunaga T., Haruyama J., Green R.O., Mall U., Staid M.I., Isaacson P.J., Yokota Y., Yamamoto S., Besse S., Sunshine J.M. One Moon, many measurements 1: Radiance values // *Icarus.* 2013. V. 226. № 1. P. 951–963.
- Pilorget C., Bibring J.-P. NIR reflectance hyperspectral microscopy for planetary science: Application to the MicrOmega instrument // *Planet. and Space Sci.* 2013. V. 76. P. 42–52.
- Saal A.E., Hauri E.H., Cascio M.L., Van Orman J.A., Ruth-erford M.C., Cooper R.F. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior // *Nature.* 2008. V. 454(7201). P. 192–195.
<https://doi.org/10.1038/nature07047>
- Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Malakhov A., Boynton W.V., Chin G., Droege G., Evans L.G., Garvin J., Golovin D.V., Harshman K., McClanahan T.P., Mokrousov M.I., Mazarico E., Milikh G., Neumann G., Sagdeev R., Smith D.E., Starr R.D., Zuber M.T. Testing lunar permanently shadowed regions for water ice: LEND results from LRO. 2012. V. 117. № E12. E00H26.
- Silvestrova I.M., Pisarevskii Yu.V., Földvári I., Peter A., Voszka R., Janszky J. Refinement of some optical and acoustic parameters of paratellurite // *Phys. Stat. Sol.* 1981. V. 66. P. K55–K58.
- Sunshine J.M., Farnham T.L., Feaga L.M., Groussin O., Merlin F., Milliken R.E., A'Hearn M.F. Temporal and Spatial Variability of Lunar Hydration As Observed by the Deep Impact Spacecraft // *Science.* 2009. V. 326. № 5952. P. 565–568.
- Voloshinov V.B. Anisotropic light diffraction on ultrasound in a tellurium dioxide single crystal // *Ultrasonics.* 1993. V. 31. P. 333–338.
- Wieczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F., Kiefer W.S., Taylor G.J., Melosh H.J., Phillips R.J., Solomon S.C., Andrews-Hanna J.C., Asmar S.W., Konopliv A.S., Lemoine F.G., Smith D.E., Watkins M.M., Williams J.G., Zuber M.T. The crust of the Moon as seen by GRAIL // *Science.* 2013. V. 339. № 6120. P. 671–675.
- Wöhler C., Grumpe A., Berezhnoy A.A., Feoktistova E.A., Evdokimova N.A., Kapoor K., Shevchenko V.V. Temperature regime and water/hydroxyl behavior in the crater Boguslawsky on the Moon // *Icarus.* 2017. V. 285. P. 118–136.
- Wood J.A., Dickey J.S., Marvin U.B., Powell B.N. Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1970. V. 1. P. 965–988.