

На правах рукописи

РОДИОНОВ Даниил Станиславович

**МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ АНАЛИЗА МИНЕРАЛОГИИ
ЖЕЛЕЗА НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

МОСКВА – 2006

Работа выполнена в:
Институте Космических Исследований РАН, Москва, Россия
Johannes-Gutenberg University, Mainz, Germany

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Евланов Евгений Николаевич	-	кандидат технических наук, Институт космических исследований РАН, г. Москва
-------------------------------	---	-----------------------------------------------------------------------------------

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Кузьмин Рунар Николаевич	-	доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет Московского Государственного Университета им. М.В.Ломоносова
Ксанфомалити Леонид Васильевич	-	доктор физико-математических наук, профессор, Институт космических исследований РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится «14» февраля 2006 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д002.113.01 при Институте Космических Исследования РАН

Адрес: 117997, г. Москва, Профсоюзная улица, д. 84/32

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Космических Исследований РАН.

Автореферат разослан 13 января 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Акимов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Мессбауэровская спектроскопия является мощным средством для исследования минералогии железосодержащих материалов. Мессбауэровские спектрометры интенсивно использовались для лабораторного анализа образцов лунного грунта и метеоритов (в том числе имеющих марсианское происхождение). Однако до 2004 года ни одна межпланетная экспедиция не имела в составе данных приборов. Эта ситуация изменилась с посадкой на Марсе двух американских марсоходов MER (Mars Exploration Rovers). Аппараты «Spirit» и «Opportunity» содержат в своем составе Миниатюризированный Мессбауэровский Спектрометр (MIMOS II), созданный в университете г. Майнца (Германия) при участии российских специалистов из Института Космических Исследований РАН.

Оба марсохода совершили посадку на поверхности Марса в январе 2004 года и передали на Землю большое число ценной научной информации. Мессбауэровские спектрометры на обоих марсоходах успешно проработали в течение основной миссии (90 марсианских суток) и внесли значительный вклад в определение минералогических особенностей марсианского грунта, указывающих, в частности, на возможность существования воды на поверхности планеты в отдаленном прошлом. На настоящий момент (октябрь 2005 года) срок работы обоих марсоходов превысил 600 марсианских суток и официально продлен до сентября 2006. Оба мессбауэровских спектрометра находятся в рабочем состоянии.

Цели работы

- Создание компонентов мессбауэровского спектрометра и тестирование прибора для применения на поверхности Марса.
- Всесторонняя предполетная калибровка и проверка прибора.
- Наземная поддержка работы мессбауэровских спектрометров на марсоходах «Spirit» и «Opportunity».
- Получение и обработка мессбауэровских спектров поверхности Марса.

Научная новизна.

Впервые в истории был создан миниатюризированный мессбауэровский спектрометр, способный автономно работать на поверхности другой планеты, и получены мессбауэровские спектры поверхности Марса в реальных условиях.

Научная и практическая ценность работы.

Создан миниатюризированный мессбауэровский спектрометр для внеземного применения (масса прибора около 500 г., энергопотребление менее 3 Вт., возможность полностью автономной работы). Прибор установлен на марсоходах-близнецах MER, продолжающих работу на поверхности Марса с января 2004 г. Идентифицированы различные железосодержащие минералы, присутствующие на поверхности Марса в местах посадки двух марсоходов: в кратере Гусева (Gusev crater) и на Полуденной равнине (Meridiani Planum). Полученные результаты

свидетельствуют о возможности существования жидкой воды на поверхности Марса в прошлом. Показано, что данный прибор может найти широкое применения для решения ряда научно-технических задач на Земле.

На защиту выносятся:

- Разработка и создание компонентов мессбауэровского спектрометра MIMOS II. В частности, разработка программного обеспечения (ПО) прибора для работы на поверхности Марса.
- Проведение и результаты предполетных и полетных проверок и калибровок прибора.
- Разработка ПО для обработки поступающих на Землю данных.
- Результаты работы спектрометра на поверхности Марса в течение 360 локальных суток.
- Создание базы марсианских мессбауэровских спектров, доступной всем желающим.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались на 67-ой ежегодной встрече метеоритного общества (67th Annual Meeting of the Meteoritical Society, 2004, Рио-де-Жанейро, Бразилия), ассамблее Европейского союза геофизиков (European Geosciences Union General Assembly 2005, Вена, Австрия). По материалам диссертации имеется 13 публикаций (из них 7 в реферируемых изданиях).

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Объем диссертации составляет 145 страниц печатного текста, в том числе 124 рисунка, 15 таблиц. Библиография включает 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и сформирована цель работы. Приведен также ряд исторических фактов, связанных с разработкой мессбауэровского спектрометра для внеземного применения (MIMOS II).

Как следует из введения, прибор разрабатывался и создавался в течение длительного времени. К началу участия автора диссертации в проекте MIMOS II механическая часть прибора была в основном подготовлена. Автор диссертации является разработчиком основных элементов программного обеспечения прибора, и принимал участие в комплексных предполетных и летных испытаниях всего прибора, а также занимался расшифровкой и интерпретацией информации, полученной от прибора с поверхности Марса.

Первая глава посвящена обсуждению основ мессбауэровской спектроскопии.

Мессбауэровская спектроскопия занимает особое место во многих областях исследований и технических приложений благодаря уникальным возможностям

резонансного поглощения или испускания γ -квантов, эмитируемых отдельными радиоактивными изотопами (в нашем случае Fe^{57}) и взаимодействующих с соответствующими кристаллическими решетками, в которых скомпенсированы потери энергии на отдачу ядра. Энергетически узкий пучок безотдачных γ -квантов позволяет изучать ничтожные изменения в сверхтонкой структуре ядерных уровней, обусловленные взаимодействием ядра с внутрикристаллическими (магнитными и электрическими) полями как статического, так и динамического происхождения (релаксационные процессы).

Обсуждаются основные наблюдаемые параметры мессбауэровских спектров, связанные со сверхтонкими расщеплениями, которые обусловлены взаимодействиями ядер с электромагнитными полями, создаваемыми в кристаллах электронами и окружающими ионами. Из анализа мессбауэровских спектров можно получить информацию о плотности заряда на ядре и о природе химической связи (изомерный сдвиг δ), о пространственной симметрии электронных волновых функций (квадрупольное расщепление ΔE_Q) и о магнитной природе исследуемого вещества (эффективное магнитное поле).

Существуют различные методы экспериментальной регистрации эффекта Мессбауэра. В геометрии пропускания (рис.1) γ -кванты, испускаемые радиоактивным источником, проходят через исследуемый образец и попадают в детектор, сигналы с которого записываются регистрирующей системой. Если источнику сообщить скорость V относительно образца, то за счет эффекта Доплера линия испускания сместится на величину $\Delta E = EV/c$. Естественная ширина линии Γ весьма мала и поэтому незначительные изменения скорости приводят к сдвигу энергии, сравнимому с Γ . В зависимости от этого сдвига и рассматривается спектр резонансного поглощения γ -квантов. Положения и относительные интенсивности резонансных линий спектра позволяют получать информацию о возбужденном состоянии ядра и о внутренних параметрах исследуемого вещества.

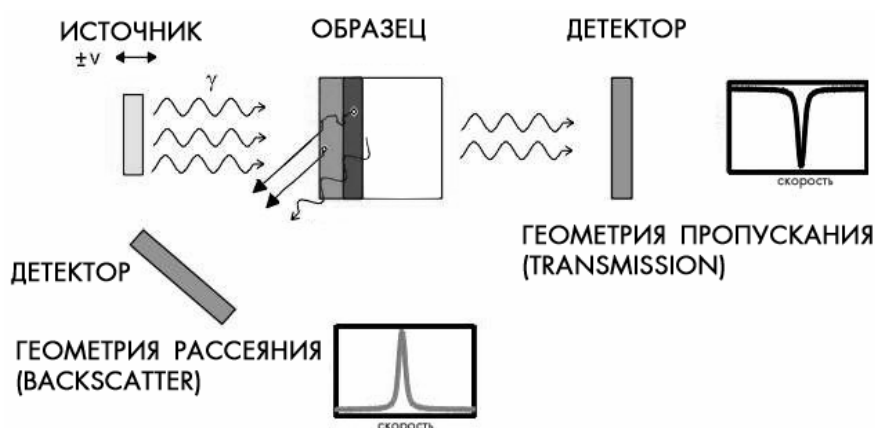


Рис. 1: Принципиальная схема Мессбауэровского эксперимента.

Другим способом измерения является регистрация мессбауэровского рассеяния, когда детектируются либо переизлученные γ -кванты, либо конверсионные электроны и рентгеновские кванты (вклад этого компонента значителен для ядра Fe^{57}). В этом случае речь идет о геометрии обратного рассеяния. Особенностью этого метода является то, что не требуется

предварительная подготовка образца (соответственно исследуется только его поверхностный слой).

В данной главе также обсуждаются вопросы обработки и анализа мессбауэровских спектров. Рассматриваются стандартные методы деконволюции спектров и ряд сопутствующих эффектов.

Во второй главе описывается устройство MIMOS II и режимы работы прибора.

По сравнению с лабораторными установками MIMOS II имеет компактные размеры, уменьшенную массу и низкое энергопотребление. Так, измерительный блок имеет массу 400 г и объем (50x50x90) мм³. Общее энергопотребление прибора менее 3 Вт. Все компоненты были выбраны с учетом противодействия большим ускорениям и ударам, изменениям температуры в течение марсианских суток и влиянию космического излучения.

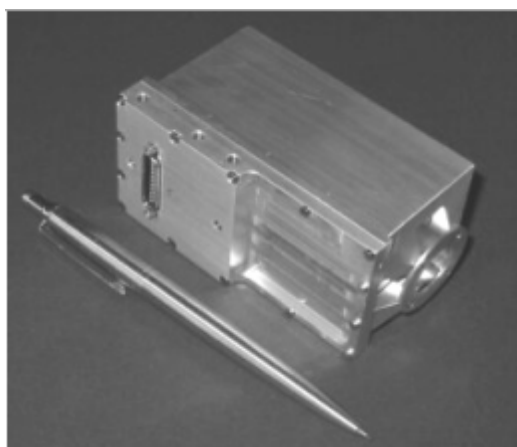


Рис. 2: Измерительный блок мессбауэровского спектрометра

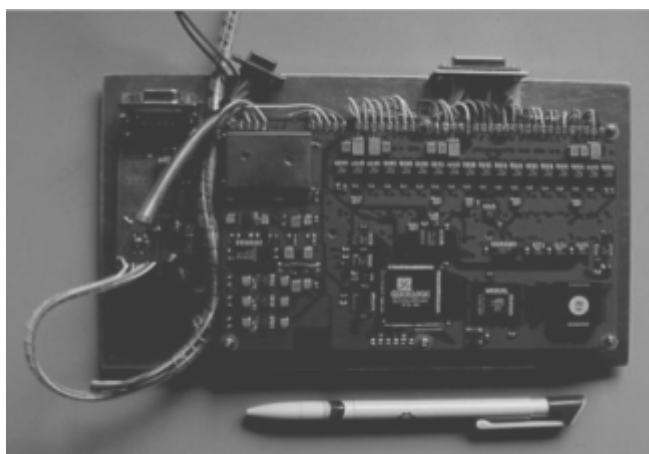


Рис. 3: Блок электроники

Прибор MIMOS II состоит из двух частей, соединенных кабелем: измерительного блока (рис.2) и блока электроники (рис.3). Блок электроники находится внутри марсохода, а измерительный блок смонтирован на подвижной «руке» марсохода (IDD – Instrument Deployment Device). Внутри измерительного блока установлены два источника γ -излучения Co^{57} (период полураспада 271 день): основной (начальная активность до запуска – 300 мКи и около 150 мКи при посадке) и калибровочный, используемый для измерения мессбауэровского спектра эталонного поглотителя в геометрии пропускания.

Источники приводятся в движение электромеханическим вибратором (рис. 4), находящимся в центре измерительного блока. Источники располагаются на противоположных сторонах вибратора. В качестве детекторов γ -излучения с энергией 14.4 кэВ и рентгеновского излучения с энергией 6.4 кэВ применены кремниевые PIN диоды (площадь каждого 100 кв. мм, толщина 0.5 мм). Всего в измерительном блоке установлено пять независимых детекторов (четыре основных, один калибровочный).

На измерительном блоке установлено также два температурных сенсора (плюс еще один на блоке электроники): один на контактной пластине, служащей для определения контакта с измеряемой поверхностью, а другой – рядом с калибровочным образцом.

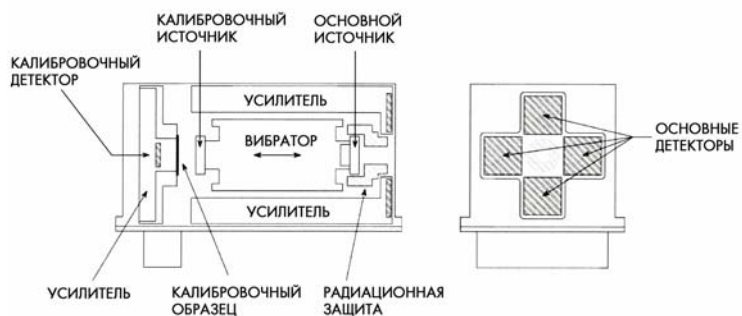


Рис. 4: Принципиальная схема измерительного блока MIMOS II

Из-за ограничений на скорость передачи данных большинство функций прибора и возможностей обработки данных (включая получение и отдельное хранение спектров, полученных при разных температурах) выполняются внутренним

микропроцессором, памятью и встроенным программным обеспечением. Это также важно в связи с тем, что измерения, как правило, проводятся ночью, когда центральный процессор марсохода отключается для экономии энергии. Таким образом, MIMOS II является независимым прибором, способным на автономную работу в течение продолжительного времени.

Прибор имеет три вида памяти: SRAM (128 KB) для научной информации, FRAM (6 KB) для копирования параметров прибора и для временного графика работы прибора, а также EEPROM (16 KB) для создания резервных копий, куда периодически записываются в сжатой форме мессбауэровские спектры для уменьшения риска потери данных. В одном мессбауэровском спектре содержится 512 каналов. Всего в памяти можно хранить до 65 спектров. При измерении спектра фиксируется также изменение температуры со временем (всего можно набрать до 256 показаний температурных датчиков). Полный объем передаваемой по окончании измерений информации составляет от 32 KB до 160 KB (некоторые данные дублируются).

Мессбауэровские параметры многих железосодержащих минералов зависят от температуры. Так как температура поверхности Марса существенно меняется в течение суток, желательно разделять спектры, снятые при различных температурах. Прибор имеет 13 температурных «окон» (граничные температуры могут быть изменены по команде с марсохода) Полученные спектры можно суммировать для улучшения статистики или рассматривать по отдельности.

Существует шесть режимов работы прибора: а) температурно-зависимый, когда спектры, полученные при разных температурах, помещаются в различные области памяти, а время набора данных не ограничено; б) температурно-независимый, при котором набор данных также не ограничен во времени; в) спящий, когда набор данных не производится; г) энергетический, когда примерно в течение 10 минут идет проверка работы детекторов, а затем система возвращается в спящий режим; д) инженерный, когда примерно в течение одной минуты проверяется работа вибратора, а затем следует возврат к спящему режиму, и е) стандартный, когда последовательно вызываются инженерный, энергетический и температурно-зависимый режимы.

Простейший пример работы прибора на поверхности Марса таков: а) установка прибора рукой марсохода до контакта с поверхностью; б) очистка памяти прибора; в) выбор параметров измерения; г) инициализация стандартного режима; д) набор статистики (от получаса до нескольких дней); е) окончание измерений и передача информации в главный компьютер марсохода.

Третья глава посвящена калибровке спектрометра. Описывается механизм и история предполетных и полетных калибровок. Приведены результаты первых проверок на поверхности Марса.

Интерпретация получаемых мессбауэровских спектров невозможна без точной и надежной калибровки вибратора по скорости. Для каждого полетного прибора был проведен ряд измерений стандартного калибровочного образца (альфа-железо). Амплитуда скорости вибратора устанавливалась программным обеспечением. Мессбауэровские параметры альфа-железа хорошо известны, так что анализ полученных спектров позволяет установить реальную скорость вибратора. Подобная калибровка проводилась для разных температур в диапазоне 150-300 К.

Другой способ калибровки заключается в измерении калибровочного образца ССТ (Compositional Calibration Target), установленного на корпусе марсохода. ССТ состоит из магнетита (Fe_3O_4), чьи мессбауэровские параметры также хорошо изучены и поэтому могут быть использованы для калибровки вибратора.

Но основной метод калибровки связан с измерением спектра встроенного в измерительный блок поглотителя известного состава (альфа-железо, гематит и магнетит). В каждом мессбауэровском спектре присутствуют данные от четырех основных детекторов, а также данные от калибровочного детектора (полученные в геометрии пропускания). Следовательно, можно точно откалибровать вибратор в любой момент времени независимо от условий окружающей среды. Для мониторинга работы вибратора измеряется его дифференциальный спектр, представляющий собой разность между теоретической и реальной скоростями. Обычно это происходит дважды: до начала и после окончания измерения.

Важной задачей предполетной калибровки явилось обеспечение оптимальной работы детекторов (максимальное соотношение сигнал/шум) при различных окружающих условиях. Для каждого измерительного блока проводилась процедура калибровки детекторов в температурном диапазоне 150-300 К (измерение энергетических спектров). Для каждого температурного окна были определены оптимальные параметры работы детекторной системы. Эти параметры затем были введены в программное обеспечение прибора для автоматического выбора оптимального режима при текущей температуре.

В четвертой главе приведены результаты измерений, проведенных на поверхности Марса в течение первых 360 марсианских суток миссии MER.

Поиски подходящих объектов для детального изучения и подробный анализ результатов проходили с использованием (в той или иной степени) всех приборов, входящих в состав научной аппаратуры марсохода. На подвижной руке марсохода кроме прибора MIMOS II были установлены также рентгеновский спектрометр APXS, измеряющий рентгеновские лучи от неупругого рассеяния альфа-частиц на

атомах химических элементов, которые находятся в тонком слое марсианского грунта, и «микроскопическая» фотокамера. Она позволяет получать детальные снимки небольшого участка поверхности (32 мм на 32 мм) вокруг места, которое наблюдалось приборами MIMOS и APXS. На подвижной руке расположено также устройство RAT (Rock Abrasion Tool) для обработки поверхности камней. На корпусе марсохода находятся широкоформатная панорамная фотокамера и миниатюрный инфракрасный спектрометр теплового излучения отдельных (но достаточно больших по размеру) участков поверхности Марса.

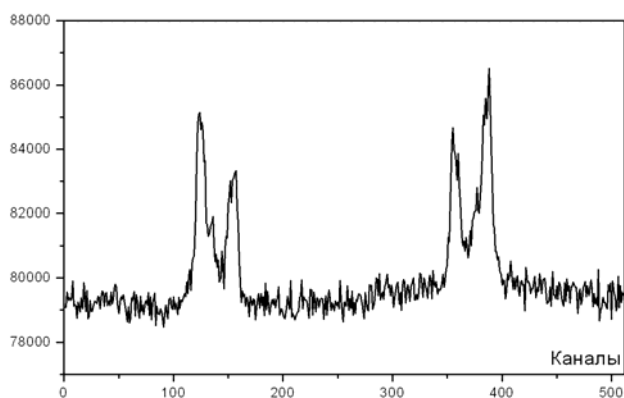


Рис. 5: Первый мессбауэровский спектр поверхности Марса, кратер Гусева.

Первый в истории мессбауэровский спектр поверхности Марса был получен с марсохода “Spirit” 17 января 2004 года (рис. 5). За первые 360 марсианских суток в кратере Гусева было получено 78 спектров (46 камней и 32 образца грунта). Характерные спектры приведены на рис 6.

Все спектры с равнинной части кратера Гусева характеризуются наличием двух Fe^{2+} дублетов (оливина и, возможно, пироксена) и одного Fe^{3+} дублета. Присутствуют также два секстета, принадлежащие магнетиту.

Единственным исключением является необработанная поверхность камня Mazatzal, где присутствует секстет, характерный для гематита. Fe^{2+} дублет с параметрами $\delta \sim 1.18$ мм/с и $\Delta E_Q \sim 3.05$ мм/с идентифицирован как оливин ($(Mg,Fe)_2SiO_4$), который является типичным порообразующим минералом для Марса, и его присутствие ожидалось на основе данных с космических аппаратов на орбите Марса и по данным, полученным при измерениях метеоритов марсианского происхождения. Значение квадрупольного сдвига также является специфичным для оливина. На основе температурных зависимостей мессбауэровских параметров состав оливина можно оценить как $\sim Fo_{60}$ (60% Mg, 40% Fe^{2+}).

Параметры второго Fe^{2+} дублета ($\delta \sim 1.18$ мм/с и $\Delta E_Q \sim 2.12$ мм/с) находятся в хорошем соответствии с параметрами пироксена $((Fe,Ca,Na,Mg)(Si,Al)_2O_6)$. Это хорошо согласуется с базальтовым составом камней. Однако нельзя исключить и вклад других Fe^{2+} фаз, например, базальтового стекла.

Дублет Fe^{3+} ($\delta \sim 0.38$ мм/с, $\Delta E_Q \sim 0.85$ мм/с) связан с ионом Fe^{3+} , который обладает восьмигранной симметрией ($oct-Fe^{3+}$) и не является минералогически специфичным. Существует несколько разумных путей для объяснения его появления. Возможно, что этот дублет возникает от наложения дублетов, принадлежащих нескольким железосодержащим фазам, в число которых могут входить, например, парамагнитные формы гематита и гетита, лепидокрокит, акаганеит, швертманнит, гидро-ярозит, феррогидрит и др.

Мессбауэровские спектры многих пород и грунтов, например, камней Adirondack и Mimi Shoe, характеризуются двумя секстетами, пики которых

перекрываются при переходе от отрицательной скорости к положительной. Эта картина типична для магнетита (Fe_3O_4). Магнетит в образцах из кратера Гусева является нестехиометрическим. Это может быть вызвано частичным окислением и/или наличием примесей (например, титан или магний).

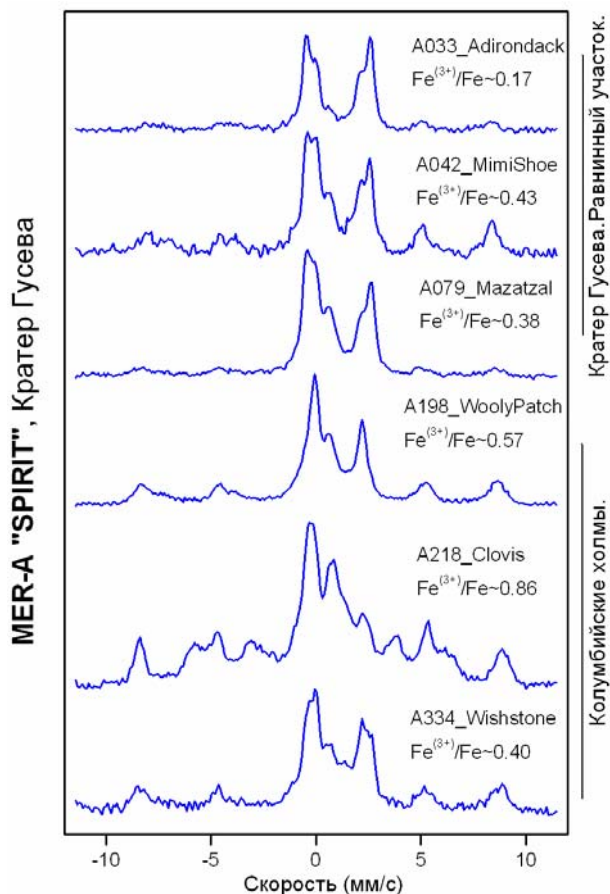


Рис. 6 : Характерные спектры поверхности Марса (кратер Гусева).

базальта. Подобная минералогическая однородность послужила одной из причин для направления марсохода “Spirit” в длительное путешествие на расстояние около 2 км к Колумбийским холмам (Columbia Hills).

У подножия холмов спектральные характеристики претерпели значительные изменения. В спектрах обнаженной породы резко увеличилось содержание трехвалентного железа, практически исчез оливин, появился секстет гематита (A198_WoolyPatch). При дальнейшем подъеме были обнаружены породы, содержащие гетит (A218_Clovis и т.д.). Гетит ($\alpha\text{-FeOOH}$) образуется только при участии воды и является прямым свидетельством существования воды в прошлом на поверхности Марса. Стоит отметить большое спектральное разнообразие пород в Колумбийских холмах (например наличие ильменита (FeTiO_3) в спектрах некоторых камней/пород (A334_Wishstone и т.д.)).

Первый мессбаэровский спектр с другого марсохода (Mer-B “Opportunity”) был получен 2 февраля 2004 года. Всего на Полуденной равнине (Meridiani Planum)

Секстет, указывающий на присутствие гематитоподобной фазы на равнинном участке кратера Гусева, наблюдался только на трех спектрах камня Mazatzal (на необработанной или слегка зачищенной поверхности). Он явно отличается от магнетитовых секстетов. При более тщательной обработке камня с помощью инструмента RAT этот секстет исчезает. Это свидетельствует о том, что он связан с плотным спекшимся покрытием камня. Хотя параметры секстета соответствуют гематиту, существуют вероятные вклады от магнетита и особенно от маггемита.

Распределение железа по железосодержащим фазам, а также отношение Fe^{3+}/Fe для пород и грунтов на равнине в кратере Гусева, показывает, что все породы – это базальты на основе оливина, а грунт в основном образован из этого

в течение первых 360 марсианских суток было получено 87 спектров (54 измерения камней и 33 анализа грунта). Характерные спектры приведены на рис 7.

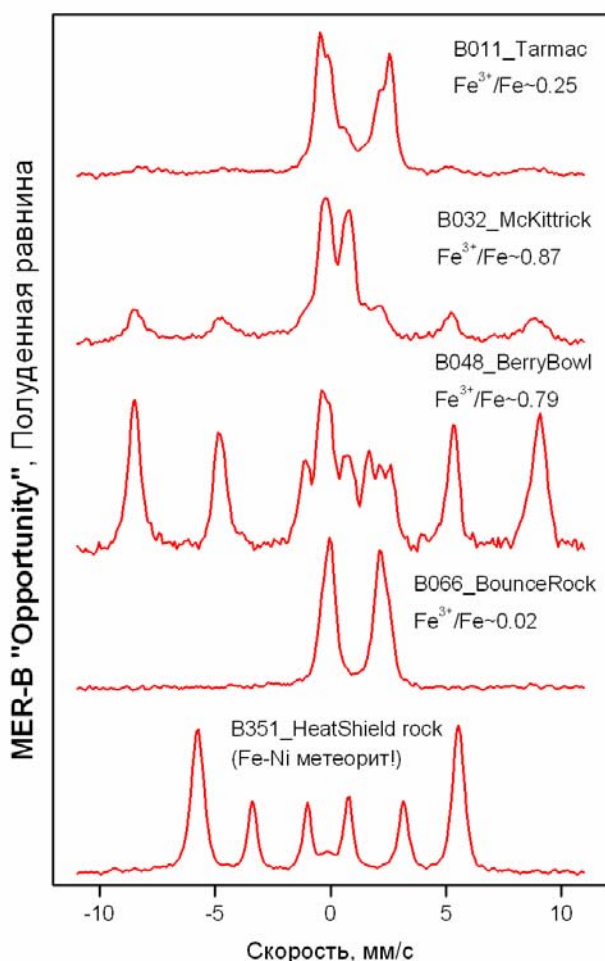


Рис. 7 : Характерные спектры поверхности Марса (Полуденная равнина).

Полученные спектры весьма отличны друг от друга и могут быть разделены на несколько групп: спектры обнаженной породы (B032_McKittrick), спектры базальтовых грунтов (B011_Tarmac), спектры шарообразных конкреций (B048_BerryBowl), спектр камня «Bounce Rock» (B066), спектр камня «Heat Shield Rock» (B351).

Секстет, наблюдаемый в спектрах обнаженной породы, а также в спектре шарообразных конкреций, идентифицирован как принадлежащий гематиту ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Температурная зависимость параметров секстета подтверждает такое отождествление – наблюдается переход Морина, характерный для гематита. Анализ конкреций (шарообразных образований, прозванных также «голубикой» - blueberries) показывает, что гематит является основным железосодержащим минералом этих образований, а содержание гематита в основной породе невелико. Подобная форма осаждения

гематита служит достаточно серьезным подтверждением предположения о наличии значительного количества свободной воды в далеком прошлом в районе Полуденной равнины. Сообщение о наблюдении гематита в заметных количествах было сделано автором диссертации на пресс-конференции в Лаборатории реактивного движения 18 марта 2004 года (<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/newsroom/pressreleases/20040318a.html>)

Мессбауэровский спектр обнаженной породы (outcrop), обнаруженной в кратере Орла (Eagle crater), характеризуется наличием Fe^{3+} дублета с параметрами $\delta \sim 0.39$ мм/с, $\Delta E_Q \sim 1.22$ мм/с. Единственным разумным отождествлением данного дублета является минерал ярозит $(\text{K,Na,H}_2\text{O})(\text{Fe,Al})_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$. Его присутствие в больших количествах (APXS указал на повышенное содержание серы) также говорит о наличии воды на поверхности Марса в прошлом.

Спектр обнаженной породы также характеризуется наличием Fe^{3+} дублета с достаточно низким квадрупольным расщеплением по сравнению с ярозитом ($\Delta E_Q \sim 0.64$ мм/с). Он отличается от Fe^{3+} дублета, обнаруженного в кратере Гусева. Его параметры не специфичны и могут принадлежать, например, ряду суперпарамагнитных оксидных фаз (гематит, гетит). Измерения подобной породы

были проведены также по пути к кратеру Выносливости (Endurance Crater) и во время спуска в этот кратер. Характерные спектральные черты остались неизменны (дублет ярозита по-прежнему присутствует).

Спектры базальтового грунта по многим параметрам совпадают с аналогичными спектрами из кратера Гусева. По-видимому, подобный грунт является «глобальным» для Марса [7].

Спектр камня «Bounce Rock» (камень «отскока») является единственным спектром такого класса, измеренным на поверхности Марса до настоящего времени. Он характеризуется наличием двух пересекающихся дублетов Fe^{2+} , принадлежащих пироксену (оливин отсутствует). Данный спектр практически идентичен ряду спектров, полученных на Земле при анализе метеоритов марсианского происхождения (т.н. базальтовых шерготтитов). Наиболее близкими мессбауэровскими параметрами обладает метеорит QUE 94201.

Камень «Heat Shield rock» (названный так из-за своего местонахождения рядом с тепловым щитом спускаемого аппарата) изначально привлек внимание своей поверхностью, имеющей «металлический характер» (высокая отражательная способность). После изучения, он был идентифицирован как железно-никелевый метеорит. Основным железосодержащим минералом (~95% железа) является железно-никелевый сплав камасит [11].

В пятой главе приведены различные примеры использования миниатюризованного мессбауэровского спектрометра в наземных условиях.

С учетом малых размеров и низкого энергопотребления, а также автономности работы его можно с успехом применять, например, для неdestructивного анализа музейных экспонатов, анализа материалов в труднодоступных местах, мониторинга состояния окружающей среды. Интересным приложением прибора может оказаться изучение поверхностных свойств материалов при сравнении результатов, полученных в геометрии пропускания и обратного рассеяния [12].

Заключение содержит основные результаты диссертационной работы:

- Создание компонентов миниатюризованного мессбауэровского спектрометра для внеземного применения: разработка полетного программного обеспечения для работы прибора на поверхности Марса и для обработки поступающей на Землю информации.
- Проведение полного цикла предполетных/полетных испытаний и калибровок прибора;
- Успешная работа прибора (в настоящее время в течение более полутора земных лет) на поверхности Марса (на двух марсоходах-близнецах проекта MER);
- Получение и анализ первых в истории мессбауэровских спектров поверхности Марса;
- Создание онлайн-базы спектров, полученных мессбауэровским спектрометром на поверхности Марса. Данная база доступна всем желающим.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Евланов Е.Н, Прилуцкий, Линкин, **Родионов**, *Возможность применения мессбауэровской спектроскопии для исследования пород Марса и других объектов Солнечной системы*, Препринт ИКИ РАН, Пр-2011, 1999
2. Klingelhofer G., Bernhardt, Foh, Bonnes, **Rodionov**, de Souza, Schroeder, Gellert, Kane, Guetluch, Kankleit, *The miniaturized Moessbauer Spectrometer MIMOS II for Extraterrestrial and Outdoor Terrestrial Applications: A Status Report*, Hyperfine interactions 144/145: 371-379, 2002
3. Клингелхофер Г., Евланов, Зубков, Прилуцкий, Линкин, Бернхардт, **Родионов**, Шредер, *Миниатюризованный мессбауэровский спектрометр для анализа минералогии железа на поверхности Марса*, Препринт ИКИ РАН, Пр-2081, 2003
4. Klingelhofer G., Morris, Bernhardt, **Rodionov**, de Souza, Squyres, Foh, Kankleit, Bonnes, Gellert, Schroeder, Linkin, Evlanov, Zubkov, Prilutski, *Athena MIMOS II Moessbauer spectrometer investigation*, J. Geophys. Res., 108(E12), 8067, 2003
5. Morris R., Klingelhofer, Bernhardt, Schroeder, **Rodionov**, de Souza, Yen, Gellert, Evlanov, Foh, Kankleit, Guetlich, Ming, Renz, Wdowiak, Squyres, Arvidson, *Mineralogy at Gusev Crater from the Moessbauer spectrometer on Spirit Rover*, Science, Vol. 305, Issue 5685, 833-836, 2004
6. Klingelhofer G., Morris, Bernhardt, Schroeder, **Rodionov**, de Souza, Yen, Gellert, Evlanov, Zubkov, Foh, Bonnes, Kankleit, Guetlich, Ming, Renz, Wdowiak, Squyres, Arvidson, *Jarosite and hematite at Meridiani Planum from the Moessbauer spectrometer on the Opportunity Rover*, Science, Vol 306, Issue 5702, 1740-1745, 2004
7. Yen A., Gellert, Schroeder, Morris, Bell, Knudson, Clark, Ming, Crisp, Arvidson, Blaney, Brueckner, Christensen, DesMarais, de Souza, Economou, Ghosh, Hahn, Herkenhoff, Haskin, Hurowitz, Joliff, Johnson, Klingelhofer, Madsen, McLennan, McSween, Richter, Rieder, **Rodionov**, Soderblom, Squyres, Tosca, Wang, Wyatt, Zipfel, *An integrated view of the chemistry and mineralogy of martian soils*, Nature, Vol 436, 49-54, 2005
8. Soderblom L., Anderson, Arvidson, Bell, Cabrol, Calvin, Christensen, Clark, Economou, Ehlmann, Farrand, Fike, Gellert, Glotch, Golombek, Greeley, Grotzinger, Herkenhoff, Jerolmack, Johnson, Jolliff, Klingelhofer, Knoll, Learner, Li, Malin, McLennan, McSween, Ming, Morris, Rice, Richter, Rieder, **Rodionov**, Schroeder, Seelos, Soderblom, Squyres, Sullivan, Waters, Weitz, Wyatt, Yen, Zipfel, *Soils of Eagle Crater and Meridiani Planum at the Opportunity Rover Landing Site*, Science, Vol. 306, Issue 5702, 1723-1726, 2004
9. Goetz W., Bertelsen, Binau, Gunnlaugsson, Hviid, Kinch, Madsen, Olsen, Gellert, Klingelhofer, Ming, Morris, Rieder, **Rodionov**, de Souza, Schroeder, Squyres, Wdowiak, Yen, *Indication of drier periods on Mars from the chemistry and mineralogy of atmospheric dust*, Nature, Vol 436, 62-65, 2005
10. **Rodionov D.** et al, *Mössbauer investigation of 'Bounce Rock' at Meridiani Planum on Mars – indications for the first shergottite on Mars*, Meteoritics & Planet. Sci., 39, A91 (2004)

11. **Rodionov D.**, Klingelhofer Ming, Morris, Schroeder, de Souza, Squyres, Yen, *An iron-nickel meteorite on Meridiani Planum: observations by MER Opportunity's Moessbauer spectroscopy*, Geophysical Research Abstracts (European Geosciences Union 2005), Vol. 7., 10242, 2005
12. Kane S., **Rodionov**, Bernhardt, Kraus, Klingelhofer, *Surface and Bulk Crystallization of $Fe_{61}Co_{21}Nb_3B_{15}$ alloy*, Hyperfine interactions 144/145: 273-278, 2002
13. Morris R., Klingelhofer, Bernhardt, Schroeder, **Rodionov**, de Souza, Yen, Gellert, Evlanov, Zubkov, Foh, Bonnes, Kankeleit, Guetlich, Ming, Renz, Wdowiak, Squyres, Arvidson, *Mössbauer mineralogy of rock, soil, and dust at Gusev Crater, Mars: Spirit's journey through weakly altered olivine basalt on the Plains and pervasively altered basalt in the Columbia Hills*, J. Geophys. Res., in press, 2005