

МИНИАТЮРИЗОВАННЫЙ МЕССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ АНАЛИЗА МИНЕРАЛОГИИ ЖЕЛЕЗА НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА

*Г. Клингельхофер², Е.Н. Евланов¹, Б.В. Зубков¹, В.М. Линкин¹,
О.Ф. Прилуцкий¹, Б. Бернхард², Д.С. Родионов¹, К. Шредер²*

¹ Институт космических исследований РАН, Россия, Москва

² Институт неорганической и аналитической химии, Университет Йоханса Гутенберга, Майнц, Германия

Мессбауэровская спектрометрия позволяет получить характеристики железосодержащих минералов марсианского грунта, которые, помимо всего прочего, определяют цвет красной планеты Марс. Получение спектров мессбауэровского рассеяния позволяет не только определить, из каких железосодержащих минералов состоит поверхность Марса, но и получить информацию о процессах физической и химической эволюции марсианских горных пород, и, в частности, о роли, которую играла вода в этих процессах.

Особенности спектра мессбауэровского рассеяния определяются электрическим квадрупольным и магнитным дипольным взаимодействием ядра с электрическим и магнитным полями в твердотельной матрице исследуемой породы. Это взаимодействие, в свою очередь, зависит от минералогического состава исследуемого образца (рис. 1).

Энергия возбужденного состояния ядра ^{57}Fe в источнике (изотоп ^{57}Co в родиевой матрице) равна 14,4 кэВ (крайний рисунок слева). В простом поглотителе с кубической симметрией кристалла линия поглощения не расщеплена (второй рисунок слева), но верхний уровень смещен (изотопный сдвиг). В поглотителе, в котором существует градиент электрического поля, расщепляется возбужденный уровень, и линия поглощения превращается в спектральный дублет (например, у Fe^{2+} в оливине, второй рисунок справа). И, наконец, при наличии магнитного поля расщепляются как верхний, так и нижний уровни, и линия превращается в секстет (например, у железа в α -металлической фазе, крайний рисунок справа).

Измерения мессбауэровского спектра можно производить в двух геометриях — поглощения и обратного рассеяния (рис. 2). Геометрия поглощения более эффективна с точки зрения статистики регистрируемого сигнала, но ее применение в измерениях на поверхности Марса затруднено из-за необходимости приготовления специальных образцов определенной толщины.



Рис. 1. Схемы уровней энергии для ядерных переходов в ^{57}Fe [1]



Рис. 2. Геометрия поглощения (в верхней части рисунка) и рассеяния (внизу) [1]

Работы по мессбауэровской спектрометрии для исследования планет в ИКИ РАН были начаты в 1989 г. в рамках проекта «МАРС-94/96» в кооперации с несколькими институтами — Институтом атомной энергии (ИАЭ), МИФИ, Физико-энергетическим институтом (ФЭИ), Белорусским государственным университетом (БГУ) [2]. Был определен облик прибора для установки на марсоходе и изготовлен его лабораторный макет, начата разработка специальных радиоактивных источников космического применения. В 1990, 1991 гг. к работам присоединился Технический университет в Дармштадте (ФРГ) [3], в котором при участии ИКИ РАН был создан летный образец мессбауэровского спектрометра. Однако сокращение программы проекта «МАРС-94/96» заставило искать другие возможности применения этого прибора.

Мессбауэровский спектрометр МИМОС II был включен в состав комплекса «Атена» на марсоходах «Спирит» и «Оппортьюнити», совершивших посадку на Марс в начале 2004 г., вместе с другими научными приборами — рентгеновским спектрометром, панорамной камерой, микроскопом и другими приборами (рис. 3). Кроме того, аналогичный прибор был установлен на посадочном аппарате ЕКА «Бигль-2» [4], посадка которого завершилась неудачей.



Рис. 3. Панорама манипулятора марсохода с мессбауэровским спектрометром на поверхности Марса

Мессбауэровский спектрометр обратного рассеяния (рис. 4) работает следующим образом. Установленный на вибраторе источник радиоактивного излучения с изотопом ^{57}Co испускает гамма-кванты с энергией 14,4 кэВ, которые рассеиваются на ядрах ^{57}Fe в составе образца грунта и регистрируются полупроводниковыми детекторами. Модуляция скорости колебаний вибратора в диапазоне примерно ± 10 мм/с позволяет измерить полный спектр мессбауэровского рассеяния.

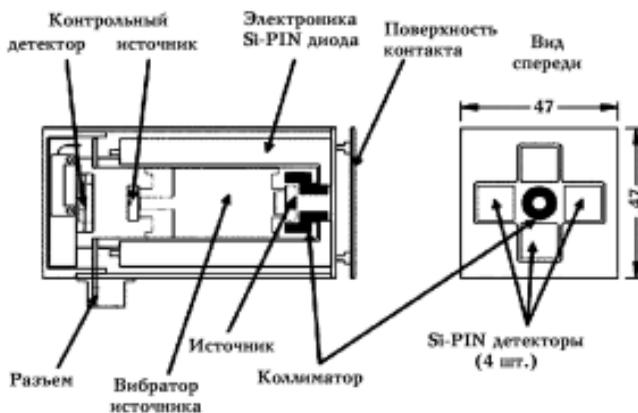


Рис. 4. Схема мессбауэровского спектрометра обратного рассеяния [1]

Параметры основных систем мессбауэровского спектрометра приведены ниже.

Характеристики вибратора

- Конструкция — алюминиевая трубка с двумя катушками на концах между постоянными магнитами Sm-Co (как динамик), закрепленная на двух мягких пружинах
- Частота колебаний — 25 Гц
- Масса — 50 г
- Диаметр — 22 мм, длина — 40 мм
- Изменение скорости ± 12 мм/с
- Линейность — 3 % (программно корректируется)

Параметры радиоактивного источника

- Изотоп ^{57}Co (период полураспада 270 сут, γ -линии 14,4; 122 и 136 кэВ) в родиевой матрице

- Удельная активность — 2 Ки/см²
- Активность при изготовлении 330 мКи, при посадке — 150 мКи, на ноябрь 2004 г. — около 70 мКи
- Диаметр активной области — 4 мм
- Титановый корпус, бериллиевое окно
- Изготовитель — АО «Циклотрон», г. Обнинск
- Коллиматор — слоистая конструкция (свинец, тантал, латунь), диаметр апертуры — 5,6 мм, диаметр пятна на образце — 14 мм

Характеристики полупроводниковых детекторов

- Пять кремниевых детекторов (один — калибровочный)
- Размеры — 10×10 мм
- Толщина — 500 мкм
- Энергетическое разрешение — 1,0–1,5 кэВ при комнатной температуре, улучшается при низких температурах
- Эффективность — около 100 % для 6,4 кэВ, 70 % для 14,4 кэВ

Параметры прибора МИМОС II

- Масса — 500 г (датчик 400 г и плата 100 г)
- Электропотребление — 2 Вт
- Размеры — 40×40×115 мм
- Четыре Si-детектора (PIN) размером 10×10 мм
- Источник ⁵⁷Со активностью 150 мКи (при посадке)
- Микропроцессор — 8051
- Информативность — 150 кбайт (55 спектров + служебная)

Параметры выходной информации

- Зависимость скорости счета гамма-квантов от скорости движения вибратора, 512 каналов для каждого из пяти детекторов
- Амплитудные спектры, 256 каналов для каждого детектора
- Значение температуры с частотой опроса 5 мин
- Характеристики работы вибратора
- Память прибора ~150 кбайт

Внешний вид мессбауэровского спектрометра показан на рис. 5.

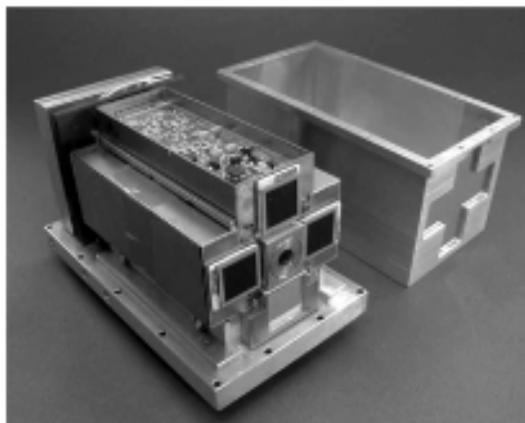


Рис. 5. Мессбауэровский спектрометр МИМОС II [1]

Первые спектры, полученные на марсоходах «Спирит» и «Оппортьюнити», показаны на рис. 6 и 7.

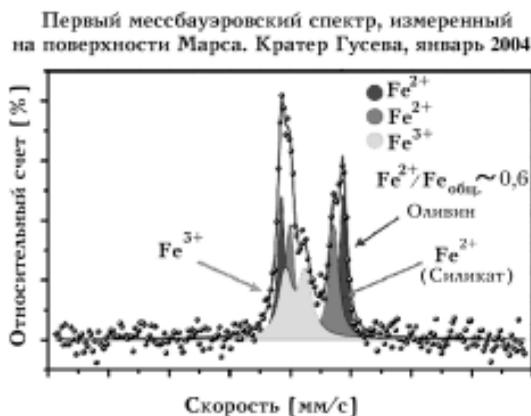


Рис. 6. Первый спектр обратного мессбауэровского рассеяния, измеренный на поверхности Марса в кратере Гусева 17 января 2004 г. мессбауэровским спектрометром на марсоходе «Спирит». По вертикальной оси отложена скорость счета по отношению к фону, в процентах, на горизонтальной оси показана скорость перемещения радиоактивного источника, в миллиметрах в секунду. Отмечены различные минералогические фазы соединений железа (оливин, силикаты двухвалентного железа).

(Картинка НАСА/ЛРД Майнцкого университета, помещена на веб-сайте <http://origin.mars5.jpl.nasa.gov/gallery/press/spirit/20040120a.html>)

На первом полученном спектре марсианского грунта в кратере Гусева с марсохода «Спирит» (рис. 6) при небольшой экспозиции были обнаружены характерные дублеты двухвалентного железа (оливины и силикаты, предположительно пироксены), а также трехвалентного железа.

Спектр марсианского грунта, полученный на втором марсоходе «Оппортьюнити» (рис. 7), оказался весьма похожим, но, благодаря большей длительности экспозиции, в нем проявились признаки магнитной фазы (магнитно-дипольный секстет).

Участники эксперимента (Д.С. Родионов, Е.Н. Евланов, О.Ф. Прилуцкий) были включены в перечень создателей комплекса «Атена» на табличке, установленной на марсоходах «Спирит» и «Оппортьюнити» (рис. 8).

ИКИ РАН вместе с Майнцским университетом (Германия) подал заявку на участие в проекте НАСА «Марс-Ровер» 2009 г. с мессбауэровским спектрометром.

Мессбауэровский спектр на поверхности Марса.
Равнина Меридиани

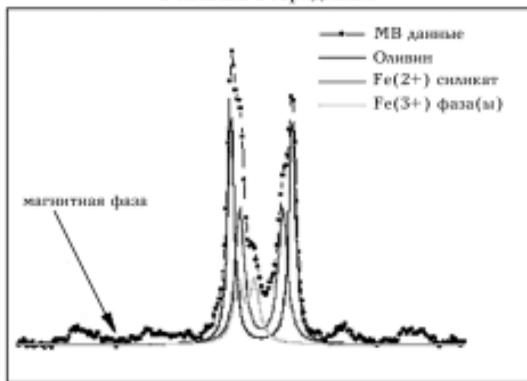


Рис. 7. Первый спектр обратного рассеяния, измеренный на поверхности Марса на равнине Meridiani Planit мессбауэровским спектрометром на марсоходе Opportunity. По вертикальной оси отложена скорость счета по отношению к фону, в процентах, на горизонтальной оси показана скорость перемещения радиоактивного источника, в миллиметрах в секунду.

Различные кривые представляют минералогические фазы соединений железа. (Картинка НАСА/ЛРД Майнцкого университета, помещена на веб-сайте <http://origin.mars5.jpl.nasa.gov/gallery/press/opportunity/20040204a.html>)

The Athena Science Payload on this rover was designed and built by:					
R. Anderson	J. Brückner	S. Perry	J. Jeffries	S. Meyer	L. Shirashi
B. Andreichikov	J. Cardone	R. Fleischer	J. Ji	T. Myrick	S. Silverman
R. Arvidson	C. Chapman	J. Foh	M. Johnson	W. O'Donnell	G. H. Smith
M. Balzer	P. Christensen	V. Ford	E. Kankleit	H.B. Pedersen	S. Squyres
P. Bartlett	P. Cha	T. Fontana	P. Karimann	R. Perata	R. Steinke
D. Bates	S.A. Collins	R. Gelert	R. Keehn	A. Pourangi	S. Stroescu
C. Bating	G. Cuculu	W. Goetz	K. Kelly	O. Prilutsky	J. Suchman
E. Baumgartner	S. Dallas	B. Goldstein	G. Klingelhöfer	V. Radchenko	R. Sullivan
J. Bell III	K. Davis	N. Gorelick	J.M. Knudsen	J. Rademacher	W. Sullivan
B. Bernhard	R. Deering	S. Gorevat	S. Kordos	R. Rieder	D. Thiessen
P. Bertelsen	R. Denise	E. Hagerott	P.C. Leger	D. Rodionov	T. Townville
R. Billing	A. Dinglian	W. Hartford	G. Lavenese	R. Romero	C. Van Houten
C. Blaney	G. Dreibus	D. Harrison	B. Linderoth	S. Sedick	E. Villegas
R. Bonitz	T. Economou	P. Handeshott	M.B. Madsen	B. St Ange	M. Westworth
U. Bonnes	T. Elliott	R. Heninger	J. Maki	L. Scher	H. Winkle
J. Brinckmann	E. Evlansv	K. Herkenhoff	G. Mahal	M. Schwobert	R. Williamson
D. Brown	P. Fatelli	B. Jau	J. Melko	D. Sherman	A. Yen

Рис. 8. Табличка со списком участников создания комплекса «Атена»

Литература

1. *Klingelhöfer G., Morris R.V., Rodionov D., Linkin S., Evlanov E., Zubkov B., Prilutski O.* et al. Athena MIMOS II Mössbauer spectrometer investigation // *J. of Geophysical Research*. 2003. V. 108. Issue E12. P. ROV 8-1.
2. *Евланов Е.Н., Зубков Б.В., Линкин В.М., Прилуцкий О.Ф.* Мессбауэровские спектры поверхности Марса — как это начиналось // Тр. междунар. конф., посвященной семидесятилетию академика РАН Роальда Зиннуровича Сагдеева «Физика плазмы, космические исследования, международное сотрудничество: взгляд в будущее». 20–22 января 2003 г. ИКИ РАН. М.: ООО «Регион-Инвест», 2004. С. 149.
3. *Klingelhöfer G., Foh J., Held P., Jöger H., Kankleit E., Teucher R., Evlanov E.N., Khromov V., Mukhin L.M., Prilutski O.F., Zubkov B., Smirnov G.V., Juchniewicz J., Knudsen J.M., Madsen M., D'Uston C.* Mössbauer Spectroscopy on the Surface of Mars // Program and Abstr. for Clay Minerals Society, 28th Annual Meeting. Held October 5–10, 1991. Houston, TX., LPI Contribution 773, Lunar and Planetary Institute, 1991. P. 90.
4. *Sims Mark R., Pillingier C.T., Wright I.P.* et al. Instrumentation on Beagle 2: the astrobiology lander on ESA's 2003 Mars Express mission // Proc. SPIE Instruments, Methods and Missions for Astrobiology III / Ed. Richard B. Hoover. 2000. V. 4137. P. 36–47.