

# Аналитические возможности мёссбаэровской спектроскопии

В.Г.Семенов, Л.Н.Москвин, А.А.Ефимов

Санкт-Петербургский государственный университет, Химический факультет  
198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 26, факс (812)428–6939

Приведены основные сведения о мёссбаэровской спектроскопии, необходимые для получения качественной и количественной информации о составе вещества из мёссбаэровских спектров. Обсуждены методы обработки мёссбаэровских спектров и описаны базы данных для поиска информации об интересующих объектах. Рассмотрено применение мёссбаэровской спектроскопии в различных областях химии, минералогии, биологии и материаловедения.

Библиография — 135 ссылок.

## Оглавление

I. Введение	354
II. Физические принципы метода мёссбаэровской спектроскопии и его модификации	355
III. Мёссбаэровские спектры как источник аналитической информации	356
IV. Методы обработки мёссбаэровских спектров и базы данных	358
V. Геохимические и космохимические объекты анализа	359
VI. Мёссбаэровская спектроскопия в анализе и исследованиях биологических объектов	360
VII. Мёссбаэровская спектроскопия в структурных исследованиях	361
VIII. Мёссбаэровская спектроскопия в изучении и контроле процессов коррозии и катализа	362
IX. Заключение	363

## I. Введение

Прошло более 45 лет с момента открытия Рудольфом Мёссбаэром<sup>1</sup> явления резонансной ядерной флуоресценции  $\gamma$ -излучения в  $^{191}\text{Ir}$ . Основанный на этом явлении спектральный метод получил название мёссбаэровской спектроскопии (МС) или, реже, ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС). Метод сразу же превратился в мощный инструмент исследования структурного и химического состояния твердых веществ и нашел широкое применение в различных областях науки и техники,<sup>2</sup> таких как материаловедение, химия, биология, геология, минералогия и др. К настоящему времени опубликовано множество монографий, посвященных МС (см., например, монографии<sup>3–9</sup>).

**В.Г.Семенов.** Доктор физико-математических наук, профессор химического факультета СПбГУ. Телефон: (812)428–4039, e-mail: semenov@moss.pu.ru

Область научных интересов: физические методы в аналитической химии, мёссбаэровская спектроскопия, синхротронное излучение.

**Л.Н.Москвин.** Доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой аналитической химии того же факультета.

Телефон: (812)428–6833, e-mail: leonid.moskvin@pobox.spbu.ru

Область научных интересов: методы разделения и их применение в аналитической химии и радиохимии, физические методы в атомной энергетике.

**А.А.Ефимов.** Кандидат химических наук, старший научный сотрудник той же кафедры. Телефон: (812)428–6777, e-mail: efimov@mail.ru  
Область научных интересов: радиохимические методы в атомной энергетике, коррозия.

Дата поступления 3 октября 2005 г.

Основное внимание в них уделено рассмотрению физических принципов метода и его теоретических аспектов, а также наиболее интересным объектам исследования, число которых постоянно растет, особенно в связи с возросшим интересом к проблемам материаловедения. Сегодня можно с уверенностью сказать, что МС перешла из разряда экзотических физических методов исследования в разряд обычных аналитических методов со своей методологией и своими объектами анализа.

В настоящее время всю информацию о мёссбаэровских исследованиях и их результатах можно найти на сайте Центра данных по эффекту Мёссбаэра (MEDC) при университете штата Северная Каролина в США ([www.unca.edu/medc](http://www.unca.edu/medc)). Созданная этим центром информационная система содержит около 40 000 библиографических ссылок, в том числе и на открытие эффекта Мёссбаэра. Новые библиографические ссылки регулярно публикуются в ежегодной серии из 10 выпусков журнала *Mössbauer Effect Reference and Data Journal* (MERDJ).<sup>10</sup> Центр издает также отдельные сборники, в которых обобщаются сведения по различным направлениям и объектам исследований с применением МС (минералогия, материаловедение, аналитическая химия, катализ и др.).<sup>11</sup>

До недавнего времени МС занимала весьма скромное место в ряду других методов аналитической химии. Химики-аналитики часто просто не владели информацией об аналитических возможностях МС. В последние годы ситуация стала меняться. Так, свидетельством возросшего интереса к аналитическим возможностям МС явилась установка мёссбаэровских спектрометров на Марсоходах «Spirit» и «Opportunity», которые позволили получить надежные данные о химических процессах на Марсе, происходящих с участием воды. Настоящая статья ставит своей целью

привлечь внимание химиков-аналитиков к этому методу. В ней рассматриваются основные методологические вопросы МС, а также методы обработки мёссбауэровских спектров для извлечения качественной и количественной информации и наиболее типичные объекты анализа в химии, геологии, минералогии, биологии и материаловедении. При рассмотрении результатов анализа конкретных объектов особое внимание обращено на методические особенности эксперимента в зависимости от природы объекта.

## II. Физические принципы метода мёссбауэровской спектроскопии и его модификации

В основе метода мёссбауэровской спектроскопии лежит безотдачное резонансное поглощение  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0$ , испускаемых ядрами мёссбауэровских изотопов в возбужденном состоянии (источник излучения), аналогичными ядрами в исследуемом объекте (поглотителе), находящимися в основном состоянии. При поглощении  $\gamma$ -квантов последние переходят в возбужденное состояние с энергией  $E'_0$ , причем резонансное поглощение возможно только при  $E_0 = E'_0$ . Заслуга Мёссбауэра состояла в том, что он нашел условия, при которых стало возможным наблюдать резонансное поглощение  $\gamma$ -квантов атомными ядрами. Он обнаружил, что если излучающие ядра входят в состав твердого тела,<sup>†</sup> то возникает значительная вероятность того, что процесс излучения будет проходить без потери части энергии на отдачу ядра, так как энергия передается не отдельному атому, а всему кристаллу, превращаясь в энергию колебаний кристаллической решетки. В этом случае спектральные линии излучения и поглощения имеют одинаковую естественную ширину ( $\Gamma$ ), определяемую квантовомеханическим соотношением неопределенностей Гейзенберга:

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau},$$

где  $\hbar = h/2\pi$ ,  $\tau$  — время жизни возбужденного состояния мёссбауэровского ядра. Типичные значения времен жизни возбужденных состояний ядер лежат в интервале от  $10^{-10}$  до  $10^{-6}$  с, что отвечает ширинам линий  $\Gamma = 10^{-5} - 10^{-9}$  эВ. Относительная ширина линий для ядерных переходов, энергия которых составляет  $10^4 - 10^5$  эВ, находится в интервале  $10^{-10} - 10^{-15}$  эВ, что определяет чрезвычайно высокую разрешающую способность мёссбауэровской спектроскопии по энергии, которая намного превосходит разрешающую способность любых других физических методов.

В реальных условиях следует принимать во внимание изменение энергии  $\gamma$ -кванта, связанное с тепловым движением атомов, поэтому для измерения мёссбауэровских спектров поглощения (рассеяния) необходимо контролируемым образом изменять энергию  $\gamma$ -квантов источника излучения в диапазоне от единиц до десятков наноэлектронвольт. Чаще всего это достигается за счет установки источника излучения на доплеровский модулятор, обеспечивающий непрерывное перемещение источника относительно поглотителя (анализируемого образца). Доплеровское изменение энергии  $\Delta E_D$ , возникающее при перемещении источника излучения с варьируемой скоростью  $v$ , равно

$$\Delta E_D = \frac{E_0 v}{c},$$

<sup>†</sup> В дальнейшем было показано, что эффект Мёссбауэра можно наблюдать не только в твердых телах, являющихся регулярными кристаллами, но и в таких системах взаимосвязанных атомов, как аморфные тела или растворы.<sup>12, 13</sup>

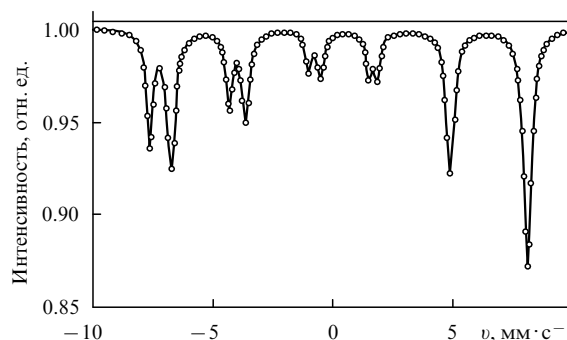


Рис. 1. Мёссбауэровский спектр соединения  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

где  $c$  — скорость света. В этом случае энергия  $\gamma$ -квантов в направлении поглотителя выражается как

$$E(v) = E_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \right) = E_0 + \Delta E_D, \quad (1)$$

где  $E(v)$  — энергия  $\gamma$ -кванта, вылетающего из источника, движущегося со скоростью  $v$ ;  $E_0$  — энергия  $\gamma$ -кванта, вылетающего из неподвижного источника.

Мёссбауэровский спектр поглощения принято представлять в виде зависимости относительной интенсивности излучения, прошедшего через образец или рассеянного им, от скорости движения источника излучения относительно образца (рис. 1). Фактически это означает, что спектр представляет собой зависимость сечения поглощения  $\gamma$ -квантов от величины доплеровской добавки ( $\Delta E_D$ ) к энергии  $E_0$  этих квантов. Для удобства количественной оценки сигнала вместо относительной интенсивности используют значение величины эффекта, которое показывает относительное отклонение сигнала от фонового значения. Для получения дополнительной информации об анализируемом объекте обычно варьируют параметры внешней среды, влияющие на эффект резонансного поглощения, такие как температура, давление, внешние магнитные и электрические поля.

При измерении мёссбауэровских спектров регистрируют либо  $\gamma$ -излучение, прошедшее через поглотитель (геометрия пропускания), либо рассеянное поглотителем излучение, связанное с резонансными процессами (геометрия рассеяния). Так как мёссбауэровские переходы в той или иной степени конвертированы, то в попытках на рассеяние помимо резонансного  $\gamma$ -излучения можно регистрировать рентгеновское излучение или электроны конверсии, сопутствующие процессу резонансного рассеяния  $\gamma$ -излучения. Рентгеновское излучение несет информацию о состоянии поверхностного слоя образца толщиной в несколько десятков микрометров, а электроны конверсии — только о состоянии поверхностного слоя толщиной 200–300 нм, что определяется малой глубиной их выхода из материала образца. Соответствующий вид мёссбауэровской спектроскопии получил название МС на электронах конверсии (КЭМС).<sup>7</sup> В последнее время для исследований ультратонких поверхностных слоев (2–200 нм) стали использовать новую модификацию КЭМС — малоугловую мёссбауэровскую спектроскопию с регистрацией электронов конверсии.<sup>14–16</sup> Изменяя угол падения  $\gamma$ -квантов, можно изменять глубину проникновения  $\gamma$ -излучения в поверхностные слои исследуемого образца.

Обычно в качестве источника излучения применяют долгоживущие материнские радионуклиды, функция которых сводится к созданию потока монохроматического интенсивного резонансного  $\gamma$ -излучения, которое затем используется для исследования состояния соответствующих мёссбауэров-

ских ядер в поглотителе или рассеивателе. Однако возможна и другая схема эксперимента, когда в качестве источника  $\gamma$ -квантов выступает сам анализируемый образец с внедренным в него мёссбауэровским изотопом, а в качестве поглотителя или рассеивателя — известное вещество с тем же изотопом с одиночной монокроматической линией для соответствующего мёссбауэровского излучения. Такой вариант принято называть эмиссионной мёссбауэровской спектроскопией (ЭМС).<sup>17</sup> Такие мёссбауэровские спектры будут отражать особенности химического окружения резонансного атома и структуры, в которую этот атом входит. Чувствительность ЭМС достигает  $10^{12}$  атомов на  $1 \text{ см}^2$  площади образца, что намного выше, чем в спектроскопии на рассеяние и поглощение. Важной особенностью и ограничением ЭМС является то, что необходимо работать с радиоактивными веществами в открытом виде, поэтому этот вариант МС не получил широкого распространения в практике мёссбауэровских исследований.

Возможность применения метода МС к изучению тех или иных объектов определяется их элементным составом. В настоящее время известно более 40 элементов, изотопы которых могут быть использованы в мёссбауэровской спектроскопии, однако в аналитических целях, в силу ряда физических и технических ограничений, используется не более 7 изотопов ( $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{121}\text{Sb}$ ,  $^{125}\text{Te}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{151}\text{Eu}$  и  $^{197}\text{Au}$ ), из которых наибольшее практическое значение имеют изотопы  $^{57}\text{Fe}$  и  $^{119}\text{Sn}$ . Несмотря на относительно небольшое число «мёссбауэровских» изотопов, количество изучаемых методом МС объектов достаточно велико, так как эти элементы входят в состав многих подлежащих анализу объектов. Известно, что железо относится к числу наиболее распространенных на Земле элементов, поэтому метод МС на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  активно применяется в геохимических и материаловедческих исследованиях твердофазных железосодержащих образцов.

Мёссбауэровская спектроскопия на ядрах  $^{119}\text{Sn}$  находит меньшее применение, так как распространенность олова в земной коре в 1000 раз ниже, чем железа. Тем не менее на заре развития МС было проведено множество исследований оловосодержащих материалов и минералов и даже созданы специализированные приборы для геологоразведочных работ на олово.

### III. Мёссбауэровские спектры как источник аналитической информации

Ядро мёссбауэровского атома является высокочувствительным зондом — энергия ядерных подуровней изменяется в зависимости от электронного окружения ядра, а также от внутренних и внешних электрических и магнитных полей.

Мёссбауэровские спектры несут информацию о большом числе взаимодействий, многие из которых опосредованно связаны с химической природой мёссбауэровского атома и его ближайшего окружения. Связь эта является косвенной, потому что химические свойства атома обуславливаются его внешними электронами, которые экранированы от мёссбауэровского ядра внутренними электронами. В табл. 1 приведен перечень наиболее важных параметров, необходимых для проведения качественного анализа, которые определяются из мёссбауэровских спектров. Здесь же даны схемы энергетических уровней, демонстрирующие влияние рассматриваемых параметров, и соответствующие этим схемам формы мёссбауэровских спектров. В качестве резонансных ядер рассматриваются ядра наиболее широко используемых мёссбауэровских изотопов  $^{57}\text{Fe}$  и  $^{119}\text{Sn}$ . Ядра этих изотопов в основном состоянии имеют спин  $I_0 = 1/2$ , а в возбужденном —  $I_b = 3/2$ .

Каждый из перечисленных в табл. 1 параметров мёссбауэровских спектров имеет свою физическую природу и обладает определенной аналитической информативностью. Их детальное рассмотрение можно найти в работах<sup>4–9</sup>. Помимо перечисленных в табл. 1 параметров следует отметить еще один — вероятность эффекта Мёссбауэра ( $f_M$ ), — который играет важную роль в количественном анализе с помощью МС.

Количественный анализ основан на предположении пропорциональности площади ( $S$ ) линий в спектре тонкого поглотителя количеству атомов ( $n$ ), содержащих ядра, на которых наблюдается эффект безотдачного поглощения:

$$S = k f_M n,$$

где  $k$  — фактор, учитывающий сечение резонансного поглощения, интенсивность излучения, время набора спектра, энергию  $\gamma$ -квантов, влияние фонового излучения и угол, образуемый направлением потока  $\gamma$ -квантов с нормалью к поверхности поглотителя;  $f_M$  — вероятность эффекта Мёссбауэра, т.е. вероятность упругих процессов, протекающих без отдачи. Величина  $f_M$  зависит от среднеквадратичного смещения ядер поглотителя из положения равновесия ( $\langle x^2 \rangle$ ) при температуре  $T$

$$f_M = \exp\left(\frac{-p^2 \langle x^2 \rangle}{\hbar}\right),$$

где  $p = E_\gamma/c$  — импульс  $\gamma$ -кванта ( $E_\gamma = \hbar\nu$  — энергия фотона).

Чем сильнее атомы связаны друг с другом в кристаллической решетке, тем выше характеристическая (дебаевская) температура вещества  $\Theta_D$ , тем меньше при данной температуре величина среднеквадратичного смещения ядер, а следовательно, тем больше вероятность эффекта Мёссбауэра. Приведенная зависимость площади спектра от количества резонансных ядер справедлива в приближении тонкого поглотителя, когда  $n\sigma \ll 1$  ( $\sigma$  — сечение резонансного поглощения), т.е. когда нет искажения формы резонансной линии за счет эффекта насыщения.

*Ширина резонансной линии.* Линия экспериментального мёссбауэровского спектра при небольшой толщине поглотителя имеет лоренцеву форму<sup>1</sup> (см. табл. 1), и ее минимальная ширина определяется удвоенной естественной шириной линии поглощения  $\Gamma$ . Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что существует уширение линий, обусловленное диффузным движением атомов. На ширину линии влияют дефекты кристаллической решетки, которые вызывают изменения в локальном окружении резонансных атомов. Наиболее сильно уширение линий проявляется в спектрах аморфных и стеклообразных материалов.

*Изомерный (химический) сдвиг ( $\delta_c$ )* возникает в том случае, когда химическое окружение мёссбауэровских ядер в источнике и поглотителе не идентично, и проявляется в смещении линии резонансного поглощения относительно линии поглощения при  $\nu = 0$ . Величина  $\delta_c$  определяется следующим выражением:

$$\delta_c = \frac{4\pi}{5} e^2 Z R^2 \frac{\Delta R}{R} \{ |\Psi(0)|_n^2 - |\Psi(0)|_i^2 \}, \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $Z$  — заряд ядра,  $R$  — средний радиус ядра,  $\Delta R$  — изменение радиуса ядра при переходе из возбужденного состояния в основное,  $|\Psi(0)|_n^2$  и  $|\Psi(0)|_i^2$  — электронные плотности на ядрах резонансных атомов в поглотителе (п) и источнике (и) соответственно. Для конкретного ядра отношение  $\Delta R/R$  постоянно и химический сдвиг определяется только различием в значениях электронной плотности на резонансных ядрах в источнике и поглотителе, которая зави-

**Таблица 1.** Основные параметры мёссбауэровских спектров на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  и  $^{119}\text{Sn}$ .

Характеристики мёссбауэровских спектров	Схемы энергетических уровней и переходов для изотопов $^{57}\text{Fe}$ (или $^{119}\text{Sn}$ ) в		Вид мёссбауэровского спектра
	источнике излучения (и)	поглотителе излучения (п)	
Ширина резонансной линии ( $\Gamma$ )			
Изомерный (химический) сдвиг ( $\delta_c$ )			
Температурный (доплеровский) сдвиг второго порядка ( $\delta_T$ )			
Квадрупольное расщепление энергии ( $\Delta E_Q$ )			
Магнитное расщепление			

сит главным образом от заселенности s-состояний. Электроны других оболочек (p, d, f) могут оказывать косвенное влияние на величину  $\delta_c$  посредством частичного экранирования s-электронов или образования s-орбиталями гибридных состояний, что в общем случае требует их учета при интерпретации величин химических сдвигов. Значения  $\delta_c$ , полученные с помощью мёссбауэровской спектроскопии, позволяют

делать выводы о характере химической связи, ее ковалентности, координации, степени электронной делокализации и т.д.

*Температурный (доплеровский) сдвиг второго порядка ( $\delta_T$ )* возникает вследствие изменения энергии  $\gamma$ -квантов при их излучении и поглощении (из-за различия в температурах источника и поглотителя) и проявляется в виде смещения линии резонансного поглощения. Величина смещения определяется выражением

$$\delta_T = -\frac{\langle v^2 \rangle}{2c^2} E_0, \quad (3)$$

где  $\langle v^2 \rangle$  — зависящая от температуры среднеквадратичная скорость, характеризующая движение атомов в твердом теле.

Таким образом, наблюдаемый в мёссбауэровских спектрах энергетический сдвиг  $\delta$  является суммой двух вкладов

$$\delta = \delta_c + \delta_T.$$

Квадрупольное расщепление ( $\Delta E_Q$ ) является результатом взаимодействия квадрупольного момента резонансного ядра, имеющего несферическую форму, с градиентом электрического поля, создаваемого на ядре электронной оболочкой и лигандами. Такое взаимодействие приводит к расщеплению ядерного энергетического уровня на подуровни, расстояние между которыми ( $\Delta E_Q$ ) описывается (например, для ядер  $^{57}\text{Fe}$ ) выражением

$$\Delta E_Q = \frac{eQ}{2} V_{zz} \sqrt{1 + \frac{\eta^2}{3}}, \quad (4)$$

где  $eQ$  — квадрупольный момент ядра,  $V_{zz}$  — значение главной компоненты градиента электрического поля на ядре вдоль оси  $z$ ,  $\eta = (V_{zz} - V_{yy})/V_{xx}$  — параметр асимметрии ( $V_{xx}$  и  $V_{yy}$  — значения градиента электрического поля вдоль осей  $x$  и  $y$ ). Выбор осей осуществляется так, чтобы  $0 \leq \eta \leq 1$ . Градиент электрического поля на ядре определяется геометрией расположения и эффективными зарядами ионов, окружающих резонансное ядро в анализируемом объекте, а также присутствием частично заполненных несферических электронных оболочек (p, d, f) в самом резонансном атоме. Таким образом, в общем случае квадрупольное взаимодействие мёссбауэровского ядра содержит в себе информацию о структуре атомного окружения ядра в кристаллической решетке и о состоянии его собственных валентных оболочек.

Одновременное присутствие в мёссбауэровском спектре химического сдвига и квадрупольного расщепления, на которые по-разному влияют s- и p-электроны, позволяет получить более разностороннюю информацию о состоянии электронной оболочки резонансного атома и о локальной структуре кристаллической решетки.

Магнитное (зеemanовское) расщепление ( $\Delta E_m$ ) возникает благодаря взаимодействию магнитного момента ядра, находящегося в основном и возбужденном состояниях, с эффективным магнитным полем ( $B$ ), создаваемым на ядре электронной оболочкой. Величина зеemanовского расщепления определяется зависимостью

$$E_m = -g_I \mu_N B \Delta m_I, \quad (5)$$

где  $g_I$  — ядерное гиромангнитное отношение для данного уровня ядра ( $I$  — спин ядра),  $\mu_N$  — ядерный магнетон,  $m_I$  — магнитное квантовое число,  $\Delta m_I$  — изменение магнитного квантового числа при переходе ядра  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{119}\text{Sn}$  или  $^{125}\text{Te}$  из возбужденного состояния со спином  $I_b = 3/2$  в основное состояние со спином  $I_o = 1/2$ . При испускании каждого  $\gamma$ -кванта с одного из четырех подуровней возбужденного состояния (+3/2, +1/2, -1/2, -3/2) ядро переходит на один из двух подуровней основного состояния (+1/2, -1/2). Переход осуществляется в соответствии с правилом отбора для дипольных переходов ( $\Delta m = 0, \pm 1$ ), что приводит к появлению в мёссбауэровском спектре магнитной сверхтонкой структуры, состоящей из шести линий (см. табл. 1). При одновременном участии ядра в магнитном и квадрупольном взаимодействиях расчет энергетических уровней усложняется. Напряженность магнитного поля  $B$  зависит от структурных и электрических параметров: числа неспаренных d-электронов, характера химической связи резонансного

атома, геометрии окружения и т.д. Таким образом, появление сверхтонкого магнитного расщепления значительно увеличивает информативность мёссбауэровских спектров, позволяя делать выводы об особенностях электронной, кристаллохимической и магнитной структур анализируемых соединений.

Информативность рассмотренных выше основных параметров мёссбауэровских спектров свидетельствует о том, что этот сравнительно простой в экспериментальном отношении метод не только обладает большими возможностями в исследовании структуры и электронных свойств твердых тел, но и является эффективным методом вещественного анализа твердофазных образцов, несмотря на ограниченное число мёссбауэровских изотопов. Доказательством обоснованности подобного утверждения являются многочисленные примеры решения сложных аналитических задач методом МС.

Уникальность получаемой информации о локальном химическом состоянии резонансного атома и об электрических и магнитных полях, действующих на ядро этого атома, привели к тому, что появились работы (см., например, работу<sup>18</sup>), в которых резонансные атомы специально вводили в состав образца в качестве своеобразного зонда (метод ЭМС). Этот подход нашел применение, в частности, при исследовании высокотемпературных сверхпроводников. Так, авторы работы<sup>18</sup> замещали атомы меди в кристаллической решетке сверхпроводников  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$  и  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  на изотопы  $^{67}\text{Cu}$  путем диффузионного легирования, после чего измеряли мёссбауэровские спектры  $^{67}\text{Cu}$  ( $^{67}\text{Zn}$ ) при 4.2 К с поглотителем  $^{67}\text{ZnS}$ . Главной проблемой при таком подходе является подтверждение факта, что резонансные атомы займут в структуре вещества положения, аналогичные замещаемым атомам.

#### IV. Методы обработки мёссбауэровских спектров и базы данных

Важным этапом в мёссбауэровской спектроскопии является математическая обработка экспериментальных спектров с помощью специальных программ, которые позволяют теоретически описать экспериментальный спектр с помощью набора резонансных линий. Целью обработки является определение рассмотренных в предыдущем разделе физических параметров.

Мёссбауэровские спектры, как правило, обрабатывают по методу наименьших квадратов.<sup>19–21</sup> С помощью компьютерных программ минимизируют функционал

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} [N_i - S_i(p_0, p_1, \dots, p_k)]^2 \quad (6)$$

по параметрам  $p_0, p_1, \dots, p_k$ . Здесь  $N_i$  — число отсчетов в  $i$ -м канале  $\ddagger$  экспериментального спектра,  $S_i(p_0, p_1, \dots, p_k)$  — значение модельного спектра для  $i$ -го канала,  $n$  — общее число каналов. Обработке экспериментального спектра предшествует выбор формы модельного спектра. В основе выбора лежит априорная информация об анализируемом объекте. Под модельным спектром подразумевается спектр, состоящий из набора резонансных линий, соответствующих определенному типу сверхтонкой структуры резонансных ядер. $\S$  Модельный спектр тонкого поглотителя можно представить в виде суперпозиции лоренцевых линий с отрица-

$\ddagger$  Интенсивность потока  $\gamma$ -квантов фиксируется с помощью многоканального анализатора. Номер канала пропорционален скорости движения источника излучения.

$\S$  Если резонансные ядра находятся в неэквивалентных положениях, то форма модельного спектра будет соответствовать суперпозиции сверхтонких структур.

тельными (спектры на поглощение) или положительными (спектры на рассеяние) амплитудами относительно базовой линии.

В качестве модельного спектра толстого поглотителя используют либо свертки лоренцевой и гауссовой функций,<sup>22</sup> либо интеграл пропускания,<sup>23</sup> который описывает прохождение резонансного  $\gamma$ -кванта через поглотитель, содержащий резонансные ядра. Такой подход наиболее эффективен для количественного анализа.

Существует большой класс веществ (аморфные вещества, сплавы, ультрадисперсные среды и т.д.), в которых ближайшее пространственное и элементное окружение атомов, содержащих резонансные ядра, непрерывно меняется. Спектры таких веществ представляют суперпозицию непрерывного ряда подспектров и не поддаются обработке с помощью алгоритмов, рассмотренных выше, так как задача становится некорректной (не существует однозначного решения). В этом случае используют другой подход, основанный на представлении модельного спектра в виде свертки элементарных  $k$  подспектров  $L_i^k(p_0, p_1, \dots, p_k)$  с непрерывно меняющимися одним или двумя параметрами сверхтонких взаимодействий и весовой функцией  $P^k(p_0, p_1, \dots, p_k)$  этих подспектров, часто называемой функцией распределения сверхтонких полей.<sup>24,25</sup> Эта функция дает информацию о распределении химических связей и электрических или магнитных полей на ядрах резонансных атомов в исследуемом веществе.

Известен также альтернативный подход к решению некорректно поставленных задач, основанный на принципе ограничения плотности числа линий по спектру в зависимости от его статистического качества.<sup>26</sup> Эффективность такого подхода продемонстрирована на примере анализа сложных для интерпретации мёссбауэровских спектров образцов высокотемпературных сверхпроводников.

Информативность мёссбауэровских спектров для качественного и количественного анализа можно проиллюстрировать на примере обработки спектра рассеяния  $\gamma$ -квантов окисленной поверхности металлического железа с регистрацией электронов конверсии. На рис. 2 представлены экспериментальный мёссбауэровский спектр (обозначен точками) и результат его разложения на отдельные подспектры, соответствующие атомам железа в различных фазах. Мёссбауэровские параметры подспектров позволяют идентифицировать железосодержащие фазы (качественный анализ), а

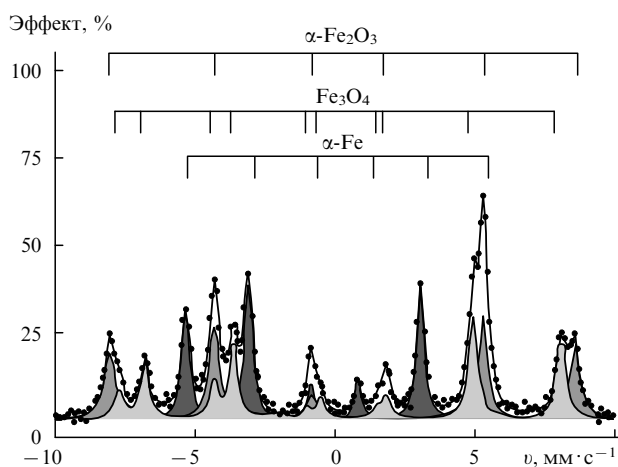


Рис. 2. Пример разложения экспериментального мёссбауэровского спектра на отдельные составляющие (подспектры), соответствующие атомам железа, входящим в состав той или иной фазы.

измерение площадей отдельных линий дает количественную оценку относительного содержания этих фаз. Для того чтобы получить точную оценку, необходимо ввести в значения площадей поправки на величину  $f_M$  (вероятность резонансного поглощения в каждой фазе). Однако нахождение фактора  $f_M$  представляет практические и теоретические трудности, поэтому обычно количественная оценка относительного содержания фаз производится с точностью до фактора  $f_M$ .

## V. Геохимические и космохимические объекты анализа

Наибольшее число примеров применения МС в химическом анализе относится к решению актуальных задач геохимии и космохимии. В их число входят определение степени окисления и координационных чисел атомов железа и олова в минералах,<sup>27–35</sup> фазовый анализ геологических пород,<sup>36–39</sup> метеоритов<sup>40–42</sup> и лунного грунта,<sup>43</sup> определение возраста и генезиса минералов.<sup>44,45</sup>

Среди последних работ особый интерес представляют исследования поверхности Марса,<sup>46–48</sup> в частности, изучение минералогического состава марсианского грунта с использованием специально разработанных для этих целей мёссбауэровских спектрометров MIMDS II. Цель этих исследований — понять эволюцию планеты, а также попытаться ответить на вопрос о существовании на Марсе воды. Объектами исследований были минералы железа. При анализе использовали геометрию обратного рассеяния конверсионного резонансного излучения. Данные анализа марсианского грунта в районе кратера Гусева и в равнинной части Марса были различны. Полной неожиданностью стало обнаружение в районе кратера оливина и пироксена — силикатных минералов, которые обычно содержатся в вулканических породах (рис. 3), в то время как основную часть (~95%) мёссбауэровских спектров грунта в равнинной части Марса составляет компонента, соответствующая такому широко распространенному на земле минералу, как гематит — Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 4). Образованию последнего обычно предшествуют процессы гидротермических превращений водорастворимых форм Fe(III), что косвенно свидетельствует о наличии

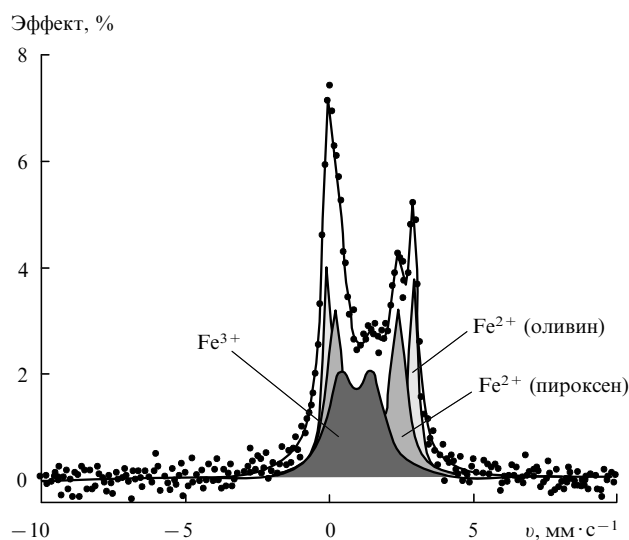


Рис. 3. Первый мёссбауэровский спектр, полученный с поверхности Марса в районе кратера Гусева (точки) и его разложение на отдельные составляющие, соответствующие атомам железа в различных окружениях.

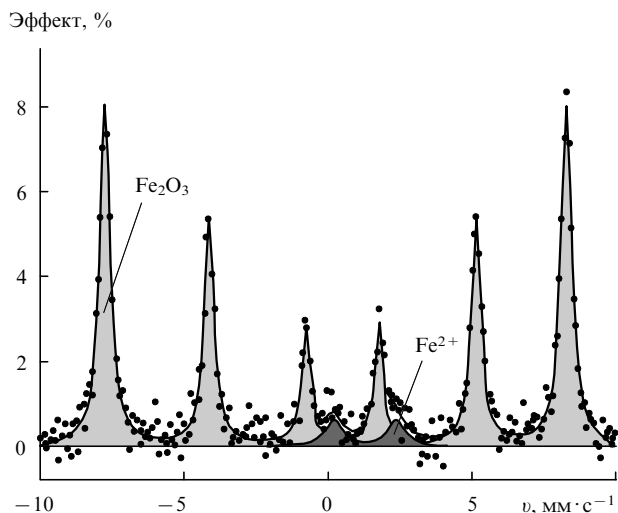


Рис. 4. Один из мёссбауэровских спектров грунта равнинной части Марса и результат его разложения на отдельные составляющие: гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (секстет) и оливин  $\text{Fe}^{2+}$  (дублет).

на Марсе воды. Для подтверждения выводов о процессах генезиса марсианских минералов необходимо продолжение исследований с помощью бурения для извлечения более глубоких слоев грунта.

Мёссбауэровская спектроскопия является одним из основных методов изучения генезиса минералов в земной коре. В последнее десятилетие резко возрос интерес к исследованию микробиологических путей формирования железосодержащих минералов с помощью анаэробных дисимбиотических железоредуцирующих бактерий, участвующих в восстановлении оксидов железа. Высказываются предположения о возможном участии этих бактерий в образовании докембрийских железно-кремнистых формаций. Мёссбауэровская спектроскопия, являясь высокочувствительным методом анализа железосодержащих объектов, позволила изучить не только кинетику фазовых превращений под влиянием железоредуцирующих бактерий, но и определить факторы, влияющие на этот процесс.<sup>49–54</sup> Полученные данные позволили предположить, что существуют различные пути биосинтеза железосодержащих минералов микроорганизмами, способствующими восстановлению  $\text{Fe(III)}$  до  $\text{Fe(II)}$ . В настоящее время механизмы биосинтеза до конца не ясны и идет интенсивное накопление экспериментальной информации.

## VI. Мёссбауэровская спектроскопия в анализе и исследованиях биологических объектов

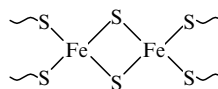
Атомы железа выполняют важную роль активных центров в таких жизненно важных белках, как гемоглобин, миоглобин, цитохромы и т.д. Эти белки обеспечивают обратимое связывание и перенос кислорода, участвуют в окислительно-восстановительных цепях фотосинтеза за счет транспорта электронов. Возможности применения МС для исследования биомолекул, главным образом белков, наиболее подробно обсуждаются в работах<sup>55–57</sup>. Важным направлением биологических исследований является сравнение мёссбауэровских параметров, полученных при изучении здорового организма и организма, подверженного различным патологиям или влиянию внешних воздействий.<sup>58–61</sup>

Методы измерения мёссбауэровских спектров биологических объектов в принципе не отличаются от методов, применяемых для исследования объектов неорганической

природы. Однако, за исключением ферредоксина, концентрация железа в исследуемых образцах настолько мала, что для получения статистически достоверных результатов необходимо их обогащать изотопом  $^{57}\text{Fe}$ . Поэтому важным этапом исследования и анализа биологических объектов является нахождение условий пробоподготовки, при которых можно направленно осуществить обмен атомов железа в образце на изотоп  $^{57}\text{Fe}$  без нарушений исходного строения белка. Это может осуществляться с помощью культивирования микроорганизмов в средах, содержащих этот изотоп, или в результате инъекции в организм раствора соли  $^{57}\text{Fe}$ .

С помощью МС были изучены гемовые и негемовые белки (например, входящие в фотосинтетические центры), железосерные, железотранспортные и железонакопительные белки. Удалось исследовать тонкости электронного и спинового превращения железа в гемовых и серосодержащих белках. Так, за обратимое связывание кислорода гемоглобином ( $\text{Hb}$ ) и функционирование гемоглобина ответствен атом  $\text{Fe(II)}$  в геме. С помощью МС было показано, что при нарушении обычных функций гема происходит окисление  $\text{Fe(II)}$  до  $\text{Fe(III)}$ . Железо(II) в геме находится в двух спиновых состояниях — высокоспиновом ( $I = 2$ ) и низкоспиновом ( $I = 0$ ). Высокоспиновое состояние наблюдается только у атома  $\text{Fe(II)}$  дезоксиформы  $\text{Hb}$  при наличии пяти лигандов. Низкоспиновое состояние характерно для соединения  $\text{Fe(II)}$  с шестью лигандами, причем в качестве шестого лиганда могут выступать молекулы  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}$ . Спектры  $\text{Hb}$ ,  $\text{HbO}_2$  и  $\text{HbCO}$  существенно отличаются друг от друга. Присоединение  $\text{O}_2$  к  $\text{Hb}$  сопровождается резким изменением величины химического сдвига, что связано с переходом  $\text{Fe}^{2+}$  из высокоспинового состояния (в  $\text{Hb}$ ) в низкоспиновое (в  $\text{HbO}_2$ ). Присоединение  $\text{CO}$  к гемоглобину приводит к образованию симметричной структуры  $\text{HbCO}$  (о чем свидетельствует уменьшение квадрупольного расщепления), причем связь  $\text{Fe(II)}-\text{CO}$  более прочная, чем связь  $\text{Fe(II)}-\text{O}_2$ . Поскольку  $\text{CO}$  присоединяется к  $\text{Hb}$  необратимо и лишает его способности к кислородному обмену, то отравление угарным газом приводит к летальному исходу.<sup>55</sup>

Одними из первых с помощью МС были изучены железосерные белки, так как они содержат относительно большое количество атомов железа в одной молекуле. Серосодержащие белки характеризуются наличием активного центра, состоящего из атомов железа и серы.<sup>62–66</sup>



Обычно атомы  $\text{Fe(II)}$  и  $\text{Fe(III)}$  в серосодержащих белках находятся в высокоспиновом состоянии. На рис. 5 приведены классические мёссбауэровские спектры ферредоксина ( $\text{Fd}$ )<sup>¶</sup> растительного типа в окисленном ( $\text{Fe(III)}$ ) и восстановленном ( $\text{Fe(II)}$ ) состояниях.

Мёссбауэровский спектр окисленного  $\text{Fd}$ , содержащего оба атома  $\text{Fe(III)}$  в тетраэдрической координации, состоит из двух дублетов с почти совпадающими параметрами:  $\delta = 0.22-0.25 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $E_Q = 0.6-0.7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  при температуре измерения 195 К. Низкое значение  $\delta$  свидетельствует о большой степени ковалентности связей  $\text{Fe}-\text{S}$ . Несмотря на однокатальный лигандный состав, очевидно, что положение атомов железа(III) в активном центре  $\text{Fd}$  не эквивалентны. По-видимому, это связано с влиянием полипептидных цепей,

¶ Ферредоксин — железосодержащий белок, выполняющий функции переносчика электрона во многих биологических окислительно-восстановительных процессах.

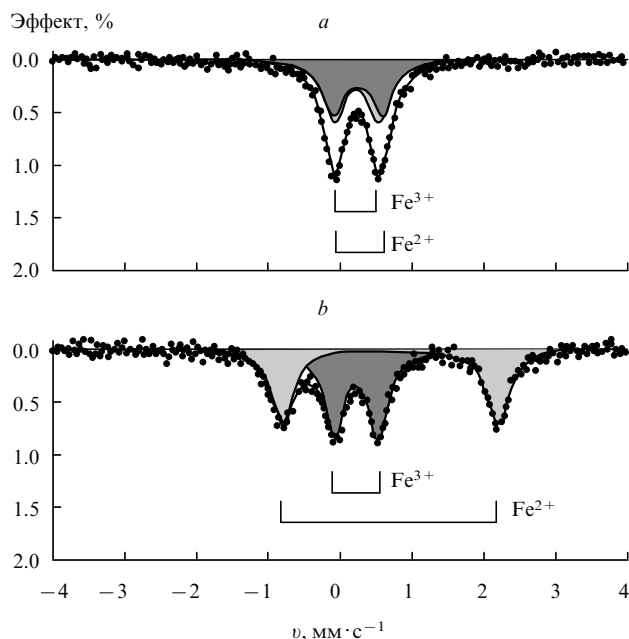


Рис. 5. Мёссбауэровские спектры ферредоксина растительного типа, измеренные при 195 К.

*a* — окисленный Fd, *b* — восстановленный Fd. Вертикальными линиями указаны положения линий дублетов.

приводящим к изменению длин связей и валентных углов в активном центре. При восстановлении Fd эта неэквивалентность отчетливо проявляется. Перенос одного электрона на Fd приводит к его локализации на одном из ионов Fe(III) и восстановлению последнего до Fe(II) ( $\delta \approx 0.7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $E_Q = 3.0 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ ), при этом электронное состояние другого иона Fe(III) изменяется незначительно.

В фармакологии МС применяется при исследовании состояния атомов железа в железосодержащих препаратах, используемых в медицинской практике. Большинство таких препаратов содержит двухвалентное железо, так как в этом случае (в отличие от Fe(III)) менее выражены побочные эффекты, характерные для соединений железа. Кроме того, специфическая биологическая активность препаратов, содержащих ионы Fe(II), выше, чем у препаратов, содержащих ионы Fe(III). Таким образом, для фармацевтического анализа важное значение приобретает определение степени окисления железа в железосодержащих препаратах. Метод МС применяется также для определения изменения степени окисления железа в процессе хранения препаратов. В работах <sup>67,68</sup> приведены результаты тестирования с использованием МС железосодержащих витаминов, выпускаемых ведущими фармацевтическими фирмами. Показано, что во всех витаминах присутствует малое количество трехвалентного железа, однако в некоторых образцах его содержание превысило допустимые нормы. Отсюда можно сделать вывод, что МС должна быть включена в перечень методов контроля железосодержащих медицинских препаратов.<sup>68</sup>

Помимо традиционной мёссбауэровской спектроскопии на поглощение, для анализа биологических объектов применяется и эмиссионная МС,<sup>12,69–72</sup> в которой в анализируемый объект вводится радиоактивный изотоп <sup>57</sup>Co. Несмотря на то что эта методика позволяет повысить чувствительность МС на несколько порядков, она используется сравнительно редко из-за уже отмечавшейся необходимости работать с открытыми радиоактивными препаратами.

Особое место занимают работы по изучению с помощью МС молекулярной подвижности белков, биополимеров и их фрагментов. В этом случае используется методика рэлеевского рассеяния мёссбауэровского излучения (РРМИ). С помощью этой методики удалось выделить различные группы движений, а также установить их частотные диапазоны и амплитуды колебаний.<sup>55,73–77</sup>

## VII. Мёссбауэровская спектроскопия в структурных исследованиях

Мёссбауэровская спектроскопия оказалась эффективным инструментом в области структурного анализа при исследовании структурных и магнитных фазовых переходов в органических и неорганических соединениях,<sup>78–87</sup> содержащих в качестве мёссбауэровского изотопа ядра <sup>57</sup>Fe, <sup>119</sup>Sn, <sup>121</sup>Sb, <sup>151</sup>Eu, <sup>155</sup>Gd или <sup>197</sup>Au. В данном случае МС позволяет существенно дополнить результаты, получаемые ИК- и ЯМР-спектральными методами. В основе высокой структурной чувствительности метода МС лежит тот факт, что параметры сверхтонкой структуры мёссбауэровского спектра (химический сдвиг, квадрупольное расщепление и магнитное сверхтонкое расщепление) непосредственно зависят от заселенности валентных состояний мёссбауэровского атома в исследуемом соединении и от геометрической структуры этого соединения. Изменение параметров мёссбауэровских спектров в зависимости от прилагаемых к исследуемым образцам внешних воздействий (температуры, давления, магнитного поля и т.д.) дает дополнительную информацию о структурных и фазовых переходах в исследуемых соединениях. Иллюстрацией применения МС в структурных исследованиях комплексов Fe(II) является изучение спин-переходного состояния, называемого спин-кроссовером,<sup>88–90</sup> — равновесного состояния между высокоспиновым (HS) и низкоспиновым (LS) состояниями. Спин-кроссовер может наблюдаться в комплексах переходных металлов с  $d^4$ -,  $d^5$ -,  $d^6$ -,  $d^7$ - и  $d^8$ -электронными конфигурациями. В зависимости от отношения энергии расщепления уровней атома переходного металла в поле лигандов ( $\Delta$ ) к энергии спаривания спинов ( $P$ ) основное состояние комплекса переходного металла может быть высокоспиновым (для слабого поля лигандов  $\Delta < P$ ) или низкоспиновым (для сильного поля лигандов  $\Delta > P$ ). Если разность  $|\Delta - P|$  становится сравнимой с тепловой энергией  $k_B T$ , то появляется возможность равновесного сосуществования высокоспинового и низкоспинового состояний. На рис. 6 приведена энергетическая диаграмма уровней 3d-орбиталей атома Fe(II) ( $3d^6$ -электронная конфигурация) в октаэдрическом ком-

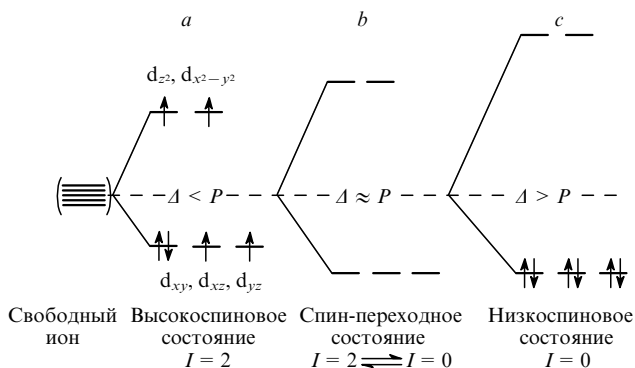
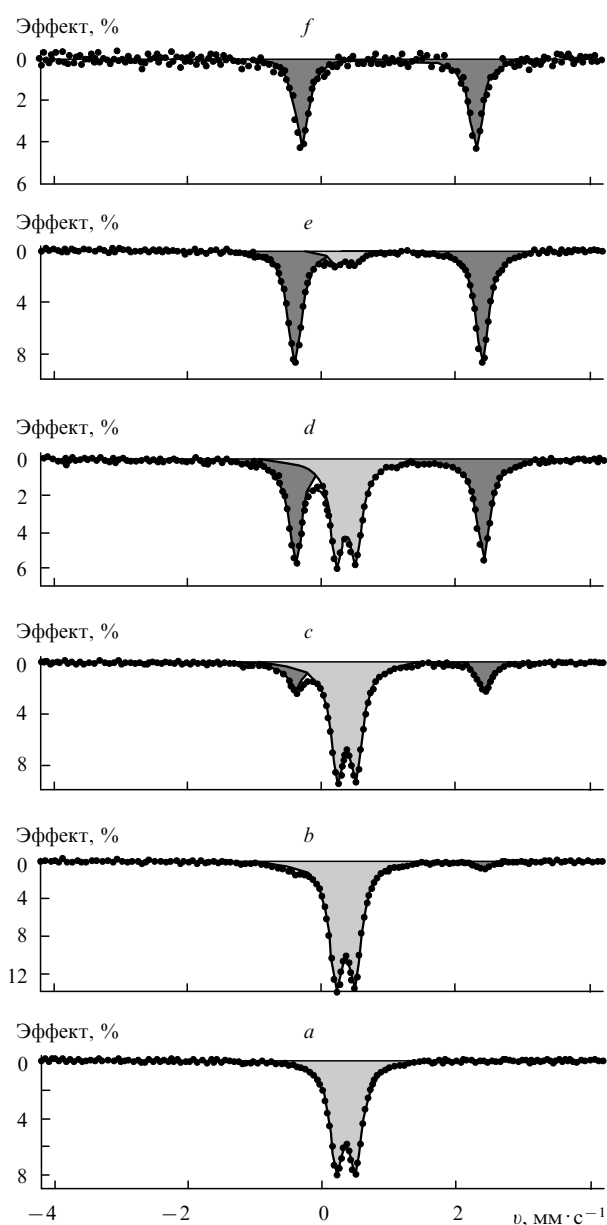


Рис. 6. Схема расположения уровней 3d-орбиталей Fe(II) в октаэдрическом комплексе при слабом (*a*), промежуточном (*b*) и сильном (*c*) поле лигандов.  $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}_{\text{обц}} \approx 0.6$ .





**Рис. 7.** Серия мёссбауэровских спектров соединения  $[\text{Fe}(\text{phen})_2(\text{NCS})_2]$ , измеренных при различных температурах. Подспектры, соответствующие атомам железа в низкоспиновом и высокоспиновом состояниях, обозначены светлой и темной штриховкой соответственно.

Температура, К: 77 (a), 180 (b), 184 (c), 186 (d), 188 (e), 300 (f).

плексе для высокоспинового, низкоспинового состояний и состояния спинового равновесия.

На рис. 7 приведена серия мёссбауэровских спектров соединения  $[\text{Fe}(\text{phen})_2(\text{NCS})_2]$ , измеренных при различных температурах. Видно, что спектр, полученный при 300 К (см. рис. 7, f), состоит из одного дублета с параметрами  $\delta \approx 1 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $E_Q = 2.6 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ , отвечающими чистому HS-состоянию Fe(II), а спектр при 77 К (рис. 7, a) — из одного дублета с параметрами  $\delta \approx 0.35 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $E_Q = 0.25 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ , отвечающими чистому LS-состоянию. В спектрах, полученных при температурах 180–188 К, проявляются два квадрупольных дублета, соответствующие двум спиновым состояниям HS и LS, причем понижение температуры приводит к уменьшению доли атомов Fe(II) в HS-состоянии и к

их росту в LS-состоянии. Видно, что переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно в узком интервале температур (180–188 К).

С помощью измерения магнитной восприимчивости методом МС были изучены спиновые переходы в комплексах Fe(III).<sup>91–93</sup> В настоящее время с помощью МС проводятся исследования спиновых переходов под воздействием электромагнитного излучения, магнитных полей и давлений.<sup>94–96</sup>

В структурных исследованиях соединений олова последних лет акцент сделан на определение зарядовых состояний и возможных кристаллографических положений атомов олова.<sup>97–99</sup> Возможность одновременного определения химического сдвига и квадрупольного расщепления позволяет применять МС для изучения строения, реакционной способности и механизмов превращения органических соединений олова (см. работы<sup>100–103</sup>).

## VIII. Мёссбауэровская спектроскопия в изучении и контроле процессов коррозии и катализа

Самым первым применением МС в химии было исследование оксидов железа как продуктов его коррозии. Фазовый состав продуктов коррозии на качественном уровне устанавливается сопоставлением параметров мёссбауэровских спектров с параметрами эталонных спектров искусственно синтезированных оксидных и гидроксидных соединений. Наиболее полные сведения о структуре, магнитных свойствах и мёссбауэровских параметрах основных оксидов, гидроксидов и ферригидридов железа приведены в работе<sup>104</sup>. В качестве достоинств МС как метода исследования процессов коррозии можно отметить следующие:

- уникальность получаемой информации о химических и структурных превращениях, имеющих место в процессе коррозии (во многих случаях возможна идентификация фаз по форме спектра);

- минимальная подготовка образцов для анализа и исследований;

- возможность проведения исследований *in situ* как в агрессивной атмосфере, так и в агрессивных жидкостях;

- возможность проведения послойного и фазового анализа под покрытием (при этом толщина исследуемых слоев может изменяться в очень широких пределах);

- одни и те же закономерности вклада в мёссбауэровский спектр от рентгеноаморфных и ультрадисперсных веществ (вклад определяется теми же закономерностями, что и вклад от хорошо окристаллизованных веществ).

Благодаря перечисленным достоинствам МС нашла широкое применение в исследованиях процессов коррозии, таких как коррозия в газах,<sup>105–109</sup> в воде и водных растворах,<sup>110–112</sup> в агрессивных средах,<sup>113</sup> а также в изучении процессов ингибирования и пассивирования,<sup>114–116</sup> внутреннего окисления и электродных реакций. Доступность метода МС позволяет использовать его и для решения задач аналитического контроля, таких как мониторинг процесса коррозии мостов<sup>117, 118</sup> и корпусов судов,<sup>118</sup> контуров тепловых и атомных энергетических установок<sup>117, 119, 120</sup> и др. Применение МС позволило не только определить фазовый состав оксидных пленок, появляющихся на поверхности перлитных сталей в процессе контакта их с водной фазой, но и установить взаимосвязь между формами существования железа в водной фазе и составом образованных на поверхности сталей пленок.<sup>119, 120</sup> С помощью МС было доказано, что одним из путей улучшения качества защитных коррозионных пленок на поверхности сталей является направленный выбор состава и структуры растворенных соединений железа, участвующих в их образовании.<sup>119, 120</sup>

Мёссбауэровская спектроскопия является высокоинформативным методом и при изучении таких поверхностных явлений, как каталитическая активность, динамика и химическое состояние атомов в высокодисперсных частицах, смолах, цеолитах, на поверхности сорбентов, а также в процессе исследования поверхностно-модифицированных материалов.<sup>17,121</sup> Возможности использования МС при исследовании нанокластеров и нанокластерных систем рассмотрены в работе<sup>122</sup>.

В гетерогенном катализе МС используется на разных этапах: при производстве катализаторов и получении их характеристик, при анализе химического состояния поверхности катализатора и анализе продуктов хемосорбции, а также в процессе работы катализатора. Применение рентгенодифракционных методов при исследовании реальных катализаторов затруднено из-за того, что катализаторы представляют собой ультрадисперсные частицы. Для МС этого ограничения не существует. С помощью МС можно получить информацию о размерах каталитических частиц и их распределении по каталитически активной фазе.

Чаще всего твердотельные катализаторы состоят из активной компоненты, нанесенной на подложку. Носитель может выполнять несколько функций: создавать наибольшую площадь поверхности для нанесения активной компоненты, стабилизировать малоустойчивую структуру и взаимодействовать за счет электронного обмена с активной компонентой, образуя единую каталитическую систему. Если активная компонента катализатора состоит из атомов, на ядрах которых наблюдается эффект Мёссбауэра, то с помощью химического сдвига в мёссбауэровских спектрах можно получить информацию о степени окисления этих атомов. Например, имеются данные, полученные с помощью МС, о большей каталитической активности железа, нанесенного на цеолит LTL, чем на  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , С и  $\text{MgO}$ .<sup>123</sup> Влияние температуры отжига на состояние атомов  $^{191}\text{Au}$  для двух типов катализаторов —  $\text{Au/TiO}_2$  и  $\text{Au/TiO}_2/\text{SiO}_2$  — было изучено в работе<sup>124</sup>, а в работе<sup>125</sup> исследован механизм низкотемпературного окисления  $\text{CO}$  с использованием катализатора  $\text{Au/Fe}_2\text{O}_3$ . В последние годы вновь вернулись к исследованию оловосодержащих катализаторов. Так, с помощью МС на ядрах  $^{119}\text{Sn}$  были изучены каталитические свойства систем  $\text{Pd-SnO/Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Pd-SnO/SiO}_2$ , предназначенных для очистки воды от нитратов.<sup>126–128</sup>

## IX. Заключение

В заключение необходимо отметить, что приведенными примерами не исчерпывается весь перечень аналитических приложений МС, которые можно найти в уже упоминавшихся специальных изданиях, посвященных данному методу. При этом практически невозможно провести грань между работами по применению МС в научных исследованиях и в химическом анализе, так как различия между ними весьма условны. Различия не затрагивают сам метод, отличаются лишь цели. Результаты фундаментальных исследований окружающего нас мира очень быстро могут оказаться востребованными для проведения химического анализа. Например, данные о механизмах процессов коррозии необходимы для контроля технологических процессов. Поэтому в предлагаемом обзоре сознательно не проводится эта грань. Приведенные примеры являются иллюстрацией основных направлений применения МС в химии, минералогии, биологии и материаловедении. Перечень таких примеров, несомненно, будет существенно расширен в будущем. Выбор в качестве иллюстративного материала преимущественно объектов, в которых эффект Мёссбауэра наблюдался на изотопе  $^{57}\text{Fe}$ , объясняется не только широкой распространенностью железосодержащих объектов, о чем уже говори-

лось выше, но и тем, что в последнее десятилетие подавляющее число работ (~90%) выполнено именно на этом изотопе, поэтому они наиболее адекватно отражают диапазон аналитических применений МС. Второе место (~6–7%) занимают работы, посвященные мёссбауэровской спектроскопии на ядрах  $^{119}\text{Sn}$ . Количество работ, выполненных с другими изотопами, в сумме составляет 3–4% от общего количества публикаций.

В связи с успехами, достигнутыми в области возбуждения ядерных резонансных уровней с помощью синхротронного излучения, можно надеяться, что откроются новые возможности для применения ядерного  $\gamma$ -резонанса в аналитических целях.<sup>129,130</sup> Во-первых, с использованием ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения снимаются проблемы приготовления мёссбауэровского источника, особенно короткоживущих источников. Во-вторых, вспомогательное оборудование на станциях по ядерному резонансному рассеянию синхротронного излучения дает возможность проводить измерения в широком интервале температур, давлений, магнитных полей, в условиях глубокого вакуума и т.д., что позволяет получать более полную информацию об анализируемом объекте. Конкретные сведения о высоких потенциальных возможностях ядерного резонансного рассеяния синхротронного излучения для получения аналитической информации можно найти в недавних публикациях<sup>131–135</sup>.

## Литература

1. R.L.Mössbauer. *Z. Physik*, **151**, 124 (1958)
2. *Химические применения мёссбауэровской спектроскопии*. (Под ред. В.И.Гольданского, Г.Гербера). Мир, Москва, 1970
3. В.С.Шпинель. *Резонанс гамма-лучей в кристаллах*. Наука, Москва, 1969
4. V.V.Ovchinnikov. *Mössbauer Analysis of the Atomic and Molecular Structure of Alloys*. Cambridge International Science, Cambridge, 2004
5. T.C.Gibb. *Principles of Mössbauer Spectroscopy*. Chapman and Hall, London, 1976
6. И.П.Суздаев. *Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии*. Атомиздат, Москва, 1979
7. Г.Н.Белозерский. *Мёссбауэровская спектроскопия как метод исследования поверхности*. Энергоатомиздат, Москва, 1990
8. М.А.Андреева, Р.Н.Кузьмин. *Мёссбауэровская гамма-оптика*. Изд-во МГУ, Москва, 1982
9. P.Gütlich, R.Link, A.Trautwein. *Mössbauer Spectroscopy and Transition Metall Chemistry*. Springer-Verlag, Berlin, 1978
10. *Mössbauer Effect Reference and Data Journal*. Vol. 28. No 6. (Eds J.G.Stevens, A.M.Khasanov, N.F.Hall, I.Khasanova). MEDC, UNCA, Asheville, NC, 2005. P. 150
11. *Mössbauer Mineral Handbook*. (Eds J.G.Stevens, A.M.Khasanov, J.W.Miller, H.Pollak, Z.Li). MEDC, UNCA, Asheville, NC, 1998
12. У.Гонзер, П.Престон. В кн. *Металлические стекла. Вып. II*. (Под ред. Г.Бека, Г.Гюнтеродта). Мир, Москва, 1986
13. *Мёссбауэровская спектроскопия замороженных растворов*. (Под ред. А.Вергеша, Д.Надь). Мир, Москва, 1998
14. В.Г.Семенов, М.А.Андреева, С.М.Иркаев. *Научное приборостроение*, **9** (1), 19 (1999)
15. В.Г.Семенов, М.А.Андреева, С.М.Иркаев. *Научное приборостроение*, **9** (2), 3 (1999)
16. М.А.Андреева, В.Н.Гитцович, В.Г.Семенов, В.М.Уздин, А.И.Филичев. *Вестник СПбГУ. Сер. 4*, **4** (1), 45 (1995)
17. Н.П.Серегин. Дис. д-ра физ.-мат. наук. ИАП РАН, С.-Петербург, 2003
18. В.Ф.Мастеров, Ф.С.Насрединов, Н.П.Серегин, П.П.Серегин. *Физика тв. тела*, **39**, 1750 (1997)
19. W.Kündig. *Nucl. Instrum. Methods*, **48**, 219 (1967)
20. A.Baldini, F.Del Giallo, F.Pieralli, G.Spina. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **B42**, 393 (1989)

21. S.L.Ruby. In *Mössbauer Effect Methodology. Vol. 2.* (Eds I.J.Gruverman, C.W.Seidel). Plenum, New York, 1973. P. 263
22. R.E.Vandenberghe, E.De Grave, P.M.A.de Bakker. *Hyperfine Interact.*, **83**, 29 (1994)
23. T.E.Cranshaw. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **7**, 122 (1974)
24. J.Window. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **4**, 401 (1971)
25. J.Hesse, A.Rübartsch. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **7**, 526 (1974)
26. А.М.Афанасьев, М.А.Чуев. *Журн. эксперим. и теорет. физики*, **107**, 989 (1995)
27. T.Ericsson, O.Amcoff, P.Nordblad. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 401 (2002)
28. O.Helgasson. In *AIP Conference Proceedings. Vol. 765.* (Eds M.Garsia, J.F.Marco, F.Plazaola). AIP, New York, 2005. P. 369
29. Т.В.Мальшева. *Эффект Мёссбауэра в геохимии и космохимии.* Наука, Москва, 1975
30. S.Mitra. *Applied Mössbauer Spectroscopy, Physics Chemistry of Earth. Vol. 18.* Pergamon Press, Oxford, 1992
31. E.Murad, J.D.Cashion. *Mössbauer Spectroscopy of Environmental Materials and Their Industrial Utilization.* Kluwer Academic, Netherlands, 2004
32. Б.Ф.Горбачев, А.Б.Корнилов, В.М.Гонюх, Ф.М.Булатов, В.В.Власов, Е.Н.Шляпкина. *Прикладная геохимия*, **4**, 242 (2003)
33. Р.А.Хасанов, Ф.М.Булатов, А.В.Корнилов, В.М.Гонюх, А.Ф.Шамсеев, Е.Н.Шляпкина. *Прикладная геохимия*, **4**, 37 (2003)
34. F.Reyes, G.A.P.Alcazar, J.M.Barraza, A.Bohorquez, J.A.Tabares, N.L.Speziali. *Hyperfine Interact.*, **148/149** (1–4), 39 (2003)
35. D.G.Rancourt. *Hyperfine Interact.*, **117** (1–4), 3 (1998)
36. E.Kuzmann, S.Nagy, A.Vértes, T.G.Weiszbürg, V.K.Garg. In *Nuclear Methods in Mineralogy and Geology.* (Eds A.Vértes, S.Nagy, K.Süvegh). Plenum, New York, 1998
37. J.Adetunji, J.M.Williams, A.Mehra. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 379 (2002)
38. M.Matsuo, K.Kubo, Y.Isozaki. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 435 (2002)
39. G.Pedrazzi, E.Schingaro, F.Scordari. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 457 (2002)
40. S.D.Forder, P.A.Bland, J.Galazka-Friedman, M.Urbanski, Z.Gontarz, M.Milczarek, N.Bakun-Czubarow. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 405 (2002)
41. Y.A.Abdu, T.Ericsson, H.Annersten, N.A.Dubrovinskaya, L.S.Dubrovinskii, A.M.Gismelseed. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 375 (2002)
42. M.D.Dyar. *Meteorit. Planet. Sci.*, **38**, 1733 (2003)
43. S.S.Hafner. In *Mössbauer Spectroscopy. Vol. 5.* (Ed. U.Gonser). Springer-Verlag, Berlin, 1975. P. 167
44. A.Amulevicius, A.Daugvila, R.Davidonis, G.Vaitkevicius. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 383 (2002)
45. U.Wagner, I.Shimada, D.Goldstein, W.Hausler. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 475 (2002)
46. G.Klingelhofer, R.V.Morris., B.Bernhardt, C.Schroder, D.S.Rodionov, P.A.de Souza Jr., A.Yen, R.Gellert, E.N.Evlanov, B.Zubkov, J.Fon, U.Bonnes, E.Kankleit, P.Gutlich, D.W.Ming, F.Renz, T.Wdowiak, S.W.Squyres, R.E.Arvidson. *Science*, **306**, 1740 (2004)
47. G.Klingelhofer. In *AIP Conference Proceedings. Vol. 765.* (Eds M.Garsia, J.F.Marco, F.Plazaola). AIP, New York, 2005. P. 369
48. C.Schroder, G.Klingelhofer, W.Tremel. *Planet. Space Sci.*, **52**, 997 (2004)
49. А.А.Камнев, Ю.Д.Перфильев. *Вестн. МГУ. Сер. 2. Химия*, **41** (3), 205 (2000)
50. W.P.Gates, P.G.Slade, A.Manceau, B.Lanson. *Clays Clay Miner.*, **50**, 223 (2002)
51. R.K.Kukkadapu, J.M.Zachara, S.C.Smith, J.K.Fredrickson, Chongxuan Liu. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 2913 (2001)
52. N.I.Chistyakova, V.S.Rusakov, D.G.Zavarzina. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 397 (2002)
53. G.Ona-Nguema, F.Jorand, O.Benali, M.Abdelmoula, J.-M.R.Genin, J.-C.Block. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 415 (2002)
54. J.-M.R.Genin. *Hyperfine Interact.*, **156/157**, 471 (2004)
55. И.П.Суздалев. *Гамма-резонансная спектроскопия белков и модельных соединений.* Наука, Москва, 1988
56. A.Vértes, L.Korecz, K.Berger. In *Mössbauer Spectroscopy.* Academic Kiado, Budapest, 1979. P. 344
57. D.P.E.Dickson. In *Mössbauer Spectroscopy Applied to Inorganic Chemistry. Vol. 1.* (Ed. G.J.Long). Plenum, New York, 1984. P. 339
58. T.G.St.Pierre, W.Chua-anusorn, J.Webb, D.J.Macey, P.Potrakul. *Biochim. Biophys. Acta*, **1407**, 51 (1998)
59. M.I.Oshtrakh, O.B.Milder, V.A.Semenkin, P.G.Prokopenko, L.I.Malakheeva. *Hyperfine Interact.*, **156/157**, 279 (2004)
60. M.I.Oshtrakh. *Spectrochim. Acta, Part A*, **60**, 217 (2004)
61. J.Galazka-Friedman, E.R.Bauminger, D.Koziorowski, A.Fridman. *Biochim. Biophys. Acta*, **1688**, 130 (2004)
62. V.R.Sutton, A.Stubna, T.Patschkowski, E.Munck, H.Beinert, P.J.Kiley. *Biochemistry*, **43**, 791 (2004)
63. E.M.Walters, M.K.Johnson. *Photosynth. Res.*, **79**, 249 (2004)
64. G.N.L.Jameson, M.M.Cosper, H.L.Hernandez, M.K.Johnson, B.H.Huynh. *Biochemistry*, **43**, 2022 (2004)
65. R.M.Cicchillo, M.A.Baker, E.J.Schnitzer, E.B.Newman, C.Krebs, S.J.Booker. *J. Biol. Chem.*, **279**, 32418 (2004)
66. R.M.Cicchillo, K.H.Lee, C.Baleanu-Gogonea, N.M.Nesbit, C.Krebs, S.J.Booker. *Biochemistry*, **43**, 11770 (2004)
67. M.I.Oshtrakh, O.B.Milder, V.A.Semenkin. *Hyperfine Interact.*, **156/157**, 273 (2004)
68. M.I.Oshtrakh, V.A.Semenkin, P.G.Prokopenko, O.B.Milder, A.B.Livshits, A.A.Kozlov. *Int. J. Macromol.*, **29**, 303 (2001)
69. A.A.Kamnev, L.P.Antonyuk, V.E.Smirnova, O.V.Serebrennikova, L.A.Kulikov, Yu.D.Perfiliev. *Anal. Bioanal. Chem.*, **372**, 431 (2002)
70. A.A.Kamnev, L.P.Antonyuk, V.E.Smirnova, L.A.Kulikov, Yu.D.Perfiliev, I.A.Kudolina, E.Kuzmann, A.Vertes. *Biopolymers*, **74**, 64 (2004)
71. A.Kamnev, L.P.Antonyuk, L.A.Kulikov, Yu.D.Perfiliev. *BioMetals*, **17**, 457 (2004)
72. A.A.Kamnev. *J. Mol. Struct.*, **744/747**, 161 (2005)
73. F.G.Parak, G.U.Nienhaus. *Eur. J. Chem. Phys. Phys. Chem.*, **3**, 249 (2002)
74. S.-H.Chong, Y.Joti, A.Kidera, N.Go, A.Ostermann, A.Gassmann, F.G.Parak. *Eur. Biophys. J.*, **30**, 319 (2001)
75. F.G.Parak. *Rep. Prog. Phys.*, **66**, 103 (2003)
76. Yu.F.Krupyanskii, S.V.Esin, G.V.Eshenko, M.G.Mikhailyuk. *J. Biol. Phys.*, **28**, 139 (2002)
77. Yu.F.Krupyanskii, S.V.Esin, G.V.Eshenko, M.G.Mikhailyuk. *Hyperfine Interact.*, **141/142** (1–4), 273 (2002)
78. W.M.Reiff, G.J.Long. In *Mössbauer Spectroscopy Applied to Inorganic Chemistry. Vol. 1.* (Ed. G.J.Long). Plenum, New York, 1984. P. 251
79. R.V.Parish. In *Mössbauer Spectroscopy.* (Eds D.P.E.Dickson, F.J.Berry). Cambridge University Press, Cambridge, 1986. P. 274
80. E.Balogh-Hergovich, G.Speier, M.Reglier, M.Giorgi, E.Kuzmann, A.Vertes. *Inorg. Chem. Commun.*, **8**, 457 (2005)
81. К.В.Похолок, И.А.Пресняков, А.В.Соболев, В.С.Пусаков, А.В.Баранов, В.П.Горьков. *Изв. АН. Сер. физ.*, **67**, 1030 (2003)
82. Ш.Ш.Башкиров, В.В.Парфенов, А.А.Валиулин, А.С.Храмов, В.А.Трунов, О.П.Смирнов, И.А.Абдель-Латиф. *Изв. АН. Сер. физ.*, **67**, 1052 (2003)
83. С.К.Дедушенко, Ю.Д.Перфильев. *Изв. АН. Сер. физ.*, **65**, 1039 (2001)
84. M.Takahashi, A.Matsuura, C.Fujita, K.Minova, M.Takeda. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 325 (2002)
85. R.P.Hermann, F.Granjean, S.M.Kauzlarich, J.Jiang, S.Brown, G.J.Long. *Inorg. Chem.*, **43**, 7005 (2004)
86. M.Takeda, J.Wang, T.Nishimura, K.Suzuki, T.Kitazawa, M.Takahashi. *Hyperfine Interact.*, **156/157**, 359 (2004)
87. K.Ikeda, N.Kojima, Y.Ono, Y.Kobayashi, M.Seto, X.J.Liu, Y.Morimoto. *Hyperfine Interact.*, **156/157**, 311 (2004)
88. P.Gutlich. In *Mössbauer Spectroscopy Applied to Inorganic Chemistry. Vol. 1.* (Ed. G.J.Long). Plenum, New York, 1984. P. 287
89. A.B.Gaspar, V.G.Ksenofontov, J.A.Real, P.Gutlich. *Chem. Phys. Lett.*, **373**, 385 (2003)

90. S.J.Campbell, V.G.Ksenofontov, Y.Garcia, J.S.Lord, J.Boland, P.Gutlich. *J. Phys. Chem. B*, **107**, 14289 (2003)
91. F.Renz, P.Kerер. *Hyperfine Interact.*, **156/157**, 371 (2004)
92. H.Ohta, Y.Sunatsuki, Y.Ikuta, N.Matsumoto, S.Iijima, H.Akashi, T.Kambe, M.Kojima. *Mater. Sci.*, **21**, 191 (2003)
93. О.Г.Шакирова, Л.Г.Лавренова, Ю.Г.Шведенков, В.Н.Икорский, В.А.Варнек, Л.А.Шелудякова, В.Л.Варанд, Т.А.Кригер, С.В.Ларионов. *Журн. структ. химии*, **41**, 964 (2000)
94. V.G.Ksenofontov, H.Spiering, S.I.Reiman, Y.Garcia, A.B.Gaspar, N.Moliner, J.A.Real, P.Gutlich. *Chem. Phys. Lett.*, **348**, 381 (2001)
95. P.Gutlich, V.G.Ksenofontov, A.B.Gaspar. *Coord. Chem. Rev.*, **249**, 1811 (2005)
96. Y.Garcia, V.G.Ksenofontov, P.Gutlich. *Hyperfine Interact.*, **139/140** (1–4), 543 (2002)
97. T.Omata, M.Kita, S.Otsuka-Yao-Matsuo, M.Katada. *J. Phys. Chem. Solids*, **66**, 52 (2005)
98. G.Y.Denes, A.Muntasar. *Hyperfine Interact.*, **153** (1–4), 91 (2004)
99. W.D.Rhodes, J.L.Margitfalvi, I.Borbath, K.Lazar, V.I.Koval'chuk, J.L.d'Itri. *J. Catal.*, **230**, 86 (2005)
100. G.Eng, X.Q.Song, Q.Y.Duong, D.Strickman, J.Glass, L.May. *Appl. Organomet. Chem.*, **17**, 218 (2003)
101. T.Marx, B.D.Mosel, I.Pantenburg, S.Hagen, H.Schulze, L.Wesemann. *Chem. Eur. J.*, **9**, 4472 (2003)
102. A.O.Porto, G.M.de Lima, A.G.Pereira, L.A.R.Rbatalha, J.D.Adrissou. *Appl. Organomet. Chem.*, **18**, 39 (2004)
103. X.Q.Song, Q.Y.Duong, E.Mitrojjorgji, A.Zapata, N.Nguyen, D.Strickman, J.Glass, G.Eng. *Appl. Organomet. Chem.*, **18**, 363 (2004)
104. E.Murad, J.H.Johnston. In *Mössbauer Spectroscopy Applied to Inorganic Chemistry. Vol. 2.* (Ed. G.J.Long). Plenum, New York, 1984. P. 507
105. P.Dillmann, F.Mazaudier, S.Hoerle. *Corros. Sci.*, **46**, 1401 (2004)
106. K.Asami, M.Kikuchi. *Corros. Sci.*, **45**, 2671 (2003)
107. M.Yamashita, H.Miyuki, Y.Matsuda, H.Nagano, T.Misawa. *Corros. Sci.*, **36**, 283 (1994)
108. A.Nakanishi, T.Kobayashi. *Hyperfine Interact.*, **156/157**, 493 (2004)
109. D.C.Cook. In *AIP Conference Proceedings. Vol. 765.* (Eds M.Garsia, J.F.Marco, F.Plazaola). AIP, New York, 2005. P. 63
110. S.J.Oh, D.C.Cook, H.E.Townsend. *Corros. Sci.*, **41**, 1687 (1999)
111. G.J.Long, D.Hautot, F.Grandjean, D.Vandormael, H.P.Leighly. *Hyperfine Interact.*, **155** (1–4), 493 (2004)
112. M.Garbucicchio, G.Palombardini, M.Rateo, F.Zini. In *AIP Conference Proceedings. Vol. 765.* (Eds M.Garsia, J.F.Marco, F.Plazaola). AIP, New York, 2005. P. 73
113. A.Samide, I.Bibuchi, M.S.Rogalski, M.Preda. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **261**, 593 (2004)
114. F.B.Waanders, S.W.Vorster, A.J.Geldenhuys. *Hyperfine Interact.*, **139** (1–4), 133 (2002)
115. M.Zapponi, T.Perez, C.Ramos, C.Saragovi. *Corros. Sci.*, **47**, 923 (2005)
116. O.Ortuk, O.Omnus, D.L.Williamson. *Surf. Coat. Technol.*, **196** (1–3), 923 (2005)
117. J.Lipka, V.Slugen, J.Hascik, M.Lehota. *Hyperfine Interact.*, **139** (1–4), 501 (2002)
118. D.C.Cook, C.E.Peterson. In *AIP Conference Proceedings. Vol. 765.* (Eds M.Garsia, J.F.Marco, F.Plazaola). AIP, New York, 2005. P. 91
119. А.А.Ефимов, О.Ю.Пыхтеев, Л.Н.Москвин. *Вестн. СПбГУ. Сер. 4*, **20** (3), 117 (2001)
120. Л.Н.Москвин, А.А.Ефимов, О.Ю.Пыхтеев, В.Г.Семенов. *Журн. аналит. химии*, **60**, 1308 (2005)
121. *Химия привитых поверхностных соединений.* (Под ред. Г.В.Лисичкина). Физматлит, Москва, 2003
122. И.П.Суздаев, П.И.Суздаев. *Успехи химии*, **70**, 203 (2001)
123. M.A.Cagnoli, N.G.Gallegos, A.M.Alvarez, J.F.Bengoa, A.A.Yeramian, M.Schmal, S.G.Marchetti. *Appl. Catal. A*, **230**, 169 (2002)
124. A.Goossens, M.W.J.Craje, A.M.van der Kraan, A.Zwijenburg, M.Makkee, J.A.Moulijn, L.J.de Jongh. *Catal. Today*, **72**, 95 (2002)
125. S.T.Daniells, A.R.Overweg, M.Makkee, J.A.Moulijn. *J. Catal.*, **230**, 52 (2005)
126. A.Garron, K.Lazar, F.Epron. *Appl. Catal. B*, **59**, 57 (2005)
127. S.Verdier, B.Didillon, S.Morin, J.C.Jumas, J.Oliver-Fourcade, D.Uzio. *J. Catal.*, **218**, 280 (2003)
128. S.Verdier, B.Didillon, S.Morin, D.Uzio. *J. Catal.*, **218**, 288 (2003)
129. G.V.Smirnov. *Hyperfine Interact.*, **97/98**, 551 (1996)
130. R.Ruffer, A.I.Chumakov. *Hyperfine Interact.*, **97/98**, 589 (1996)
131. H.Paulsen, V.Schunemann, A.X.Trautwein, H.Winkler. *Coord. Chem. Rev.*, **249**, 255 (2005)
132. J.E.Amonette, R.K.Kukkadapu, E.E.Alp, W.Sturhahn, T.S.Toellner. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 2815 (2003)
133. H.Winkler, A.I.Chumakov, A.X.Trautwein. *Top. Curr. Chem.*, **235**, 137 (2004)
134. R.Haruki, M.Seto, S.Kitao, Y.Kobayashi, Y.Yoda, T.Mitsui, Y.Maeda. *Hyperfine Interact. (C)*, **5**, 139 (2002)
135. K.Nomura, A.I.Rykov, T.Mitsui, Y.Yoda, Y.Kobayashi, M.Seto, T.Sawada. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **255**, 187 (2003)

## ANALYTICAL POTENTIAL OF MÖSSBAUER SPECTROSCOPY

**V.G.Semenov, L.N.Moskvin, A.A.Efimov**

*Department of Chemistry, St.Petersburg State University*

*26, Universitetsky pr., Petrodvorets, 198504 St.Petersburg, Russian Federation, Fax +7(812)428–6939*

Basic knowledge about Mössbauer spectroscopy necessary for gaining qualitative and quantitative information on the substance composition from Mössbauer spectra is considered. The methods for Mössbauer spectra processing are discussed; databases ensuring the search for information on the object under study are described. The application of Mössbauer spectroscopy in various fields of chemistry, mineralogy, biology and materials science are considered.

Bibliography — 135 references.

*Received 3rd October 2005*