

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА  
ОБЫКНОВЕННОГО ХОНДРИТА JIDDAT AL HARASIS 055**

Л.В. Гуда<sup>1</sup>, А.Н. Кравцова<sup>1</sup>, С.П. Кубрин<sup>2</sup>, М.И. Мазурицкий<sup>1</sup>, М.В. Киричков<sup>1</sup>,  
Ю.В. Русалёв<sup>1</sup>, В.В. Шаповалов<sup>1</sup>, А.В. Солдатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МИЦ "Интеллектуальные материалы", Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия  
E-mail: astrosfedu@mail.ru

<sup>2</sup>НИИ физики, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Статья поступила 17 июля 2018 г.

Проведено комплексное исследование обыкновенного хондрита типа L4-5 Jiddat Al Harasis 055 на основе 2D рентгеновской флуоресцентной спектроскопии, мессбауэровской спектроскопии, спектроскопии рентгеновского поглощения в околороговой области (XANES), рентгеновской дифракции и вибрационной магнитометрии. Определено содержание элементов Fe, Ni, Si, Mg, S, Ca, Al, Mn, Ti и Cr и обнаружено наличие нескольких компонент и областей с повышенным содержанием S, Ti, Cr и Ni, вкраплений Ca—Al. По данным спектроскопии рентгеновского поглощения было определено, что Jiddat Al Harasis 055 содержит железо, среднее зарядовое состояние которого в образце составляет 2.4+, что согласуется с данными мессбауэровской спектроскопии, с помощью которой проведена идентификация фаз железа и показано, что 46 % ионов железа находится в состоянии Fe<sup>2+</sup>, а 54 % — в состоянии Fe<sup>3+</sup>. Среднее координационное число в первой координационной сфере железа равно 5.3, что следует из сравнения энергетического положения и площади предкраевой структуры XANES с литературными данными для геологических образцов. По данным рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии установлено, что железосодержащие фазы метеорита состоят, в основном, из оливина, пироксена, гематита и гетита. Наблюдаемые магнитные свойства образца могут объясняться малыми включениями ферромагнитных фаз, таких как наночастицы никеля, которые не могут быть надежно идентифицированы с помощью лабораторных спектральных методов.

DOI: 10.26902/JSC20180814

**Ключевые слова:** спектроскопия XANES, мессбауэровская спектроскопия, элементное картирование, зарядовое состояние, рентгеновская дифракция, обыкновенные хондриты, Jiddat Al Harasis 055.

**ВВЕДЕНИЕ**

Метеориты являются одним из источников информации о структуре вещества в Солнечной системе, в том числе и на ранней стадии эволюции. Исследование метеоритов с помощью рентгеновской спектроскопии и мессбауэровской спектроскопии позволяет определить не только химический состав среды, из которой она формировалась, но и определить степень окисления и локальную атомную структуру вокруг атомов железа, что свидетельствует о процессах окисления на этапе формирования родительского тела. Самыми многочисленными из найденных метеоритов являются обыкновенные хондриты, однако статистика исследований различных образцов до сих пор недостаточно представительна для понимания процессов их формирования и эволюции [ 1, 2 ].

В настоящей работе представлено комплексное исследование обыкновенного хондрита типа L4-5 Jiddat Al Harasis 055, найденного в Омане ( $19^{\circ} 39.31'N$ ,  $56^{\circ} 41.76'E$ ) в 2004 г. [3]. До настоящего времени исследования химического состава и свойств данного метеорита практически не было проведено. Для того чтобы определить химический состав и структуру метеорита Jiddat Al Harasis 055, дополнить данные о его минеральном составе и процессах, протекавших во время его формирования и эволюции, а также для развития новой комплексной методики исследования метеоритов и набора статистики данных об обыкновенных хондритах, были применены мессбауэровская спектроскопия, спектроскопии рентгеновского поглощения в околопороговой области (XANES), рентгеновская дифракция (XRD), рентгеновский микрофлуоресцентный анализ (микро-РФА) [7], а также проведено исследование зависимости магнитных свойств метеорита от величины приложенного магнитного поля.

Интенсивность термического метаморфизма и гидратации в исследованиях метеорита и его родительского астероида определяется степенью окисления железа. Железо в недавно сформированных метеоритах может существовать как в виде  $Fe^0$  в металлической фазе Fe—Ni,  $Fe^{2+}$  в силикатах и сульфидах и  $Fe^{3+}$  в филлосиликатах и магнетите. С течением времени при окислении железо в виде  $Fe^0$  и  $Fe^{2+}$  трансформируется в фазы  $Fe^{3+}$ . Поэтому доля  $Fe^{2+}$  может указывать на наличие или отсутствие молекул воды и кислорода в области формирования родительского тела и именно в той его части, в которой находился астероид в родительском теле при его последующей эволюции [4, 5]. Поэтому определение зарядового состояния железа в исследуемом метеорите является актуальной задачей и в настоящей работе было выполнено на основе комбинации методов — спектроскопии XANES на *K*-крае железа и мессбауэровской спектроскопии. Мессбауэровская спектроскопия весьма популярна при исследовании метеоритов [6], поэтому мы использовали данный метод для определения железосодержащих фаз в хондрите.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Рентгенофлуоресцентный элементный анализ был проведен на микро-флуориметре M4 TORNADO (Bruker) с пространственным разрешением 25 мкм. Срез метеорита Jiddat Al Harasis 055 был отполирован алмазным порошком, после чего было проведено картирование области  $10 \times 10$  мм, и отдельно измерены спектры рентгеновской флуоресценции для трех точек с большим временем накопления статистики, которые имели заметные отличия относительно соседних областей на оптической микрофотографии.

Мессбауэровские спектры измеряли для образца Jiddat Al Harasis 055 в порошковом виде на спектрометре MS1104Em, работающем в режиме постоянных ускорений с треугольной формой изменения доплеровской скорости источника относительно поглотителя. В качестве источника использовали  $^{57}Co$  в матрице Rh. Измерения проводили в диапазоне температур 15—300 К в гелиевом криостате замкнутого цикла CCS-850 (Janis Research). Модельную расшифровку и анализ мессбауэровских спектров осуществляли в программе SpectrRelax [8]. Изомерные химические сдвиги определяли относительно металлического  $\alpha$ -Fe.

Спектры рентгеновского поглощения за *K*-краем железа для исследуемого образца и реперных соединений были измерены на лабораторном рентгеновском спектрометре R-XAS Looper (Rigaku) в режиме на прохождение. Был использован кристалл-монохроматор Ge(311), обеспечивающий энергетическое разрешение 1.4 эВ на энергии 7100 эВ. В качестве детектора интенсивности падающего излучения на образец использовали ионизационную камеру, заполненную аргоном при давлении 300 мбар, а в качестве детектора прошедшей интенсивности — скинтилляционный детектор.

Для анализа образца методом рентгеновской дифракции использовали дифрактометр D2 Phaser (Bruker). Перед анализом образец измельчали и помещали в низкофоновую кювету для сыпучих материалов. Исследовали интервал углов от 5 до  $85^{\circ}$  с шагом  $0.01^{\circ}$ . Время, отведенное на каждый шаг, было равно 0.02 с. В целом, общее время анализа составило 133 мин (10 проходов по 13.3 мин). При анализе использовали медный анод и позиционно-чувствительный детектор LYNXEYE. Анализ дифрактограммы проводили по методу Ритвельда.

Магнитные измерения были проведены на вибрационном магнитометре VSM 7404 (Lake Shore). Кривые намагниченности измеряли при комнатной температуре в диапазоне полей от  $-19$  до  $19$  кЭ. На каждое измерение приходилось не менее 210 точек с выдержкой 10 с на точку. При этом точность измерения магнитного момента составляет  $10^{-7}$  эрг/Гс. Небольшой образец для измерения был отколот от основной массы метеорита, взвешен и упакован в пленку Parafilm для фиксации в кювете для измерений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе рентгенофлуоресцентного анализа, мессбаэровской спектроскопии, спектроскопии XANES на  $K$ -крае железа, анализа рентгеновских дифрактограмм и данных магнитометра охарактеризованы химический и минеральный составы, степень окисления железа и магнитные свойства обыкновенного хондрита Jiddat Al Harasis 055.

Исследование небольшой площади полированной поверхности среза метеорита при помощи РФА показывает среднее содержание элементов в приповерхностном слое. При рассмотрении среза с помощью РФА метеорит в основном состоит из двух компонент (табл. 1): одна (компонента 1) со сравнительно небольшим содержанием Fe, повышенным содержанием Mg и Si с небольшой примесью Ca, Al, S и Ni; и вторая (компонента 2) с высоким содержанием Fe, с примесью таких элементов, как Si и S, Mg, Ca, Ni. Распределение Mg, Si, Mn, Al и Ti противоположно Fe, Ni и S. Элементы Ti, Cr и Mn в среднем распределены равномерно, но при более подробном рассмотрении можно заметить области, обогащенные Ti, Cr и Mn по сравнению с соседними областями, размером порядка 100 мкм. Концентрации Al, Ti, Cr и Ni в среднем незначительны. Однако наблюдаются вкрапления, обогащенные Ca и Al, а также области с высоким содержанием серы относительно других областей. В нескольких точках были получены спектры флуоресценции с большей выдержкой. Так, методом рандомизированного поиска была обнаружена точка (точка 3 в табл. 1), в которой наблюдается вкрапление Ca—Al, а в точках 1 и 2 наблюдается довольно высокое содержание Ni. Также можно выделить еще три компонента в рассматриваемой области с различным содержанием элементов. Они занимают значительно меньшую долю поверхности, но по ним и по данным в отдельных точках можно судить о присутствии вкраплений Ca—Al и областей с повышенным содержанием S, Cr, Ti, Mn и Ni.

Мессбаэровские спектры метеорита Jiddat Al Harasis 055 измерены при различных температурах. Все спектры представляют собой суперпозиции двух парамагнитных дублетов и двух зеемановских секстетов. Параметры компонент спектров приведены в табл. 2. Величина изомерного сдвига дублета D1 соответствует ионам  $Fe^{2+}$  [9]. Наблюдаемые значения величин изомерного сдвига ( $\delta$ ) и квадрупольного расщепления ( $\Delta$ ) дублета D1 близки к значениям, наблюдаемым для мессбаэровских спектров оливина [10, 11]. Кроме того, параметры дублета D1 практически совпадают с параметрами оливина, наблюдаемого в метеоритах [12,13]. Оливины

Т а б л и ц а 1

*Содержание элементов в отдельных фазах полированной поверхности метеорита Jiddat Al Harasis 055 согласно данным микро-РФА. Точки 1, 2, 3 были найдены в ходе рандомизированного поиска микрообластей с отличным от среднего распределением элементов*

Компонента, %	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	
1	78.0	15.84	1.41	27.02	1.50	2.10	0.15	0.49	0.43	49.56	1.33
2	14.0	2.88	0.58	11.71	4.76	2.56	0.09	0.30	0.10	74.04	2.86
3	2.5	16.52	2.24	35.69	1.97	7.64	0.24	0.56	0.50	34.04	0.62
4	1.5	3.08	0.74	11.98	15.89	12.44	0.10	0.32	0.10	53.23	2.12
5	4.0	7.90	1.76	20.32	7.69	6.29	0.38	4.72	0.32	47.01	3.56
Точка 1		4.24	1.51	10.04	3.26	—	—	—	0.15	72.24	8.56
Точка 2		1.73	0.30	4.19	1.33	0.30	—	—	0.06	87.01	5.08
Точка 3		14.03	3.16	26.01	1.31	3.11	—	0.46	0.34	50.53	1.05

Параметры мессбауэровских спектров образца метеорита Jiddat Al Harasis 055

T, К	Компонента	$\delta \pm 0.02$ , мм/с	$\varepsilon/\Delta \pm 0.02$ , мм/с	$H \pm 2$ , кЭ	$A \pm 2$ , %	$G \pm 0.02$ , мм/с	Фаза	$\chi^2$
300	D1	1.15	2.93		36	0.31	Оливин	1.728
	D2	1.14	2.10		13	0.29	Пироксен	
	S1	0.35	-0.14	296	33	1.76	Гетит	
	S2	0.35	-0.05	495	18	0.52	Гематит	
200	D1	1.21	3.07		33	0.30	Оливин	1.883
	D2	1.21	2.12		13	0.31	Пироксен	
	S1	0.38	-0.13	439	36	1.15	Гетит	
	S2	0.40	-0.03	514	18	0.49	Гематит	
100	D1	1.26	3.10		34	0.31	Оливин	3.420
	D2	1.26	2.10		13	0.33	Пироксен	
	S1	0.44	-0.10	490	36	0.67	Гетит	
	S2	0.45	-0.03	525	17	0.49	Гематит	
15	D1	1.28	3.13		33	0.43	Оливин	2.294
	D2	1.28	2.14		13	0.45	Пироксен	
	S1	0.46	-0.10	501	36	0.53	Гетит	
	S2	0.47	-0.02	529	18	0.46	Гематит	

Примечание:  $\delta$  — изомерный сдвиг;  $\varepsilon$  — квадрупольное смещение Зеемановских секстетов;  $\Delta$  — квадрупольное расщепление парамагнитных компонент спектра;  $H$  — сверхтонкое магнитное поле на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ ;  $A$  — площадь компонент;  $G$  — ширина линий спектра;  $\chi^2$  — критерий Пирсона.

$(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$  являются промежуточной фазой между фаялитом  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  и форстеритом  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ . Ионы  $\text{Fe}^{2+}$  в оливинах занимают две кристаллографические позиции M1 и M2. Данные позиции, как правило, сложно различимы на мессбауэровских спектрах метеоритов [14]. Однако фаялит при температуре  $\sim 65$  К переходит в антиферромагнитное состояние [15, 16]. Как видно из рис. 1, компонента D1 не испытывает зеемановского расщепления при температуре ниже 100 К. При этом ширина линий дублета D1 возрастает при температуре 15 К, что, вероятно, обусловлено близостью к температуре магнитного фазового перехода. Таким образом, компонента D1 соответствует оливину с промежуточным содержанием ионов  $\text{Fe}^{2+}$  с переходом в магнитоупорядоченное состояние в окрестности 10 К [17, 18].

Величина изомерного сдвига дублета D2 составляет  $\sim 1.14$  мм/с, что соответствует ионам  $\text{Fe}^{2+}$  [9]. Параметры дублета D2 мессбауэровского спектра близки к значениям, наблюдаемым в пироксенах на мессбауэровских спектрах метеоритов [19—23]. Так же, как и в случае оливинов, позиции пироксенов M1 и M2 трудно различимы на мессбауэровских спектрах метеоритов [14]. При понижении температуры квадрупольное расщепление дублета D2 слегка возрастает. При температуре 15 К уширяются линии дублета D2. Уширение, вероятно, обусловлено близостью к температуре магнитного фазового перехода. Согласно данным рентгеновской дифракции, пироксеновая фаза обладает орторомбической сингонией. Таким образом, компонента D2, вероятно, соответствует ортопироксенам ряда энстатит ( $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ )—ферросилит ( $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ).

Зеемановский секстет S1 мессбауэровского спектра метеорита Jiddat Al Harasis 055 обладает величиной изомерного сдвига  $\sim 0.35$  мм/с, соответствующего ионам  $\text{Fe}^{3+}$  [9]. Величина магнитного сверхтонкого поля на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  при комнатной температуре составляет  $H_{S1} \approx 296$  кЭ. С понижением температуры величина  $H_{S1}$  возрастает до значения 501 кЭ, при этом ширина линий секстета S1 значительно снижается (табл. 2). При температуре 15 К сверхтонкие параметры компоненты S1 становятся близки к значениям, наблюдаемым для мессбауэровских спектров гетита ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) при низких температурах [24, 25]. Низкое значение сверхтонкого магнитного поля и уширение линий при комнатной температуре, вероятно, обусловлены возникновением

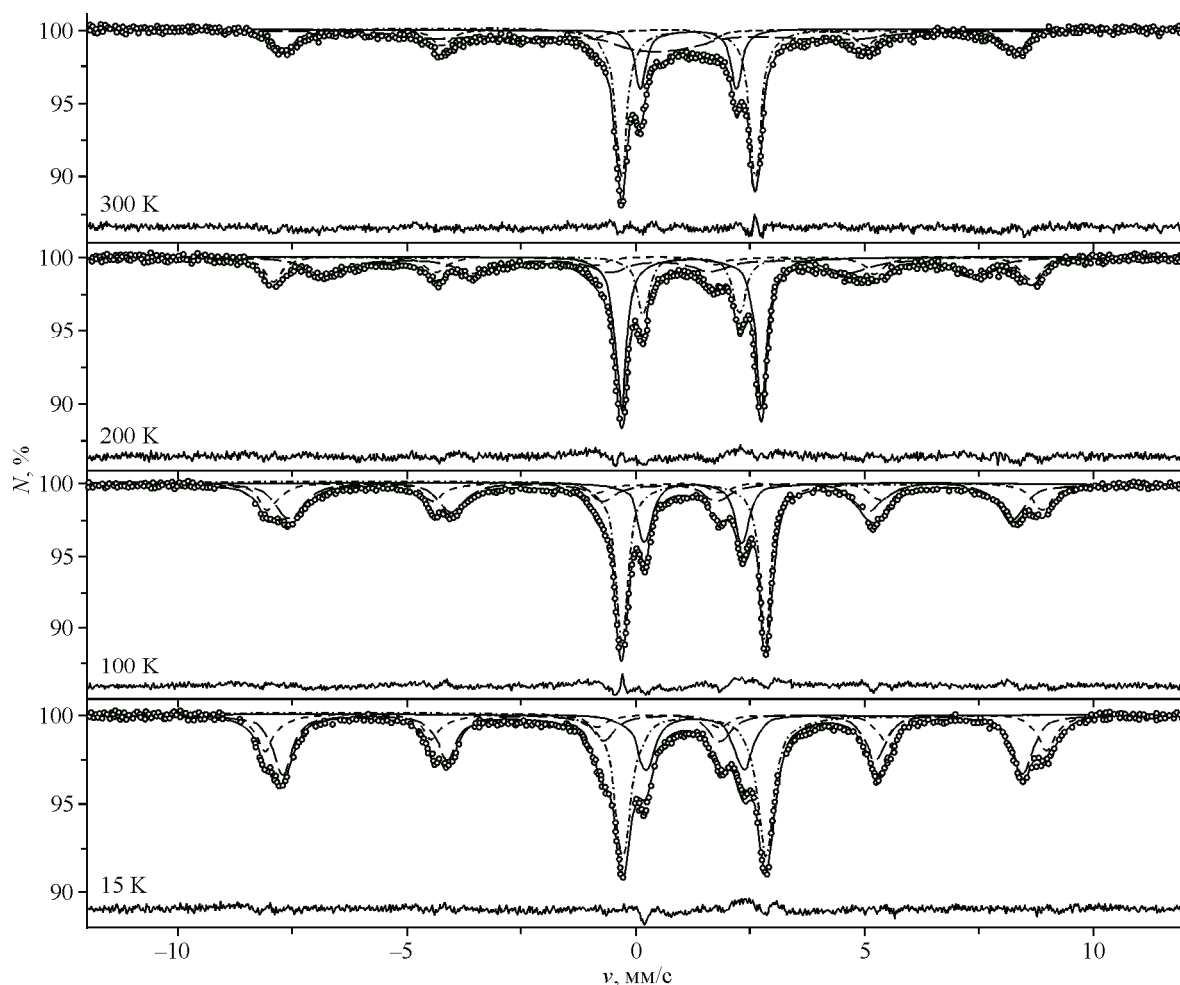


Рис. 1. Мессбауэровские спектры образца метеорита Jiddat Al Harasis 055, измеренные при разных температурах. Для каждого спектра проведена подгонка линий. Количественный анализ подгонки приведен в табл. 2

суперпарамагнетизма [26]. Суперпарамагнетизм зачастую проявляется в оксидах железа со средним размером кристаллитов меньше 200 нм. Возникающие при суперпарамагнитной релаксации коллективные возбуждения приводят к понижению величины сверхтонкого магнитного поля [27] и искажению формы линий мессбауэровского спектра [28].

Компонента S2 мессбауэровского спектра образца метеорита Jiddat Al Harasis 055 обладает изомерным сдвигом  $\sim 0.35$  мм/с, характерным для ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . Параметры секстета S2 близки к наблюдаемым параметрам мессбауэровского спектра гематита ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) [10, 11, 29]. Уменьшение ширины линии и рост величины сверхтонкого магнитного поля секстета S2 при понижении температуры также связаны с наличием коллективных возбуждений в результате возникновения суперпарамагнитной релаксации. Суперпарамагнитная релаксация возникает, по-видимому, из-за низкого размера кристаллитов гематита.

Таким образом, мессбауэровское исследование образца метеорита Jiddat Al Harasis 055 показало, что в исследуемом образце ионы железа находятся в виде фаз оливина, пироксена, гетита и гематита. Так как  $f$ -факторы поглощений указанных железосодержащих фаз примерно равны при температуре 15 К, величины площадей компоненты соответствующего мессбауэровского спектра позволяют оценить соотношение ионов железа в данных фазах: 36 % ионов Fe находятся в гетите, 33 % — в оливине, 18 % — в гематите и 13 % — в пироксене (табл. 3).

На рис. 2 показаны измеренные спектры XANES за  $K$ -краем железа для исследуемого образца метеорита и реперных образцов оксидов железа FeO и  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Анализ положения края

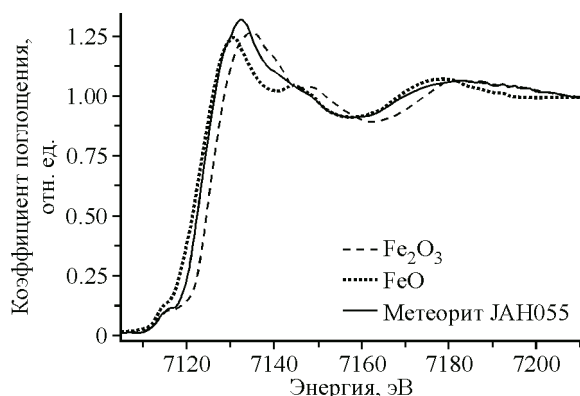


Рис. 2. Спектры XANES на K-крае железа для образца хондрита Jiddat Al Harasis 055 (сплошная линия) и реперных образцов оксидов железа —  $\text{Fe}^{2+}\text{O}$  (пунктирная линия) и  $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3$  (штриховая линия)

Т а б л и ц а 3

Железосодержащие фазы образца метеорита Jiddat Al Harasis 055 согласно данным мессбауэровской спектроскопии; концентрация относительно железа

Фаза	Концентрация, %
Оливин, $\text{Fe}^{2+}$	33
Пироксен, $\text{Fe}^{2+}$	13
Гетит, $\text{Fe}^{3+}$	36
Гематит, $\text{Fe}^{3+}$	18

поглощения в предположении линейной зависимости величины химического сдвига от степени окисления железа показал, что железо в рассматриваемом метеорите имеет зарядовое состояние  $\text{Fe}^{2.4+}$ , что свидетельствует о комбинации фаз железа  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . Эти данные хорошо согласуются с результатами мессбауэровской спектроскопии, показывающей, что 46 % ионов железа находится в состоянии  $\text{Fe}^{2+}$ , а 54 % — в состоянии  $\text{Fe}^{3+}$ . Проведен анализ энергетического положения центроида для предкраевой области XANES и вычислена общая интенсивность предкрая. Так обнаружено, что интенсивность предкрая для образца метеорита составляет 98 % от интенсивности предкрая в  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 150 % от интенсивности предкрая в  $\text{FeO}$ . Интенсивность предкраевой особенности возрастает при уменьшении координационного числа и искажения октаэдрической симметрии вокруг позиции железа. Реперы  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  содержат железо  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  в октаэдрическом окружении. Используя данные об интенсивности и энергетическом положении предкрая из рис. 5 работы [30] для 4-, 5-, 6-координированных позиций  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  в минералах, можно оценить среднее координационное число в Jiddat Al Harasis 055 равным 5.3. Это свидетельствует о наличии пятикоординированных позиций железа, которые наблюдаются в ортопироксенах.

Анализ рентгеновских дифрактограмм, проведенный по методу Ритвельда, позволяет оценить соотношение кристаллических фаз в образце. На рис. 3 представлена дифрактограмма исследуемого образца с отмеченными вкладами основных кристаллических фаз — оливин (68 %), орто- и клинопироксен (28 %). Фазовый анализ также показал наличие таких дополнительных фаз, как гематит (2 %) и гетит (3 %) (табл. 4). Данные рентгеновской дифракции подтверждают выводы мессбауэровской спектроскопии о нахождении ионов железа преимущественно в оливиновой и пироксеновой фазах. Однако соотношение фаз, полученных из дифракции отличается от данных мессбауэровской спектроскопии, что обуславливается вкладом наноразмерных вклю-

Т а б л и ц а 4

Фазовый состав метеорита Jiddat Al Harasis 055 согласно данным рентгеновской дифракции

Фаза	Предполагаемая формула	Содержание, %
Оливин	$\text{Al}_{0.01}\text{Ca}_{0.01}\text{Fe}_{0.35}\text{Mg}_{1.64}\text{O}_4\text{Si}_{0.99}$	67
Клинопироксен	$\text{Na}(\text{Al},\text{Fe})(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	12
Ортопироксен	$(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	16
Гематит	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2
Гетит	$\text{FeO}(\text{OH})$	3

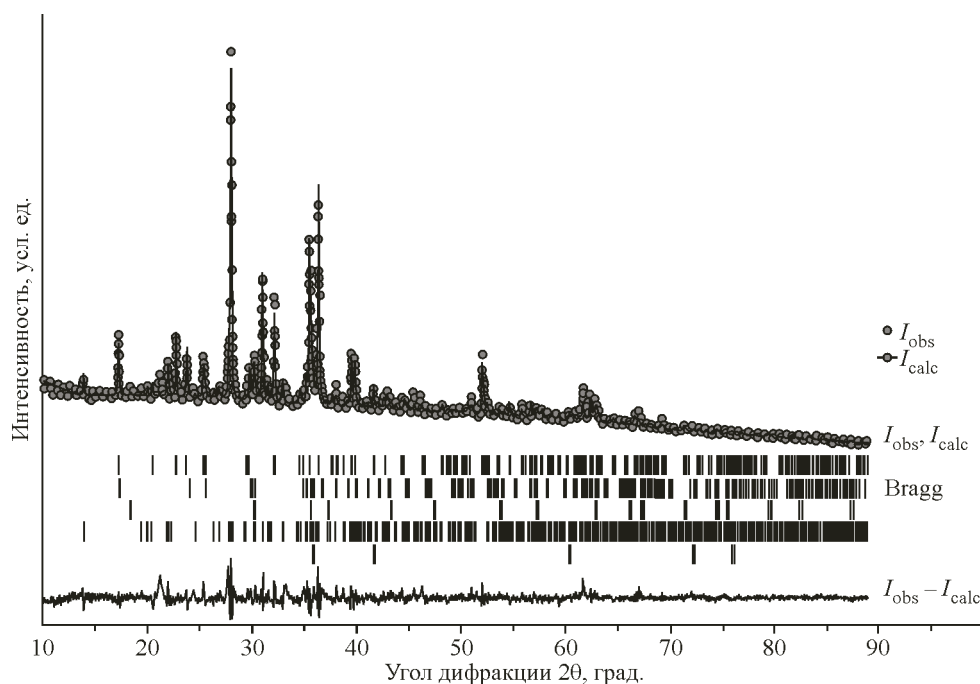


Рис. 3. Дифрактограмма метеорита Jiddat Al Harasis 055

чений, к которым рентгеновская дифракция является значительно менее чувствительной в отличие от спектроскопии рентгеновского поглощения и мессбауэровской спектроскопии, которые собирают информацию со всех атомов железа в образце, независимо от их размера и кристалличности. Так, обнаруженные малые концентрации кристаллических фаз оксидов железа в рентгеновской дифракции скорее относятся к сформировавшимся фазам в ходе естественных процессов уже после падения метеорита на землю.

Исследование магнитных свойств метеорита от приложенного внешнего магнитного поля показало наличие ферромагнитных свойств вещества (рис. 4). Максимальная намагниченность образца составила  $4.28 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3/\text{г}$ , остаточная намагниченность  $0.65 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3/\text{г}$ , коэрцитивная сила  $150 \text{ Э}$ .

Согласно литературным данным [31] наблюдаемое отношение остаточной намагниченности к намагниченности в насыщении  $\sim 0.15$  согласуется с магнитными свойствами наночастиц магнетита. Похожие значения коэрцитивной силы также наблюдались для наночастиц железа размером менее  $30 \text{ нм}$  [32] и наночастиц никеля размером менее  $50 \text{ нм}$  [33]. Поскольку лабораторными методами не удалось зарегистрировать наличие металлического железа или магнетита, можно предположить, что ферромагнетизм в метеорите Jiddat Al Harasis 055 возникает из-за наночастиц никеля, что подтверждается также обнаруженными на РФА вкраплениями с большой концентрацией этого элемента.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Флуоресцентное микрокартирование среза метеорита Jiddat Al Harasis 055 позволило оценить химический состав метеорита и выделить несколько компонент по обилию элементов и области с повышенным содержанием Ca—Al, S, Cr, Ti и Mn, что характерно для обыкновенных хондри-

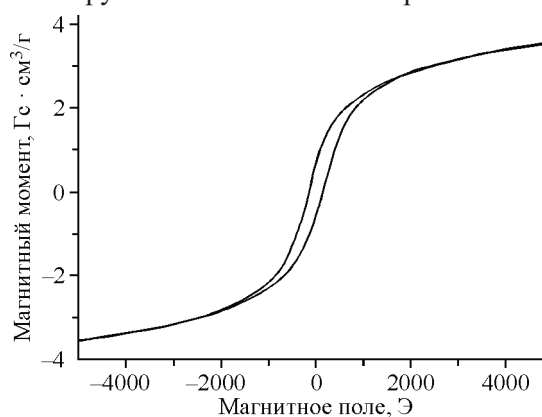


Рис. 4. Намагниченность образца как функция приложенного внешнего магнитного поля

тов. С точностью 25 мкм обнаружены точки, в которых наблюдаются вкрапления Ca—Al, а также высокое содержание Ni, что может объяснять ферромагнитные свойства вещества метеорита, характеризующиеся коэрцитивной силой 150 Э. Данные рентгеновской дифракции указывают на то, что железосодержащие фазы образца Jiddat Al Harasis 055 находятся в виде оливина (68 %), орто- и клинопироксена (28 %) и небольшой доли гематита (2 %) и гетита (3 %). Согласно данным мессбауэрской спектроскопии Jiddat Al Harasis 055 содержит оливин с промежуточным содержанием ионов  $\text{Fe}^{2+}$  (с переходом в магнитоупорядоченное состояние в окрестности 10 К), ортопироксены  $\text{Fe}^{2+}$  ряда энстатит ( $\text{MgSi}_2\text{O}_6$ )—ферросилит ( $\text{FeSi}_2\text{O}_6$ ), ионы  $\text{Fe}^{3+}$  в гетите и гематите. Значительный вклад гетита и гематита в мессбауэрских спектрах по сравнению с данными рентгеновской дифракции может объясняться аморфизацией и малым размером кристаллитов этих фаз, что затрудняет использование рентгеновской дифракции для их надежной идентификации. Согласно данным спектроскопии рентгеновского поглощения среднее зарядовое состояние железа в образце равно  $\text{Fe}^{2.4+}$ , что согласуется с данными мессбауэрской спектроскопии. Координационное число железа может быть оценено как 5.3 по интенсивности и положению предкраевой особенности XANES. Наличие железа в степени окисления  $\text{Fe}^{3+}$  указывает на процессы окисления родительского тела при его формировании или при последующей его эволюции, которые, однако не привели к полному переходу из  $\text{Fe}^{2+}$  в  $\text{Fe}^{3+}$ , как это наблюдается, например, в CI-метеорите Orgueil с отношением  $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+})$  более 80 % [6].

Результаты работы были получены в рамках выполнения государственного задания № 16.3871.2017/4.6 при финансовой поддержке Минобрнауки России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Wirick, G.J. Flynn, S.R. Sutton, M.E. Zolensky. *45th Lunar Planet. Sci.*, **2014**, (1940).
2. S.B. Simon, S.R. Sutton, L. Grossman. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2016**, 189, 377.
3. S.S. Russell, L. Folco, M.M. Grady et al. *Meteorit. Planet. Sci.*, **2004**, 39, A215.
4. M. Wilke, F. Farges, P.-E. Petit et al. *Am. Mineral.*, **2001**, 86, 714.
5. A. Garenne, P. Beck, G. Montes-Hernandez et al. *45th Lunar Planet. Sci.*, **2014**, (1941).
6. P. Beck, V. De Andrade, F.-R. Orthous-Daunay et al. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2012**, 99, 305.
7. M.L. Cerón Loayza, J.A. Bravo Cabrejos. *Hyperfine Interact.*, **2011**, 203, 17.
8. M.E. Matsnev, V.S. Rusakov. *AIP Conf. Proc.*, **2012**, 178, 1489.
9. F. Menil, J. Systematic. *Phys. Chem. Solids.*, **1985**, 46, 763.
10. J.G. Stevens, A.M. Khasanov, J.W. Miller et al. *Li Mössbauer Mineral Handbook*. USA, The University of North Carolina at Asheville: Mössbauer Effect Data Center, **2002**.
11. R.E. Vandenberghe, E. De Grave. *Mössbauer Spectroscopy*. Tutorial Book, **2013**.
12. Y.A. Abdu, T. Ericsson. *Meteorit. Planet. Sci.*, **1997**, 32, 373.
13. E. Dos Santos, J. Gattaceca, P. Rochette et al. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **2015**, 242, 50.
14. E.V. Zhiganova, V.I. Grokhovsky, M.I. Oshtrakh. *Phys. Status Solidi*, **2007**, 204, 1185.
15. S.S. Hafner, J. Stanek, M. Stanek. *J. Phys. Chem. Solids*, **1990**, 51, 203.
16. W. Lottermoser, K. Forcher, G. Amthauer et al. *Phys. Chem. Miner.*, **1995**, 22, 259.
17. J.C.P. De Oliveira, M.I. da Costa, W.H. Schreiner et al. *J. Magn. Magn. Mater.*, **1991**, 98, 239.
18. V.U.S. Rao, F.E. Huggins, G.P. Huffman. *J. Appl. Phys.*, **1979**, 50, 2408.
19. B.S. Paliwal, R.P. Tripathi, H.C. Verma et al. *Meteorit. Planet. Sci.*, **2000**, 35, 639442.
20. A.M. Gismelseed, Y.A. Abdu, M.H. Shaddad et al. *Meteorit. Planet. Sci.*, **2014**, 49, 1485.
21. E. Dos Santos, R.B. Scorzelli, M.E. Varela. *Hyperfine Interact.*, **2014**, 224, 251.
22. P. Munayco, J. Munayco, M. Valenzuela et al. *Hyperfine Interact.*, **2014**, 224, 257.
23. A.M. Gismelseed, S.B. Abdallah, A.D. Al-Rawas et al. *Hyperfine Interact.*, **2016**, 237, 14.
24. S. Bocquet, R.J. Pollard, J.D. Cashion. *Phys. Rev. B*, **1992**, 46, 11657.
25. U. Schwertmann, P. Cambier, E. Murad. *Clays Clay Miner.*, **1985**, 33, 369.
26. S. Bedanta, W. Kleemann. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **2009**, 42, 013001.
27. S. Mørup, H. Topsøe. *Appl. Phys.*, **1976**, 11, 63.
28. M.A. Chuev. *JETP Lett.*, **2013**, 98, 465.
29. W. Kündig, H. Bömmel. *Phys. Rev.*, **1966**, 142, 327.
30. G. Giuli, G. Pratesi, C. Cipriani et al. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2002**, 66, 4347.
31. Z. Nemati, J. Alonso, L.M. Martinez et al. *J. Phys. Chem. C*, **2016**, 120, 8370.
32. J. Carvell, E. Ayieta, A. Gavrin et al. *J. Appl. Phys.*, **2010**, 107, 103913.
33. Xuemin He, Wei Zhong, Chak-Tong Au. *Nanoscale Res. Lett.*, **2013**, 8, 446.