

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЫКНОВЕННОГО ХОНДРИТА GANDOM BERYAN 008 МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ, РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ И МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Гонцова С.С.¹, Петрова Е.В.², Чукин А.В.², Максимова А.А.², Максимова Е.М.¹, Яковлев Г.А.²,
Оштрах М.И.²

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Физико-технический институт,
г. Симферополь, sgoncova@gmail.com

²Уральский федеральный университет, Физико-технологический институт, г. Екатеринбург

Метеорит Gandom Beryan 008 был найден Метеоритной экспедицией Уральского федерального университета 5 января 2017 г. в северной части пустыни Лут, Иран. Метеорит был классифицирован как обыкновенный хондрит группы H5 со степенью ударного метаморфизма S2 и степенью земного выветривания W3–4 (*Meteoritical Bulletin*, **106**, 2018). В настоящей работе представлены результаты исследования обыкновенного хондрита Gandom Beryan 008 методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (EDS), рентгеновской дифрактометрии (XRD) и мессбауэровской спектроскопии с высоким скоростным разрешением.

Аншлиф фрагмента метеорита Gandom Beryan 008 был подготовлен для исследований на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT (Carl Zeiss) и сканирующем электронном микроскопе SIGMA VP (Carl Zeiss) с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии X-max 80 (Oxford Instruments). Затем с поверхности аншлифа Gandom Beryan 008 был приготовлен порошок для измерений рентгеновской дифрактограммы на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu), работающем при 40 кВ и 30 мА на CuK_α -излучении с использованием монохроматора, и мессбауэровского спектра на спектрометре SM-2201 с высоким скоростным разрешением (измерения проводились при комнатной температуре).

Исследование аншлифа фрагмента метеорита методами оптической и сканирующей электронной микроскопии с EDS показало, что метеорит состоит из таких железосодержащих минералов, как оливин $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$, ортопироксен $(\text{Fe, Mg})\text{SiO}_3$, клинопироксен

$(\text{Fe, Mg, Ca})\text{SiO}_3$, зерна сплава Fe-Ni-Co, содержащие $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni, Co})$ и $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni, Co})$ фазы, троилит FeS, хромит FeCr_2O_4 с небольшим количеством (~4 ат.%) Al в качестве третьего по содержанию металла, что предполагает присутствие герцинита FeAl_2O_4 , и продукты окисления железосодержащих фаз в результате земного выветривания (рис. 1). Из минералов, не содержащих железа, найдены хлорапатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{Cl}$ и плагиоклаз $(\text{Na, Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8$. Результаты анализа рентгеновской дифрактограммы вещества метеорита Gandom Beryan 008 (рис. 2) показали присутствие следующих фаз: оливин (37.2 вес.%), ортопироксен (32.1 вес.%), анортит $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ (7.6 вес.%), низкокальциевый клинопироксен (6.9 вес.%), хромит (4.6 вес.%), троилит (3.6 вес.%), герцинит (0.5 вес.%), $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni, Co})$ фаза (0.3 вес.%), $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni, Co})$ фаза (0.1 вес.%), а также оксигидроксиды и оксиды железа, такие как гетит ($\alpha\text{-FeOOH}$) (5.9 вес.%) и гематит ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (1.2 вес.%).

С помощью полнопрофильного анализа XRD вещества метеорита Gandom Beryan 008 по методу Ритвельда были оценены параметры элементарных ячеек кристаллов силикатных минералов, представленные в таблице 1.

Мессбауэровский спектр обыкновенного хондрита Gandom Beryan 008 представляет собой суперпозицию большого числа компонент (рис. 3) и похож на мессбауэровские спектры других обыкновенных хондритов с большой степенью выветривания (см. [Maksimova and Oshtrakh, 2019]). В результате аппроксимации мессбауэровского спектра и анализа параметров сверхтонкой структуры выявлены следующие компоненты: два магнитных секстета, связанных с троилитом и остаточной $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni, Co})$

Таблица 1. Параметры элементарной ячейки кристаллов силикатов в веществе метеорита Gandom Beryan 008

Кристалл силиката	Параметры элементарной ячейки			
	<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	β , °
Оливин	10.2480(9)	6.0032(7)	4.7665(5)	–
Ортопироксен	18.263(6)	8.853(5)	5.203(4)	–
Низкокальциевый клинопироксен	9.63(5)	8.88(4)	5.19(4)	108.5

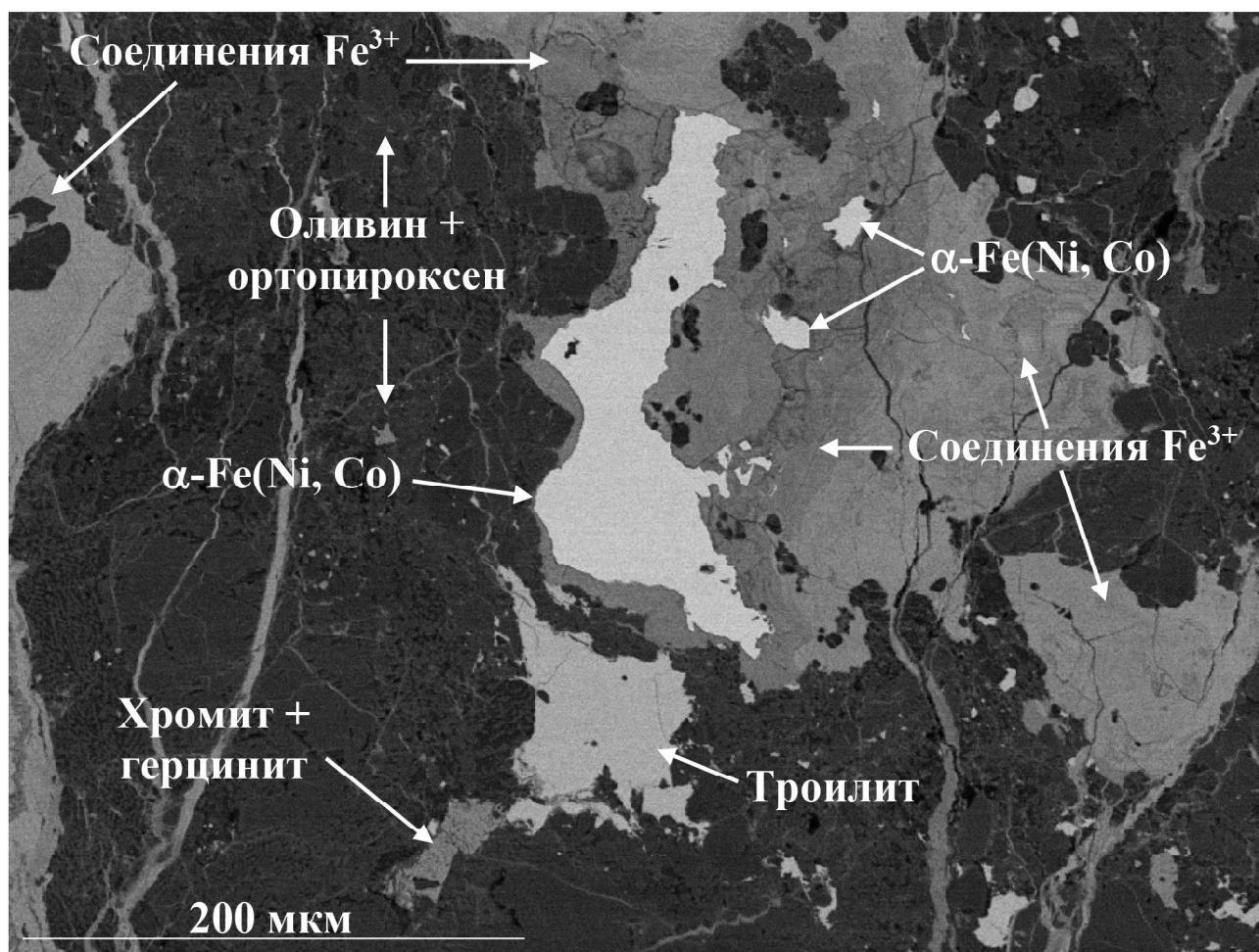


Рис. 1. Микрофотография обыкновенного хондрита Gandom Bergan 008, полученная на сканирующем электронном микроскопе. Указанные фазы определены методом энергодисперсионной спектроскопии

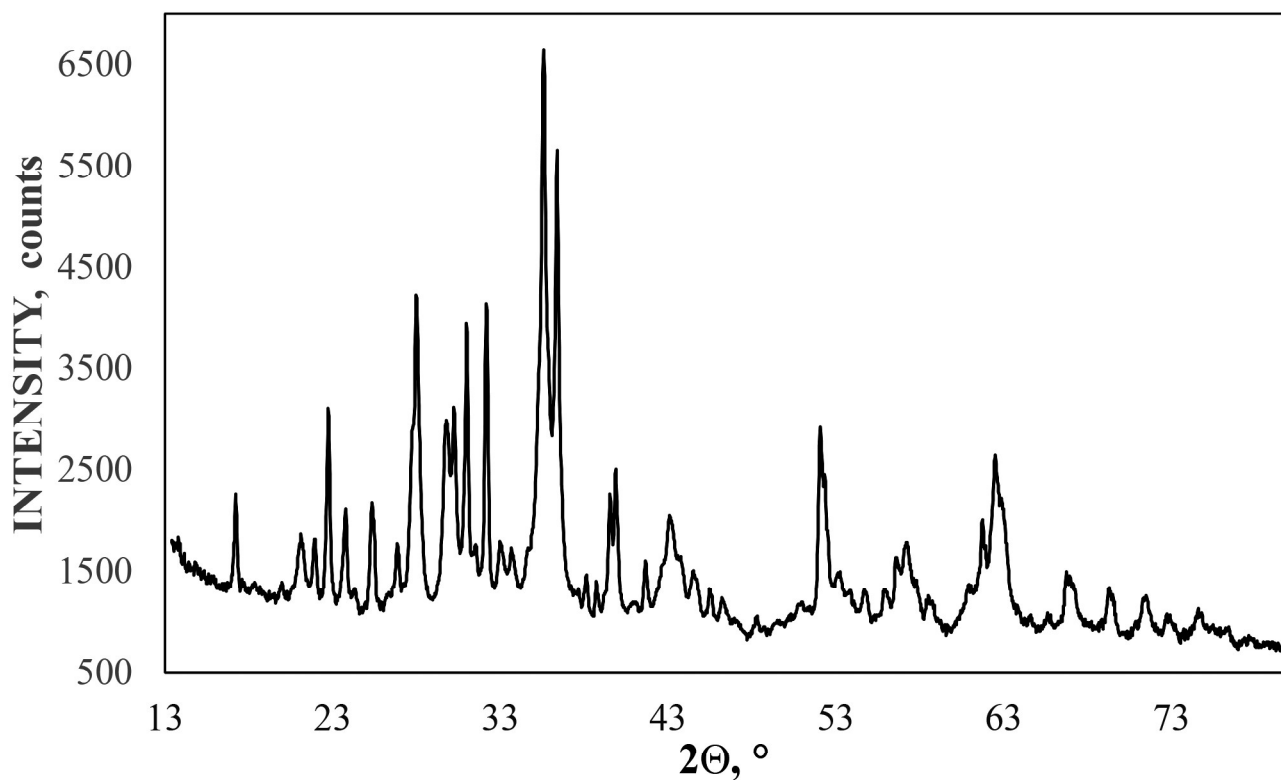


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма вещества обыкновенного хондрита Gandom Bergan 008

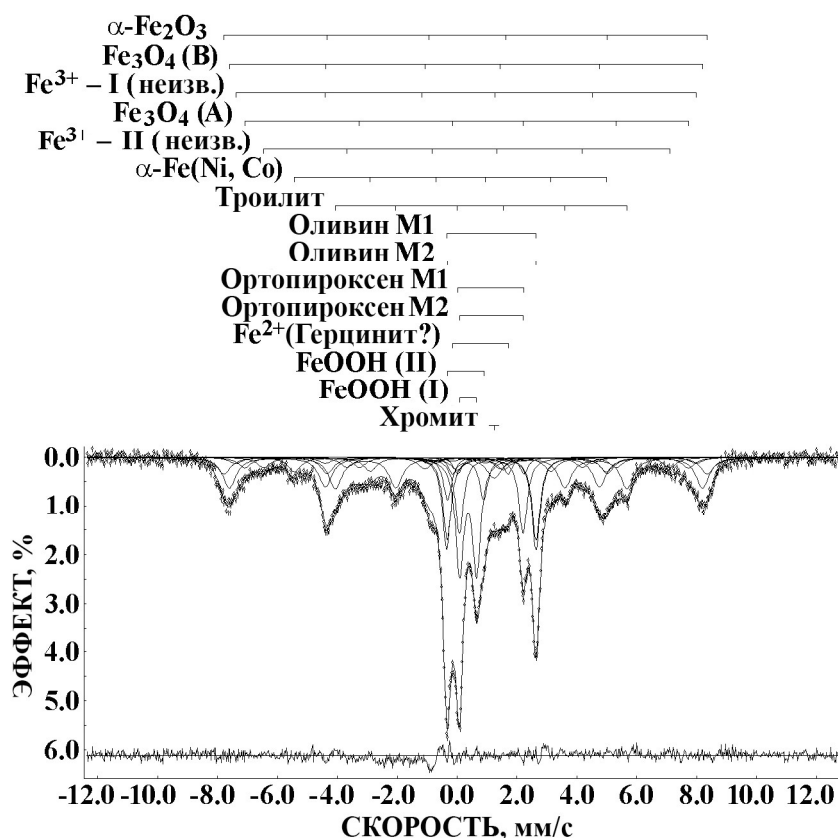


Рис. 3. Мессбауэровский спектр вещества обыкновенного хондрита Gandom Beryan 008. Указанные компоненты – результат наилучшей аппроксимации спектра. Дифференциальный спектр приведен снизу. $T=295$ К

фазой, по две пары квадрупольных дублетов, соотношенных с ядрами ^{57}Fe в позициях M1 и M2 в оливине и ортопироксене, парамагнитный синглет, связанный с хромитом, небольшой квадрупольный дублет с параметрами сверхтонкой структуры, соответствующими соединению Fe^{2+} , вероятнее всего, герциниту, а также компоненты, отнесенные к оксидам и оксигидроксидам железа. С продуктами земного выветривания метеорита были связаны два магнитных секстета, которые можно соотнести с ядрами ^{57}Fe в октаэдрических (A) и тетраэдрических (B) позициях в магнетите (Fe_3O_4), магнитный секстет, вероятнее всего соответствующий гематиту, два магнитных секстета, параметры сверхтонкой структуры которых еще не удалось связать с известными соединениями Fe^{3+} , а также два парамагнитных квадрупольных дублета, сверхтонкие параметры которых могут соответствовать частицам наноразмерного гетита, акагениту ($\beta\text{-FeOOH}$) или ферригидриту ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$). Общая относительная площадь компонент, соответствующих соединениям Fe^{3+} , составила $\sim 48\%$.

В мессбауэровском спектре вещества Gandom Beryan 008 были выявлены по две пары дублетов, связанных с позициями M1 и M2 в оливине и ортопироксене. Однако компоненты, соответствующие клинопироксену, в спектре выявить не удалось вви-

ду их малого содержания и сильного перекрытия линий этих компонент с внутренними линиями магнитных секстетов. Поэтому мы можем сравнить отношения заселенностей ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2, используя два независимых метода – XRD и мессбауэровскую спектроскопию по аналогии с тем, как это было выполнено в работах [Maksimova et al., 2017; Maksimova et al., 2018], только в оливине и ортопироксене. В результате проведенного полно-профильного анализа рентгенограммы по методу Ритвельда были получены оценки заселенностей ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в силикатах и их соотношения ($X_{\text{Fe}^{M1}}/X_{\text{Fe}^{M2}}$) для кристаллов оливина и ортопироксена. По данным мессбауэровской

Таблица 2. Оценки соотношения заселенностей позиций M1 и M2 ионами Fe^{2+} в кристаллах силикатных минералов обыкновенного хондрита Gandom Beryan 008, полученные по данным рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии

Кристаллы силикатных фаз	Метод оценки	
	Рентгеновская дифракция $X_{\text{Fe}^{M1}}/X_{\text{Fe}^{M2}}$	Мессбауэровская спектроскопия A^{M1}/A^{M2}
Оливин	1.43	1.12
Ортопироксен	0.14	0.21

спектрологии соотношение заселенностей ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 можно грубо оценить по отношению относительных площадей A^{M1}/A^{M2} соответствующих компонент спектра (в предположении равенства вероятности эффекта Мессбауэра для всех фаз). Полученные результаты представлены в таблице 2. Сравнение соотношений заселенностей позиций M1 и M2 ионами Fe^{2+} как в оливине, так и в ортопироксене, полученных с помощью рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии, показало хорошее согласие результатов, оцененных двумя независимыми методами.

Авторы выражают благодарность проф. Гроховскому В.И. за предоставленный для исследований образец метеорита Gandom Beryan 008, а также Пастуховичу А.Ю. за помощь в подготовке образца. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 3.1959.2017/4.6) и Акта 211 Правительства Российской Федерации, соглашение № 02.A03.21.0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maksimova A.A., Chukin A.V., Semionkin V.A., Oshtrakh M.I. The Fe^{2+} occupancies in the silicates M1 and M2 sites in Chelyabinsk LL5 meteorite determined using XRD and Mössbauer spectroscopy // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. V. 81. P. 845–849.
2. Maksimova A.A., Oshtrakh M.I. Ordinary chondrites: what can we learn using Mössbauer spectroscopy? // Journal of Molecular Structure. 2019. V. 1186. P. 104–117.
3. Maksimova A.A., Oshtrakh M.I., Chukin A.V., Felner I., Yakovlev G.A., Semionkin V.A. Characterization of Northwest Africa 6286 and 7857 ordinary chondrites using X-ray diffraction, magnetization measurements and Mössbauer spectroscopy // Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2018. V. 192. P. 275–284.