

УДК 552.63

DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-580-587

Новый углистый хондрит CM2 из Северо-Западной Африки (Northwest Africa 11781)

© 2019 г. К. А. Дугушкина, С. В. Берзин

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mail: dugushkina.kseniya@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2018 г., принята к печати 14.11.2018 г.

Объект исследования. Излагаются результаты исследования фрагмента метеорита Northwest Africa 11781. **Материалы и методы.** Материалом для исследования послужил фрагмент метеорита массой 15.56 г, из которого было изготовлено 4 прозрачно-полированных шлифа общей площадью 10.5 см². Изучение минералогии и структурных особенностей метеорита проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы JEOL, электронно-зондового микроанализатора Cameca SX-100, а также квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ELAN 9000. Все анализы были выполнены в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН. **Результаты.** Метеорит является углистым хондритом и относится к петрологическому типу CM2. Он состоит на ≈20–30% из хондр, на 60–70% – из тонкозернистой матрицы, тугоплавкие включения (CAIs, AOAs, Forsterite rich objects) занимают не более 3–5%. Размер хондр в среднем составляет 0.3 мм. Преобладают порфириновые оливиновые и оливин-пироксеновые хондры. Матрица метеорита состоит преимущественно из слоистых силикатов и гидроксидов железа. CAIs имеют небольшие размеры (0.05–0.3 мм). Главными минералами CAIs являются шпинель, клинопироксен, хибонит и перовскит. AOAs состоят из оливина со шпинель-диопсидовыми включениями. Богатые форстеритом объекты сложены низкожелезистым оливином и окаймлены энстатитом. В метеорите установлено необычное крупное (1 мм) богатое форстеритом включение, на наш взгляд занимающее переходное положение к высокомагнезиальным хондрам. В матрице метеорита присутствуют необычные идиоморфные зерна железистого оливина (FeO – 15.35–38.89 мас. %), механизм образования которых остается дискуссионным. **Заключение.** В ходе исследований было установлено, что данный фрагмент представляет собой углистый хондрит и является ранее не изученным метеоритом. Была проведена регистрация метеорита как нового углистого хондрита под названием Northwest Africa 11781 (NWA 11781). Метеорит не несет следов ударного воздействия и в значительной степени был подвержен земному выветриванию.

Ключевые слова: метеорит, углистый хондрит, тугоплавкие включения, богатые кальцием и алюминием включения, амевовидные оливиновые агрегаты, богатые форстеритом объекты

New carbonaceous chondrite Northwest Africa 11781 (CM2)

Kseniya A. Dugushkina, Stepan V. Berzin

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, 15 Acad. Vonsovsky st., Ekaterinburg,
620016 Russia, e-mail: dugushkina.kseniya@mail.ru

Received 12.09.2018, accepted 14.11.2018

Research subject. The article presents the results of a study of a new meteorite Northwest Africa 11781. **Material and methods.** The material for the study was a fragment of a meteorite weighing 15.56 g, from which 4 transparent polished sections with a total area of 10.5 cm² were produced. The mineralogy and structural features of the meteorite were studied using a scanning electron microscope JSM-6390LV by JEOL, an electron probe microanalyzer Cameca SX-100 and a quadrupole mass spectrometer with inductively coupled plasma ELAN 9000. All analyses were performed in core facilities “Geoanalytic” IGG UB RAS. **Results.** The meteorite is CM2 carbonaceous chondrite comprising ≈ 20–30% of chondrules and 60–70% of a fine-grained matrix. Refractory inclusions (CAI, AOAs, forsterite rich objects) occupy no more than 3–5%. The average chondrule size is 0.3 mm. Porphyritic olivine (PO) and olivine-pyroxene (POP) chondrules predominate. The meteorite matrix consists of layered silicates and iron hydroxides. CAIs are small in size (0.05–0.3 mm). The main minerals of CAIs are spinel, Ca-pyroxene, hibonite and perovskite. Olivine in AOAs mainly contains spinel-diopside inclusions. The forsterite-rich object presents a low-Fe forsterite with a low-Fe enstatite margin. The meteorite also features an unusually large (1 mm) forsterite-rich object. This object has a transitional position from refractory forsterite to magnesian chondrules. Unusual isolate crystals of high-Fe (FeO 15.35–38.89 wt %) olivine were identified in the meteorite matrix. The mechanism of their formation remains controversial. **Conclusion.** It is established that the discovered fragment is a carbonaceous chondrite, therefore being a meteorite that has not been studied before. The meteorite has been re-

Для цитирования: Дугушкина К.А., Берзин С.В. (2019) Новый углистый хондрит CM2 из Северо-Западной Африки (Northwest Africa 11781). *Литосфера*, 19(4), 580–587. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-580-587

For citation: Dugushkina K.A., Berzin S.V. (2019) New carbonaceous chondrite Northwest Africa 11781 (CM2). *Litosfera*, 19(4), 580–587. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-580-587

corded as a new carbonaceous chondrite called Northwest Africa 11781 (NWA 11781). The meteorite shows no signs of a shock impact and demonstrates a high grade of terrestrial weathering.

Keywords: meteorite, carbonaceous chondrite, refractory inclusion, CAIs, AOAs, forsterite-rich objects

Acknowledgements

The authors wish to thank A.V. Mikheeva and Dr L.V. Leonova (Common Use Center “Geoanalyst”, IGG UB RAS) for the analytical support in this research.

The study was funded by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 17-05-00297.

ВВЕДЕНИЕ

Углистые хондриты являются достаточно редким классом метеоритов и составляют около 3% от всех известных падений или находок. На метеориты группы CM приходится менее 1% от всех зарегистрированных на сегодня метеоритов. Нам для изучения частными коллекционерами передан фрагмент метеорита Northwest Africa 869, который ранее был классифицирован как обыкновенный хондрит L4-6 [Connolly et al., 2006]. Фрагмент найден в месте выпадения метеоритного дождя в Западной Африке, в Марокко. В ходе исследований было установлено, что данный фрагмент на самом деле представляет собой не обыкновенный, а углистый хондрит и, соответственно, не имеет отношения к метеоритному дождю Northwest Africa 869, а является ранее не изученным метеоритом. Было проведено изучение метеорита и регистрация его как нового углистого хондрита под названием Northwest Africa 11781 (NWA 11781).

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходным материалом для исследования послужил фрагмент метеорита массой 15.56 г, по-

крытый со всех сторон корой плавления черного цвета (рис. 1). Было изготовлено 4 прозрачно-полированных шлифа общей площадью 10.5 см².

Изучение минералогии и структурных особенностей метеорита NWA 11781 проводилось на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы JEOL с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Л.В. Леонова). Состав минералов исследован на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX-100 (аналитик А.В. Михеева). Для изучения содержания редких и рассеянных элементов небольшой фрагмент метеорита был проанализирован на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELAN 9000 фирмы PerkinElmer. Все анализы были выполнены в ЦКП “Геоаналитик” в ИГГ УрО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроэлементный состав метеорита NWA 11781 приведен в табл. 1, спайдер-диаграммы распределения редкоземельных, а также халькофильных и сидерофильных элементов показаны на рис. 2. По распределению редких и редкоземель-



Рис. 1. Метеорит Northwest Africa 11781.

Fig. 1. Meteorite Northwest Africa 11781.

Таблица 1. Содержание микроэлементов в метеорите NWA 11781, г/т**Table 1.** Trace element composition of the meteorite NWA 11781, ppm

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Li	6.049	Y	1.873	Gd	0.458
Be	н/о	Zr	5.541	Tb	0.061
Sc	2.933	Nb	0.431	Dy	0.409
Ti	427.347	Mo	1.326	Ho	0.088
V	55.855	Ag	0.197	Er	0.267
Cr	2307.441	Cd	0.151	Tm	0.040
Mn	1365.370	Sn	1.180	Yb	0.264
Co	236.269	Sb	0.146	Lu	0.041
Ni	2597.365	Te	0.949	Hf	0.209
Cu	86.034	Cs	0.038	Ta	0.365
Zn	128.691	Ba	282.695	W	0.151
Ga	6.816	La	0.545	Tl	0.053
Ge	8.905	Ce	1.327	Pb	7.358
As	2.694	Pr	0.194	Bi	0.024
Se	4.822	Nd	0.963	Th	0.100
Rb	0.952	Sm	0.281	U	0.481
Sr	189.624	Eu	0.104		

ных элементов изученный образец наиболее близок к CM хондритам, средний состав которых приводится в работе [Wasson, Kallemeyn, 1988].

Метеорит NWA 11781 имеет темно-коричневый цвет и хондровую текстуру (см. рис. 1). Состоит по большей части из мелкозернистой матрицы, хондры составляют 20–30% объема. Тугоплавкие включе-

ния (богатые кальцием и алюминием включения (CAIs), богатые форстеритом объекты (forsterite rich object) и амебоидальные оливиновые агрегаты (AOAs)) занимают 3–5% от общего объема.

Хондры в среднем имеют размер около 0.3 мм, иногда достигая 1 мм. Преобладают в основном порфиоровые оливиновые (PO) и порфиоровые оливинпироксеновые (POP) хондры, имеющие неровные границы. Главные минералы хондр – оливин и ортопироксен. Железистость ($Fa = Fe^{2+} \times 100\% / (Fe^{2+} + Mg)$) оливина варьирует в достаточно широких пределах – от 0.31 до 16.38%. Некоторые зерна оливина в хондрах имеют зональное строение с магнезиальным центром и железистой периферией. Отличительной особенностью хондр является крайне низкое содержание в них плагиоклаза (или маскелинита). Клинопироксен преимущественно обрастает по периферии зерна ортопироксена. Также в хондрах встречены хромит, шпинель, тэнит и камасит.

Матрица метеорита имеет тонкозернистую структуру и сложена слоистыми силикатами, в меньшей степени карбонатами и гидроксидами железа. Основное количество металла и троилита изначально было приурочено к матрице метеорита, однако в результате земного выветривания эти минералы практически полностью заместились гидроксидами железа.

В матрице установлена хромовая шпинель в виде ксеноморфных зерен размером до 0.3 мм. Также отмечается в виде мелких включений (до 50 мкм)

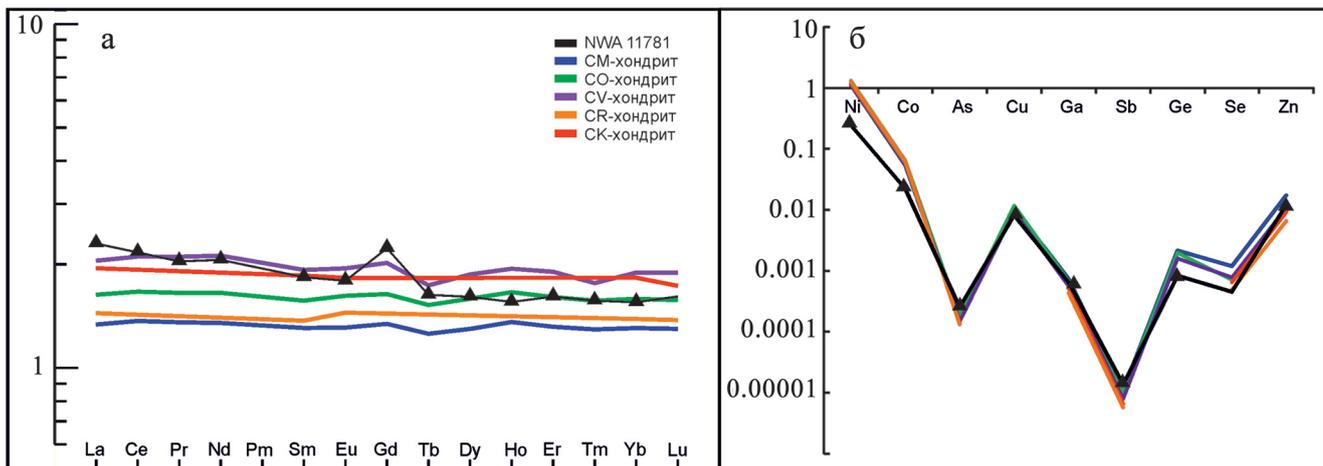


Рис. 2. Спайдер-диаграммы содержания РЗЭ (а) и распределения сидерофильных и халькофильных элементов (б) в метеорите Northwest Africa 11781, нормированных по CI хондриту [Wasson, Kallemeyn, 1988].

Средние содержания элементов в углистых хондритах CM, CO, CV типов – по [Wasson, Kallemeyn, 1988], CK – по [Kallemeyn et al., 1991], CR – по [Kallemeyn et al., 1994].

Fig. 2. CI-normalized REE (a) and non-lithophile element (b) abundances of the meteorite Northwest Africa 11781, CI chondrite composition by [Wasson, Kallemeyn, 1988].

Mean composition of CM, CO, CV chondrites by [Wasson, Kallemeyn, 1988], CK – by [Kallemeyn et al., 1991], CR – by [Kallemeyn et al., 1994].

зерна оливина и пироксена. По данным микрозондового анализа, хромшпинелид относится к хромиту с химическим составом, %: Cr_2O_3 – 55.30, FeO – 30.30, Al_2O_3 – 7.16, MgO – 3.77, TiO_2 – 1.37, MnO – 0.22, CaO – 0.03.

Размер богатых кальцием и алюминием включений (CAIs) варьирует от 0.05 до 0.3 мм (рис. 3). CAIs имеют пористое строение и тонкозернистую структуру. Минеральный состав CAIs представлен Al,Ti-содержащим диопсидом, шпинелью, хибонитом и перовскитом. Состав диопсида, %: SiO_2 – 52.8, CaO – 23.5, MgO – 18.9, Al_2O_3 – 3.3, TiO_2 – 0.8, FeO – 0.6. Состав шпинели, %: Al_2O_3 – 69.9, MgO – 28.3, FeO – 1, Cr_2O_3 – 0.4, SiO_2 – 0.4. Хибонит имеет следующий состав, %: SiO_2 – 1.7, MgO – 0.4, Al_2O_3 – 84.1, FeO – 4.2, CaO – 7.9, TiO_2 – 1.7. Химический состав перовскита, %: SiO_2 – 2.92, MgO – 5.69, Al_2O_3 – 11.09, FeO – 2.88, CaO – 25.97, TiO_2 – 51.54. По кайме вокруг CAIs развивается оливин

(Fe – 10.7%), по составу соответствующий оливину из амебовидных оливиновых агрегатов (AOAs), которые находятся обособленно от CAIs.

Амебоидальные оливиновые агрегаты имеют неправильную форму и по размеру не превышают 0.3–0.4 мм. Они сложены тонкозернистым агрегатом оливина, иногда с редкими зернами клинопироксена.

Размер богатых форстеритом объектов варьирует от 0.05 до 0.4 мм, они имеют округлую, реже остроугольную обломочную форму (рис. 4). По большей части они сложены высокомагнезиальными форстеритом и энстатитом. Форстерит содержит повышенную примесь “тугоплавких” элементов CaO (0.22–0.78%) и Al_2O_3 (0.08–0.37%) и пониженные содержания MnO (ниже пределов обнаружения микронзонда). Содержание FeO в форстерите и энстатите повышается от центра к краю зерна. Состав форстерита и энстатита представлен в табл. 2.

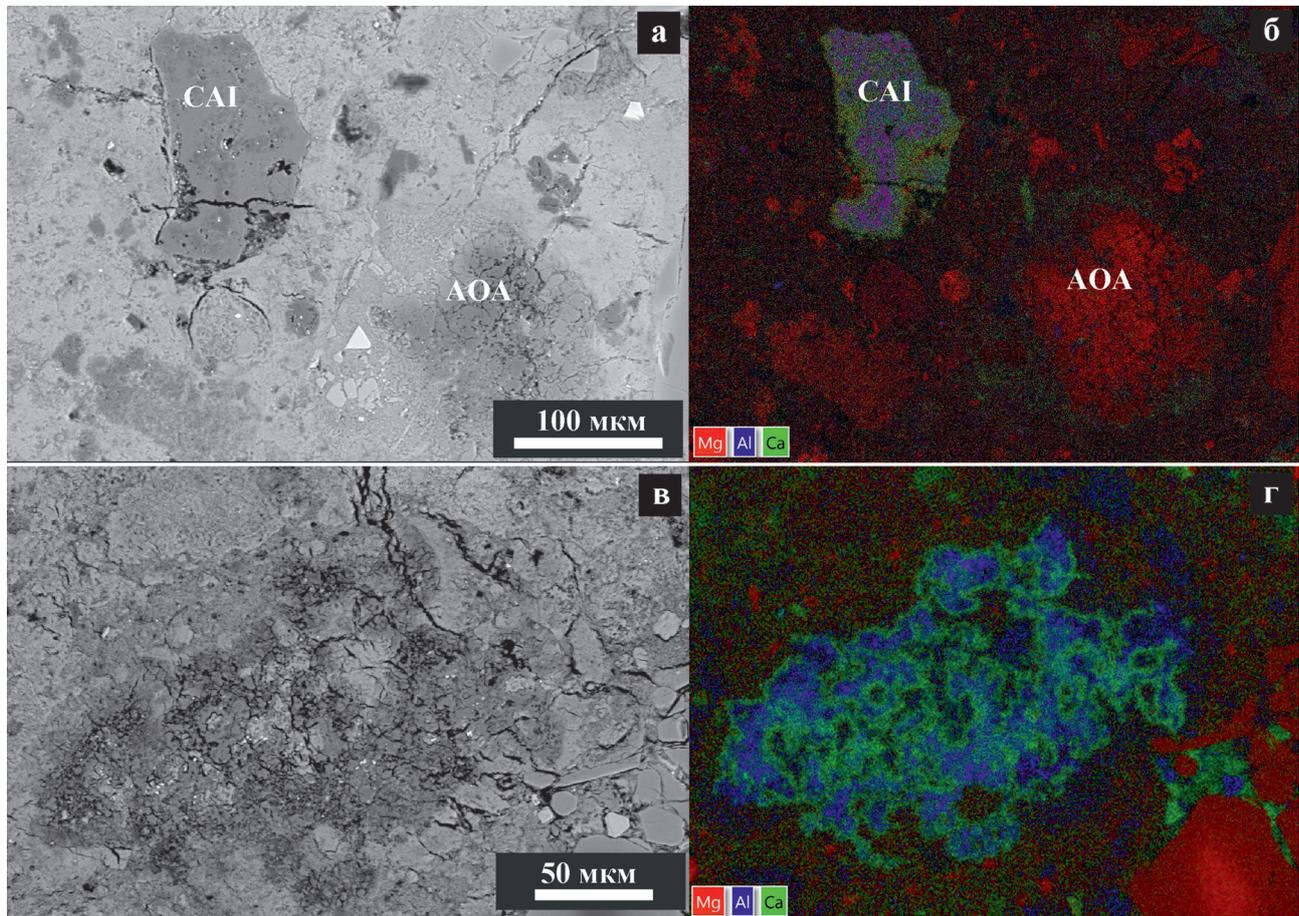


Рис. 3. Строение богатых кальцием и алюминием включений (CAIs) из углистого хондрита NWA 11781.

а, в – изображения в обратно-отраженных электронах (BSE), б, г – комбинированные элементные карты распределения; Mg – красный, Al – синий, Ca – зеленый.

Fig. 3. Calcium- and aluminum-rich inclusion (CAIs) in the carbonaceous chondrite NWA 11781.

а, в – back-scattered electron image (BSE), б, г – elemental distribution map; Mg – red, Al – blue, Ca – green.

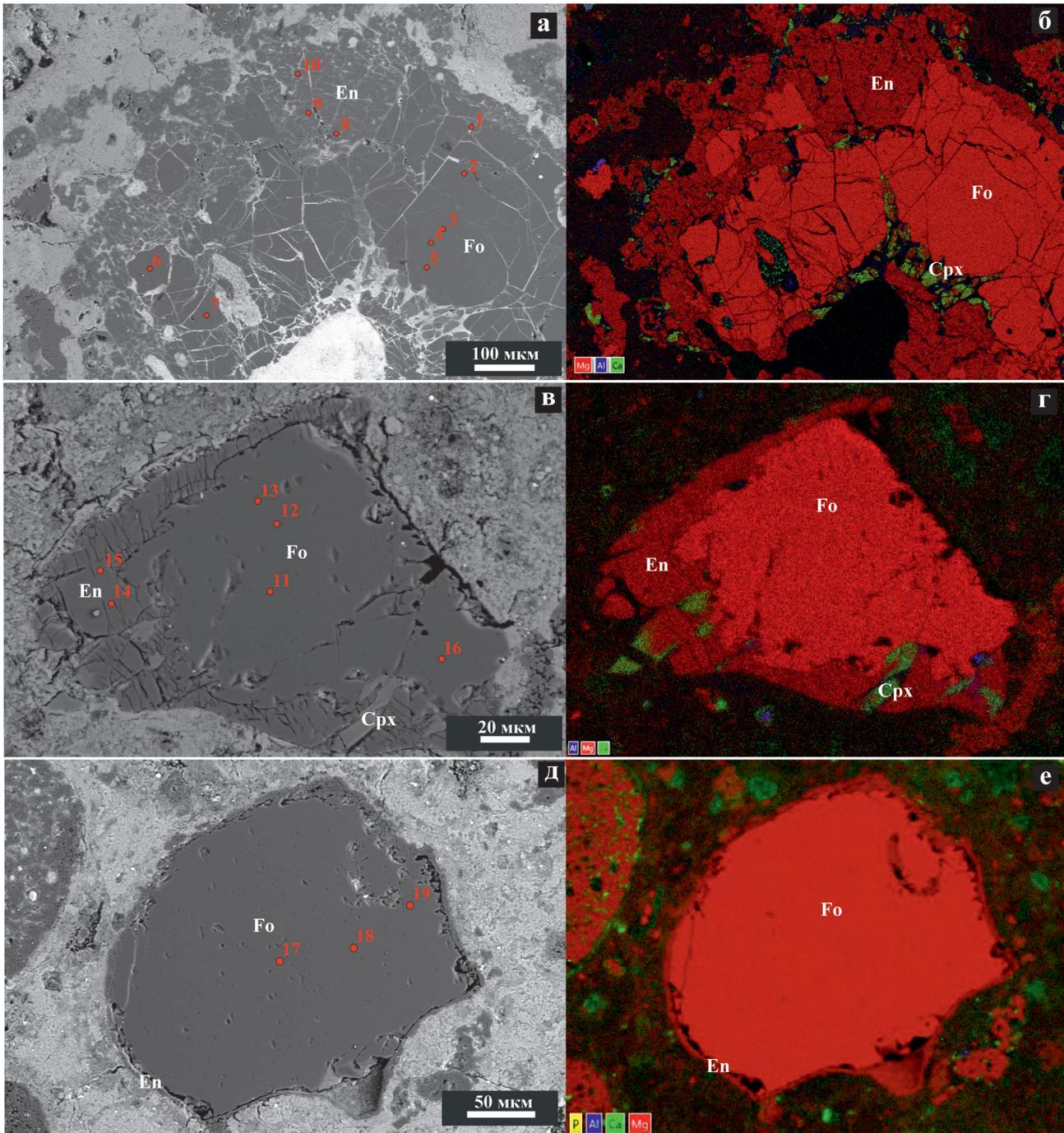


Рис. 4. Структура тугоплавких богатых форстеритом объектов из углистого хондрита NWA11781.

а, в, д – изображения в обратно-отраженных электронах (BSE), б, г, е – комбинированные элементные карты распределения: Mg – красный, Al – синий, Ca – зеленый, P – желтый.

Fig. 4. The structure of forsterite-rich objects in the carbonaceous chondrite NWA 11781.

а, в, д – back-scattered electron image (BSE), б, г, е – elemental distribution map: Mg – red, Al – blue, Ca – green, P – yellow.

В метеорите установлено необычное крупное (1 мм) богатое форстеритом включение (рис. 4а, б). Центральная его часть сложена несколькими сросшимися индивидами форстерита, по периферии на-

блюдается значительная ярко выраженная энстатитовая кайма. В отличие от других аналогичных включений в нем содержится небольшое количество плагиоклазового стекла и диопсида, запол-

Таблица 2. Химический состав форстерита и энстатита из богатых форстеритом объектов, мас. %

Table 2. Chemical composition of forsterite and enstatite from refractory forsterite-rich objects, wt %

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Сумма	f, %
Форстерит									
1	42.30	0.08	0.17	0.39	0.86	55.11	0.35	99.41	0.87
2	42.50	0.06	0.31	0.11	0.39	55.34	0.72	99.50	0.39
3	41.64	0.09	0.27	0.09	0.32	56.02	0.67	99.13	0.32
4	41.57	0.09	0.37	0.11	0.39	55.58	0.78	98.93	0.39
5	41.64	0.08	0.22	0.09	0.49	55.94	0.69	99.20	0.49
6	42.64	0.04	0.08	0.38	0.81	55.28	0.39	99.72	0.82
7	42.13	0.09	0.17	0.16	0.68	55.08	0.55	98.91	0.69
11	41.72	0.04	0.12	0.24	0.66	56.17	0.40	99.39	0.65
12	41.96	0.06	0.13	0.25	0.71	56.37	0.41	99.96	0.70
13	41.93	0.04	0.12	0.33	0.76	56.12	0.37	99.76	0.75
16	41.92	0.05	0.13	0.34	0.97	55.86	0.39	99.71	0.96
17	42.44	0.05	0.18	0.23	0.49	56.05	0.31	99.77	0.49
18	42.77	0.03	0.18	0.28	0.53	55.93	0.35	100.09	0.53
19	42.75	0.00	0.08	0.44	0.88	55.70	0.22	100.22	0.88
Энстатит									
8	56.87	0.16	0.98	0.47	3.49	36.36	0.68	99.15	5.11
9	59.19	0.20	0.94	0.43	0.63	38.15	0.54	100.12	0.92
10	57.95	0.25	0.96	0.50	1.98	37.20	0.57	99.69	2.90
14	58.99	0.13	0.45	0.60	0.82	38.51	0.52	100.17	1.18
15	58.05	0.38	1.81	0.66	0.81	37.92	0.43	100.20	1.18

Примечание. Содержания примесей MnO < 0.15 мас. %, NiO < 0.06 мас. %. $f = \text{Fe} \times 100\% / (\text{Fe} + \text{Mg})$. Здесь и далее анализы выполнены на микроанализаторе Cameca SX 100 в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН, аналитик А.В. Михеева.

Note. Impurities MnO < 0.15 wt %, NiO < 0.06 wt %. $f = \text{Fe} \times 100\% / (\text{Fe} + \text{Mg})$. Here and below analyses have been made on microanalyzer CAMECA SX100 in Common Use Center “Geoanalyst”, IGG UB RAS, analyst A.V. Mikheeva.

няющего мезостази́с между зернами форстерита в краевой части включения. В данном объекте также присутствуют зерна металла, которые заместились гидроксидами железа.

В матрице хондрита установлены отдельные зерна относительно высокожелезистого оливина размером 0.1–0.3 мм (рис. 5). Оливин находится в виде идиоморфных, реже – обломочных зерен. Такие зерна не образуют сростаний с другими минералами и встречаются равномерно в матрице метеорита. Состав таких зерен оливина приведен в табл. 3. Как правило, зерна имеют зональное строение, содержание FeO увеличивается по направлению от центра к краю с 15.35 до 38.89 мас. %.

Метеорит не несет следов ударного воздействия и в значительной степени был подвержен земному выветриванию.

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изученный метеорит классифицирован нами по петрографическим признакам и отчасти по микроэлементному составу как углистый хондрит CM второго петрографического типа. Данный метеорит является типичным представителем класса CM-хондритов и похож на большинство других CM-хондритов, описанных ранее в литературе [Macpherson, Davis, 1994; Hanowski, Brearley, 2001;

Rubin et al., 2007; Kimura et al., 2011; Hewins et al., 2014; Lee et al., 2016].

Интересной представляется находка крупного богатого форстеритом включения (см. рис. 4а, б), содержащего в краевой части мезостази́с, сложенный полевым шпатом и диопсидом. Наличие такого мезостази́са делает данный объект похожим на хондру. По нашему мнению, вероятно, он занимает промежуточное место между тугоплавкими богатыми форстеритом включениями и магнезиальными хондрами.

Относительно генезиса энстатита в богатых форстеритом включениях нет устоявшейся точки зрения. На наш взгляд, энстатитовая кайма в данных объектах могла сформироваться путем обрастания зерен форстерита или путем замещения последнего в результате взаимодействия с небулярным газом.

Зерна изолированного железистого оливина упоминаются и при описании других углистых хондритов [Richardson, McSween, 1978; Jones, 1992; Ruzicka et al., 2008; Frank et al., 2014; Yamanobe et al., 2017]. Их генезис остается дискуссионным. Так же, как хондры и тугоплавкие включения, они не подверглись замещению низкотемпературными водосодержащими минералами. Полная окристаллизованность (реже обломочная форма) дает основания предполагать их образование непосредствен-

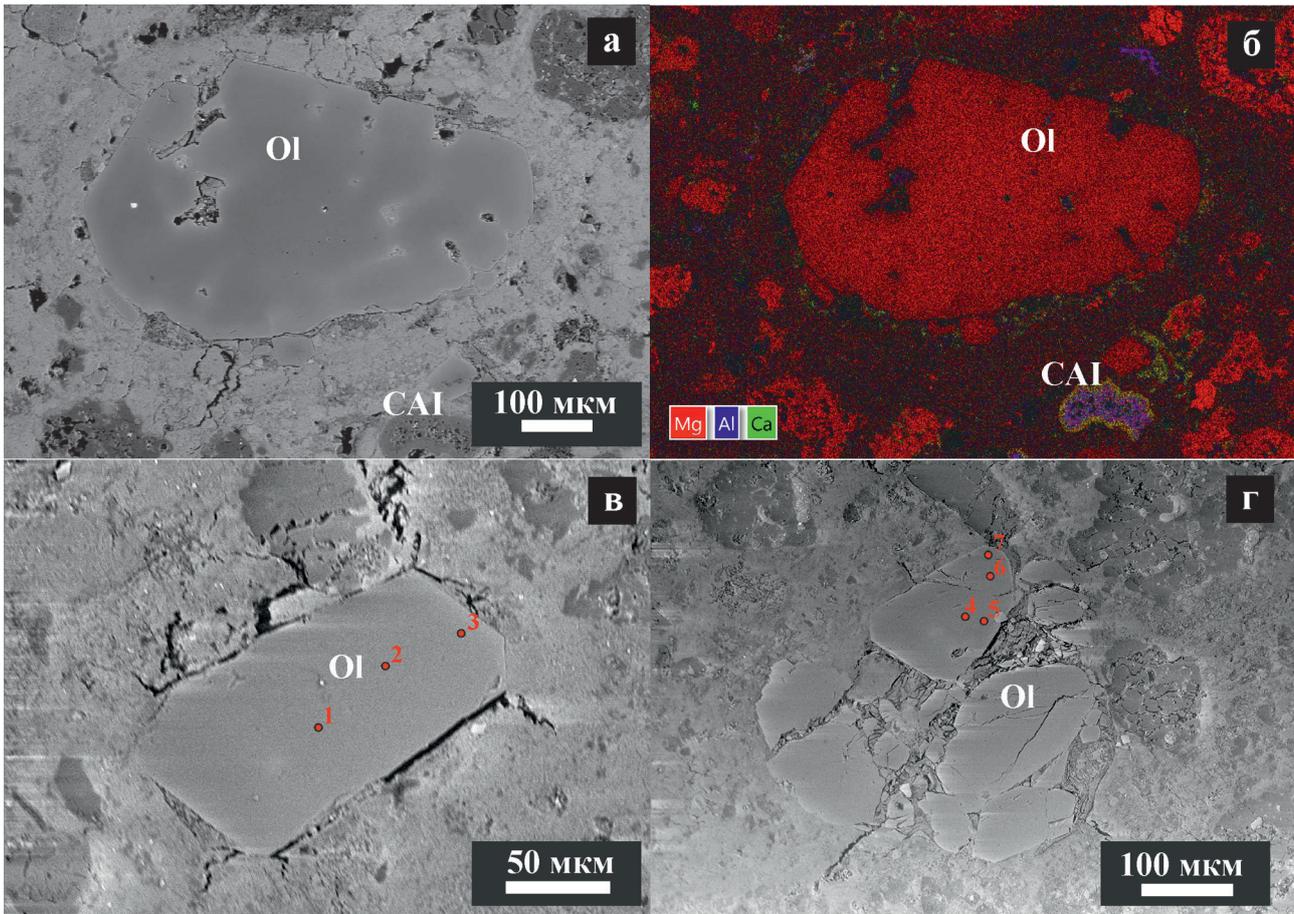


Рис. 5. Идиоморфные зерна железистого оливина в тонкозернистой матрице хондрита NWA 11781.

а, в, г – изображения в обратно-отраженных электронах (BSE), б – комбинированная элементная карта распределения: Mg – красный, Al – синий, Ca – зеленый.

Fig. 5. Isolate crystals of high-Fe olivine in fine-grained matrix of the meteorite NWA 11781.

а, в, г – back-scattered electron image (BSE), б – elemental distribution map: Mg – red, Al – blue, Ca – green.

Таблица 3. Химический состав идиоморфных зерен железистого оливина, мас. %

Table 3. Chemical composition of Isolate crystals of high-Fe olivine, wt %

№	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
1	38.64	0.05	0.30	15.45	0.10	44.3	0.15	99.01
2	38.91	0.08	0.39	15.35	0.19	44.43	0.15	99.59
3	37.14	0.06	0.4	21.50	0.28	40.75	0.21	100.46
4	35.52	0.00	0.45	33.55	0.48	28.85	0.14	99.06
5	35.25	0.00	0.43	34.85	0.42	28.2	0.15	99.42
6	35.20	0.03	0.42	34.77	0.40	28.07	0.13	99.03
7	34.32	0.00	0.39	38.89	0.50	25.22	0.28	99.63

Примечание. Содержания примесей TiO₂ < 0.04 мас. %, NiO < 0.08 мас. %.

Note. Impurities TiO₂ < 0.04 wt %, NiO < 0.08 wt %.

но путем конденсации из небулярного газа (по аналогии с богатыми форстеритом объектами). Однако остаются непонятными условия кристаллизации оливина при отсутствии других кристаллизовавшихся тем же путем минералов.

Таким образом, нами изучен и зарегистрирован новый CM2-углистый хондрит, показаны его геохимические особенности, изучены петрография и состав минералов. В метеорите установлены различные типы тугоплавких включений, в том числе достаточно мало распространенные тугоплавкие богатые форстеритом включения. Нами обнаружено необычно крупное (1 мм) богатое форстеритом включение, на наш взгляд занимающее переходное положение к высокомагнезиальным хондрам. Исследованы необычные идиоморфные зерна железистого оливина, механизм образования ко-

торых до конца не понятен. Данный метеорит является очень удобным объектом для дальнейшего изучения процессов, происходивших в ранней Солнечной системе.

Авторы благодарны за помощь в работе к.г.-м.н. Л.В. Леоновой и А.В. Михеевой.

Исследования проводятся при частичной поддержке гранта РФФИ 17-05-00297.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Connolly H.C., Zipfel J., Grossman J.N., Folco L., Smith C., Jones R.H., Righter K., Zolensky M., Russell S.S., Benedix G.K., Yamaguchi A., Cohen B.A. (2006) The Meteoritical Bulletin, No. 90. *Meteorit. Planet. Sci.*, **41**(9), 1383-1418.
- Frank D.R., Zolensky M.E., Le L. (2014) Olivine in terminal particles of Stardust aerogel tracks and analogous grains in chondrite matrix. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **142**, 240-259.
- Hanowski N.P., Brearley A.J. (2001) Aqueous alteration of chondrules in the CM carbonaceous chondrite, Allan Hills 81002: Implications for parent body alteration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**(3), 495-518.
- Hewins R.H., Bourot-Denise M., Zanda B., Leroux H., Barat J.-A., Humayun M., Göpel C., Greenwood R.C., Franchi I.A., Pont S., Lorand J.-P., Cournede C., Gattacceca J., Rochette P., Kuga M., Marrocchi Y., Marty B. (2014) The Paris meteorite, the least altered CM chondrite so far. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **124**, 190-222.
- Jones R.H. (1992) On the relationship between isolated and chondrule olivine grains in the carbonaceous chondrite ALHA 77307. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 467-482.
- Kallemeyn G.W., Rubin A.E., Wasson J.T. (1991) The compositional classification of chondrites: VI. The Karoonda (CK) group of carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 881-892.
- Kallemeyn G.W., Rubin A.E., Wasson J.T. (1994) The compositional classification of chondrites: VI. The CR carbonaceous chondrite group. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 2873-2888.
- Kimura M., Grossman J.N., Weisberg M.K. (2011) Fe-Ni metal and sulfide minerals in CM chondrites: An indicator for thermal history. *Meteorit. Planet. Sci.*, **46**(3), 431-442.
- Lee M.R., Lindgren P., King A.J., Greenwood R.C., Franchi I.A., Sparkes R. (2016) Elephant Moraine 96029, a very mildly aqueously altered and heated CM carbonaceous chondrite: implications for the drivers of parent body processing. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **187**, 237-259.
- Macpherson G.J., Davis A.M. (1994) Refractory inclusions in the prototypical CM chondrite, Mighei. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**(24), 5599-5625.
- Richardson S.M., McSween H.Y. (1978) Textural evidence bearing on the origin of isolated olivine crystals in C2 carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **37**, 485-491.
- Rubin A.E., Trigo-Rodriguez J.M., Huber H., John T. Wasson J.T. (2007) Progressive aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 2361-2382.
- Ruzicka A., Floss C., Hutson M. (2008) Relict olivine grains, chondrule recycling, and implications for the chemical, thermal, and mechanical processing of nebular materials. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 5530-5557.
- Wasson J.T., Kallemeyn G.W. (1988) Composition of Chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, **325**(1587), 535-544.
- Yamanobe M., Nakamura T., Nakashima D. (2017) Oxygen isotope reservoirs in the outer asteroid belt inferred from oxygen isotope systematics of chondrule olivines and isolated forsterite and olivine grains in Tagish Lake-type carbonaceous chondrites, WIS 91600 and MET 00432. *Polar Sci.*, **15**, 29-38.