

УДК 552.63

МЕТЕОРИТ БОРОДИНО: ЭВОЛЮЦИЯ НА РОДИТЕЛЬСКОМ ТЕЛЕ

© 2024 г. К. Г. Суханова^{1,*}, член-корреспондент РАН А. Б. Кузнецов¹, С. Г. Скублов^{1,2}

Поступило 14.11.2023 г.

После доработки 24.01.2024 г.

Принято к публикации 29.01.2024 г.

В статье обсуждаются результаты минералого-петрографического изучения метеорита Бородино (Н5). Впервые описаны минералы метеорита и приведены их химические составы. В метеорите Бородино обнаружены: оливин ($\text{Fa } 18.16 \pm 1.15$), низко-Са пироксен – (клино)энстатит ($\text{En } 81.37 \pm 1.73$, $\text{Wo } 1.18 \pm 0.31$), высоко-Са пироксены – авгит ($\text{En } 57.23 \pm 1.57$, $\text{Wo } 39.38 \pm 2.68$), диопсид ($\text{En } 51$, $\text{Wo } 45$), пижонит ($\text{En } 69$, $\text{Wo } 6$), плагиоклазы – олигоклаз ($\text{An } 12.16 \pm 1.24$, $\text{Or } 5.68 \pm 2.12$), фазы андезина ($\text{An } 48.23 \pm 1.84$, $\text{Or } 1.23 \pm 0.12$), анортоклаза ($\text{An } 0$, $\text{Or } 36$) и санидина ($\text{An } 0$, $\text{Or } 40.00 \pm 1.1$), и слабо раскристаллизованные стёкла полевошпатового состава, мериллит и хромшпинелид. Полученные данные позволили оценить степень земного выветривания метеорита как W0 и стадию импактного метаморфизма (S1-2), что предполагает хорошую сохранность материала метеорита. Состав оливина и хромшпинелида, определённый с помощью метода ЕРМА, был использован для оценки пиковой температуры термального метаморфизма 720°C , которая укладывается в интервал температур ($670\text{--}740^\circ\text{C}$), характерных для хондритов 5 петрологического типа. Присутствие высоко-Са пироксенов, крупных зёрен Са–Na–Mg-фосфатов и хромит-пижонитовых агрегатов в матрице метеорита указывают на продолжительное нагревание материала.

Ключевые слова: обыкновенные хондриты, метеорит Бородино, хондры, оливин, плагиоклаз, пироксен

DOI: 10.31857/S2686739724050105

Метеорит Бородино относится к группе оливин-бронзитовых высокожелезистых равновесных обыкновенных хондритов (Н5). В научной литературе до сих пор не приводилось полного минералого-петрографического описания метеорита, оценки температуры метаморфизма, степени земного выветривания и стадии импактного метаморфизма. Обнаруженные в этой работе петрографические особенности позволяют выделить несколько этапов в образовании вещества метеорита.

Метеорит Бородино упал в ночь накануне генерального сражения Отечественной войны 5 сентября 1812 г. на территорию расположения русских войск недалеко от деревни Горки (Московская область). Часовой артиллерийской роты, стоя на своем посту, заметил полёт и падение камня с неба, поднял его и передал своему командиру майору Дитрихсу [6]. Майор

Дитерихс был ранен во время сражения и, выйдя в отставку, жил в своем имении в Курляндии (современная Латвия) [5]. Метеорит оставался в семье майора на протяжении 80 лет, до тех пор пока в 1890 году потомки передали основную часть метеорита (320 г) в музей Горного института, небольшую часть – в Российскую академию наук [14] и личную коллекцию Ю.И. Симашко, расследовавшего обстоятельства падения метеорита.

Первое краткое петрографическое описание структуры метеорита Бородино и его хондр приведено в статье А.Н. Заварицкого в 1948 году [2]. А.Н. Заварицкий отмечает слабые следы перекристаллизации матрицы метеорита и наличие хондр разных структурных типов, в том числе двойных хондр. Минальный состав оливина метеорита измерен в 1963 г. ($\text{Fa} = 20$) [16], данные по остаточному магнетизму опубликованы в 1968 г. [1]. В оливине, пироксене и плагиоклазе были измерены плотности треков ядер тяжёлых элементов [15]. В 1968 г. был исследован химический состав метеорита [10], а в 1997 г. опубликовано содержание летучих элементов U, Au, Co,

¹Институт геологии и геохронологии докембрия Российской Академии наук, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

*E-mail: cris.suhanova92@yandex.ru

Sb, Ga, Rb, Ag, Se, Cs, Te, Zn, Cd, Bi, Tl и In, определённое инструментальным нейтронно-активационным анализом (INAA), благодаря которому стало возможным отнести метеорит Бородино к другим Н-хондритам, упавшим в период с сентября 1812 по 1831 гг. [20].

В 1950 г. в метеорите Бородино измерен изотопный состав углерода (общий C = 0.070%, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 90.9\%$) [9]. В метеорите подсчитано содержание инертных газов и отмечено присутствие первичных газов типа В (солнечные), что отражает подверженность вещества метеорита солнечному ветру [3]. По соотношению изотопов инертных газов был вычислен радиационный возраст метеорита около 4.5 млрд лет [13]. В 1991 г. было предложено отнести метеорит Бородино по его петрографическим и спектральным характеристикам к “чёрным” обыкновенным хондритам, которые были сильно изменены в космосе во время ударов и столкновений [12].

Фрагмент метеорита Бородино для минералого-петрографического исследования в этой работе был предоставлен Горным музеем Санкт-Петербургского горного университета. Химический состав минералов метеорита на уровне главных элементов определён методом SEM-EDS в ИГГД РАН на сканирующем электронном микроскопе “JEOL” JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200. Вещество метеорита было помещено в стандартную шайбу из эпоксидной смолы, которая после полировки напылялась углеродом. Точечные определения состава минералов выполнялись с использованием электронного луча с ускоряющим напряжением в 20 кВ и током 1 нА, размер пятна пучка составлял 1–2 мкм. Время накопления каждого спектра составляло 35 с, в качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы. Для коррекции матричного эффекта использовался алгоритм ZAF.

Химический состав оливина и хромшпинелида для расчёта пиковых температур метаморфизма на уровне главных элементов был определён методом EPMA в ИГГД РАН на микрозонде “JEOL” JXA-8230 с четырьмя волновыми дисперсионными спектрометрами. Точечные измерения состава минералов выполнялись с ускоряющим напряжением 20 кВ и током 20 нА. Диаметр сфокусированного пучка составил 3 мкм. В качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы. Для коррекции матричного эффекта использовался алгоритм ZAF. Линии K α 1 измерялись для всех элементов.

Минералого-петрографическое исследование метеорита позволило выявить хондры порфировой и колосниковой структур, также в матрице метеорита наблюдаются порфировые пироксеновые агрегаты, сложенные низко- и высоко-Са пироксенами. Явных различий в размере, форме и наличии кайм между колосниковыми и порфировыми хондрами не наблюдается. Большинство хондр имеет размер около 0.5 мм, наиболее крупные хондры достигают 1 мм в диаметре, маленькие хондры не превышают 300 мкм в диаметре. Форма хондр в основном округлая, довольно редко встречается овальная. Трещин, полостей, металлических и силикатных кайм в хондрах метеорита Бородино не наблюдается. Границы с матрицей у хондр чёткие и хорошо проявленные. Порфировые хондры сложены зёрнами оливина и/или низко-Са пироксена, интерстиции между которыми занимает мезостазис. В порфировых хондрах размер зёрен колеблется на уровне 100–200 мкм, в колосниковых хондрах, сложенных тонкими короткими балками оливина и пироксена, размер зёрен не превышает 100 мкм по удлинению.

Матрица метеорита сложена крупными зёрнами силикатных минералов, в массе которых также присутствует камасит, тетратэнит, троилит, хромшпинелид и апатит. Пор, прожилков и трещин в матрице метеорита не наблюдается. Вторичных минералов и следов земного выветривания в метеорите Бородино не обнаружено. В матрице метеорита встречен скелетный тонкоиглочатый агрегат хромшпинелида в оливин-пижонитовой массе, что может отражать ультравысокое давление флюидов на родительском теле хондрита [4].

Оливин в метеорите Бородино наблюдается в виде идиоморфных или гипидиоморфных зёрен, слагающих порфировые хонды. В зависимости от хондры размеры зёрен могут сильно варьировать от 100 до 300 мкм. В колосниковых хондрах оливин присутствует в виде вытянутых скелетных кристаллов, иногда срастающихся между собой, образуя балки, ориентированные чаще всего параллельно, но иногда пересекающиеся между собой. В матрице метеорита наблюдаются отдельные, чаще всего гипидиоморфные зёрна оливина, размер которых в среднем составляет 100–200 мкм по удлинению. Состав оливина соответствует форстериту и довольно неоднороден (Fo 79–83), но различий между оливином хондр и матрицы по составу главных элементов не установлено (табл. 1 и 2).

Пироксен в метеорите Бородино представлен энстатитом, диопсидом, авгитом и пижонитом

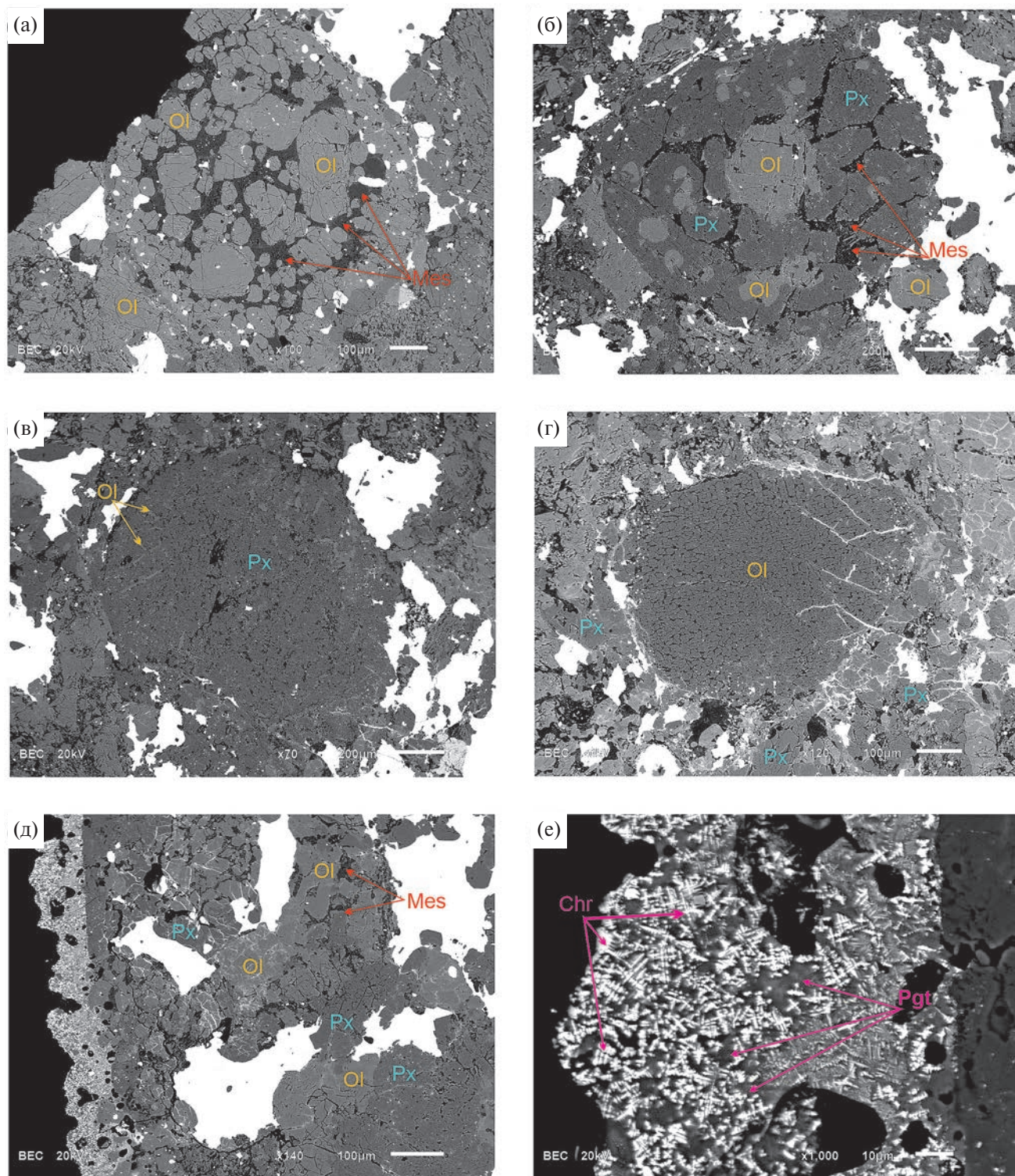


Рис. 1. Фотографии и минеральный состав порфировых (а–б) и колосниковых (в–г) хондр и матрицы (д–е) метеорита Бородино в обратно-отражённых электронах. Ol – оливин, Px – пироксен, Mes – мезостазис, Pgt – пиджит, Chr – хромит.

(табл. 1), присутствующими как в хондрах, так и в матрице.

Низко-Са пироксен соответствует энстатиту (En 79–85, Wo 1). Состав энстатита варьирует

довольно значительно, по сравнению с гомогенным составом оливина. В порфировых хондрах энстатит представлен в виде крупных (100–300 мкм) гипидиоморфных зёрен. Колосниковые хондры практически полностью состоят из балок энстатита, с редким включением оливина. В матрице метеорита энстатит находится в виде ксеноморфных выделений и гипидиоморфных кристаллов (100–200 мкм).

Высоко-Са пироксен чаще всего представлен авгитом (En 54–58, Wo 37–42), но также встречаются фазы диопсида (En 51, Wo 45) и пижонита (En 69, Wo 6). Авгит и диопсид встречаются в виде вытянутых зёрен или каёмок на оливине и низко-Са пироксене. Пижонит в сростании с оливином образует агрегат, который заполнен скелетными кристаллами хромшпинелида.

Плагиоклаз в метеорите Бородино плохо раскристаллизован и чаще всего заполняет интерстиции между оливином и низко-Са пироксеном. В порфировых, колосниковых хондрах и матрице метеорита плагиоклаз характеризуется олигоклазовым составом (An 10–13, Or 3–7) и минимальной степенью раскристаллизованности. Иногда в хондрах встречаются фазы андезина (An 46–49, Or 1), анортклаза (An 0, Or 36) и санидина (An 0, Or 38–41) (табл. 1).

Камасит (Ni 6.0 мас.%) и тетратэнит (Ni 52–53 мас.%) чаще всего образуют крупные металлические обособления в матрице метеорита или слагают прерывистые каймы хондр. Количество металлического железа в метеорите достигает 25–30 об.%.

Троилит встречается в виде ксеноморфных выделений и гипидиоморфных зёрен в матрице метеорита, иногда образует каёмки вокруг хондр. Примеси в троилите по данным SEM-EDS не обнаружены.

Хромшпинелид (табл. 1 и 2) в виде ксеноморфных выделений присутствует в матрице метеорита в сростках с камаситом, тетратэнитом и троилитом. Размер выделений чаще всего не превышает 200 мкм.

Фосфаты в метеорите Бородино представлены Са–Na–Mg-разновидностью (мериллитом), тогда как апатит при исследовании не обнаружен (табл. 1). Мериллит образует крупные (до 200 мкм) гипидиоморфные зёрна на границе металлической и силикатной фаз матрицы метеорита и на границе хондры и матрицы.

Исходное вещество обыкновенных хондритов не испытывало дифференциации в протопланетном облаке, но подвергалось последующему

термальному метаморфизму, что затрудняет реконструкцию первичных минералов [7, 8]. Обнаруженные в этой работе петрографические особенности метеорита Бородино позволяют нам в общих чертах раскрыть историю его пребывания в космосе и на Земле. Выделяют несколько возможных этапов в истории метеорита.

Первый этап — образование каменного материала в виде субмиллиметровых сферул (хондр), их аккреция и формирование родительского тела хондрита.

Второй этап — преобразование хондритового вещества на родительском теле. Обыкновенные хондриты (ОХ) — это наиболее распространённый тип метеоритного вещества на Земле, который представляет собой обломки астероидов, достигавших 200 км в диаметре. Крупный размер астероидов позволял накапливать короткоживущие изотопы, что приводило к нагреванию центра астероида и действию термального метаморфизма. [11]. Тем не менее, в результате различных причин, астероиды обыкновенных хондритов не претерпели сегрегации ядро-мантии и сохранили большую часть вещества в малоизменённом состоянии. Действие термального метаморфизма на родительских астероидах ОХ приводило к гомогенизации Fe и Mg в оливине и низко-Са пироксене, раскристаллизации плагиоклаза, появлению высоко-Са пироксена, апатита и хромшпинелида, увеличению размеров зёрен минералов матрицы и постепенное стирание границ между матрицей и хондрами.

Третий этап — соударение ранних космических тел. Коллизия планет, родительских тел хондритов и других метеоритов, а также астероидов и более мелкого космического “мусора” приводили к разрушению космических тел и импактному преобразованию их каменного материала. В результате столкновений вещество ОХ могло подвергаться высокому давлению (до 90 ГПа), быстрому нагреву и плавлению. Импактные события в истории метеорита определяются наличием карманов плавления, трещин, мозаичным погасанием оливина и т.п. [17].

Четвёртый этап — пребывание метеорита на Земле. Продолжительное пребывание метеорита на поверхности Земли, а также условия выветривания (влажность и др.) приводят к изменению метеоритного вещества, в частности к окислению камасит-тэнита, троилита и других минералов и образованию вторичных фаз.

Минералого-петрографическое описание метеорита Бородино позволяет выявить некоторые

Таблица 1. Среднее содержание главных (мас. %) элементов в минералах метеорита Бородино, определённое методом SEM-EDS

	Оливин	(Клино) энстатит	Авгит	Диопсид	Пижонит	Олигоклаз	Анлезин	Анортоклаз	Санидин	Мериллит	Хромшпинелид
<i>n</i>	7	9	4	1	1	5	2	1	2	2	2
Fa, мол. %	18.16±1.15			—	—						
En		81.37±1.73	57.23±1.57	51.64	69.69						
Wo		1.18±0.31	39.38±2.68	45.77	6.00						
An						12.16±1.24	48.23±1.84	0.76			
Or						5.68±2.12	1.23±0.12	36.29	40.00±1.1		
SiO ₂	39.47	56.98	52.30	49.59	47.79	63.74	55.84	58.09	61.45±0.22	0.36	0.06
TiO ₂		0.16	0.81	1.19		0.16	0.41	0.48	0.41		2.51
Al ₂ O ₃	0.19	0.17	6.73	9.15	2.82	21.63	22.43	22.94	21.01	0.43	5.85
Cr ₂ O ₃		0.13	1.76	2.06	0.33		0.45	1.00	0.53		58.11
FeO	17.85	11.04	1.43	0.93	19.74	1.29	2.15	1.35	1.28	0.84	28.52
MnO	0.17	0.37	0.62	0.52	0.09		0.16	0.02	0.03		0.56
MgO	42.23	30.51	19.47	16.26	24.12	0.30	4.24	0.29	1.00	3.38	3.20
CaO	0.09	0.64	18.60	20.05	2.89	2.51	8.87	0.18		45.04	0.08
Na ₂ O			0.19	0.24	1.35	9.39	5.13	8.30	6.98	2.34	
K ₂ O						0.98	0.19	7.27	7.06		
ZnO											0.32
NiO					0.85						
P ₂ O ₅										47.59	
Cl								0.07	0.13	0.03	
SO ₃							0.16		0.13		
V ₂ O ₅											0.82
Сумма	100.00	100.00	101.90	99.99	99.98	100.00	100.01	99.99	100.00	100.00	100.00

Примечание. Здесь и в других таблицах, пропуск — элемент не определялся. *n* — количество анализов.

Таблица 2. Содержание главных и малых (мас. %) элементов в оливине и хромшпинелиде метеорита Бородино, определённое методом EPMA-WDS

	Оливин										Хромшпинелид									
	39.38	39.60	39.23	39.82	39.16	39.59	39.37	39.33	39.70	39.45	0.04	0.05	0.06	0.12	0.06	0.09	0.05	0.06	0.00	0.05
SiO ₂	39.38	39.60	39.23	39.82	39.16	39.59	39.37	39.33	39.70	39.45	0.04	0.05	0.06	0.12	0.06	0.09	0.05	0.06	0.00	0.05
Al ₂ O ₃	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	5.62	5.40	5.40	5.97	6.14	6.40	6.21	6.27	6.49	5.67
MgO	43.27	43.60	42.78	42.71	42.18	43.57	42.77	43.10	42.91	42.65	3.47	3.74	3.93	3.81	3.06	3.21	2.95	2.78	3.47	4.45
TiO ₂	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	2.41	2.15	2.08	2.31	2.21	2.10	2.13	1.84	2.23	2.36
CaO	0.02	0.01	0.03	0.02	0.05	0.02	0.04	0.01	0.03	0.03										
FeO	17.55	17.40	17.63	17.93	18.37	17.21	17.90	17.78	17.86	17.80	27.20	26.96	26.91	27.71	28.47	28.18	28.70	29.07	28.14	26.61
MnO	0.49	0.46	0.48	0.47	0.47	0.50	0.48	0.48	0.46	0.47	0.87	0.96	0.88	0.86	0.94	0.90	0.92	1.03	0.96	0.76
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.02	0.00	0.06	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	59.01	59.84	60.24	58.54	58.04	58.39	59.18	58.29	58.32	58.37
NiO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.18	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.04	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.03
V ₂ O ₅											0.52	0.42	0.52	0.49	0.47	0.53	0.51	0.50	0.44	0.55
ZnO											0.73	0.72	0.76	0.70	0.96	0.93	0.35	0.36	0.36	0.65
Сумма	100.74	101.11	100.19	100.97	100.47	100.90	100.61	100.72	100.98	100.44	99.90	100.26	100.79	100.56	100.38	100.75	101.02	100.24	100.42	99.48

особенности его преобразований. Так, отсутствие вторичных минералов, прожилков и пор в метеорите, а также история его падения позволяют оценить степень земного выветривания материала как W0 [18]. Отсутствие карманов плавления в матрице метеорита, заполненных рудными минералами трещин и общей дезинтегрированности породы отражают низкую степень импактного метаморфизма метеорита не выше S1-2 [17]. Наблюдаемое малое влияние импактного метаморфизма не соответствует данным предыдущих исследователей [12], что может объясняться неоднородным строением метеорита.

Практически полная гомогенность состава по главным элементам оливина и низко-Са пироксена, присутствие высоко-Са пироксена, апатита и хромшпинелида указывают на подверженность материала метеорита высокой степени термального метаморфизма.

Пиковая температура нагрева хондрита, при которой достигается равновесие между оливинам и хромистой шпинелью, было определено оливин-хромшпинелидовым геотермометром как 720°C [19], что укладывается в интервал температур, характерных для обыкновенных хондритов H5 (670–740°C).

Таким образом, метеорит Бородино является характерным представителем равновесных обыкновенных хондритов H5. Минералого-петрографическое исследование позволило установить отсутствие следов земного выветривания и импактного метаморфизма. Пиковая температура термального метаморфизма метеорита Бородино входит в интервал температур нагрева, характерных для 5 петрографического типа. Однако, широкое распространение высоко-Са пироксенов, крупных зёрен фосфатов и присутствие хромит-пижонитового агрегата в метеорите указывают на продолжительную подверженность термальному метаморфизму на родительском теле.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят О.Л. Галанкину (ИГГД РАН) за аналитические работы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках темы НИР ИГГД РАН № FMUW-2022-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуськова Е. Г. Магнитные свойства метеоритов: Метеориты в лаборатории. Л.: Наука, 1972. 108 с.
2. Заварицкий А. Н. О структуре кристаллических хондритов // Метеоритика. 1948. С. 50–70.
3. Левский Л. К. Новые данные по содержанию изотопов инертных газов каменных метеоритов // Метеоритика. 1972. С. 149–150.
4. Маракушев А., Зиновьева Н., Грановский Л. Генетические типы минералов ультравысокого давления в метеоритах // Доклады Академии наук. 2007. Т. 417. С. 673–676.
5. Оболенская Э. В., Попова Е. Е. Метеорит Бородино // Русская история. 2012. С. 95–96.
6. Симашко Ю. И. Падение двух метеоритов в исторические эпохи 1704 г. близ Дерпта и 1812 г. с. Бородино. СПб.: Тип. А. С. Суворина, 1892. [2], 8 с.; 19 с.
7. Суханова К., Кузнецов А., Галанкина О. Особенности кристаллизации оливина в обыкновенных хондритах (метеорит Саратов): геохимия редких и редкоземельных элементов // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 149–157.
8. Суханова К. Г., Кузнецов А. Б., Скублов С. Г. Геохимические особенности хондр метеорита Орловка (H5) как свидетельство плавления минералов-прекурсоров // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 504. С. 28–33.
9. Трофимов А. В. Изотопный состав углерода метеоритов // Метеоритика. 1950. С. 127–133.
10. Харитонов В. Я. Химический состав каменных метеоритов Бородино, Лаврентьевка, Alfianello и Nardoo II // Метеоритика. 1968. С. 138–141.
11. Aleon J., Aleon-Toppa A., Platevoet B., Bardintzeff J. M., McKeegan K. D., Brisset F. Alkali magmatism on a carbonaceous chondrite planetesimal // PNAS. 2020. V. 117. P. 8353–8359.
12. Britt D. T., Pieters C. M. Black ordinary chondrites: An analysis of abundance and fall frequency // Meteoritics. 1991. V. 26. P. 279–285.
13. Graf T., Marti K. Collisional history of H chondrites // Journal of Geophysical Research. 1995. V. 100. P. 21247–21263.
14. Ivanova M. A., Nazarov M. A. History of the meteorite collection of the Russian Academy of Sciences // Geological Society, London, Special Publications. 2006. V. 256. P. 219–236.
15. Kashkarov L. L., Korotkova N. N., Kalinina G. V. Some general characteristics of the early radiation-thermal history of carbonaceous and ordinary chondrite

- matter on data of track studies // Lunar and Planetary Science Conference. 1994. V. 25. P. 671–672.
16. *Mason B.* Olivine composition in chondrite // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1963. V. 27. P. 1011–1023.
 17. *Stöffler D., Keil K.* Shock metamorphism of ordinary chondrites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. V. 55. P. 3845–3867.
 18. *Wlotzka F.* A weathering scale for the ordinary chondrites // *Meteoritics*. 1993. V. 28. P. 460.
 19. *Wlotzka F.* Cr spinel and chromite as petrogenetic indicators in ordinary chondrites: Equilibration temperatures of petrologic types 3.7 to 6. // *Meteoritics & Planetary Science*. 2005. V. 40. P. 1673–1702.
 20. *Wolf S. F., Wang M.-S., Dodd R. T., Lipschutz M. E.* Chemical studies of H chondrites 8. On contemporary meteoroid streams // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 1997. V. 102. P. 9273–9288.

THE BORODINO METEORITE: EVOLUTION ON PARENT BODY

K. G. Sukhanova^{a, #}, Corresponding Member of the RAS A. B. Kuznetsov^a, S. G. Skublov^{a, b}

^a*Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*

^b*Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation*

[#]*E-mail: cris.suhanova92@yandex.ru*

The article discusses the results of a mineralogical and petrographic study of the Borodino meteorite (H5). For the first time, meteorite minerals are described and their chemical compositions are given. The following were found in the Borodino meteorite: olivine (Fa 18.16 ± 1.15), low-Ca pyroxene – (clino) enstatite (En 81.37 ± 1.73 , Wo 1.18 ± 0.31), high-Ca pyroxene – augite (En 57.23 ± 1.57 , Wo 39.38 ± 2.68), diopside (En 51, Wo 45), pigeonite (En 69, Wo 6), plagioclases – oligoclase (An 12.16 ± 1.24 , Or 5.68 ± 2.12), andesine (An 48.23 ± 1.84 , Or 1.23 ± 0.12), anorthoclase (An 0, Or 36) and sanidine (An 0, Or 40.00 ± 1.1), and weakly crystallized glasses of feldspathic composition, merillite and chrome spinel. The data obtained made it possible to estimate the degree of terrestrial weathering of the meteorite as W0 and the stage of impact metamorphism (S1-2), which suggests good preservation of the meteorite material. The composition of olivine and chrome spinel, determined using the EPMA method, was used to estimate the peak temperature of thermal metamorphism at 720°C, which falls within the temperature range (670–740°C) characteristic of petrological type 5 chondrites. The presence of high-Ca pyroxenes, large grains of Ca–Na–Mg phosphates and chromite-pigeonite aggregates in the meteorite matrix indicate prolonged heating of the material.

Keywords: ordinary chondrites, Borodino meteorite, chondrules, olivine, plagioclase