

УДК 523.681

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И ГЕНЕЗИСА МЕТЕОРИТА БРАГИН

А.И. Бахтин, А.А. Ескин, Р.Х. Сунгатуллин, Г.В. Сонин, Р.Д. Петрова
Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

С применением микронзондового анализа изучена полированная пластина метеорита Брагин из коллекции Геологического музея Казанского федерального университета. Анализы пересчитывались на минералы, по которым делались выводы о минералогическом составе метеорита. В его составе выявлено 15 минералов и алюмосиликатное стекло сложного состава. Структура метеорита является петельчато-порфирированной. Петельчатая часть сложена в основном никелистым железом, а порфирированная – крупными кристаллами оливина. Особенности минеральных выделений и их пространственное распределение позволили сделать вывод о том, что вещество метеорита Брагин образовалось в результате флюидно-метасоматического преобразования изначально хондритового вещества под действием глубинных восстановительных газовых флюидов H_2 , CO , CO_2 , H_2S и др.

Ключевые слова: метеориты, метеорит Брагин, палласиты, минералогический состав, генезис палласитов

Введение

Метеориты представляют большую научную ценность. Их изучение позволяет воссоздать раннюю историю Солнечной системы и способствует пониманию происхождения Земли, планет и выявлению минералого-геохимических закономерностей эволюции их вещества. Источником метеоритов считается пояс астероидов, находящийся между Марсом и Юпитером. Астероиды – это фрагменты распавшихся планетезималей, поэтому изучение метеоритов позволяет получать информацию о глубинных зонах планет земной группы.

По минералогическому и химическому составу все метеориты делят на три группы: каменные, железокремнистые, железные. Железокремнистые метеориты состоят из примерно равных частей каменного (силикатного) и железистого (металлического) материала и представлены в основном двумя классами: мезосидериты и палласиты. Их главное различие состоит в том, что в мезосидеритах силикаты представлены в основном пироксеном и плагиоклазом, а в палласитах – оливином различных размеров и очертаний. Метеорит Брагин относится к классу палласитов. Нами изучена полированная пластина этого метеорита из коллекции Геологического музея Казанского федерального университета (рис. 1) весом 19,6 г.



Рис. 1. Полированная пластина метеорита Брагин

Исследования проводились в отраженном свете на микроскопе ПОЛАМ РП -1 фирмы ЛОМО (Россия) и на электронном микроскопе XL-30 фирмы Philips (Голландия), снабженном энергодисперсной приставкой EDAX. Под метеоритом Брагин подразумевается целая группа фрагментов, найденных на речке Брагинка Речницкого уезда Минской губернии. Все они имеют одинаковую структуру и состав. Поэтому считается, что здесь в небе когда-то произошел распад крупного метеорита и выпал метеоритный дождь на площади 15×30 км. Первые находки брагинских палласитов относятся к 1807 г. Одновременно было найдено два экземпляра весом 80 и 20 кг в местности Кунцовка, близ деревни Капоренки ныне Брагинского района Белоруссии [1]. Первый сейчас находится в коллекции АН Украины. В самом конце XIX в. в этом же уезде был найден точно такой же палласит весом 182 кг (ныне хранится в коллекции Киевского университета). В начале XX в. в этих же местах было найдено еще два образца палласита. Один из них был затерян, а другой весом 66470 г поступил 19 февраля 1924 г. в коллекцию АН СССР. В 1927 г. в АН СССР от жителей д. Колыбань этого же района поступило три куса аналогичного палласита весом 1376 г, 543 г и 340 г. В 1937 г. в полукилометре от с. Круки был найден новый экземпляр брагинских палласитов весом 270 кг, а в 1938 г. близ д. Капоренки был найден такой же метеорит весом 16 кг. Оба последних хранились в Институте геологии АН Белоруссии, но были утеряны во время войны. Общий вес всех брагинских палласитов в коллекциях превышает 640 кг [1]. В литературе метеорит Брагин до сих пор остается плохо изученным [2, 3].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На электронном микроскопе в лаборатории Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ было выполнено 60 микрозондовых анализов метеорита Брагин, которые послужили основой для характеристики особенностей состава и генезиса этого метеорита. Микрозондовые анализы пересчитывались на нормативные минералы (миналы), и по ним оценивался минералогический состав проанализированных участков образца. Наиболее характерные анализы и отвечающий им состав приведены в табл. 1, 2. В составе изученной пластинки метеорита Брагин было выявлено 15 минералов и алюмосиликатное стекло сложного состава (табл. 3).

Табл. 1

Микрозондовые анализы химического состава метеорита Брагин (вес. %)

№ анализа	O	Si	Mg	Fe	Ni	Al	Cr	Ca	Na	K	S	C	Cl	Nb
1	27.13	0.27				0.17						71.03	1.41	
2	14.77											82.65	2.58	
3				88.80	6.33							4.87		
4	37.68	17.48	28.35	16.49										
5	27.73	1.03		71.24										
6	32.67	1.87		65.06				0.40						
7	36.86	19.33	29.02	14.79										
8				68.23							31.77			
9	23.09		2.79	20.80			53.32							
10				89.00	6.64							4.36		
11	44.49	55.51												
12	38.46	32.33		0.66		12.88			1.18	14.49				
13	34.00	21.22	30.67	14.12										
14				90.29	5.46							4.25		
15				67.60							32.40			
16	37.14	19.14	28.19	15.53										
17				41.35	26.73						31.92			
18	28.04	20.73	31.87	19.36										
19	4.04	1.67		83.50				0.35	2.10	0.47		4.58	0.37	2.93
20	22.38	0.23		77.40										

Табл. 2

Минаяльный состав анализированных участков метеорита Брагин

№ анализа	Минаялы
1	Графит с примесями
2	Графит с примесями CO ₂ , Cl ₂
3	Когенит (Fe _{2.82} Ni _{0.18}) ₃ C 73%, камасит (Fe _{0.93} Ni _{0.07}) 27%
4	Оливин, $f = 0.20$ *
5	Вюстит FeO 98% + тридимит SiO ₂ 2%
6	Вюстит в силикатном стекле (Si, Fe, Ca)O ₂
7	Оливин, $f = 0.18$
8	Маккинавит FeS _{1-x} , $x = 0.19$
9	Хромит (Fe _{0.74} Mg _{0.23} Cr _{0.03})Cr ₂ O ₄
10	Скрытозернистая смесь когенита (Fe _{2.72} Ni _{0.28}) ₃ C 65% и камасита (Fe _{0.98} Ni _{0.02}) 35%
11	Тридимит
12	К-На-полевой шпат
13	Оливин, $f = 0.17$
14	Скрытозернистая смесь когенита (Fe _{2.82} Ni _{0.18}) ₃ C 64% и камасита (Fe _{0.96} Ni _{0.04}) 36%
15	Маккинавит FeS _{1-x} , $x = 0.17$
16	Оливин, $f = 0.19$
17	Скрытозернистая смесь маккинавита FeS _{1-x} , $x = 0.07$ и хизлевудита Ni ₃ S ₂ 36%
18	Оливин, $f = 0.20$
19	Хаксонит Fe ₂₃ C ₆ 86% + силикатное стекло (Na _{0.39} Si _{0.25} Fe _{0.14} Nb _{0.13} K _{0.05} Ca _{0.04})O _{1.07} Cl _{0.04} 14%
20	Вюстит FeO

*Примечание: $f = \text{Fe}/(\text{Mg} + \text{Fe})$.

Табл. 3

Минералы, выявленные в метеорите Брагин

Класс	Минералы
Самородные элементы	Камасит, тэнит (Fe, Ni), графит С
Карбиды	Когенит (Fe, Ni) ₃ С, хаксонит Fe ₂₃ С ₆
Сульфиды	Маккинавит* FeS _{1-x} , хизлевудит Ni ₃ S ₂ , альдгамит CaS
Галогениды	Лавренсит (Fe, Ni)F ₂
Окислы	Вюстит FeO, хромит (Fe, Mg)Cr ₂ O ₄ , тридимит SiO ₂
Силикаты	Оливин (Mg, Fe)[SiO ₄], К–Na-полевой шпат (K, Na)[AlSi ₃ O ₈]
Фосфаты	Панетит Ca(Mg, Fe)(PO ₄)
Алюмосиликатное стекло (Si _{0.81} Al _{0.85} K _{0.24} Fe _{0.06} Na _{0.05} Mg _{0.04} Ba _{0.005})O _{2.44}	

* Величина x в формуле маккинавита варьирует в пределах 0.06–0.21, в среднем составляет 0.14.

Самым распространенным минералом в метеорите Брагин является оливин. Визуально он слагает примерно 50% площади пластинки метеорита Брагин (рис. 1). Вторым по распространенности является никелистое железо, которое слагает примерно 45% площади пластинки, причем по данным микрозондового анализа на камасит приходится около 35%, а на тэнит – 10%. Третьим по распространенности в метеорите является хромит (1%), затем следуют графит (0.8%), когенит (0.8%), маккинавит (0.7%), вюстит (0.5%). Далее по уменьшению встречаемости располагаются силикатное стекло (0.25%), лавренсит (0.25%). Замыкают список минералы, обнаруженные в единичных анализах: тридимит, К–Na-полевой шпат, хаксонит, хизлевудит, альдгамит, панетит, которые в сумме составляют 0.75%. Приведенные выше данные показывают, что главными минералами метеорита Брагин являются оливин и никелистое железо. Это в совокупности с отсутствием пироксенов и ничтожным количеством полевого шпата в метеорите Брагин позволяет отнести его к классу палласитов.

Относительно происхождения палласитов среди исследователей нет единого мнения [2]. Более обоснованной, по мнению авторов работы [3], является гипотеза, согласно которой палласиты были образованы в результате плавления и дифференциации первичного космического вещества в недрах родительских тел при формировании в них ядра и мантии. Однако, изучив палласит Омолон, авторы этой работы пришли к выводу, что он образовался как ударно-брекчированная смесь материала металлического ядра астероида с оливином его мантии хондритового состава [3].

Оливин в метеорите Брагин подвергается метасоматическому преобразованию. Об этом четко свидетельствует развитие выделений графита размером до 70 × 140 мкм в оливине (рис. 2, 3).

Форма выделения графита неправильная с многочисленными прямолинейными ограничениями, свидетельствующими о проникновении графитообразующего флюида по трещинкам, микротрещинкам и кристаллографически ориентированным ослабленным зонам. Высокая температура плавления графита (3550 °С) исключает его образование из расплава. Его образование следует связывать с проникновением газового флюида состава CO, CO₂. Из диаграммы,

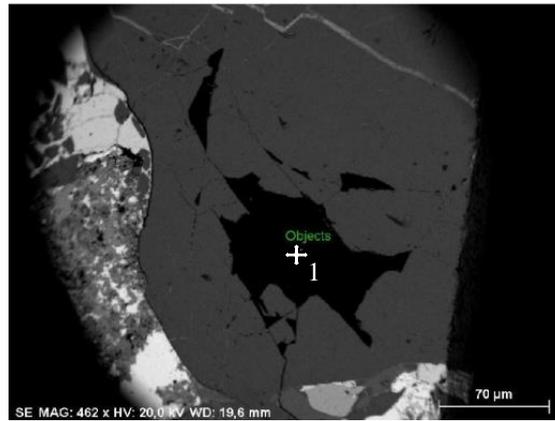


Рис. 2. Метасоматические включения графита (черное, анализ 1 в табл. 1) в оливине (серое)

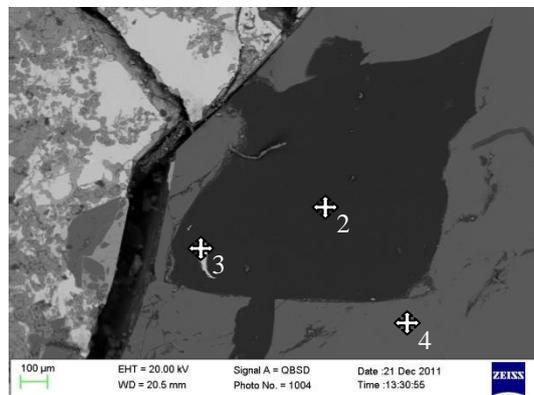


Рис. 3 Метасоматические включения графита (темно-серое, анализ 2) в оливине (серое, анализ 4). Графит содержит включение (белое, анализ 3), сложенное скрытокристаллической смесью когенита (73%) и камасита (27%)

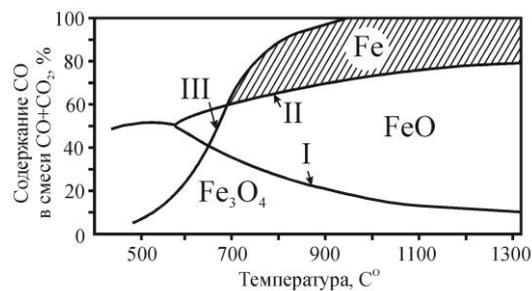


Рис. 4. Диаграмма зависимости равновесного состава системы Fe–C–O от температуры и концентрации газа CO (по данным Б.Ф. Гончарова и И.С. Соломахиной [4]). Реакции: I – $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$; II – $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$; III – $2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$

приведенной на рис. 4, видно, что при повышении содержания CO в смеси CO + CO₂ уже при 600 °C возможно образование графита по следующей реакции:



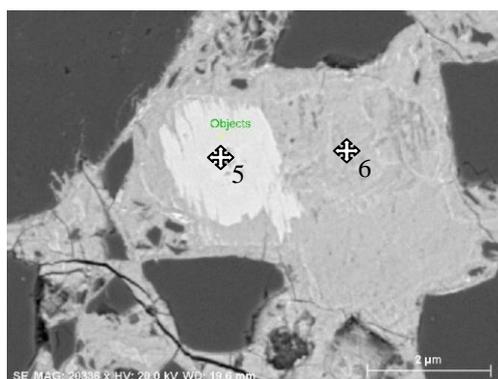
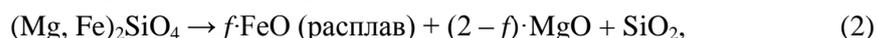


Рис. 5. Сегрегация вюстита (белое, анализ 5) в микрозернистом агрегате вюстит-силикатное стекло (серое, анализ 6). Темно-серое – оливин, замещаемый вюститом и силикатным стеклом

которая с ростом фугитивности f_{CO} (то есть концентрации CO) протекает слева направо с выделением тепла ($\Delta rG = -120$ кДж/моль). Во всех семи проанализированных нами выделениях графита обнаруживается примесь хлора (до 6.5 вес. %). По-видимому, графитообразующий газовый флюид содержал и четыреххлористый углерод CCl_4 . Графит в оливине «съедает» значительный объем минерала-хозяина, то есть оливина. Возникает вопрос, куда делись минералообразующие элементы оливина Mg, Fe, Si. В малых количествах эти элементы иногда отмечаются в анализированных графитах, но основная их масса, очевидно, была вынесена графитообразующим флюидом.

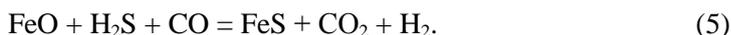
Высокое флюидное давление, по мнению А.А. Маракушева, определило относительно умеренные температуры 1000–1200 °С образования палласитов [5]. Под действием высокой температуры восстановительных флюидов H_2 , CO, H_2S , CO_2 оливин материнского тела подвергался молекулярному распаду вследствие выплавления из него наиболее низкотемпературной молекулярной компоненты FeO. Этот процесс можно представить в виде реакции (2)



где f – коэффициент железистости оливина $Fe/(Mg + Fe)$. Приблизительная оценка изменения энергии Гиббса (ΔrG) этой реакции составляет 56 кДж/моль, то есть она является эндотермической, но тепла, выделяемого в реакции (1), более чем достаточно для протекания реакции (2). Образующийся расплав вюститового состава производил вынос из зоны метасоматоза молекул периклазового MgO и тридимитового SiO_2 составов. Этот процесс разложения оливина наиболее интенсивно протекал вне связи с графитообразованием, а в участках более активной миграции высокотемпературных восстановительных флюидов, когда от зерен оливина часто оставались лишь небольшие реликты (рис. 5).

Возникший вюститовый расплав мог порождать в участках, обогащенных флюидом CO, образование металлического железа и карбида железа по реакциям (3), (4), а в участках, обогащенных флюидом H_2S , мог порождать сульфид железа по реакции (5):





Реакция (3) является экзотермической ($\Delta_r G = -14.53$ кДж/моль), то есть образование металлической фазы палласитов происходит с выделением тепла.

Следует заметить, что оливин всегда содержит изоморфную примесь никеля. Поэтому возникающий вюститовый расплав оказывается также обогащенным никелем. Это приводит к обогащению никелем формирующихся по реакциям (3), (4) металлического железа и карбида железа, и в итоге образуются соответственно камасит, тэнит (Fe, Ni) и когенит (Fe, Ni)₃C. Подтверждение справедливости реакций (1)–(4) может служить рис. 3, на котором видно, что метасоматически образованный в оливине графит содержит мелкое (1×5 мкм) включение неправильной формы, сложенное скрытокристаллической смесью 73% когенита (Fe_{2.82}Ni_{0.18})₃C и 27% камасита (Fe_{0.93}Ni_{0.07}) и образованное из остаточных порций расплава, возникшего в процессе графитизации (по оливину) и последующего его преобразования по реакциям (3), (4).

Для палласитов вообще, а для метеорита Брагин, в частности весьма характерна петельчато-порфировидная структура (рис. 1), образованная крупными (до 10 мм) кристаллами оливина, окруженными металлической фазой, сложенной в основном никелистым железом (камаситом, тэнитом). Эта металлическая фаза образует петельчатый рисунок структуры метеорита и знаменует собой сильновосстановительную среду, отвечающую геохимическому буферу – самородное железо – вюстит. По-видимому, эта среда создается более активной миграцией глубинных восстановительных флюидов H₂, CO, H₂S вследствие более высокой флюидной проницаемости участков петельчатой структуры метеорита. Участки метеорита, сложенные порфировидными кристаллами оливина, знаменуют собой слабоокислительную среду, отвечающую устойчивости фаялита геохимического буфера кварц – фаялит – магнетит, активность кислорода в котором в тысячи раз выше, чем у буфера самородное железо – вюстит (рис. 6). Поэтому в палласитах должна проявляться локальная окислительно-восстановительная зональность. В направлении от порфировидных кристаллов оливина к участкам петельчатой структуры происходит уменьшение окислительного потенциала и увеличение восстановительного потенциала среды, что является следствием разной проницаемости этих участков для глубинных восстановительных флюидов.

Уже в приконтактных участках порфировидных оливинов среда становится восстановительной, и здесь часто развивается сульфид железа маккинавит FeS_{1-x} (рис. 7). Между зоной сульфидов и оливином нередко образуется хромит, относящийся, как и магнетит, к группе шпинелидов. Наиболее восстановительной среда становится поодаль от крупных кристаллов оливина в участках петельчатой структуры, здесь широкое развитие имеют камасит, тэнит, когенит. Эту зональность можно видеть на рис. 7. В этих петельчатых участках оливин становится неустойчивым по окислительно-восстановительному потенциалу и разлагается (рис. 5) с образованием расплава FeO и молекул MgO, SiO₂. Последние выносятся вюститовым расплавом из зон петельчатой структуры в направлении крупных порфировидных кристаллов оливина, обеспечивая их дальнейший рост. Этим можно объяснить образование петельчато-порфировидной структуры палласитов.

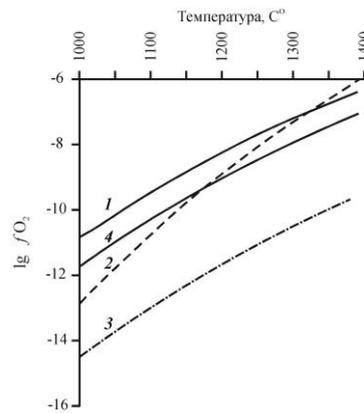


Рис. 6. Положение линий буферных равновесий в координатах $fO_2 - T, ^\circ C$ (из работы [6]). Линии буферов: 1 – $SiO_2-Fe_2SiO_4-FeFe_2O_4$ (QFM); 2 – $FeO-FeFe_2O_4$ (WM); 3 – $Fe-FeO$ (IW); 4 – $C-CO$

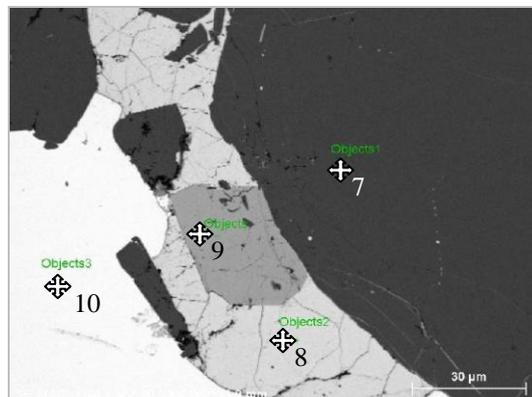


Рис. 7. Зональное расположение минералов оливин $(Mg, Fe)_2SiO_4$ (темно-серое, анализ 7) – хромит $(Fe, Mg)Cr_2O_4$ (серое, анализ 9) – маккинавит FeS_{1-x} (светло-серое, анализ 8) – (когенит + камасит) (белое, анализ 10) свидетельствует о смене слабоокислительной среды (оливин) на сильновосстановительную среду (камасит)

В палласитах отсутствуют пироксены. Не обнаружены они нами и в метеорите Брагин. Их исчезновение можно объяснить молекулярным распадом, подобным рассмотренным выше на примере оливина (см. уравнение (2)), под действием высокотемпературных, восстановительных газовых флюидов H_2 , CO , H_2S , CO_2 с образованием вюститового расплава, который обеспечивал все транспортные перемещения минералообразующих молекулярных компонент FeO , MgO , SiO_2 , Cr_2O_3 и др., возникающих при метасоматическом разложении пироксенов и оливина. В участках наиболее интенсивного разложения этих минералов сначала возникает скрытозернистая кашеобразная смесь вюстита и силикатного стекла сложного состава (рис. 5). По мере дифференциации этой смеси в ней обособляются участки, сложенные чистым вюститом FeO (рис. 5). Кремний, калий натрий и другие элементы этой смеси выносятся вюститовым расплавом и идут на образование тридимита (рис. 8), полевого шпата (рис. 9), а молекулярные компоненты FeO , MgO , SiO_2 , Cr_2O_3 и др. уходят на образование порфирированных кристаллов оливина и хромита $(Mg, Fe) Cr_2O_4$.

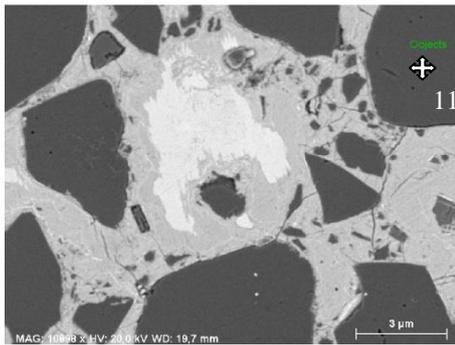


Рис. 8. Тримит (темно-серое, справа в верхнем углу, анализ 11) в окружении скрытозернистого агрегата вюстит – силикатное стекло (серое, анализ 6)

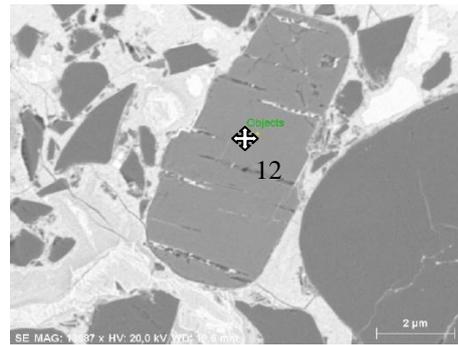


Рис. 9. Полевой шпат (серое, анализ 12) в окружении скрытозернистого агрегата вюстит – силикатное стекло

Через крупный кристалл оливина размером 5×6 мм (рис. 10) по геохимическому профилю от центра к краю было выполнено 10 микрозондовых анализов, вычислена величина железистости оливина (f) в каждой из этих десяти точек и по ним построен график изменения железистости оливина от центра к краю кристалла (рис. 11). Флуктуации величины железистости оливина, наблюдаемые на рис. 11, нельзя объяснить ошибкой эксперимента, так как вычисленная нами величина ошибки составляет ± 0.046 , а величина флуктуации превосходит ее в несколько раз. Поэтому можно считать, что в процессе роста данного кристалла оливина происходили изменения железистости среды, по-видимому, вследствие стадийного поступления глубинных восстановительных флюидов H_2 , CO , H_2S , CO_2 , которые косвенно вызывали увеличение железистости среды (расплава) в соответствии с реакцией (2). Каждый новый импульс прихода новой порции высокотемпературного восстановительного газового флюида сопровождался усилением процессов молекулярного разложения более низкотемпературных магнезиально-железистых силикатов и повышением концентрации (и активности) образующегося при этом расплава FeO , который, очевидно, и обеспечивал транспортировку питательных компонентов к граням растущего кристалла оливина. Поэтому каждый новый флюидный импульс сопровождался увеличением железистости нарастающих зон кристалла оливина. На рис. 11 проявляются не менее трех импульсов глубинной флюидной активности, отвечающих анализам 2, 5–6, 8.

Поступление глубинных высокотемпературных восстановительных флюидов, очевидно, происходило стадийно в периоды повышения тектонической активности, которая могла инициироваться ударными столкновениями планетезималей и процессами дифференциации вещества в их недрах. Ударные столкновения подтверждаются наличием в кристаллах оливина метеорита Брагин трещин, по которым развивается не только графит, но и образовавшиеся из расплавов камасит, тэнит, когенит (рис. 12), маккинавит (рис. 13), хизлеудит (рис. 14), вюстит, хаксонит (рис. 15).

По данным средних химических составов метеоритов различных классов, приведенных в работе [5], нами были вычислены коэффициенты силикатной железистости обыкновенных хондритов, углистых хондритов трех петрологических

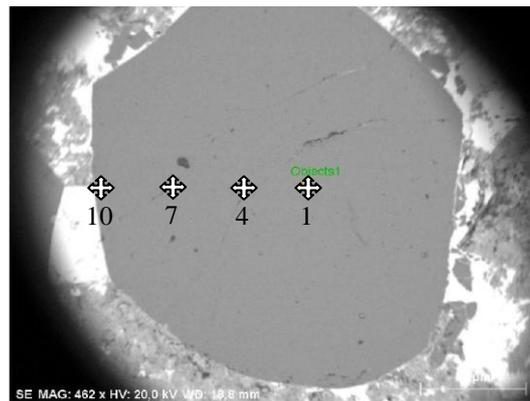


Рис. 10. Кристалл оливина

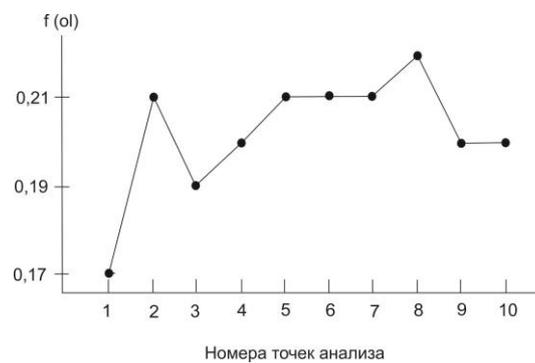
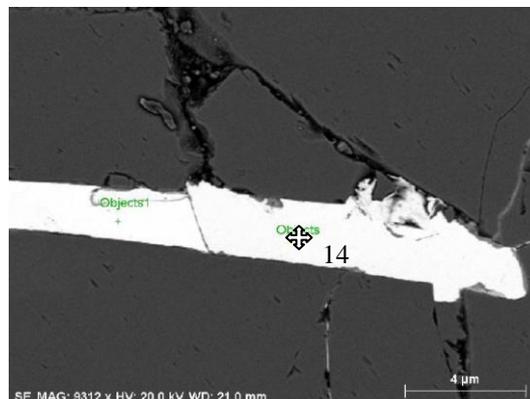
Рис. 11. График изменения железистости кристалла оливина $f(OI)$, показанного на рис. 10 по профилю от центра (точки 1,2,...) к краю кристалла (точки ...9,10)

Рис. 12. Прожилок, сложенный скрыто-кристаллической смесью когенита (64%) и камасита (36%) (анализ 14) в оливине

типов и палласитов (табл. 4). Из данных таблицы следует, что главным отличием химизма палласитов от хондритов является уменьшение величины силикатной железистости палласитов относительно углистых хондритов в 1.6–2 раза, относительно обыкновенных хондритов в 1.3 раза и увеличение содержания металлического железа. Это подтверждается и встречающимися трендами изменения силикатной железистости и содержания металлического железа в метеоритах (рис. 16).

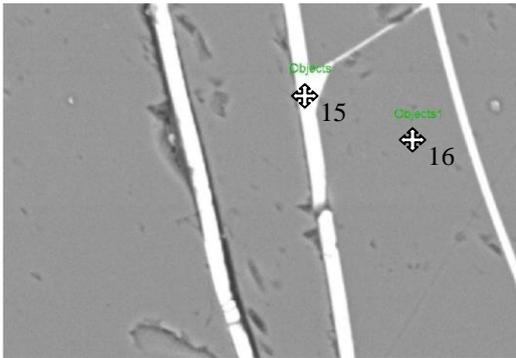


Рис. 13. Прожилки маккинавита (анализ 15) по трещинам в оливине (анализ 16)

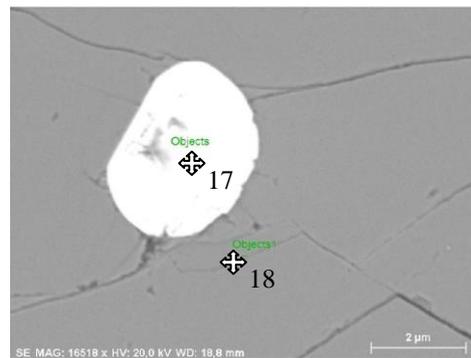


Рис. 14. Включение, сложенное скрытозернистой смесью маккинавита (64%) и хизлевудита (36%) (анализ 17) в оливине (анализ 18)

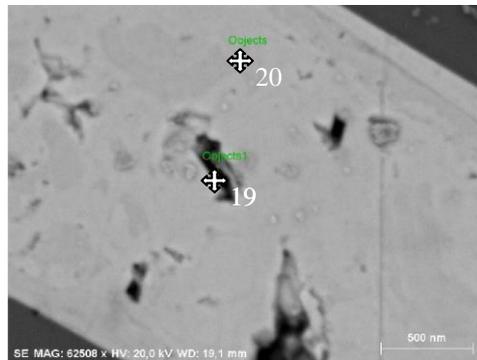


Рис. 15. Включение хаксонита (черное, анализ 19) в вюститовой прожилке (серое, анализ 20) в оливине (темно-серое)

Известно, что химизм углистых хондритов наиболее близок к химизму вещества Солнечной системы. Поэтому вещество планетезималей и планет земной группы обычно рассматривают как преобразованное (процессами дифференциации) вещество углистых хондритов. С этих позиций и вещество палласитов можно рассматривать как преобразованное вещество углистых хондритов. Ведущим процессом этого преобразования, как показывают изложенные выше материалы настоящей работы, можно считать флюидно-метасоматическую дифференциацию. Глубинные флюиды, обособляющиеся, возможно, бародиффузионным путем в недрах планетезималей и продвигающиеся вверх вследствие гравитационной неустойчивости, активизируются в периоды столкновения планетезималей. Они приносят глубинное тепло, которое вызывает молекулярный распад более низкотемпературных силикатов (пироксенов, полевых шпатов), образование расплава FeO, который производит перекристаллизацию оливина с исчезновением более мелких его зерен в участках сильновосстановительной среды (в зонах буфера IW) и увеличением размеров более крупных его кристаллов в участках менее восстановительной среды, примыкающей к буферу QFM. При этом оливин уменьшает свою железистость за счет сброса части своего железа в расплав FeO. Это подтверждается уменьшением силикатной железистости палласитов в сравнении с хондритами (табл. 4). Высвобождаемое силикатное

Табл. 4

Среднее содержание FeO, Fe_{мет} (вес. %) в метеоритах разных классов и отвечающие им коэффициенты силикатной железистости (*f*)

Класс метеоритов	MgO	FeO	<i>f</i>	Fe _{мет}
1. Обыкновенные хондриты	23.99	11.98	0.33	11.68
2. Углистые хондриты (C1)	21.59	14.32	0.40	0.15
3. Углистые хондриты (C2)	23.02	24.31	0.51	–
4. Углистые хондриты (C3)	24.21	24.68	0.50	2.37
5. Палласиты	19.87	6.65	0.25	48.98

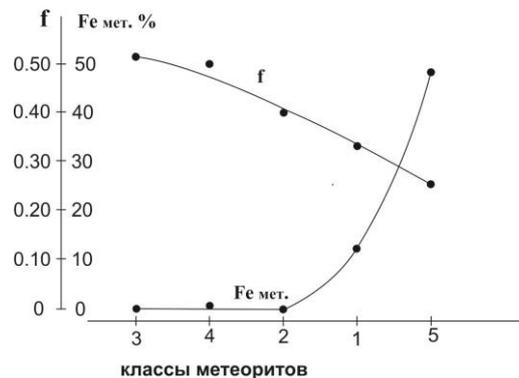


Рис. 16. Графики изменения силикатной железистости (*f*) и содержания металлического железа (Fe_{мет.}) в метеоритах разных классов, отмеченных цифрами в табл. 4

железо порождает расплав FeO, который взаимодействуя с газовой фазой CO, H₂S глубинных флюидов, а также с молекулярными компонентами FeO, MgO, Cr₂O₃ и др. приводит к образованию камасита, тэнита, когенита, маккинавита, вюститита и других характерных минералов палласитов. В итоге образуется агрегат с петельчато-порфирированной структурой, петельчатая часть которого сложена в основном никелистым железом, а порфирированная часть представлена укрупненными (до 10 мм) кристаллами оливина в окружении никелистого железа. Излишки расплава FeO вследствие большого удельного веса, видимо, просачивались в недра планетезимали, где могли расходоваться на образование железного ядра. Так можно объяснить генезис метеорита Брагин.

Заключение

В составе метеорита Брагин выявлено 15 минералов и алюмосиликатное стекло сложного состава. Главные минералы оливин и никелистое железо (камасит, тэнит) находятся примерно в равных количествах и в сумме составляют около 95% объема метеорита. Акцессорными примесями являются хромит, графит, когенит, маккинавит, вюстит, лавренит, тридимит, K–Na-полевой шпат, хэксонит, хизлеводит, альдгамит, панетит. Метеорит имеет петельчато-порфирированную структуру. Участки петельчатой структуры сложены в основном никелистым железом, а участки порфирированной структуры – крупными кристаллами оливина. Состав и структура метеорита Брагин позволяет относить его к классу палласитов.

Металлическая фаза, слагающая участки петельчатой структуры, знаменует собой сильновосстановительную среду, отвечающую геохимическому буферу –

IV. Эта среда создавалась более активной миграцией глубинных восстановленных флюидов H_2 , CO , H_2S . Участки метеорита, сложенные порфиридовидными кристаллами оливина, знаменуют собой менее восстановительную среду, примыкающую к геохимическому буферу QFM. В палласитах создается локальная окислительно-восстановительная зональность вследствие разной проницаемости этих участков для глубинных восстановительных флюидов. В наиболее проницаемых участках петельчатой структуры широко развиваются камасит, тэнит, когенит, а оливин здесь оказывается неустойчивым по окислительно-восстановительному потенциалу и разлагается с образованием расплава FeO и молекул MgO , SiO_2 . Последние выносятся вюститовым расплавом в направлении крупных порфиридовидных кристаллов оливина, обеспечивая их дальнейший рост и укрупнение. Поэтому формирование состава и строение палласита Брагин мы связываем с флюидно-метасоматическим преобразованием изначально хондритового вещества под действием глубинных восстановительных газовых флюидов H_2 , CO , CO_2 , H_2S и др. Поступление этих флюидов происходило стадийно и инициировалось, по-видимому, ударными столкновениями планетезималей и процессами дифференциации вещества в их недрах.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. Кринов Е.Л. Метеориты. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – 371 с.
2. Buseck P.R. Pallasite meteorites – mineralogy, petrology and geochemistry// *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1977. – V. 41, No 6. – P. 711–740.
3. Лаврентьева З.А., Люль А.Ю., Колесов Г.М. Палласит Омолон: химический состав, минералогия и генетические предпосылки // *Геохимия.* – 2012. – № 1. – С. 38–47.
4. Гончаров Б.Ф., Соломахин И.С. Производство чугуна. – М.: Металлургия, 1965. – 368 с.
5. Маракушев А.А. Петрология. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 309 с.
6. Сокол Э.В., Максимова Н.В., Нигматуллина Е.Н., Френкель А.Э. Природа, химический и фазовый состав энергетических зол челябинских углей. – Новосибирск: Изд-во СО РАН; Филиал «Гео», 2001. – 107 с.

Поступила в редакцию
06.04.17

Бахтин Анатолий Иосифович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и литологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Anatoly.Bakhtin@kpfu.ru

Ескин Алексей Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры минералогии и литологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: eskin.aleksey@gmail.com

Сунгатуллин Рафаэль Харисович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры региональной геологии и полезных ископаемых

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *rafael.sungatullin@kpfu.ru*

Сонин Геннадий Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий монографическим отделом Геологического музея

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *g_sonin@mail.ru*

Петрова Римма Даниловна, главный хранитель Геологического музея

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *Rimma.Petrova@kpfu.ru*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2018, vol. 160, no. 2, pp. 324–338

Peculiarities of the Composition and Genesis of the Brahin Meteorite

A.I. Bakhtin^{*}, *A.A. Eskin*^{**}, *R.Kh. Sungatullin*^{***}, *G.V. Sonin*^{****}, *R.D. Petrova*^{*****}

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: ^{*} *Anatoly.Bakhtin@kpfu.ru*, ^{**} *eskin.aleksey@gmail.com*, ^{***} *rafael.sungatullin@kpfu.ru*,
^{****} *g_sonin@mail.ru*, ^{*****} *Rimma.Petrova@kpfu.ru*

Received April 6, 2017

Abstract

A polished plate of the Brahin meteorite from the collection of the Geological Museum of the Institute of Geology and Petroleum Technologies of Kazan Federal University has been studied with the use of microprobe analysis. The analyses have been recalculated into the end members, based on which the conclusions have been made about the mineralogical composition of the meteorite. We have found 15 minerals and aluminosilicate glass of a complex composition. The structure of the meteorite is cellular porphyry. The cellular part is composed mostly of plessite, the porphyritic part is made of large olivine crystals. The features of mineral precipitates and their spatial distribution have allowed to conclude that the substance of the Brahin meteorite developed as a result of a fluid-metasomatic transformation of the initially chondrite-like substance under the influence of deep restorative fluids of H₂, CO, CO₂, H₂S etc.

Keywords: meteorites, Brahin meteorite, pallasites, mineral composition, pallasite genesis

Acknowledgments. The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

Figure Captions

Fig. 1. Polished plate of the Brahin meteorite.

Fig. 2. Metasomatic inclusions of graphite (black, analysis 1 in Table 1) in olivine (gray).

Fig. 3. Metasomatic inclusions of graphite (dark gray, analysis 2) in olivine (gray, analysis 4). Graphite contains an inclusion (analysis 3) composed of a cryptocrystalline mixture of cohenite (73%) and kamacite (27%).

- Fig. 4. The diagram of the equilibrium composition of the system Fe–C–O in dependence of the temperature and CO content (according to B.F. Goncharov and I.S. Solomakhin [4]). Reactions: I – $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$; II – $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$; III – $2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$.
- Fig. 5. Segregation of wustite (white, analysis 5) in the micrograin aggregate of wustite-silicate glass (gray, analysis 6). Dark gray is olivine replaced by wustite and silicate glass.
- Fig. 6. The position of the lines of the buffer equilibria in the coordinates of $f\text{O}_2 - T, ^\circ\text{C}$ (from the work [6]). Buffer lines: 1 – $\text{SiO}_2\text{--Fe}_2\text{SiO}_4\text{--FeFe}_2\text{O}_4$ (QFM); 2 – $\text{FeO--FeFe}_2\text{O}_4$ (WM); 3 – Fe--FeO (IW); 4 – C--CO .
- Fig. 7. Zonal position of minerals: olivine ($\text{Mg, Fe}_2\text{SiO}_4$ (dark gray, analysis 7) – chromite ($\text{Fe, MgCr}_2\text{O}_4$ (gray, analysis 9) – mackinawite FeS_{1-x} (light gray, analysis 8) – (cohenite + kamacite) (white, analysis 10) indicates a change of the weakly oxidizing medium (olivine) into the strongly deoxidizing medium (kamacite).
- Fig. 8. Tridymite (dark gray, on the right in the upper corner, analysis 11) surrounded by the cryptomerous aggregate of wustite-silicate glass (gray, analysis 6).
- Fig. 9. Feldspar (gray, analysis 12) surrounded by the cryptomerous aggregate of wustite-silicate glass.
- Fig. 10. The olivine crystal.
- Fig. 11. The graph showing changes in the ferruginosity of the olivine crystal $f(\text{Ol})$ shown in Fig. 10 in the profile from the center (points 1, 2, ...) to the edge of the crystal (points ...9, 10).
- Fig. 12. A vein composed of a cryptocrystalline mixture of cohenite (64%) and kamacite (36%) (analysis 14) in olivine.
- Fig. 13. Mackinawite veins (analysis 15) in the olivine cracks (analysis 16).
- Fig. 14. An inclusion made of the cryptomerous mixture of mackinawite (64%) and heazlewoodite (36%) (analysis 17) in olivine (analysis 18).
- Fig. 15. An inclusion of haxonite (black, analysis 19) in the wustite veins (gray, analysis 20) in olivine (dark gray).
- Fig. 16. The graphs showing changes in the silicate ferruginosity (f) and the content of metallic iron (Fe_{met}) in meteorites of different classes marked with numbers in Table 4.

References

1. Krinov E.L. *Meteority* [Meteorites]. Moscow, Leningrad, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1948. 371 p. (In Russian)
2. Buseck P.R. Pallasite meteorites – mineralogy, petrology and geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1977, vol. 41, no. 6, pp. 711–740.
3. Lavrent'eva Z.A., Lyul' A.Yu., Kolesov G.M. Omolon pallasite: Chemical composition, mineralogy, and genetic background. *Geokhimiya*, 2012, no. 1, pp. 38–47. (In Russian)
4. Goncharov B.F., Solomakhin I.S. *Proizvodstvo chuguna* [Cast Iron Production]. Moscow, Metallurgiya, 1965. 368 p. (In Russian)
5. Marakushev A.A. *Petrologiya* [Petrology]. Moscow, Izd. Mosk. Univ., 1988. 309 p. (In Russian)
6. Sokol E.V., Maksimova N.V., Nigmatullina E.N., Frankel A.E. *Priroda, khimicheskii i fazovyi sostav energeticheskikh zol chelyabinskikh uglei* [Nature, Chemical and Phase Composition of Energy Ashes of Chelyabinsk Coals]. Novosibirsk, Izd. Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, Fil. "Geo", 2001. 107 p. (In Russian)

Для цитирования: Бахтин А.И., Ескин А.А., Сунгатуллин Р.Х., Сонин Г.В., Петрова Р.Д. Особенности состава и генезиса метеорита Брагин // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 2. – С. 324–338.

For citation: Bakhtin A.I., Eskin A.A., Sungatullin R.Kh., Sonin G.V., Petrova R.D. Peculiarities of the composition and genesis of the Brahin meteorite. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 2, pp. 324–338. (In Russian)