

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛА В ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТАХ ГРУППЫ ПЕ И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ АНАЛОГИ

© 2019 г. С. Н. Теплякова^{а,*}, К. А. Лоренц^{а,**}

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19
e-mail: *elga.meteorite@gmail.com; ** c-lorenz@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.12.2018 г.

После доработки 05.02.2019 г.

Принята к публикации 12.02.2019 г.

Металл метеоритов группы ПЕ несет свидетельства фракционирования в недрах астероида, однако наличие мелкозернистой структуры несовместимо с его эндогенным происхождением. Было предположено, что металл подвергся повторному плавлению на поверхности родительского тела. Данные о минералогии, минеральном и химическом составе железных метеоритов группы ПЕ (Эльга, Верхнеднепровск, Тобычан, Miles и Watson) указывают на то, что относительно мелкозернистая структура металла и ксеноморфные зерна шрейберзита, вероятно, образовались путем кристаллизации из расплава. Согласно расчетным данным по валовому составу металла метеорита Эльга и фазовым диаграммам Fe-Ni-P, кристаллизация первых зерен γ -Fe началась при температуре $\sim 1511^\circ\text{C}$ и завершилась при температуре ~ 1060 – 1100°C с образованием полигональных кристаллов никелистого железа сантиметрового размера и ксеноморфных агрегатов шрейберзита вдоль их границ. Одинаковый состав ксеноморфного шрейберзита как вдоль границ зерен тэнита, так и на каймах вокруг неметаллических включений указывает на их одновременное формирование. Среди четырех генераций шрейберзита ксеноморфный шрейберзит отличается более железистым составом. Также отмечено, что чем выше температура кристаллизации шрейберзита, тем меньше никеля содержится в нем. Подобные структуры металла обнаруживаются и в других типах метеоритов: железных группы IAB, в некоторых металлических нодулях мезосидеритов и аномально богатых металлом мезосидеритах, для которых импактный механизм образования считается наиболее вероятным. Таким образом, механизм образования метеоритов группы ПЕ путем ударного переплавления фракционированного металла и смешения с силикатными фрагментами в условиях поверхности родительского, возможно, имеет аналоги среди метеоритов других типов.

Ключевые слова: железный метеорит, группа ПЕ, Эльга, шрейберзит

DOI: 10.31857/S0016-7525648826-836

ВВЕДЕНИЕ

Железные метеориты группы ПЕ были выделены Скоттом и Вассоном (Scott, Wasson, 1976). Независимо от наличия силикатных включений и их состава, железные метеориты ПЕ имеют сходный химический состав металла ($\text{Ni} - 8.27 \pm 0.54$ мас. %, $\text{Ga} - 23.9 \pm 3.04$ мкг/г, $\text{Ge} - 88.3 \pm 78.0$ мкг/г, $\text{Ir} - 5.02 \pm 1.6$ мкг/г; Wasson, 2017). Для метеоритов группы ПЕ также характерны небольшие вариации содержания Ir (\sim в 7 раз; Wasson, 2017) по сравнению с метеоритами магматических групп, в которых концентрации Ir меняются в широких пределах и различаются в 6000 раз в пределах группы. Так, например, метеориты группы ПАВ содержат от 0.01 до 60 мкг/г Ir. Кроме того, в металле метеоритов группы ПЕ обнаружены вариации изотопного состава Ge, объясняемые испарением с потерей

легких изотопов Ge и Ga на поверхности тела, вероятно, вследствие ударного события (Luisi, 2007). На основании этих фактов некоторые исследователи пришли к заключению о том, что металл метеоритов группы ПЕ был образован «немагматическим» путем, то есть кристаллизовался не в ядрах астероидов при фракционной кристаллизации расплава, а на поверхности в виде небольших металлических бассейнов расплава при ударном событии (Scott, Wasson, 1976; Wasson, Wang, 1986; Ebihara et al., 1997; Wasson, 2017). В пользу такой интерпретации свидетельствует мелкозернистая структура металла метеоритов группы ПЕ, так как размер родительских кристаллов γ -железа (от 1–11 см, табл. 1) невелик по сравнению с метровыми кристаллами в метеоритах IIIAB (до 2 м) (Wasson, 2017). Присутствие в метеоритах группы ПЕ силикатных

Таблица 1. Структурные и химические характеристики метеоритов группы ПЕ

Название метеорита	Структурная классификация; размер родительского (γ) кристалла	Ширина балок (кал), мм	Каймы шрейберзита на включениях	Области локального плавления	Силикат, об. %	Шрейберзит, об. %	Троилит, об. %	Ni, мас. %	P, мас. %	Ссылки
Arlington	Om; $\gamma=2-3$ см	0.8	-	-	-	-	-	8.42	-	5; 10
Barranca Blanca	An; $\gamma=2-5$ мм	2	-	-	-	1	3	8.07	-	2; 5
Colomera	Om; $\gamma=10$ см	0.7	-	-	3	2	1	7.16	-	2; 5; 10
Elephant Moraine 83390	An-Om	1.1	-	-	-	1	-	8.3	-	5
Garhi Yasin	Om	1.05	-	-	1-2	3	3	8.3	0.15	5
Kavarpura	Of	-	-	-	-	-	-	-	-	5
Kodaikanal	Off	0.05	+	-	15	2	3	8.42	-	4
Leshan	Of реликты	0.5	-	-	-	-	-	9.5	-	5
Miles	Of; $\gamma=2$ см	2	+	-	10-20	1	1	7.96	-	7; 10; 14
Нечаево	Om реликты	1.35	-	+	25	3	3	8.29	0.15	9
NWA 5608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
NWA 6716	An; $\gamma=2$ мм	-	-	-	-	2	3	-	-	5
Robert Massif 04186	An; $\gamma=3$ мм	-	-	-	-	-	-	-	-	5
Tarahumara	$\gamma=5$ см	0.1	-	-	-	-	-	7.91	-	5; 10
Taylor Glacier 05181	-	0.8	-	-	2	-	3	-	-	5; 10
Techado	Om	0.6	-	-	2	-	1	8.9	-	5; 10
Тобычан	Og; $\gamma=1$ см	2.45	+	-	-	2.4	0.06	7.71	0.3	12; 14
Watson 001	Off; $\gamma=6$ см	0.07	+	+	3	2.1	3	8.2	0.5	6; 14
Weekeroo Station	An; $\gamma=2-4$ см	2.5	-	-	3.77	0.5	3	7.5	-	2; 8
Yamato 791093	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
Верхнеднепровск	Off; $\gamma=2$ см	0.05	+	+	-	2	1	8.78	-	1; 2; 3
Эльга	Off; $\gamma=1$ см	0.05	+	+	18	-	-	8.38	0.47	11; 13; 14

Ссылки: 1 – Bevan, 1979; 2 – Buchwald, 1975; 3 – Buchwald, 1987; 4 – Kurat et al., 2007; 5 – Meteoritical Bull. (<http://www.lpi.usra.edu/meteor/>); 6 – Olsen et al., 1994; 7 – Ruzicka, Hutson, 2010; 8 – Ruzicka et al., 1999; 9 – Van Roosbroek et al., 2017; 10 – Wasson, 2017; 11 – Дьяконова и др., 1979; 12 – Иванова и др., 1976; 13 – Теплякова и др., 2018; 14 – в наст. работе. Условные обозначения: An – аномальная структура, Ogg – весьма грубоструктурный октаэдрит, Og – грубоструктурный октаэдрит, Om – среднеструктурный октаэдрит, Of – тонкоструктурный октаэдрит, Off – весьма тонкоструктурный октаэдрит, γ – родительский кристалл гэнита.

включений, иногда риолитового состава, также сложно объяснить формированием в эндогенных условиях астероидов. Однако распределение тугоплавких сидерофильных элементов в металле ПЕ указывает на их образование в результате магматического фракционирования в ядре родительского тела (Terpyakova et al., 2012). Это явилось основанием предположить, что повторное переплавление металла эндогенного происхождения могло происходить на поверхности родительского тела при ударных событиях (Теплякова и др., 2018).

В настоящей работе реконструирована последовательность кристаллизации метеоритов группы ПЕ на основании детального анализа их структуры, валового состава и химического состава минералов и показано, что метеориты ПЕ аналогичны по структуре железным и богатым металлом метеоритам, имеющим ударное происхождение, что подтверждает выстроенный ранее сценарий их образования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на основе изучения 8 аншлифов метеорита Эльга и 7 аншлифов метеоритов группы ПЕ: Верхнеднепровск, Тобычан, Miles и Watson, общей площадью 30.5 см². Для изучения структуры металла образцы были подготовлены по стандартной схеме для металлографического изучения: отшлифованы, отполированы и протравлены ниталом (5% раствор азотной кислоты в спирте) при экспозиции от 10 до 100 сек. Предварительное исследование образцов железных метеоритов группы ПЕ было проведено методом оптической микроскопии в проходящем и отраженном свете на микроскопе Leica DMRX, оснащенный цифровой видеокамерой Leica DFC 320, в лаборатории метеоритики ГЕОХИ РАН.

Химический состав минералов силикатных включений и вмещающего металла определялся методом электронно-зондового микроанализа (ГЕОХИ РАН) на приборе Cameca SX 100 (ГЕОХИ РАН), при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда 30 нА, диаметр зонда 1 мкм, с использованием РАР-коррекции. Предел обнаружения для минералообразующих элементов — 0.02 мас.%. При анализе металла и фосфида в качестве стандартов использовались синтетические — NiO, CoO и природные стандарты — шрейберзит и троилит из железного метеорита Сихотэ-Алинь.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Подобно большинству железных метеоритов, метеорит Эльга состоит из никелистого железа — агрегата камасита (α -Fe) и тэнита (γ -Fe). Второстепенные минералы — шрейберзит и троилит. Метеорит Эльга имеет поликристаллическую структуру, образованную полигональными зернами размером ~1 см (рис. 1а). Каждое индивидуальное зерно имеет внутреннюю октаэ-

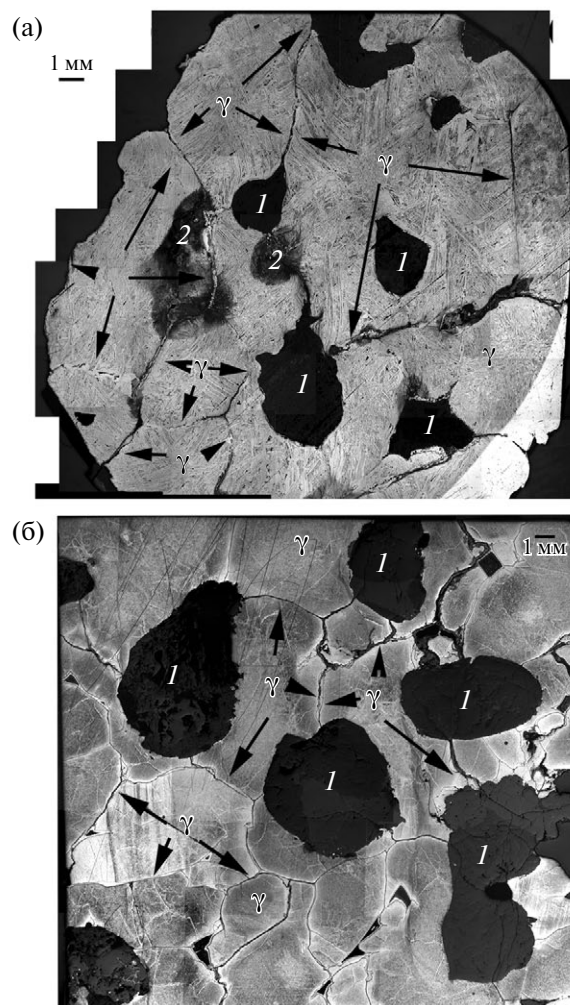


Рис. 1. (а) Панорама аншлифа образца метеорита Эльга (оптическое изображение, отраженный свет). На протравленной ниталом полированной поверхности образца видны реликтовые границы зерен исходных кристаллов γ -железа, стрелками показаны их границы. К стыкам границ зерен металла приурочены округлые силикатные включения (1). Внутренняя октаэдритовая структура металлических зерен местами искажена областями локального плавления, состоящими из фосфида и металла (2); (б) панорама аншлифа метеорита Miles (оптическое изображение, отраженный свет). Стрелками показаны некоторые границы родительских кристаллов γ -железа, между зернами которых наблюдаются силикатные включения (1).

дритовую структуру, образуемую выделениями камасита и шрейберзита в тэните, которые ориентированы по граням октаэдра. На границах кристаллов тэнита располагаются округлые или амебовидные силикатные включения, троилитовые нодули (рис. 2б) и крупные ксеноморфные выделения шрейберзита (рис. 1а, рис. 2а, б). Относительно крупные ксеноморфные выделения

шрейберзита также образуют прерывистые каймы шириной до 100 мкм на границах силикатных и троилитовых включений с вмещающим металлом. Границы шрейберзитовых кайм с силикатными включениями гладкие, с металлом — неровные (рис. 2а). Прожилковидные выделения шрейберзита вдоль границ родительских зерен тэнита имеют ширину от 50 до 300 мкм и протя-

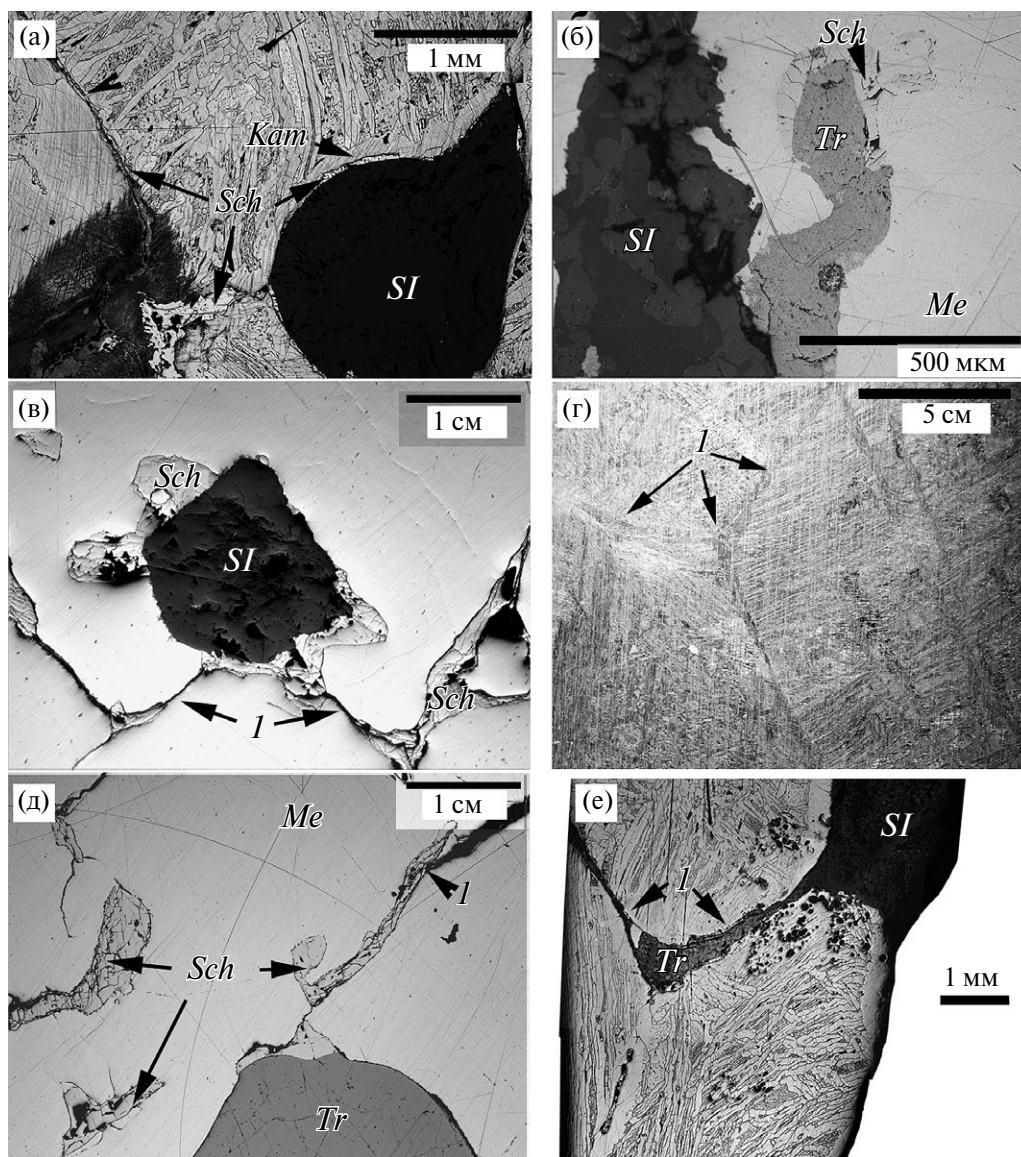


Рис. 2. Первичные структуры метеоритов группы ПЕ — строение родительских кристаллов тэнита (γ -железа) и выделения ксеноморфного шрейберзита на их контактах; (а) каймы шрейберзита (*Sch*), обрамляющие силикатное включение (*SI*) и декорирующие границу включения с вмещающим металлом (*I*). Вмещающий металл имеет частично деформированную видманштеттенову структуру, шрейберзит окаймлен ленточным камаситом (*Kam*) (метеорит Эльга, отраженный свет); (б) троилитовый нодуль в металле на контакте с силикатным включением окружен прерывистой каймой шрейберзита (метеорит Эльга, отраженный свет); (в) вдоль границ зерен (*I*) расположены выделения шрейберзита и силикатное включение (*SI*) (метеорит Miles, отраженный свет); (г) вдоль границ зерен (*I*) встречается ксеноморфный шрейберзит, отороченный лентами камасита (метеорит Watson, отраженный свет); (д) вдоль границ зерен (*I*) расположены зерна ксеноморфного шрейберзита; внизу изображения наблюдается троилитовый нодуль (метеорит Тобычан, отраженный свет); (е) вдоль границ зерен металла (*I*) наблюдается троилит (*Tr*) и силикатные включения (*SI*) (метеорит Watson, отраженный свет).

женность до 1 см (рис. 2а). Так же, как и шрейберзитовые каймы вокруг силикатных включений и троилитовых нодулей, шрейберзитовые прожилки оторочены ленточным камаситом.

Было отмечено четыре генерации шрейберзита, которые отличаются по составу и структуре. Ксеноморфные выделения шрейберзита (1) встречаются на границах зерен металла, а также в виде кайм на силикатных и троилитовых включениях и отличаются пониженным содержанием Ni (16.7 ат. %, табл. 2) по сравнению со шрейберзитами других типов. Шрейберзит (2) в видманштеттеновой структуре образуется вдоль камаситовых балок при распаде твердого раствора (Ni 27 ат.%, табл. 2). Шрейберзит (3) встречается в виде изометричных зерен в рекристаллизованной видманштеттеновой структуре и отличается наиболее высоким содержанием Ni (34 ат.%, табл. 2). Области локального плавления (Теплякова, 2011) состоят из выделений зерен камасита, объединяются в дендритовидные структуры и погружены в шрейберзитовую матрицу. Эта генерация шрейберзита (4) имеет самое низкое содержание Ni (12.5 ат. %, табл. 2) в сравнении с вышеописанными шрейберзитами.

Металл метеорита Тобычан имеет поликристаллическое строение, размер камаситовых зерен до 1 см. Иногда встречаются крупные нодули троилита размером до 3 см. На контактах родительских зерен тэнита наблюдаются ксеноморфные выделения шрейберзита (рис. 2д), аналогичные наблюдаемым в метеорите Эльга.

Для металла метеорита Miles также характерно полиэдрическое строение. Кристаллы камасита имеют форму полигональных зерен размерами до 2 см, в которых наблюдаются нейманновы линии. Силикатные включения, располагающиеся на границах зерен металла, имеют неправильную форму, тогда как силикатные включения, заключенные внутри зерен, — изометричные (рис. 1б). Вдоль границ зерен металла наблюдаются силикатные прожилки и/или ксеноморфный шрейберзит (рис. 2в). Внутри камаситовых зерен наблюдается микрозернистый рабдит. Представления о структуре метеорита Miles, сформировавшиеся на основе микроскопических наблюдений, находятся в полном соответствии с недавними исследованиями метеорита методом трехмерной рентгеновской микротомографии. На полученных трехмерных изображениях (Kirby, 2016) наблюдалась вышеописанная структура агрегата кристаллов размерами до 1 см, на границах которых локализованы силикатные включения и шрейберзит.

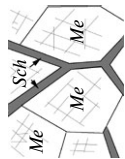
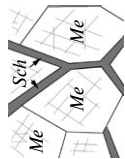
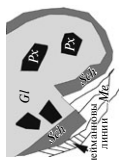
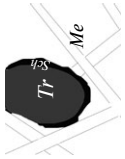
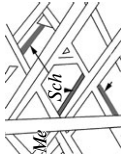

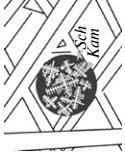
Метеорит Watson сложен крупными полигональными кристаллами тэнита, размерами до 6 см. В межзерновом пространстве наблюдаются выделения троилита (рис. 2г, е) и крупный ксеноморфный шрейберзит с лентами камасита, подобные тем, что наблюдались в металле метеорита Эльга (рис. 1а, 2а). Единственное силикатное включение, оказавшееся на плоскости образца, располагается между кристаллами металла. Форма силикатного включения округлая, границы с металлом — гладкие, на поверхности включения наблюдаются прерывистые каймы шрейберзита и ленточный камасит.

Метеорит Верхнеднепровск представляет собой поликристаллический агрегат реликтовых зерен тэнита размером около 2 см (Buchwald, 1987). Таким образом, структуры метеоритов Тобычан, Miles, Watson и Верхнеднепровск, аналогичны наблюдаемым в металле метеорита Эльга (рис. 1а, б), сравнительный анализ которых выявляет следующие закономерности: поликристаллическое строение металла, относительно небольшой размер зерен родительских кристаллов тэнита (первые см), локализация ксеноморфного шрейберзита, троилита и силикатных включений на границах родительских кристаллов тэнита.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Метеориты группы ПЕ имеют схожие структуры металла, а также выявленные генерации шрейберзита, что указывает на единый механизм их формирования. Небольшой размер (1–6 см) зерен γ -железа указывает на существенно более высокую скорость кристаллизации металла метеорита Эльга и других метеоритов группы ПЕ (Wasson, 2017) в сравнении с метеоритами магматических групп (монокристаллы никелистого железа размером до 1 м). Морфология силикатных включений и их взаимоотношения с зернами тэнита свидетельствуют о том, что изначально они представляли собой частицы силикатного расплава, обособленные от вмещающего металла за счет несмесимости жидкостей. При кристаллизации глобулярные обособления несмесимых силикатной, сульфидной и фосфидной жидкостей должны были сегрегироваться в пространстве между гранями растущих кристаллов γ -железа. На последних стадиях роста кристаллов тэнита их смыкающиеся грани деформировали капли силикатного, фосфидного и сульфидного расплава, в результате чего некоторые включения частично унаследовали кристаллографические черты реликтовых кристаллов

Таблица 2. Средние химические составы главных и второстепенных минералов и их стандартные отклонения (σ) в металле метеорита Эльги

Элемент	Камасит	Тэнит	Троилит	Шрейберзит (1)		Шрейберзит (1)		Шрейберзит (1)		Шрейберзит (2)		Шрейберзит (3)		Шрейберзит (4)	
				Шрейберзит (1)		Шрейберзит (1)		Шрейберзит (1)		Шрейберзит (2)		Шрейберзит (3)		Шрейберзит (4)	
				средние	σ	средние	σ	средние	σ	средние	σ	средние	σ	средние	σ
	в металле разных типов	в металле разных типов	троилитовые нодулы	ксеноморфные выделения зернами металла	кайма на силикатных включениях	кайма на силикатных включениях	кайма на троилитовых нодулах	удлинено-призматические кристаллы шрейберзита в видман-шкеттеновой структуре	изометричные зерна в рекристаллизованной видман-шкеттеновой структуре	глобулы и дендриты в областях локального плавления					
	-	-	-												
	N=303	N=88	N=5	N=5	N=30	N=30	N=2	N=5	N=3	N=4					
Fe	93.3	82.8	63.6	65.7	66.6	66.6	59.7	53.7	46.0	70.0					
P	0.13	0.06	0.08	0.11	0.13	0.13	0.1	0.2	0.2	1.5					
Ni	6.81	17.3	0.08	0.07	19.0	19.0	25.2	31.8	39.5	14.4					
Co	0.55	0.42	0.08	0.05	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.4					
Cr	0.02	0.03	0.15	0.03	-	-	-	-	-	-					
S	0.02	0.02	36.0	0.13	-	-	-	-	-	-					
Сумма	100.9	100.5	100.0	0.17	101.1	101.1	100.2	100.0	100.0	98.9					
ат. % Ni	-	-	-	-	16.6	16.7	21.6	27.6	34.4	12.5					
Формула	$Fe_{0.93}Ni_{0.06}Co_{0.01}$	$Fe_{0.83}Ni_{0.17}$	$Fe_{0.50}S_{0.50}$	$Fe_{2.40}Ni_{0.60}P$	$Fe_{2.10}Ni_{0.90}P$	$Fe_{2.40}Ni_{0.60}P$	$Fe_{2.10}Ni_{0.90}P$	$Fe_{1.9}Ni_{1.1}P$	$Fe_{1.7}Ni_{1.4}P$	$Fe_{2.6}Ni_{0.5}P$					

Примечания. N – количество анализов.

тэнита. Так, отдельные силикатные включения имеют линейные границы с вмещающим металлом, за счет чего они приобретают полигональные очертания. Отдельные порции несмешиваемых расплавов были сдавлены между гранями двух растущих кристаллов тэнита настолько, что сформировались в линейные или дугообразные прожилковидные тела, некоторые из которых соединяют силикатные включения. При более низких температурах в реликтах исходных родительских кристаллов тэнита (γ -железа) произошло твердофазное превращение низконикелевого тэнита в агрегат высоконикелевого тэнита, камасита и шрейберзита с образованием метаморфической октаэдритовой структуры.

Для того чтобы объяснить все наблюдаемые структурные особенности металла метеорита Эльга, мы прибегли к рассмотрению фазовых диаграмм (рис. 3). Из экспериментальной работы (Raghavan, 1988) известно, что кристал-

лизация металлического расплава (валовый состав (мас. %): Fe — 90, Ni — 8.6, P — 1.3, S — 0.1) по составу соответствующего метеориту Эльга (без силикатов) в системе Fe-Ni-P начинается с $\sim 1511^\circ\text{C}$ (рис. 3а). Первым кристаллизуется тэнит, условно обозначенный γ -фазой. По достижении перитектической линии в системе происходит образование α и γ фаз по реакции $\alpha + \text{жидкость} \leftrightarrow \gamma$ (рис. 3а). В точке U (рис. 3а) при 1000°C (Raghavan, 1988) перитектическая реакция $\alpha + \text{жидкость} \leftrightarrow \gamma + \phi$ завершается исчерпанием жидкости и финальной кристаллизацией камасита (α), тэнита (γ) и шрейберзита (ϕ).

При более низких температурах ($1100\text{--}550^\circ\text{C}$) система Fe-Ni-P была изучена серией экспериментов (Doan, Goldstein, 1970). Валовый состав металла метеорита Эльга обозначен на изотермических сечениях в фазовых треугольниках (рис. 3б, в), которые позволяют оценивать составы фаз, находящиеся в равновесии. При температурах $1060\text{--}1100^\circ\text{C}$ теоретические составы γ -фазы близки к составу металла родительских кристаллов тэнита (исходная γ -фаза), а остаточной шрейберзитоподобной жидкости (10.7 мас.% Ni, 12.7 мас.% P) — к составу ксеноморфного железистого шрейберзита (1) в метеорите Эльга. Конноду для металла метеорита Эльга мы провели параллельно конноде, обозначенной на диаграмме, исходя из предположения, что они близки, поскольку состав тэнита и жидкости практически не меняется. Можно предполагать, что при закалке из остаточной шрейберзитоподобной жидкости, обогащенной Ni и P, впоследствии кристаллизуется шрейберзит (1) в межзерновом пространстве металла. При понижении температуры скорость диффузии настолько мала, что дальнейший рост фаз не происходит. Анализ изотермических диаграмм при температурах 1010°C , 1000°C и ниже показывает, что в металле метеорита Эльга таких равновесий $\alpha + \gamma$ не существует.

Чтобы объяснить структурные особенности строения металла метеорита Эльга, а именно наличие ксеноморфного шрейберзита в межзерновом пространстве, мы рассмотрели подобные структуры, полученные экспериментально (Chai et al., 2016). В этом эксперименте эвтектическая кристаллизация α -Fe(Ni, P) и шрейберзита (Fe, Ni)₃P по границам зерен тэнита (рис. 4) была обнаружена при закалке ($950\text{--}1025^\circ\text{C}$) металлического расплава данного состава (73.6 мас. % Fe, 23.7 мас.% Ni, 2.7 мас.% P). Отмечено, что чем выше была температура закалки расплава (от 925

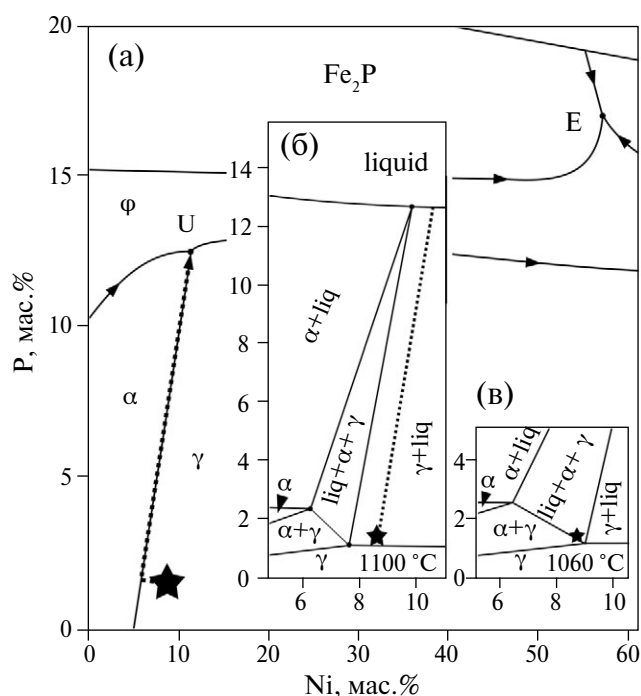


Рис. 3. (а) Ликвидусная поверхность на диаграмме Fe-Ni-P (Raghavan, 1988) и поля первичной кристаллизации фаз. Черной звездой показан валовый состав металла метеорита Эльга (8.6% Ni, 1.3% P), пунктирной стрелкой — возможный путь его кристаллизации на перитектической линии с соответствующей перитектической реакцией $\alpha + \text{жидкость} \leftrightarrow \gamma$. Точка U соответствует перитектической реакции $\alpha + \text{жидкость} \leftrightarrow \gamma + \phi$; (б) и (в) — фазовая диаграмма Fe-Ni-P (Doan, Goldstein, 1970) при различных температурах: (б) 1100°C ; (в) 1060°C . Пунктирной коннодой показаны составы фаз при данных температурах.

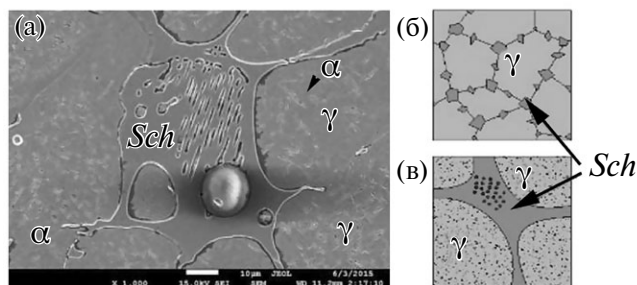


Рис. 4. Структура стали (Fe, 23.7 мас.% Ni, 2.7 мас.% P), закаленная при температуре 1000°C: (а) в микроструктуре стали прослеживается 3 фазы: зерна γ -Fe(Ni, P) с микровостками α -Fe(Ni, P) и $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$ по границам зерен металла (изображение в отраженных электронах); (б, в) схематическое изображение взаимоотношений фаз в стали. Сфера в центре снимка является артефактом.

до 1025°C), тем больше был размер зерна γ -фазы (от 9 до 106 мкм).

Отсюда следует, что рост зерен металла в метеорите Эльга начинается при $\sim 1511^\circ\text{C}$, при этом остаточная жидкость обогащается Ni и P, накапливаясь в межзерновом пространстве. При закалке в диапазоне 1060–1100°C из остаточной шрейберзитоподобной жидкости кристаллизуется шрейберзит, образуя ксеноморфные выделения вдоль границ зерен металла.

Образование крупных ксеноморфных выделений шрейберзита для разных типов железных метеоритов ранее интерпретировалось как результат субсолидусных превращений в металле при температурах выше 850°C (на пр. Clarke, Goldstein, 1978). В работах (Ikeda, Prinz, 1996; Ikeda et al., 1997; Ruzicka, 1999; Ruzicka, Hutson, 2010) предполагается, что каймы шрейберзита на силикатных включениях образуются при восстановлении фосфора из силикатов. Однако основная масса ксеноморфного шрейберзита в Эльге структурно не связана с силикатными включениями. По составу ксеноморфный шрейберзит на границах зерен металла аналогичен шрейберзиту в каймах вокруг силикатных включений и, следовательно, имеет аналогичное происхождение. Очевидно также, что и морфология, и состав ксеноморфного шрейберзита не соответствуют тому ориентированному в видманшеттенной структуре шрейберзиту, который возникает при субсолидусных реакциях. Вероятнее всего, ксеноморфный шрейберзит в метеоритах группы ПЕ кристаллизовался непосредственно из металлического расплава, как было предположено (Buchwald, 1975; Hofmann et al., 2009) по результатам исследования метеоритов Santa Luzia (IIAB) и Twannberg (PIG).

Каждый из четырех генетических типов структур металла в метеорите Эльга определяется взаимосвязью определенных генераций шрейберзита и металла (табл. 2). Чем выше температура кристаллизации шрейберзита, тем меньше никеля содержится в нем (рис. 5) и, соответственно, тем выше его железистость. Шрейберзит (1) — каймы шрейберзита на неметаллических включениях и ксеноморфные зерна вдоль границ металла. Это наиболее железистый по составу шрейберзит, образующийся в результате быстрой неравновесной кристаллизации. Шрейберзит (2) — идиоморфные удлиненно-призматические кристаллы шрейберзита в видманшеттенной структуре металла, кристаллизующиеся при субсолидусных превращениях. Шрейберзит (3) — наиболее никелистый шрейберзит, образующий изометричные кристаллы в рекристаллизованной видманшеттенной структуре металла, что является одним из признаков повторного нагрева метеорита. Шрейберзит (4) в областях локального плавления, несомненно, формируется из расплава при закалке. По составу шрейберзит (4) отличается от составов от других выделений шрейберзитов самыми низкими содержаниями Ni, P и более высокими содержаниями Co (табл. 2), но наиболее близок к составу ксеноморфного шрейберзита (1), что также является подтверждением того, что высокожелезистые шрейберзиты могут формироваться из расплава при быстром охлаждении.

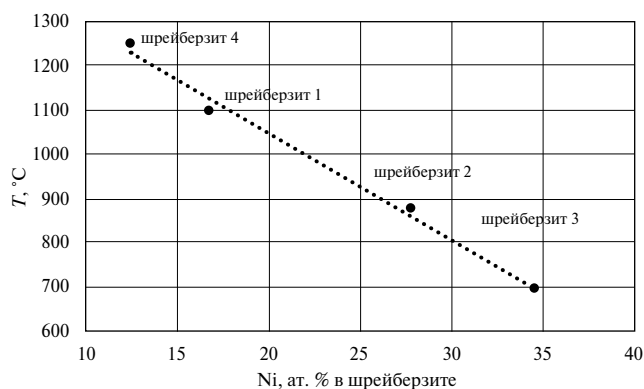


Рис. 5. Зависимость состава шрейберзита от температуры его образования при кристаллизации из расплавов и субсолидусных реакциях. Шрейберзит (1) — каймы на неметаллических включениях и ксеноморфные зерна вдоль границ металла. Шрейберзит (2) — идиоморфные удлиненно-призматические кристаллы шрейберзита в видманшеттенной структуре металла. Шрейберзит (3) — изометричные кристаллы в рекристаллизованной видманшеттенной структуре металла. Шрейберзит (4) — матрица в областях локального плавления.

Аналогичные структуры были обнаружены и в других типах метеоритов группы IAB (например, Copiapo, Linwood, Morasko, NWA 6369 (рис. 6а), Woodbine), в богатом металлом мезосидерите Чаунский (Petaev et al., 1993; Petaev, Jacobsen, 2005), в крупных металлических нодулях мезосидеритов (Hassanzadeh et al., 1990; Lorenz et al., 2001). Железные метеориты группы IAB имеют реликтовую октаэдрическую или, чаще, гранулярную полиэдрическую структуру металла. Поскольку для этого типа метеоритов характерно наличие углерода, плесситовые области представлены сферическим плесситом, перлитом и мартенситом. Силикатные включения приурочены к границам реликтовых (родительских) кристаллов тэнита. Силикатные сантиметровые включения имеют неправильную форму, на отдельных участках форма включений близка к обломочной, иногда встречаются отдельные идиоморфные силикатные зерна в металле. Многие силикатные включения соединены между собой прожилковидными выделениями силикатно-

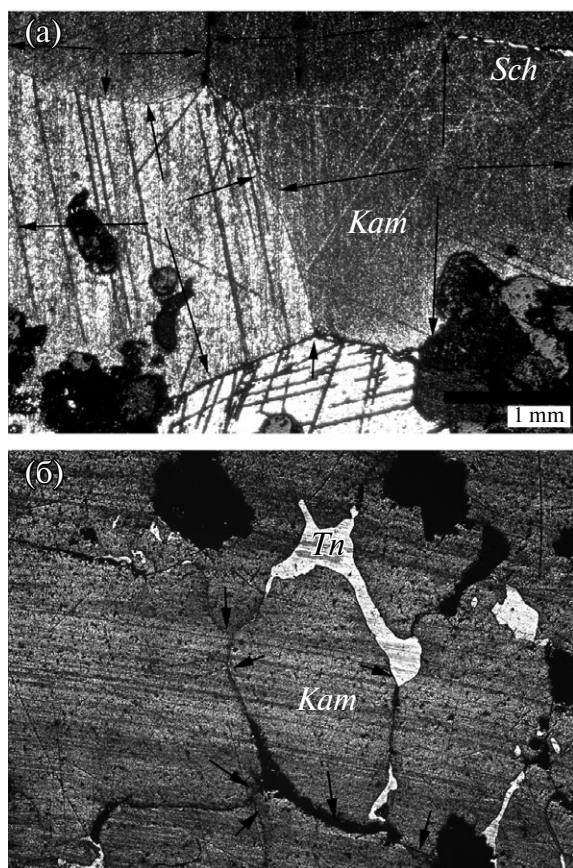


Рис. 6. Мелкозернистая структура металла метеорита группы IAB NWA 6369 (а) и мезосидерита Будулан (б). В этих метеоритах пространство между полиэдрическими кристаллами камасита заполнено тэнитом (Tn) и шрейберзитом (Sch). Стрелками показаны границы родительских кристаллов железа.

го материала, простирающимися вдоль границ родительских кристаллов тэнита, и ассоциирующими с ними выделениями графита, троилита и шрейберзита. Относительно мелкозернистая структура металла так же, как и силикаты, фосфид и троилит, которые приурочены к границам зерен металла, указывают на поверхностное ударно-расплавное происхождение метеоритов.

Что касается мезосидеритов, то некоторые из них содержат крупные металлические объекты (нодулы) с включениями силикатов. Отдельные крупные нодулы ранее считались железными метеоритами группы IIIAB; некоторые мезосидериты также фактически представляют собой очень крупные нодулы с небольшим количеством силикатов (Hassanzadeh et al., 1990; Petaev et al., 1993). Структура низконикелевого металла нодуля Будулан мелкозернистая, размер зерен камасита 1–2 мм, по границам зерен изредка прослеживается тэнит и шрейберзит (рис. 6б). Подобно железным метеоритам групп IAB и IIE, нодулы в мезосидеритах содержат обломочные и полностью расплавленные силикатные включения, иногда соединяемые прожилками вдоль границ кристаллов металла. Так же, как и для метеоритов группы IIE, для мезосидеритов характерна высокая скорость остывания до температур примерно 850°C (Ganguly et al., 1994; Ruzicka et al., 1994). Однако размер зерен в металле мезосидеритов меньше, чем в металле группы IIE, что может указывать на существенно более высокую скорость охлаждения на высокотемпературном участке их термальной истории. Метаморфическая история мезосидеритов была более сложной, чем у метеоритов группы IIE, вероятно, мезосидериты испытывали высокотемпературный отжиг с последующим медленным охлаждением, что привело к рекристаллизации металла в металлических нодулах некоторых мезосидеритов. Подобная рекристаллизация металла приводит к появлению микровидманштеттеновой структуры внутри зерна и/или к выравниванию межзеренных границ до 120° с образованием полиэдрической структуры, схожей со структурой, которая формируется из расплава.

Таким образом, по строению и условиям кристаллизации металл метеорита Эльга соответствует ударным металлическим расплавам, наблюдающимся среди метеоритов других групп и типов, что подтверждает предложенный нами ранее сценарий образования метеоритов группы IIE за счет переплавления фракционированного металла и его смешения с силикатами в резуль-

тате ударного события на поверхности родительского тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общность изученных метеоритов группы ПЕ заключается в том, что для них характерно поликристаллическое, относительно мелкозернистое строение металла, что указывает на кристаллизацию расплава в условиях более быстрого охлаждения по сравнению с метеоритами магматических групп. На основании данных о валовом составе и фазовых взаимоотношениях в метеорите Эльга показано, что метеориты ПЕ с аномальной структурой кристаллизовались с высокой скоростью от температур $\sim 1511^\circ\text{C}$, а потом были закалены при температуре $\sim 1060\text{--}1100^\circ\text{C}$. Такая обстановка соответствует условиям, возникающим на поверхности малых тел в ударном процессе, что подтверждается наличием структурных аналогов ПЕ среди метеоритов других групп и типов. И поскольку металл метеоритов группы ПЕ имеет эндогенное происхождение, вероятно, повторное переплавление происходило на поверхности тела в результате катастрофического ударного события. Подобие структур в разных типах метеоритов показывает воспроизводимость процессов, происходящих на разных родительских телах.

Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам О.И. Яковлеву и М.А. Ивановой за их рекомендации, которые помогли улучшить данное исследование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дьяконова М. И., Харитонова В. Я., Явнель А. А. (1979) Химический состав метеоритов М.: Наука, 48 с.
- Иванова Г. М., Кузнецова И. К. Железный метеорит Тобычан. *Метеоритика* **35**, 47–58.
- Теплякова С. Н. (2011) Эволюция расплавов в железных ядрах малых планет. *Астрономический Вестник* **45** (6), 529–536.
- TePLYakova S.N. (2011) Evolution of molten material in iron cores of small planets. *Solar System Res.* **45**(6), 515–522.
- Теплякова С. Н., Лоренц К. А., Иванова М. А., Кононкова Н. Н., Аносова М. О., Рязанцев К. М., Костицын Ю. А. (2018) Минералогия силикатных включений в железном метеорите группы ПЕ Эльга. *Геохимия* (1), 1–25.
- TePLYakova S.N., Lorentz C.A., Ivanova M.A., Kononkova N.N., Anosova M.O., Ryazantzev K.M., Kostitzin Yu.A. (2018) Mineralogy of silicate inclusions in IIE iron meteorite Elga. *Geochem. Int.* **56** (1), 1–23.
- Bevan A. W. R., Kinder J. and Axon H. J. (1979) A metallographic study of the iron meteorite Verkhne Dnieprovsk (BM 51183). *Mineralog. mag.* **43**, 149–54.
- Buchwald V. F. (1975) Handbook of Iron Meteorites. Their History, Distribution, Composition and Structure. *Berkeley: University of California Press*, 262 p.
- Buchwald V.F. and Clarke Jr. (1987) The Verkhne Dnieprovsk iron meteorite specimens in the Vienna collection and the confusion of Verkhne Dnieprovsk with Augustinovka. *Meteoritics* **22**, 121–135.
- Chai W., German R. M., Olevsky E. A., Wei X., Jiang R., Cui G. (2016) Preparation and properties of high strength Fe-Ni-P ternary alloys. *Advanced Engin. Materials* **18**, 1889–1896.
- Clarke R. S. and Goldstein J. I. (1978) Schreibersite growth and its influence on the metallography of coarse-structured iron meteorites. *Smithsonian Contrib. to the Earth Sci.* **21**, 1–81.
- Doan A. S., Goldstein J. I. (1970) The ternary phase diagram, Fe-Ni-P. *Metallurgical Transactions* **1**, 1759–1767.
- Ebihara, M., Ikeda, Y., Prinz, M., (1997). Petrology and chemistry of the Miles IIE iron II: chemical characteristics of the Miles silicate inclusions. *Antarc. Meteorite Res.* **10**, 373–388.
- Ganguly J., Yang H., Ghose S. (1994) Thermal history of mesosiderites: Quantitative constraints from compositional zoning and Fe-Mg ordering in orthopyroxenes. *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**, 2711–2723.
- Hassanzadeh J., Rubin A. E., Wasson J. T. (1990) Compositions of large metal nodules in mesosiderites - Links to iron meteorite group IIIAB and the origin of mesosiderite subgroups. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 3197–3208.
- Hofmann B. A. Lorenzetti S., Eugster O., Krahenbuhl U., Herzog G., Serefiddin F., Gnos E., Eggimann M., Wasson J. T. (2009) The Twannberg (Switzerland) IIG iron meteorites: mineralogy, chemistry, and CRE ages. *Meteorit. Planet. Sci.* **44**, 187–199.
- Ikeda Y., Prinz M. (1996) Petrology of silicate inclusions in the Miles IIE iron. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorit.* **9**, 143–173.
- Ikeda Y., Ebihara M., Prinz M. (1997) Petrology and chemistry of the Miles IIE iron. Description and petrology of twenty new silicate inclusions. *Antarct. Meteorite Res.* **10**, 355–372.
- Kirby R. S., King P. L., Henley R. W., Troitzsch U., Ireland T. R., Turner M. (2016). A new hypothesis for the evolution of IIE iron meteorites based on geochronology and petrology of the Miles meteorite. *Lunar and Planet. Sci. Conf.* **47**, 1938p.
- Kurat G., Zinner E., Varela M. E. (2007) Trace element studies of silicate-rich inclusions in the Guin (UNGR) and Kodaikanal (IIE) iron meteorites. *Meteorit. Planet. Sci.* **42**, 1441–1463.
- Lorenz C. A., Nazarov M. A., Kurat G., Kononkova N. N. (2001) Silicate Inclusions in a Metal Nodule of the Budulan Mesosiderite: Mineralogy and Origin. *Meteorit. Planet. Sci.* **36**, Supplement, A116.

- Luais B. (2007) Isotopic fractionation of germanium in iron meteorites: Significance for nebular condensation, core formation and impact processes. *Earth and Planet. Sci. Lett.* **262**, 21–36.
- Olsen E., Davis A., Clarke R. J., Jr., Schultz L., Weber H. W. (1994) Watson: A new link in the IIE iron chain. *Meteoritics* **29**, 200–213.
- Petaev M. I., Clarke R. S., Jr., Olsen E. J., Jarosewich E., Davis A. M., Steele I. M., Lipschutz M. E., Wang M.-S., Clayton R. N., Mayeda T. K., Wood J. A. (1993) Chaunskij: The most highly metamorphosed, shock-modified and metal-rich mesosiderite. *Lunar and Planetary Inst., 24th Lunar and Planet. Sci. Conf. Part 3: N-Z* p 1131–1132.
- Petaev M. I., Jacobsen S. B. (2005). LA-ICP-MS study of trace elements in the Chaunskij Metal. *36th Lunar and Planet. Sci. Conf.*, March 14–18, 2005, in League City, Texas, abstract no.1740
- Raghavan V. (1988) The Fe–Ni–P (Iron–Nickel–Phosphorus) System. *Phase Diagr. Ternary Iron Alloys* **3**, 121–137.
- Scott E. R. D., Wasson J. T. (1976) Chemical Classification of Iron Meteorites. VIII. Groups IC, IIE, IIIF and 97 other irons. *Geochim. Cosmochim. Acta* **40**, 103–115.
- Ruzicka A., Boynton W. V., Ganguly J. (1994) Olivine coronas, metamorphism, and the thermal history of the Morris-town and Emery mesosiderites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **58**, 2725–2741.
- Ruzicka A., Fowler G.W., Snyder G. A., Prinz M. Papike J. And Taylor L. A. (1999) Petrogenesis of silicate inclusions in the Weekeroo Station IIE iron meteorite; Differentiation, remelting and dynamic mixing. *Geochim. Cosmochim. Acta* **63**, 2123–2143.
- Ruzicka A., Hutson M. (2010) Comparative petrology of silicates in the Udei Station (IAB) and Miles (IIE) iron meteorites: Implications for the origin of silicate-bearing irons. *Geochim. Cosmochim. Acta* **74**, 394–434.
- Teplyakova S. N., Humayun M., Lorenz C. A., Ivanova M. A. (2012) A Common Parent for IIE Iron Meteorites and H Chondrites. *43rd Lunar and Planet. Sci. Conf.* pdf#1130.pdf.
- Van Roosbroek N., Hamann C., McKibbin S., Greshake A., Wirth R., Pittarello L., Hecht L., Claeys P., Debaille V. (2017). Immiscible silicate liquids and phosphoric olivine in Netscaevu IIE silicate: Analogue for planetesimal core-mantle boundaries. *Geochim. Cosmochim. Acta* **197**, 378–395.
- Wasson J. T., Wang J. (1986) A nonmagmatic origin of group-IIE iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **50**, 725–732.
- Wasson J. T. (2017) Formation of non-magmatic iron-meteorite group IIE. *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**, 396–416.

CRYSTALLISATION OF THE METAL IN IIE IRONS AND POSSIBLE METEORITE ANALOG

© 2019 г. S. N. Teplyakova^{a,*}, C. A. Lorenz^{a,**}

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Kosygina st., 19
e-mail: *elga.meteorite@gmail.com; **c-lorenz@yandex.ru

Received: 27.12.2018

Received version received: 05.02.2019

Accepted: 12.02.2019

The metal of the IIE irons has evidence of fractionation in the depths of the asteroid, but the presence of a fine-grained structure is incompatible with its endogenous origin. It was assumed that the metal underwent remelting on the surface of the parent body. Data on the mineragraphy, mineral and chemical composition of IIE irons (Elga, Verkhodniprovs, Tobychan, Miles and Watson) indicate that the relatively fine-grained metal structure and xenomorphic schreibersite grains were probably formed by crystallization from the melt. According to the calculated data on the bulk composition of the Elga metal and on the Fe–Ni–P phase diagrams, the crystallization of the first γ -Fe grains began at $\sim 1511^\circ\text{C}$ and ended at ~ 1060 – 1100°C with the formation of polygonal crystals of cm-sized taenite and xenomorphic schreibersite along their boundaries. The identical composition of xenomorphic schreibersite, both along the borders of the taenite grains and on the rims around nonmetallic inclusions, indicates their simultaneous formation. Among four generations of schreibersite, the xenomorphic schreibersite is distinguished by a high Fe/Ni ratio. It is also noted that the higher the crystallization temperature of schreibersite, the less nickel content in this schreibersite. Similar metal structures were found in other types of meteorites: in the IAB irons and in metal of some mesosiderites, and the impact mechanism of formation is considered the most likely for them. Thus, the mechanism of formation of the IIE irons by shock remelting of fractionated metal and mixing with silicate fragments in the conditions of the parent surface may have analogues among other types of meteorites.

Keywords: iron meteorites, IIE, Elga, schreibersite

(For citation: Teplyakova S.N., Lorenz C.A. Crystallisation of the Metal in Iie Irons and Possible Meteorite Analog. *Geokhimiya*. 2019;64(8):826–836. DOI: 10.31857/S0016-7525648826-836)