

УДК 552.63+523.681.2

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО И ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТЕОРИТА “ЧЕЛЯБИНСК”

© 2013 г. С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов, В. В. Хиллер

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7
E-mail: ivanovks@igg.uran.ru*

Поступила в редакцию 04.04.2013 г.

Фрагменты метеорита состоят на 25–35% из хондр, на 65–75% из матрицы, и содержат не более 3–4% железо-никелевых интерметаллидов и сульфидов. Метеорит является каменным хондритом и относится к петрологическому типу LL5. Во фрагментах метеорита отмечены повышенные содержания Na, U, Ag, и пониженные содержания Cr, Mn, Ni, Zn, Cs, по сравнению со средними содержаниями в обыкновенных хондритах. Метеорит сложен оливином, ортопироксеном, клинопироксеном, плагиоклазом, хромитом, интерметаллидами железа и никеля, сульфидами, хлорапатитом и стеклом полевошпатового состава. В ходе высокотемпературной перекристаллизации матрицы метеорита произошла сегрегация сульфидов и интерметаллидов в линейные зоны, перемежающиеся с участками сложенными исключительно силикатами. В черных фрагментах метеорита наблюдаются ударные прожилки и ветвящиеся сульфидные микропрожилки, образовавшиеся в результате трех этапов импактного воздействия, которые сопровождалась полным или частичным плавлением метеоритного вещества. Во фрагментах серого хондрита фиксируется один этап ударного воздействия, который привел к формированию черных прожилков. Зерна троилита в сером хондрите с поверхности окислены, что, по всей видимости, произошло при взаимодействии с водой во внеземных условиях. В черном хондрите около 2–3% объема составляют поры, образовавшиеся при аккреции твердых фрагментов метеорита. Находящиеся свободно в порах полностью ограненные кристаллы плагиоклаза, клинопироксена и оливина были захвачены в поры при их формировании и свидетельствуют об одновременном нахождении в среде формирования хондрита как недифференцированных образований, ставших в последствие хондрами, так и отдельных минералов, являющихся продуктами дифференциации силикатного вещества.

Ключевые слова: Урал, метеорит “Челябинск”, хондрит, минералогия, геохимия, ударные прожилки, сульфидные микропрожилки, поровое пространство.

ВВЕДЕНИЕ

Один из самых крупных (по оценкам [10] около 17–20 м в поперечнике и весом около 10 тыс. т) и самый известный из метеоритов Урала – метеорит “Челябинск” вошел в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. около 9:20 утра по местному времени. Он вызвал значительной силы взрыв в атмосфере на высоте около 50 км [4] и падение многочисленных фрагментов на большой территории Челябинской области. Название метеорита “Челябинск” “Cheleabinsk” утверждено Международным метеоритным комитетом (The Meteoritical Society) [5]. Наиболее крупные фрагменты метеорита упали в 78 км западнее г. Челябинск, в пределах озера Чебаркуль рядом с одноименным городом, проломив толстый (около 1 м) лед озера и образовав полынью около 6 м в поперечнике.

ОБНАРУЖЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРИТА

Все изучавшиеся нами фрагменты метеорита “Челябинск” были найдены авторами через

7 дней после падения в 2–3 километрах к югу от поселка Депутатское (Еткульский район, Челябинская область). Плотность находок примерно 1 фрагмент размером от 0.5 до 3.5 см на 80–600 м². Найденные фрагменты метеорита не достигли почвенного слоя и были извлечены из снега с глубины 20–50 см, при мощности снежного покрова на тот момент около 60–70 см. При вхождении в снег частицы метеорита оставили вертикальные или слабонаклонные входные отверстия (с отклонением от вертикали до 20°), иногда извилистой формы. Нижняя половина входных отверстий была заполнена зернистым льдом, сами обломки были окружены слоем льда толщиной 2–5 мм. Очевидно, это является следствием их высокой температуры на момент вхождения в снег. Таким образом, изучаемые фрагменты метеорита не подверглись импактному воздействию при соударении с землей, не контактировали с химическими соединениями в почвенном слое и не подвергались процессам выветривания в земных условиях. Отметим, что (как и ожидалось) ни

один из исследованных нами фрагментов метеорита “Челябинск” не обладал радиоактивностью выше фоновых значений.

Среди находок преобладают округлые обломки метеорита, окруженные черной стекловатой зоной закалки, мощностью около 0.5 мм. Однако найдены и фрагменты с одной или нескольких сторон ограниченные более тонкой зоной закалки, состоящей из отдельных капель черного стекла на сером фоне излома. Также были найдены обломки, ограниченные как округлой поверхностью с черной зоной закалки, так и неровной серой поверхностью свежего излома, т.е. разрушившиеся в атмосфере еще до падения в снег.

СТРОЕНИЕ ОБЛОМКОВ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Большая часть фрагментов метеорита представлена светло-серым хондритом. Около 20% обломков, как правило, размером не более 1 см, имеют черную окраску, которая обусловлена тем, что их матрица пронизана густой сетью тонких сульфидных прожилков, толщина которых не превышает 2–3 мкм. Многие фрагменты серого хондрита пересекаются черными линейными ударными прожилками мощностью от 0.3 до 1 мм вплоть до образования брекчии. Интерстиции между зернами оливина в сером хондрите заполнены преимущественно плагиоклазом, в то время как в черных – исключительно расплавленным полевошпатовым стеклом. При этом зерна оливина и ортопироксена в обоих случаях не имеют зональности, за счет чего, по данным [1, 2], серые хондриты классифицируются как равновесные низкотемпературные (тип III), а черные – как промежуточные среднетемпературные (тип II).

Все фрагменты, по классификации [15 и др.], относятся к хондритам LL типа, так как содержат не более 2–3% железо-никелевых интерметаллидов при повышенном содержании железа в силикатах, и к петрологическому типу 5, поскольку состоят на 25–35% из хондр и на 65–75% из матрицы со следами высокотемпературного преобразования.

ХИМИЧЕСКИЙ И МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ФРАГМЕНТОВ МЕТЕОРИТА

Содержания главных петрогенных элементов были определены в двух пробах хондрита методом рентгено-флуоресцентного анализа (прибор XRF-1800, аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, В.Г. Петрищева).

Первая проба серого хондрита показала состав (мас. %): SiO₂ – 36.06, TiO₂ – 0.13, Al₂O₃ – 2.94, Cr₂O₃ – 0.54, FeO – 33.33, MnO – 0.33, MgO – 19.13, CaO – 2.09, Na₂O – 1.78, K₂O – 0.12, P₂O₅ – 0.31, Ni – 0.21, S – 2.85, сумма – 99.84.

Вторая проба черного хондрита показала состав (мас. %): SiO₂ – 32.80, TiO₂ – 0.13, Al₂O₃ – 2.75, Cr₂O₃ – 0.50, FeO – 36.04, MnO – 0.32, MgO – 17.97, CaO – 2.05, Na₂O – 1.59, K₂O – 0.12, P₂O₅ – 0.32, Ni – 0.42, S – 4.09, сумма – 99.10.

Таким образом, в пробе черного хондрита отмечено повышенное содержание Ni, S и Fe по сравнению с пробой светло-серого хондрита. По всей видимости это связано с повышенным содержанием в них сульфидов. В обеих пробах следует отметить повышенное содержание Na по сравнению с наиболее часто встречающимися составами обыкновенных хондритов LL-типа.

По содержанию микроэлементов (табл. 1) пробы метеорита близки к обыкновенным хондритам L и LL типов, **средний состав которых приводится в [14 и др.]**. В пробах незначительно повышены содержания U и Ag, а также наблюдаются пониженные содержания Cr, Mn, Ni, Zn, Cs. На спайдердиаграммах содержаний РЗЭ, нормированных на CI-хондрит (рис. 1), все три пробы образуют неровные “ломанные” пологие тренды, с незначительным обогащением в области легких лантаноидов, и содержат в сумме больше редких земель, чем в среднем хондриты такого типа.

Таблица 1. Микроэлементный состав (г/т) метеорита “Челябинск”

Эл-ты	1	2	3	Эл-ты	1	2	3
Li	1.65	1.67	1.72	La	0.76	0.45	0.47
Be	0.03	0.01	0.03	Ce	1.99	1.23	1.31
Sc	7.41	7.80	7.67	Pr	0.25	0.15	0.18
Ti	586.06	539.00	542.27	Nd	1.25	0.76	0.85
V	69.78	61.53	61.01	Sm	0.47	0.20	0.33
Cr	2083.3	1683.2	1736.0	Eu	0.09	0.09	0.11
Mn	1160.3	1244.5	1188.0	Gd	0.37	0.23	0.30
Co	450.19	473.51	361.85	Tb	0.07	0.06	0.07
Ni	5601.5	7309.4	6901.0	Dy	0.54	0.39	0.43
Cu	73.82	55.49	57.84	Ho	0.12	0.08	0.11
Zn	8.08	4.66	4.89	Er	0.35	0.25	0.28
Ga	4.65	4.89	4.53	Tm	0.05	0.03	0.04
Ge	10.03	7.56	6.68	Yb	0.34	0.28	0.26
Rb	3.24	3.31	3.62	Lu	0.06	0.04	0.05
Sr	12.01	12.48	13.08	Hf	0.20	0.16	0.23
Y	2.68	1.96	2.23	Ta	21.66	0.02	18.18
Zr	5.37	6.24	6.30	W	0.66	0.13	0.39
Nb	29.44	0.44	29.28	Tl	0.03	0.002	0.01
Mo	1.08	0.79	0.89	Pb	0.26	0.14	0.20
Ag	2.57	0.79	2.33	Bi	0.005	–	–
Cd	0.01	0.002	0.002	Th	0.22	0.11	0.08
Sn	0.71	0.26	0.36	U	0.14	0.04	0.13
Cs	0.09	0.02	0.03	Sb	0.08	0.05	0.07
Ba	9.92	6.81	11.01	Te	0.46	0.38	0.33

Примечание: анализы выполнены методом ICP-MS на масс-спектрометре ELAN 9000 в ИГТ УрО РАН, аналитик Н.Н. Адамович. Пробы: 1–2 – серый хондрит, 3 – черный хондрит. Здесь и далее: прочерк – не обнаружено.

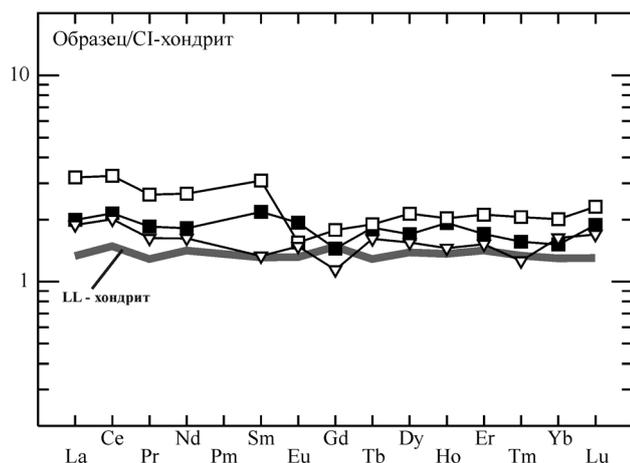


Рис. 1. Спайдер-диаграмма содержаний РЗЭ в фрагментах метеорита “Челябинск”, нормированных на CI-хондрит по [11].

Не залитые квадраты (проба 1) и не залитые треугольники (проба 2) – серый хондрит; залитые квадраты (проба 3) – черный хондрит, сплошная линия – распределение РЗЭ в обыкновенных хондритах LL-типа по [14]. Номера проб соответствуют номерам в таблице 1.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ МЕТЕОРИТА

Минеральный состав метеорита представлен оливином, ортопироксеном, клинопироксеном, плагиоклазом, хромитом, интерметаллидами железа и никеля, сульфидами, хлорapatитом и стеклом полевошпатового состава. Большая часть метеорита сложена силикатной матрицей со следами высокотемпературной перекристаллизации. Зерна оливина и клинопироксена образуют гранобластовую пойкилобластовую структуру, близкую к структуре земных метаморфических и метасоматических пород. В интерстициях между этими минералами находятся зерна плагиоклаза, расплавленного стекла и апатита (рис. 2г). Хондры различного строения (колосниковые, лучистые, порфириновые) слагают около 25–30% объема породы (рис. 2б, в). Их размер доходит до 1.5–2 мм. Хондры также состоят преимущественно из зерен оливина и ортопироксена, погруженных в базис из плагиоклаза или вулканического стекла, которые не всегда различимы между собой (рис. 2в).

Оливин в матрице метеорита является главным породообразующим минералом (рис. 2г) и слагает зерна размером 0.03–0.5 мм. В массе оливин имеет светло-серую окраску, видимо, за счет мелкого размера зерен и микротрещиноватости. Встречается как по всей матрице метеорита, так и в хондрах. При этом характеризуется устойчивым химическим составом (табл. 2, ан. 1–4) и относится к форстериту с 30% фаялитового минала. Кроме того, содержит незначительные примеси марганца, никеля и хрома.

Ортопироксен более ксеноморфен по отношению к зернам оливина, но также является главным породообразующим минералом метеорита. Встречается как в хондрах, так и в матрице породы. Так же, как и оливин, отличается устойчивым химическим составом (табл. 2, ан. 5–8) и относится к энстатиту с 25% ферросилитового минала. Минерал постоянно содержит примесь кальция (CaO до 1 мас. %).

Клинопироксен ксеноморфен по отношению к зернам оливина и энстатита, и часто встречается в матрице в виде единичных зерен среди агрегата ортопироксена. Характеризуется несколько изменчивым химическим составом (табл. 2, ан. 9–11), но все анализы попадают в поле авгита ($\text{En}_{43-45}\text{Wo}_{41-45}\text{Fs}_{10-16}$). Минерал постоянно содержит примеси алюминия, хрома, титана и натрия.

Интерстиции между зернами вышеперечисленных минералов заполнены плагиоклазом и расплавленным стеклом. Плагиоклаз относится к альбито-олигоклазу, содержит примеси калия и железа (табл. 2, ан. 12–14). Расплавленное стекло по составу близко к плагиоклазу (табл. 3), однако отличается от него пониженным содержанием натрия и повышенным содержанием калия. Оптическими методами оно не всегда диагностировалось особенно в тонких срастаниях с минералами матрицы, однако заметно отличалось от плагиоклаза устойчивыми нестехиометрическими соотношениями химических элементов.

В интерстициях между хондрами встречены единичные ксеноморфные зерна апатита размером до 0.8 мм. По данным микрозондового анализа наиболее крупного зерна, фосфат относится к хлорapatиту с содержанием хлора (3.04–4.07 мас. %) и фтора (0.24–0.72 мас. %). Причем обозначенные вариации содержания галогенов отмечены в пределах одного зерна апатита. Исследуемый апатит содержит заметно меньше Cl и F и соответственно больше (OH)-группы, рассчитанной стехиометрически, по сравнению с апатитом из LL хондритов по [5, 8 и др.]. Из существенных примесей установлено только железо (FeO до 0.5 мас. %), что вполне типично для апатита из хондритов [5].

Хромовая шпинель присутствует в матрице в виде ксеноморфных зерен размером до 0.2 мм и часто приурочена к скоплениям интерметаллидов и троилита. Кроме того, она отмечается в виде мелких включений (до 50 мкм) в зернах оливина и ортопироксена. По данным микрозондового анализа хромшпинелид (табл. 4) относится к хромиту с незначительным содержанием миналов герцинита (до 13%), ульвошпинели (до 10%) и магнезиохромита (до 17%). В ассоциации с металлами и сульфидами хромит более железистый (табл. 4, ан. 1–5), а во включениях в оливине и ортопироксене – магнезиальный (табл. 4, ан. 6–7). Присутствие значительной примеси титана (или минала ульвошпинели) в хромите говорит о том, что минерал может иметь частично обращенную структуру.

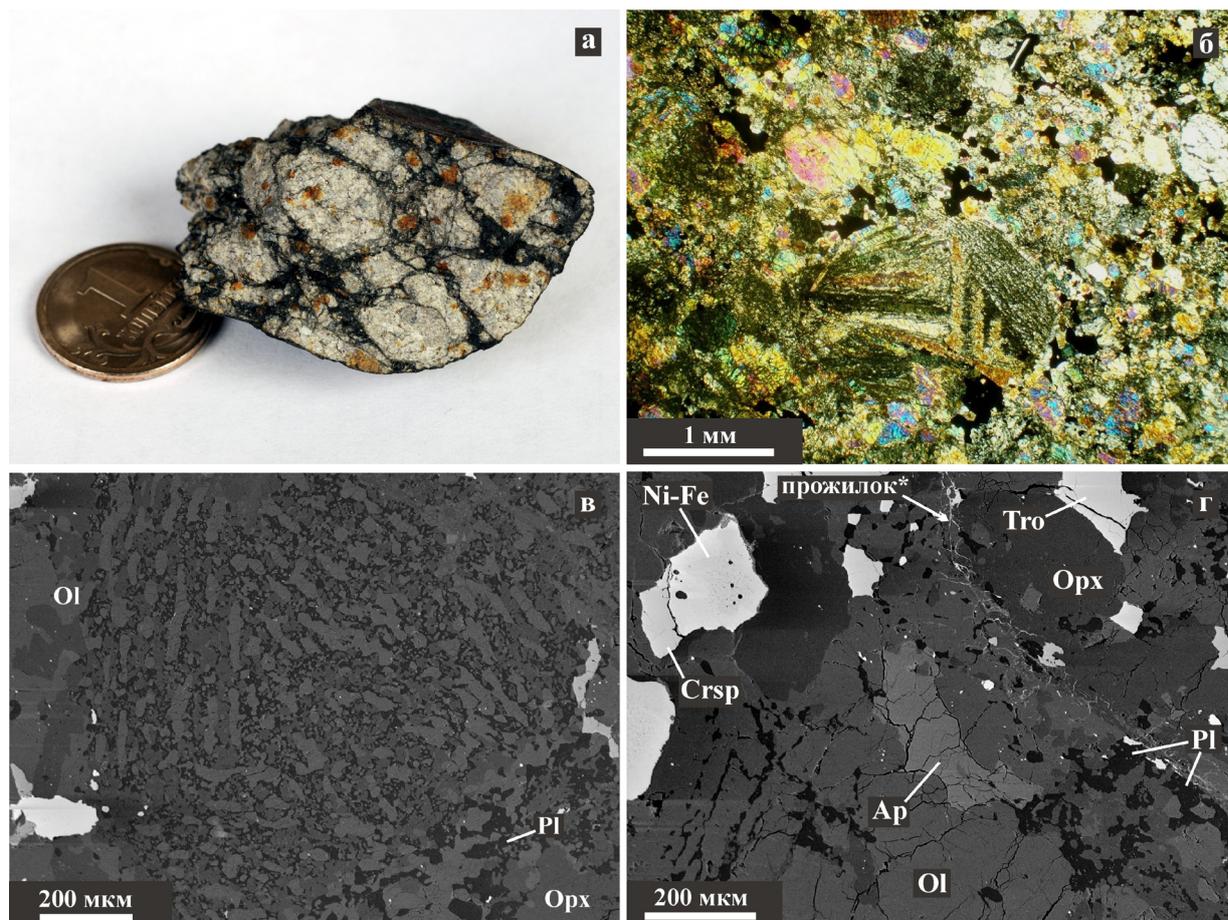


Рис. 2. Структура серого хондрита из метеорита “Челябинск”.

а – фрагмент серого хондрита, пересекающийся черными ударными прожилками, фото П.В. Шалаева; б – структура серого хондрита: округлые хондры окружены неравномернозернистой матрицей со следами высокотемпературной перекристаллизации (проходящий свет, николи скрещены); в – хондра колосникового строения, фотография в отраженных электронах, ИГГ УрО РАН, Cameca SX 100 (здесь и далее аналитик В.В. Хиллер); г – апатит в матрице хондрита, фотография в отраженных электронах, Cameca SX 100. Здесь и далее: Ap – апатит, Crsp – хромовая шпинель, Fe-Ni – интерметаллиды железа и никеля, OI – оливин, Орх – ортопироксен, Pl – плагиоклаз, Tro – троилит, прожилок* – черный прожилок, пересекающий серый хондрит.

Таблица 2. Химический состав силикатов (мас. %) из метеорита “Челябинск”.

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Fe/ (Fe+Mg)
1	37,35	–	–	0,11	0,11	26,66	0,46	34,77	0,03	–	–	99,49	0,30
2	37,19	0,01	–	0,03	0,04	26,35	0,44	35,06	0,02	0,01	–	99,16	0,30
3	37,21	–	0,01	0,03	0,06	26,60	0,49	34,97	0,01	–	–	99,38	0,30
4	37,61	0,03	0,02	0,19	0,03	26,07	0,59	34,68	0,02	0,01	–	99,24	0,30
5	55,16	0,20	0,11	0,15	–	16,12	0,44	26,84	0,69	0,04	0,01	99,76	0,25
6	54,68	0,24	0,11	0,13	0,03	15,72	0,45	26,88	0,87	–	–	99,12	0,25
7	54,89	0,20	0,13	0,12	–	15,87	0,56	26,98	0,88	0,02	0,01	99,66	0,25
8	55,21	0,15	0,13	0,14	0,02	16,02	0,37	26,94	0,83	0,01	–	99,83	0,25
9	51,32	0,40	0,42	0,60	0,32	10,37	0,24	15,64	20,93	0,44	–	100,69	0,27
10	51,76	0,35	0,49	0,70	0,08	8,52	0,21	15,63	21,48	0,54	–	99,76	0,23
11	53,67	0,36	0,46	0,80	0,05	6,14	0,16	15,89	21,88	0,58	0,01	99,99	0,18
12	64,57	0,03	20,34	0,09	0,23	1,27	–	0,02	2,26	9,77	0,68	99,26	–
13	65,86	0,02	20,94	0,03	0,06	0,62	–	–	1,99	10,44	0,58	100,54	–
14	65,48	0,04	20,88	0,02	0,03	0,66	–	0,01	2,23	9,84	0,82	100,01	–

Примечание. Ан. 1–4 – оливин, ан. 5–8 – ортопироксен, ан. 9–11 – клинопироксен, ан. 12–14 – плагиоклаз. Здесь и далее анализы сделаны на микроанализаторе Cameca SX 100 в ИГГ УрО РАН, аналитик В.В. Хиллер.

Таблица 3. Состав расплавных стекол в метеорите “Челябинск”

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Сумма
Черный хондрит												
1	68.44	0.02	22.49	0.10	1.34	0.01	0.26	0.10	2.95	1.54	0.03	97.29
2	67.91	0.03	22.31	0.13	1.18	–	0.31	0.14	2.92	1.37	0.05	96.35
3	67.64	0.05	22.27	0.09	1.10	0.02	0.22	0.08	3.02	1.85	0.02	96.36
4	66.85	0.06	22.20	0.06	0.66	–	0.10	2.12	5.46	1.08	0.03	98.61
Черный прожилок в сером хондрите												
5	67.77	0.01	21.75	0.04	0.89	0.06	0.17	1.54	4.02	1.88	0.02	98.17

Таблица 4. Химический состав хромита (мас. %) из метеорита “Челябинск”

№	1	2	3	4	5	6	7
TiO ₂	2.25	2.45	2.16	2.18	3.63	3.63	3.65
Al ₂ O ₃	6.08	6.05	6.07	5.83	5.15	5.09	4.97
Cr ₂ O ₃	56.55	56.61	56.41	57.06	55.65	56.09	56.47
Fe ₂ O ₃	0.31	0.64	0.72	0.26	0.11	0.27	0.12
NiO	0.02	0.08	0.03	0.05	0.03	0.04	0.07
FeO	31.85	31.77	31.34	31.55	33.05	30.63	30.91
MnO	0.44	0.57	0.71	0.55	0.55	0.47	0.41
MgO	1.63	1.59	1.64	1.63	1.59	3.15	3.03
CaO	–	–	0.09	0.04	0.03	–	0.02
Сумма	99.13	99.75	99.17	99.16	99.78	99.37	99.65
Кристаллохимический пересчет (на 3 катиона)							
Ti	0.06	0.07	0.06	0.06	0.10	0.10	0.10
Al	0.26	0.26	0.26	0.24	0.22	0.21	0.21
Cr	1.61	1.59	1.61	1.63	1.58	1.58	1.60
Fe ³⁺	0.01	0.02	0.02	0.01	–	0.01	–
Fe ²⁺	0.96	0.96	0.93	0.95	0.99	0.92	0.92
Mn	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
Mg	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.17	0.16
Cr/(Cr + Al + Fe ³⁺)	0.83	0.82	0.83	0.84	0.83	0.83	0.84
Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ + Mg)	0.91	0.92	0.91	0.91	0.91	0.83	0.84

Примечание. Ан. 1–5 – крупные зерна в матрице метеорита, ан. 6–7 – мелкие включения в оливине и ортопироксене. Fe₂O₃ – рассчитан по стехиометрии.

Интерметаллиды слагают округлые и интерстициальные зерна, размером до 0.3 мм, обычно в ассоциации с троилитом, который как более поздний минерал их обрастает. Зерна интерметаллидов характеризуются зональным строением, в центральной части развит агрегат камасита (табл. 5, ан. 1–5), а в краевых зонах – тэнита (табл. 5, ан. 6–10). Интересно, что содержание никеля достаточно сильно варьирует по матрице зерен, но максимальное обогащение (Ni до 48%; табл. 5, ан. 9–10) отмечается только в их периферии. При этом интерметаллидов с преобладанием никеля над железом (аваруит и др.) нам обнаружить не удалось.

Троилит слагает отдельные зерна и их сращения размером до 0.3 мм, образованные полигонально-зернистым агрегатом, а также каймы обрастания вокруг интерметаллидов и участвует в строении всех типов прожилков. При этом, по данным микронного анализа, троилит (табл. 5, ан. 11–14) независимо от ассоциации характеризуется устойчивым химическим составом. Из примесей отме-

чается только никель (не более 1 мас. %). В наиболее крупных зернах троилита наблюдаются мелкие округлые включения другого сульфида, размером до 20–25 мкм. По данным микронного анализа (табл. 5, ан. 15–17) они являются железистым пентландитом. Кроме того, минерал содержит примеси меди (до 1 мас. %) и кобальта (до 0.6 мас. %).

ИМПАКТНЫЕ ПРОЖИЛКИ

Как отмечалось выше, между серой и черной разностью хондрита наблюдаются некоторые различия. В сером хондрите интерстиции между зернами оливина заполнены преимущественно плагиоклазом, в то время как в черных – исключительно расплавленным стеклом. Окраска черных хондритов обусловлена тем, что они пронизаны сеткой ветвящихся сульфидных микропрожилков, сложенных троилитом (“прожилки 1” на рис. 3а–в). Их мощность варьирует от 0.1 до 2–3 мкм. Такие прожилки пересекают зерна оливина, пироксенов и хромо-

Таблица 5. Химический состав интерметаллидов и сульфидов (мас. %)

№	Минерал	Fe	Ni	Co	Cu	S	P	As	Сумма
1	камасит	94.85	4.92	2.03	–	0.01	0.04	0.04	101.89
2		93.69	5.85	2.19	0.08	–	–	–	101.82
3		87.23	11.46	1.69	–	–	0.03	–	100.42
4		84.81	14.61	0.95	–	0.01	0.11	–	100.48
5		82.60	17.07	0.96	0.10	–	0.09	0.02	100.85
6	тэнит	73.67	24.90	1.00	0.03	0.01	0.13	0.01	99.75
7		63.94	34.71	0.92	0.08	0.02	–	–	99.68
8		55.72	43.32	0.33	0.16	–	0.04	0.04	99.59
9		51.54	47.94	0.22	0.19	0.04	–	–	99.92
10		50.73	48.08	0.25	0.21	0.01	–	0.01	99.29
11	троилит	63.85	0.37	0.02	–	35.60	–	0.01	99.85
12		64.07	0.65	0.07	0.02	35.45	–	–	100.26
13		63.92	0.60	0.04	0.07	35.70	–	–	100.34
14		63.25	1.07	0.06	0.04	35.23	–	0.03	99.68
15	пентландит	46.08	20.79	0.51	0.66	33.15	–	0.02	101.21
16		46.10	20.06	0.51	0.81	32.19	–	–	99.68
17		45.09	20.95	0.54	0.97	32.48	–	0.02	100.04

вой шпинели, но при этом не пересекают расплавленное стекло (рис. 3а, в). Помимо этого, сульфидные микропрожилки не пересекают зерна железо-никелевых интерметаллидов и находятся в непрерывном срастании с крупными зернами троилита. Наибольшая густота и мощность сульфидных прожилков наблюдаются вдоль протяженных линейных трещин, заполненных троилитом с каплевидными включениями тэнита.

В черном хондрите наблюдаются прожилки мощностью от 10 мкм до 3 мм, заполненные стеклом с каплевидными обособлениями троилита и интерметаллидов (“прожилки 2” на рис. 3). Тонкие (до 150 мкм) и мощные (2–3 мм) прожилки незначительно различаются по строению. Тонкие прожилки имеют как линейную, так и разветвленную форму, за счет “обтекания” обломочных зерен матрицы хондрита (рис. 3а, в). Они сложены стеклом, мелкими (до 0.5 мкм) зернами оливина и каплевидными обособлениями троилита с включениями железо-никелевых интерметаллидов. По краям таких прожилков наблюдается отчетливая зона закалки, выраженная в уменьшении размеров как зерен оливина, так и каплевидных выделений троилита. Из-за наличия в прожилках микрокристаллов оливина измерить на микрозонде состав стекла в прожилках не получилось, однако на фотографиях в отраженных электронах оно светлее, чем стекло выполняющее интерстиции в матрице хондрита, что свидетельствует о его большей плотности за счет различий в химическом составе.

Мощные прожилки, в отличие от тонких, по большей части состоят из угловатых зерен оливина и ортопироксена размером от 5 до 50–

200 мкм, сцементированных расплавленным стеклом с каплевидными обособлениями троилита (рис. 3д, е). Границы таких прожилков, ровные и сопровождаются маломощной зоной закалки, выраженной в уменьшении размеров зерен силикатов и каплевидных выделений троилита (рис. 3д). В троилите присутствуют каплевидные включения железо-никелевых интерметаллидов (рис. 3е). Зерна оливина и ортопироксена в прожилке имеют зональное строение, отчетливо видное на рис. 3д, поэтому, порода, слагающая прожилков, может быть классифицирована как высокотемпературный неравновесный хондрит [2 и др.].

Мощные прожилки не пересекаются сульфидными микропрожилками, однако некоторые сульфидные микропрожилки занимают секущее положение по отношению к тонким прожилкам, что отчетливо заметно на рис. 3а. При этом таких микропрожилков немного, большая их часть обрывается и выклинивается вблизи тонких прожилков.

Строение прожилков во многом сходно с ударными дайками, описанными для обыкновенных хондритов [8] и полученными экспериментально в обыкновенных [7] и углистых хондритах [13]. На контакте тонких прожилков с зернами сульфидов, наблюдаются затвердевшие сульфидно-силикатные эмульсии, аналогичные описанным в [14].

Черные прожилки, пересекающие серый хондрит, по строению близки к черному хондриту. Более тонкие черные прожилки представляют собой линейные зоны с ветвящимися сульфидными микропрожилками (рис. 2г). При большей мощности в их строении наблюдаются еще и зоны стекла с микрокристаллами оливина и каплевидными обособлениями троилита (рис. 3г), а вместо плагиоклаза в матрице хондрита вблизи черных прожилков наблюдается стекло, отличающееся по составу

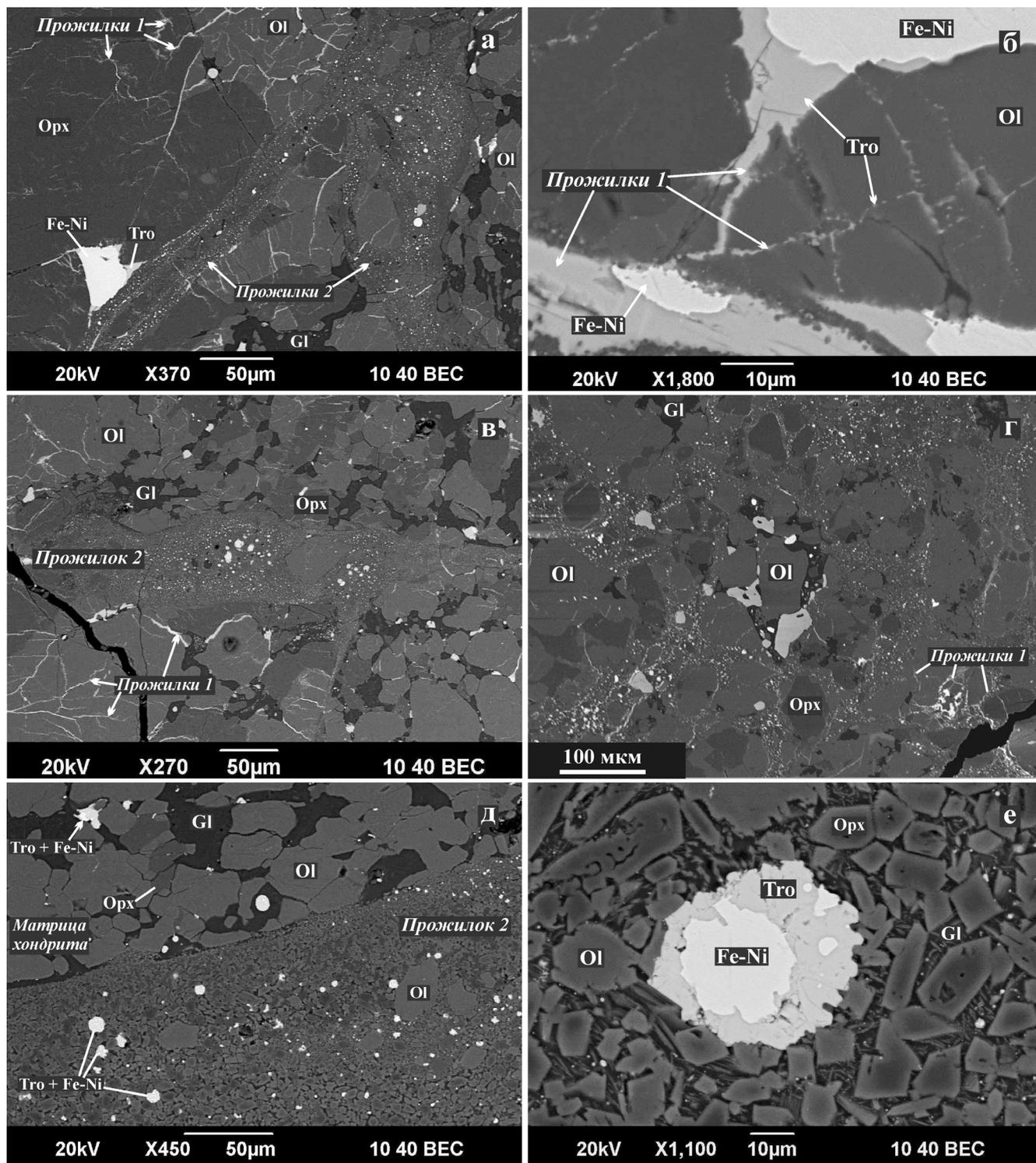


Рис. 3. Ударные прожилки в фрагментах метеорита “Челябинск”.

а, в – микропрожилки, выполненные сульфидами. Gl – расплавленное стекло полевошпатового состава, “прожилки 1” – ветвящиеся сульфидные микропрожилки, “прожилки 2” – линейные или ветвящиеся прожилки, сложенные стеклом с микрокраплениями оливина и каплевидными металл-сульфидными обособлениями. Фотографии в отраженных электронах. Прибор JSM-6390LV в ИГГ УрО РАН (здесь и далее аналитик С.П. Главатских).

от плагиоклаза. Все это позволяет провести аналогию между черными прожилками в сером хондрите и фрагментами черного хондрита. Очевидно, что

формирование черных прожилков в сером хондрите является результатом импактного внешнего воздействия.

В сером хондрите зерна троилита и интерметаллидов распределены неравномерно. На рис. 4 видно, что они сконцентрированы в линейные скопления, пересекающиеся между собой и окружающие участки хондрита, сложенные практически исключительно силикатами. Зерна сульфидов и интерметаллидов в линейных скоплениях имеют сложную форму, расположены на границе между зернами оливина и ортопироксена, мелкие зерна присутствуют в виде включений в этих минералах (рис. 5). Поскольку оливин и ортопироксен при этом также имеют сложные границы и находятся в виде включений друг в друге, можно сделать вывод, что сегрегация троилита и интерметаллидов произошла одновременно с высокотемпературной перекристаллизацией матрицы хондрита. Черные прожилки, пересекающие серый хондрит, занимают секущее положение по отношению к скоплениям троилита и интерметаллидов, т.к. образовались при более позднем ударном воздействии.

ПОРЫ В МЕТЕОРИТЕ

Во фрагментах метеорита “Челябинск” наблюдаются поры размером до 0.5 мм. Преимущественно поры находятся во фрагментах черного хондрита. Пористость не превышает 1–3% от общего объема.

Поры имеют неровную изогнутую форму с вогнутыми поверхностями, что обусловлено выступанием из стенок пор индивидов матрицы (рис. 6а, в, г). Выступы минералов обычно неровные или округлые, на некоторых округлых поверхностях выступающих минералов наблюдается комбинацион-

ная штриховка (рис. 6в). По всей видимости, поры сформировались в процессе аккреции как свободное пространство между слипшимися хондрами и минеральными индивидами матрицы.

К такому же выводу относительно природы пор в обыкновенных хондритах пришла группа исследователей, изучавшая геометрию пор в каменных метеоритах при помощи синхротронной рентгеновской микротомографии [11]. При этом, по их данным, пористость, обусловленная неполным уплотнением при метаморфизме, широко распространена во всех типах обыкновенных хондритов и является характерной чертой для всего пояса астероидов.

Вдоль стенок пор наблюдаются кристаллы клинопироксена (рис. 6в), плагиоклаза (рис. 6д) и округлые индивиды оливина (рис. 6г), находящиеся возле стенок прожилка или прирастающие к ним. Минералы диагностированы при помощи энерго-дисперсионной приставки INCA Energy 450 X-Max 80 сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV в ИГТ УрО РАН, аналитик С.П. Главатских. Кристаллы плагиоклаза и клинопироксена имеют типичную для них огранку и слегка скругленные ребра. На округлом выделении оливина (рис. 6г) при внимательном изучении также обнаруживаются небольшие грани, а на скругленной поверхности между ними местами заметна комбинационная штриховка.

В местах пересечения пор тонкими сульфидными прожилками наблюдаются натечные выделения троилита, располагающиеся, как правило, вдоль стенок полости. Реже встречаются натечные образования сложной формы в центре

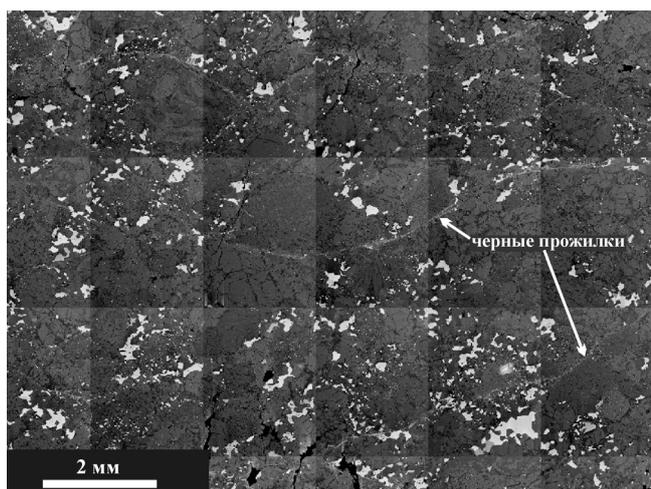


Рис. 4. Линейные скопления троилита и железоникелевых интерметаллидов (белое) в сером хондрите метеорита “Челябинск”.

Черные прожилки занимают секущее положение по отношению к таким скоплениям. Фотография в отраженных электронах, Cameca SX 100.

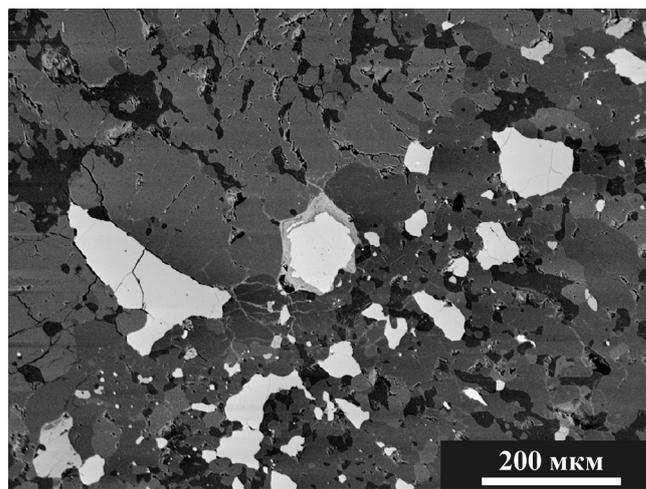


Рис. 5. Линейное скопление зерен троилита и интерметаллидов в сером хондрите.

Фото в отраженных электронах, Cameca SX 100.

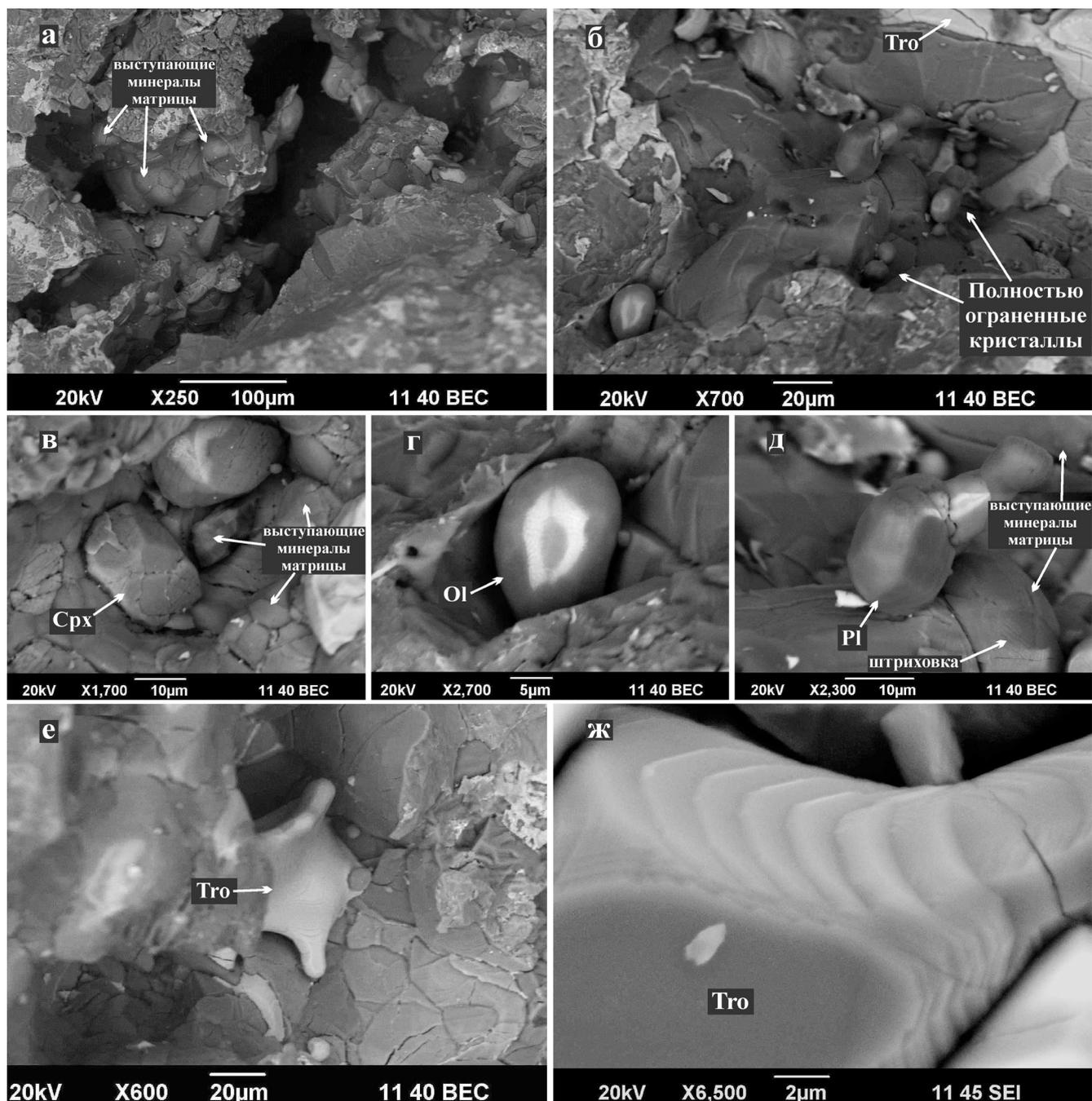


Рис. 6. Структура пор в черном хондрите метеорита «Челябинск».

а – поры с выступающими минералами матрицы хондрита; б – поры с полностью ограненными кристаллами силикатов, расположенных вдоль стенок пор; в–д – кристаллы и шарообразные индивиды минералов, находящиеся в порах; е – натечное образование троилита в поровом пространстве; ж – ступени роста на поверхности натечных образований троилита. а–е – фотографии в обратно-отраженных электронах, ж – изображение в режиме вторичных электронов. Прибор JSM-6390LV.

порового пространства (рис. 6е). Поверхность таких натечков ступенчатая, ступени образуют округлые очертания согласные с формой натечков. При большем увеличении видно, что ступени имеют угловатую форму и образованы комбинацией кристаллических граней параллельных друг другу на всей площади натечного образо-

вания, или более тонкой комбинационной штриховкой (рис. 6ж). То есть такие ступени сами, по сути, являются комбинационной штриховкой, свидетельствующей о медленной кристаллизации сульфидного расплава, а так же о том, что многие натечки представляют собой единые кристаллические индивиды.

ОКИСЛЕНИЕ СУЛЬФИДОВ

Вокруг некоторых зерен троилита в сером хондрите наблюдаются микропоры с гидроокислами железа в виде пластинчатых индивидов и их сростков (рис. 7). Макроскопически они выглядят как ореолы “ржавого” цвета вокруг сульфидных зерен. Размер кристаллов не превышает 2 мкм (рис. 7б). Гидроокислы нарастают как на зерна троилита, так и на стенки пор рядом с ними. Поверхность зерен троилита, обнажающаяся в порах, частично покрыта тончайшей пленкой оксидов железа, определенной при помощи EDX-приставки электронного микроскопа.

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, черные и серые фрагменты метеорита “Челябинск” относятся к обыкновенным хондритам LL 5 типа. Их формирование сопровождалось высокотемпературной перекристаллизацией вещества, приведшей к образованию в матрице хондрита гранобластовой пойкилобластовой структуры, близкой к земным метаморфическим породам. Высокотемпературная перекристаллизацией сопровождалась сегрегацией сульфидов и интерметаллидов в линейные скопления вокруг участков сложенных силикатами. При общей бластической структуре хондрита сохранилось интерстициальное положение зерен плагиоклаза и апатита.

В черных хондритах фиксируется три этапа ударного воздействия, сопровождающиеся хрупкими деформациями и последующей цементацией трещин расплавом: образование тонких прожилков, образование ветвящихся сульфидных микропрожилков и на третьем этапе – образование мощ-

ных ударных прожилков. На первом этапе произошло полное плавление метеоритного вещества вдоль отдельных трещин, а затем цементация этих трещин эмульсией силикатного и сульфидно-металлического расплава. Последний застыл в виде отдельных капель в силикатном стекле тонких прожилков. На втором этапе произошло хрупкое растрескивание оливина, ортопироксена и хромита, с последующим заполнением трещин сульфидным расплавом, возникшим в результате частичного плавления. Именно наличием частичного, а не полного плавления второй этап ударного воздействия отличается от первого. На втором этапе тонкие прожилки, возникшие ранее, растрескались в значительно меньшей степени, чем силикаты матрицы, а расплавленное стекло плагиоклазового состава не подверглось хрупким деформациям. На третьем этапе образовались мощные ударные прожилки (мощностью в первые миллиметры), сложенные высокотемпературным неравновесным хондритом.

В серых хондритах фиксируется один этап ударного воздействия, который привел к формированию черных прожилков, местами пересекающихся и образующих брекчевидную текстуру. По строению черные прожилки аналогичны черным фрагментам метеорита.

Найденные фрагменты метеорита “Челябинск” после падения находились в снежном покрове несколько дней, не контактировали с почвенным слоем и не подвергались выветриванию в земных условиях. Из чего можно сделать вывод, что окисление сульфидов с образованием полостей, заполненных гидроокислами железа, происходило вероятнее всего во внеземных условиях.

Отдельного рассмотрения заслуживает строение порового пространства. Тот факт, что мине-

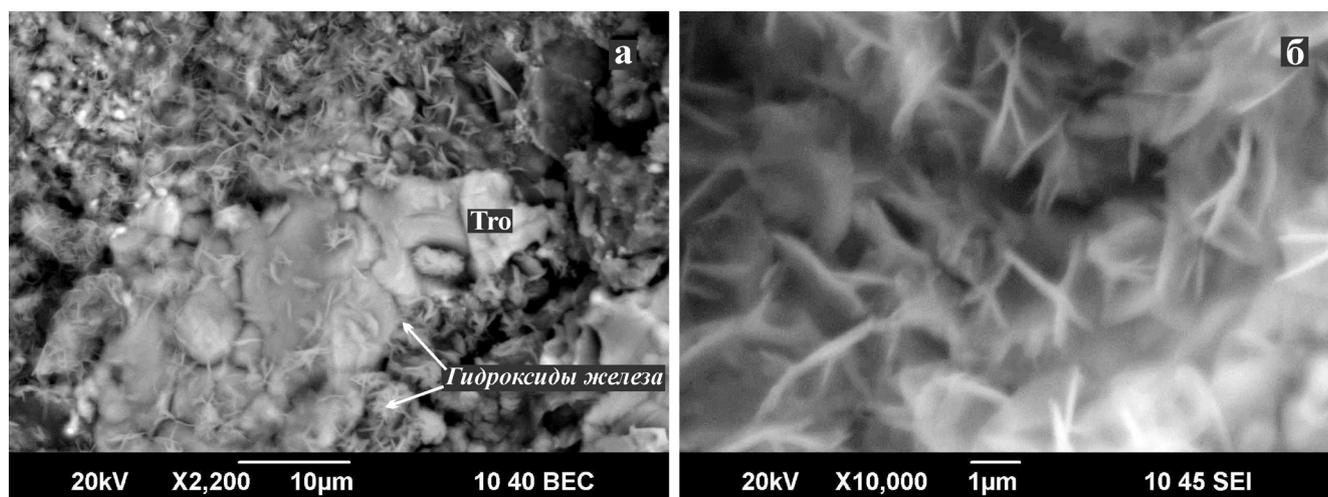


Рис. 7. Зерно троилита, окруженное микропустотами с пластинчатыми кристаллами гидроокислов железа, из серого хондрита метеорита “Челябинск”.

а – фотография в отраженных электронах, б – фотография пластинчатых кристаллов во вторичных электронах. Прибор JSM-6390LV.

ральные индивиды в порах в большинстве имеют полную огранку и только с одной стороны примыкают к стенкам пустот, говорит о том, что их зарождение и рост происходил в свободном пространстве, заполненном газом или жидкостью. Теоретически это могло происходить в поровом пространстве при условии отсутствия гравитационных сил способных притянуть кристаллы к одной из стенок полости. Этому предположению противоречит отсутствие кристаллов, непосредственно растущих от стенок полостей, что было бы естественно, учитывая, что поверхность полости является более предпочтительной для зародышеобразования, чем объем газа или жидкости [3 и др.]. Поэтому, вероятно, кристаллы сформировались в газовой среде до формирования метеоритного тела и впоследствии оказались в пустотах между сегрегировавшимися фрагментами метеорита. Наличие разных по составу кристаллов, принимавших участие в формировании хондрита наряду с хондрами, свидетельствует о полимиктной природе изучаемых образцов. Т.е. метеорит формировался в среде, где существовали как округлые хондры, образовавшиеся из недифференцированного силикатного расплава, так и отдельные кристаллы силикатов, являющие собой продукты дифференциации силикатного вещества.

Авторы благодарят руководителя центра геоэкологического и минералогического туризма “Уральские рудознатцы” Н.Б. Беленкова за неоценимую помощь в поисках метеоритного материала. Авторы признательны аналитикам ИГГ УрО Н.П. Горбуновой, С.П. Главатских, Н.Н. Адамович и другим.

Исследования выполнены при частичной поддержке проекта УрО РАН 12-П-5-1017 “Структурно-вещественная эволюция и металлогения базит-ультрабазитовых комплексов...”, являющегося частью Программы 27 президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зиновьева Н.Г.* Петрология обыкновенных хондритов. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М: МГУ, 2001. 53 с.
2. *Зиновьева Н.Г., Маракушев А.А., Грановский Л.Б.* Условия формирования равновесных и неравновесных хондритов // Магматизм и метаморфизм в истории Земли: тез. докл. XI Всерос. петрограф. совещ. Т. 1. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. С. 251–252.
3. *Краснова Н.И., Петров Т.Г.* Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб: Невский курьер, 1997. 228 с.
4. Челябинский Болид. Сообщение ИДГ РАН, 2013. <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=1da2959b-902f-46b2-9f1f-0c62d19740e8#content>
5. Chelyabinsk. Meteoritical Bulletin Database. <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=57165>
6. *Dreeland L., Jones R.H.* Origin and development of phosphate minerals in metamorphosed LL chondrites // 42nd lunar and planetary science conference, 2011. Abstract #2523.
7. *Horz F., Cintala M.J., See T.H., Le L.* Shock melting of ordinary chondrite powders and implications for asteroidal regoliths // Meteoritics & Planetary Science. 2005. V. 40, № 9/10. P. 1329–1346.
8. *Hutson M., Ruzicka A., Brown R.* A pyroxene-enriched shock melt dike in the buck mountains 005 (L6) chondrite // 44th lunar and planetary science conference, 2013. Abstract #1186. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/1186.pdf>
9. *Lewis J.A., Jones R.H.* Phosphate Mineralogy of Petrologic Type 4–6 L Ordinary Chondrites // 44th lunar and planetary science conference, 2013. Abstract #2722. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/2722.pdf>
10. Russia meteor not linked to asteroid Flyby, NASA, 2013. http://www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/news/asteroid20130215.html
11. *Sasso M.R., Macke R.J., Boesenberg J.S. et al.* Incompletely compacted equilibrated ordinary chondrites // Meteoritics & Planetary Science. 2009. V. 44, № 11. P. 1743–1753.
12. *Sun S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Soc. Special Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
13. *Tomeoka K., Yamahana Y., Sekine T.* Experimental shock metamorphism of the Murchison CM carbonaceous chondrite // Geochim. Cosmochim. Acta. 1999. V. 63, Is. 21. P. 3683–3703.
14. *Tomkins A.G., Weinberg R.F., Schaefer B.F., Langendam A.* Disequilibrium melting and melt migration driven by impacts: Implications for rapid planetesimal core formation // Geochim. Cosmochim. Acta. 2013. V. 100. P. 41–59.
15. *Wasson J.T., Kallemeyn G.W.* Composition of Chondrites // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1988. P. 535–544.
16. *Weisberg M.K., McCoy T.J., Krot A.N.* Systematics and Evaluation of Meteorite Classification // Meteorites and the Early Solar System II / D.S. Lauretta and H.Y. McSween Jr. (eds.) Tucson: University of Arizona Press, 2006. P. 19–52.

Рецензент В.В. Мурзин

Structure, the mineralogical and geochemical composition of the meteorite “Chelyabinsk”

S. V. Berzin, Yu. V. Erokhin, K. S. Ivanov, V. V. Khiller

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

Fragments of the meteorite consist of the chondrules (25–35%), the matrix (65–75%), and contain no more than 3–4% of iron-nickel intermetallics and sulfides. The meteorite involves chondrite and belongs to petrological type LL5. Meteorite fragments have higher contents of Na, U, Ag, and lower contents of Cr, Mn, Ni, Zn, Cs, compared with ordinary chondrites. The meteorite is composed of olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase, chromite, intermetallics of iron and nickel, sulfides, Cl-apatite and glass, which has feldspar composition. During high-temperature recrystallization of meteorite matrix segregation of sulphides and intermetallics in linear zones, interleaved with silicates areas, was occurred. In black meteorite fragments shock veins and sulphide branching microveins, which formed by the three stages of impact effects, accompanied by a full or partial melting of meteoritic material, is observed. In fragments of gray chondrite one stage of impact, leading to the formation of black veins, is observed. Surfaces of troilite grains in gray chondrite are oxidized, that apparently occurred during interaction with water in extraterrestrial environments. About 2–3% of chondrite account for the pores, formed by accretion of solid fragments of the meteorite. Plagioclase, clinopyroxene and olivine have complete crystalline facet, which located freely in the pores. It is indicates that undifferentiated entities, which later became the chondrules and some minerals, which are the products of differentiation silicate substance, were captured in the pores during their formation, in the parental environment of chondrites.

Key words: *Ural, meteorite “Chelyabinsk”, chondrite, mineralogy, geochemistry. shock veins, sulfide micro veins, porous space.*