

ПЕТРОГРАФИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И СТРОЕНИЕ МЕТЕОРИТА “ЧЕЛЯБИНСК”

© 2013 г. В. Н. Анфилов, Е. В. Белогуб, И. А. Блинов, В. Е. Еремяшев, Л. Я. Кабанова,
С. М. Лебедева, Г. Ф. Лонцакова, П. В. Хворов

*Институт минералогии УрО РАН
456317, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник
E-mail: anfilogov@mineralogy.ru*

Поступила в редакцию 04.04.2013 г.

В статье излагаются предварительные результаты изучения обломков метеорита “Челябинск”. Слабо-нарушенные обломки представлены агрегатом хондр различного строения и состава, порфиридных кристаллов оливина и пироксена и тонко- до криптозернистой основной массой. Поверхность обломков покрыта черным стекловатым веществом с порами и каплевидными включениями сульфидов и металлов. Часть обломков содержит черные прожилки стекловатой структуры с просечками и каплевидными включениями сульфидов и никелистого железа. Химический состав: (мас. %): SiO_2 – 39.73, TiO_2 – 0.13, Al_2O_3 – 2.09, Fe_2O_3 – 4.34, FeO – 25.14, MnO – 0.36, MgO – 24.89, CaO – 1.80, Na_2O – 1.05, K_2O – 0.18, H_2O < 0.10, P_2O_5 – 0.24, сумма – 99.95. Цветные металлы (г/т): Ni – 13200, Co – 618, Cr – 492, Cu – 137, Zn – 65, Li – 8.3. Средний минеральный состав, (мас. %): рентгеноаморфная фаза – 35, форстерит железистый – 37, гиперстен – 11, клиногиперстен – 2, альбит – 8, троилит – 4, железо никелистое – 3, менее 1%: апатит, ильменит, медь, никель, сульфиды никеля, хром-магнетит. Химический состав оливина, пироксенов, плагиоклаза, троилита и хромита выдержан. Содержания никеля в железе широко варьируют.

Ключевые слова: *метеорит “Челябинск”, железистый форстерит, железистый энстатит, железистый клиноэнстатит, альбит, троилит, никелистое железо, медь, никель, хлор-apatит, хромит, ильменит, хром-магнетит, хизлеудит.*

Изложенные в статье данные о минеральном составе и структуре обломков метеорита “Челябинск”, упавшего 15.02.2013 г., получены в Институте минералогии УрО РАН, Южно-Уральском центре коллективного пользования по исследованию минерального сырья (г. Миасс). Обломки для изучения отобраны в двух районах: на льду оз. Чебаркуль (предоставлены С.В. Кожевниковым) и на площади между поселками Депутатский и Березняки Еткульского района. Обломки из Еткульского района переданы корреспондентом ОТВ И. Коробейниковой, коллекционером С. Епанчинцевым, С. Колисниченко (Челябинск), А. Цыпленковым (г. Златоуст), а также отобраны сотрудниками Института минералогии УрО РАН М. Анкушевым, В. Анфиловым, Д. Артемьевым, Р. Аюповым, Е. Белогуб, А. Гладковым, Т. Ивановой, О. Королевой, В. Масленниковым, П. Хворовым, А. Юминовым и сотрудниками Естественно-научного музея Ильменского государственного заповедника Т. Нишанбаевым и М. Рассомахиным. Всего коллекция включает около 200 обломков массой от 1 до 79.8 г.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

По определению ГЕОХИ РАН, метеорит “Челябинск” относится к обыкновенным хондритам типа

LL5S4WO. Строение и минеральный состав обломков изучены с использованием следующих методов:

- оптическая микроскопия: Е.В. Белогуб (оптика отраженного света, 22 аншлифа); Л.Я. Кабанова (петрографическое описание шлифов, 6 шлифов);
- сканирующая электронная микроскопия, микроскоп VEGA3 TESCAN (4 образца), И.А. Блинов;
- количественный рентгеноструктурный анализ методом Ритвельда (Shimadzu XRD 6000, Cu-излучение с монохроматором, программный пакет SIROQUANT, для определения содержания рентгеноаморфной фазы использована добавка кристаллического вещества), анализ выполнен для усредненной пробы массой около 150 г, полученной дроблением обломков массой 7–18 г, П.В. Хворов;
- термогравиметрический анализ (дериватограф Q-1500), П.В. Хворов;
- спектроскопия комбинационного рассеяния на рамановском спектрометре Horiba Jobin Yvon HR 320, оборудованным стандартным He-Ne лазером (Pmax=20мВт, $\lambda = 632.8$ нм, красный цвет), С.М. Лебедева.

Химический состав усредненного материала получен классическим методом “мокрой” химии М.Н. Маляренко и Т.В. Семеновой. Содержания малых элементов определены методами атомно-

адсорбционного анализа на приборе Perkin-Elmer 3110 в пламени ацетилен-воздух Г.Ф. Лонцаковой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Строение обломков. Все изученные обломки метеорита имеют зональное строение (рис. 1, 2). Центральная часть условно “свежих” обломков представлена светло-серой зернистой массой с включениями троилита и никелистого железа, иногда с просечками черного “стекловатого” материала (около 70% имеющихся в распоряжении ИМин УрО РАН обломков) (рис. 1а). Иногда обломки “свежего” хондрита заключены в цемент из черного “стекловатого” материала и представляют собой брекчию (10%) (рис. 1б). Около 20% обломков, черного до темно-серого цвета на сколе, состоят из измененного (оплавленного) хондрита. Поверхность всех обломков оплавлена и покрыта тонкой коркой твердого черного, иногда мелкопористого “стекло-

ватого” вещества (рис. 1в, г). Здесь и далее под “стекловатым” подразумевается оптически изотропное или слабо-просвечивающее, преимущественно однородное на уровне разрешения оптической микроскопии вещество, рамановские спектры которого, тем не менее, свидетельствуют о его кристаллической природе. В центральной части крупных и средних обломков (до 1.5 см) сохраняются типичные для метеоритов массивные или брекчиевидные текстуры и хондры размером до 0.8 мм.

В шлифах свежие обломки метеорита напоминают интенсивно катаклазированный неравномерно-зернистый перидотит, т.е. местами метеорит сопоставим с полнокристаллической породой гипидиоморфнозернистой структуры. Участками хондры и порфириовидные кристаллы оливина и пироксена выделяются на фоне слабо раскристаллизованной массы. Хондры обычно не имеют резких границ с вмещающей матрицей, как это свойственно типичным хондритам. Межхондровый матрикс сло-

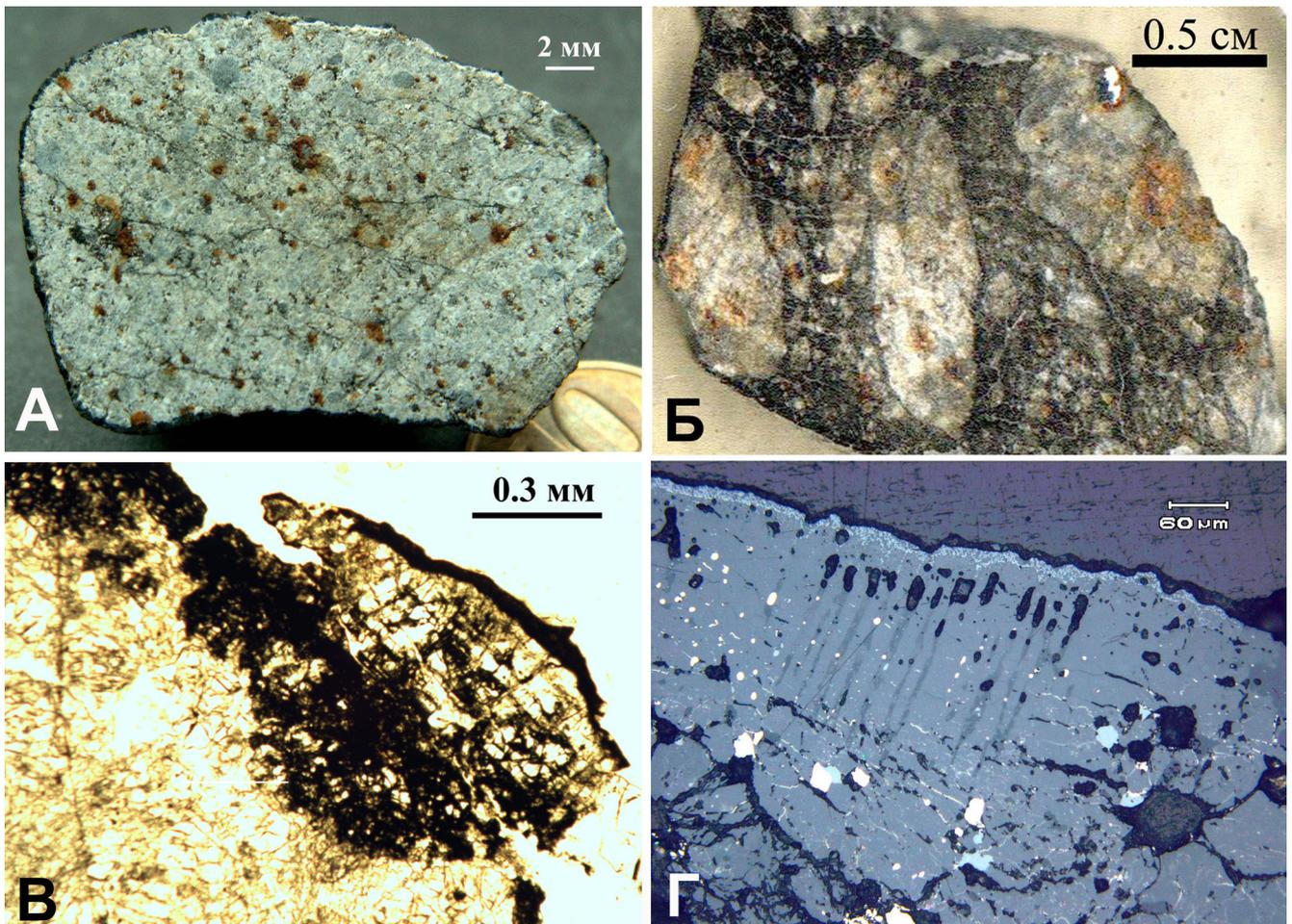


Рис. 1. Строение обломков метеорита.

а – свежий хондрит на спиле, б – агломеративная структура оплавленного обломка на спиле, в – “стекловатая” корка с раскристаллизованной промежуточной зоной (проходящий свет), г – “стекловатая” корка с порами на продолжении агрегатов альбита и поверхностной каймой с хром-магнетитом (отраженный свет).

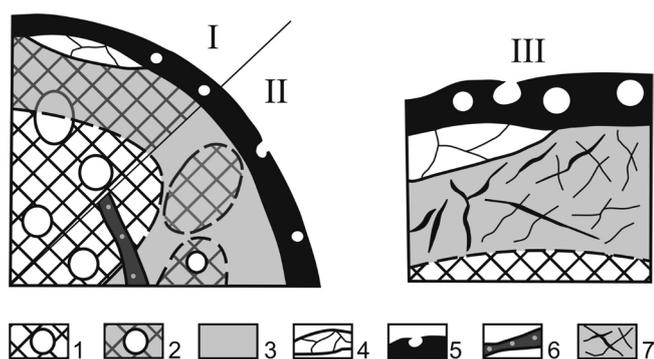


Рис. 2. Обобщенная схема строения обломков метеорита.

1 – брекчированный “свежий” хондрит; 2 – оплавленный, частично оптически изотропный хондрит с реликтовыми структурами; 3 – оплавленный, частично оптически изотропный хондрит без сохранения реликтовых структур; 4 – продукты раскристаллизации силикатного расплава; 5 – поверхностная “стекловатая” корка с порами и скелетными кристаллами хром-магнетита; 6 – прожилки гомогенизированного силикатного “стекла” с каплевидными включениями троилита и никелистого железа; 7 – оптически изотропный силикатный агрегат с просечками троилита. Римскими цифрами обозначены: I – **свежий хондрит**, II – **значительно измененный хондрит с фрагментами “свежего”**, III – **деталь строения поверхностной корки.**

жен пироксен-оливиновым мелко- до криптозернистого агрегатом или буровато-серым, слабо раскристаллизованным веществом. Содержание хондр составляет от 20 до 40 об. %. Свежие обломки, как правило, сильно трещиноваты.

Хондры имеют овально-округлую форму, их размер достигает 1 мм. Встречаются хондры оливинового, пироксен-оливинового и пироксенового состава. Оливиновые хондры имеют балочное или колосниковое строение и, как правило, сложены одним одновременно или волнисто гаснущим скелетным кристаллом оливина (рис. 3б). Интерстиции заполнены криптокристаллическим плагиоклазом или агрегатом плагиоклаза и пироксена. Включения рудных минералов в хондрах редкие и очень мелкие. Пироксен-оливиновые хондры имеют балочное, эксцентрично-лучистое и мелкозернистое строение. Сложены они в равной степени оливином и пироксеном, в интерстициях может присутствовать плагиоклаз (рис. 3б). Встречаются хондры сложного строения: в центре – скопления буроватого пылеватого материала с мелкими редкими зернами оливина и пироксена размером менее 0.001 мм, кайма состоит из кристаллов оливина, растущих перпендикулярно к его границе (рис. 3в). Пироксеновые хондры обычно представлены лучистыми или радиально-лучистыми агрегатами со смещенным центром и различными размерами составляющих их кристаллов от первых десятых до первых сотых долей миллиметра по удлинению, вплоть до образования волокнистых структур.

Межхондровый матрикс неравномернoзернистый, участками гипидиоморфнозернистый, часто содержит порфиридные кристаллы оливина (рис. 3г), пироксена (рис. 3д). Наблюдаются признаки пластических деформаций, выраженные в волнистом угасании и искривлении кристаллов (рис. 3е).

Брекчированные и оплавленные обломки под микроскопом имеют агломератовую или брекчиевую текстуру. Цементирующая масса базального типа представлена криптозернистым агрегатом оливина, пироксена, изотропного вещества и рудных минералов, которые встречаются как в виде ксеноморфных выделений, так и тонких просечек. Обломочный материал представлен хондрами, кристаллами и обломками зерен оливина и пироксена, комковатыми скоплениями этих минералов. Количество соотношение хондр и межхондрового матрикса в обломках примерно соответствует наблюдаемому в свежих обломках. Обломки часто несут следы пластических и хрупких деформаций.

Следы термического воздействия на вещество метеорита. В хондрите, подвергнутом термическому воздействию, первичные структуры в той или иной степени нарушены. В незначительно измененных участках зерна оливина в хондрах и матриксе трещиноваты. Трещины залечены троилитом, иногда с включениями никелистого железа (рис. 4а). Альбит и пироксен подвержены растрескиванию в меньшей степени. Типично сохранение реликтов оливина хондр с многочисленными поперечными просечками троилита и превращение интерстициальной массы в микрокристаллический оптически изотропный пироксен-альбитовый агрегат с мелкими выделениями троилита, железа, хромита.

По мере приближения к поверхности обломка или к трещине, заполненной черным “стекловатым” материалом, степень изменений увеличивается. Структурный рисунок оплавленных участков обусловлен сочетанием угловатых зерен пироксенового и оливинового состава с округлыми, реже интерстициальными включениями альбита (рис. 4б). Такие участки часто оптически изотропны. Границы зерен и трещины в них заполнены троилитом. Хромит сохраняется в виде реликтов. Растрескивание и оптическая изотропизация оливина и пироксена развиты неравномерно и наблюдаются не во всех обломках. В оливине и гиперстене из измененных участков повышено содержание железа, вероятно, из-за включений эмульсии металла и троилита (табл. 1, 2). Отсутствие каплевидных выделений сульфидов и металла в зернах свидетельствует о том, что температуры не достигали параметров, необходимых для смешения силикатной и сульфидно-металлической составляющих метеорита и находились вблизи температуры плавления пироксена и оливина.

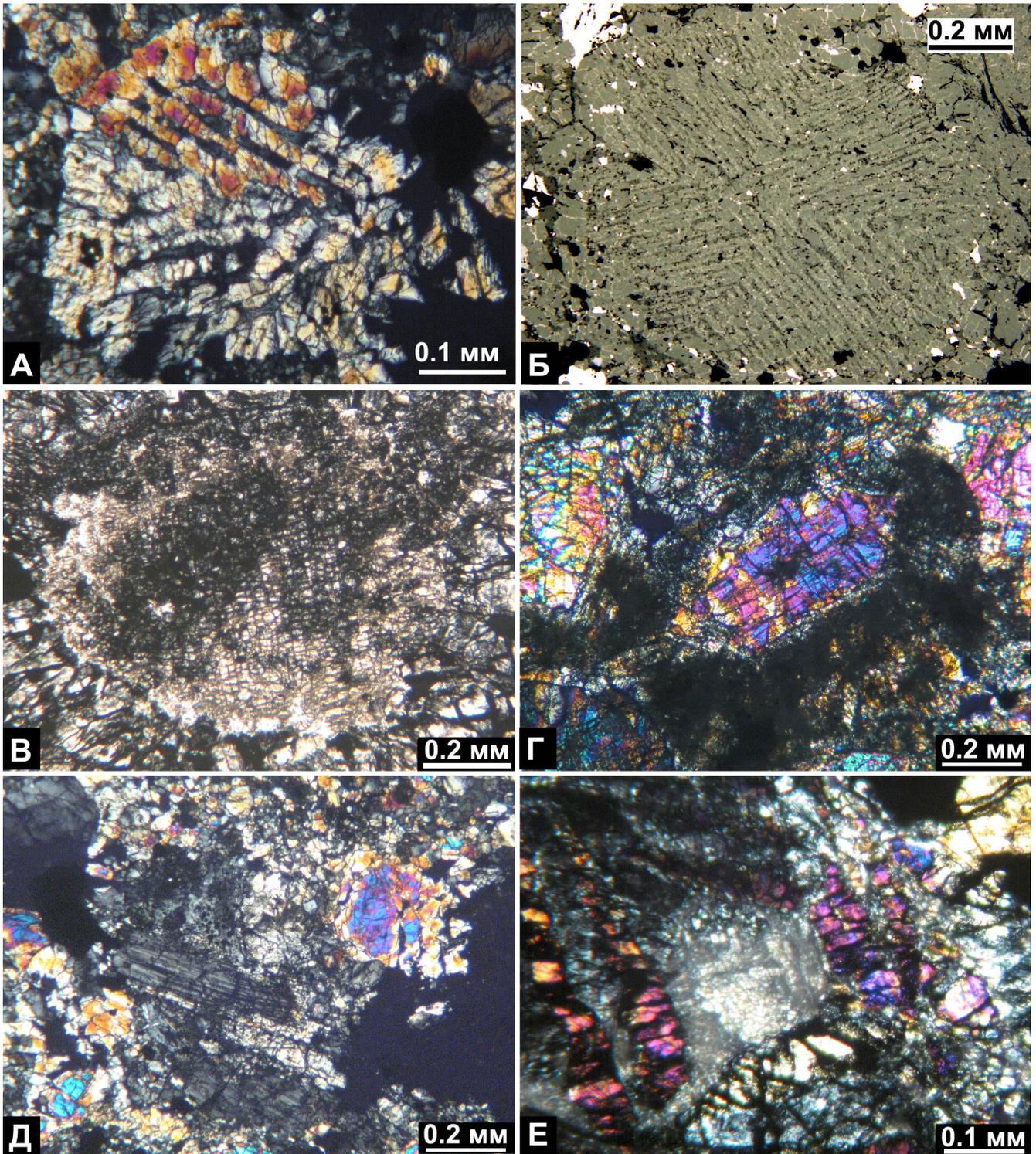


Рис. 3. Строение свежего хондрита.

а – оливиновая балочная хондра, б – оливин-пироксеновая хондра, в – пироксеновая хондра с криптозернистым ядром и тонкозернистой каймой, г – идиоморфный кристалл оливина в криптоморфнозернистой массе, д – кристаллы полисинтетически сдвойнированного пироксена в оливин-пироксеновом гипидиоморфнозернистом агрегате, е – искривленный скелетный кристалл оливина из хондры с тонкозернистым плагиоклаз-пироксеновым агрегатом в интерстициях.

Прожилки черного “стекловатого” материала при микроскопическом изучении обнаруживают

как гомогенное стекловатое (рис. 4в), так и негомогенное строение, с реликтами структур матриц-

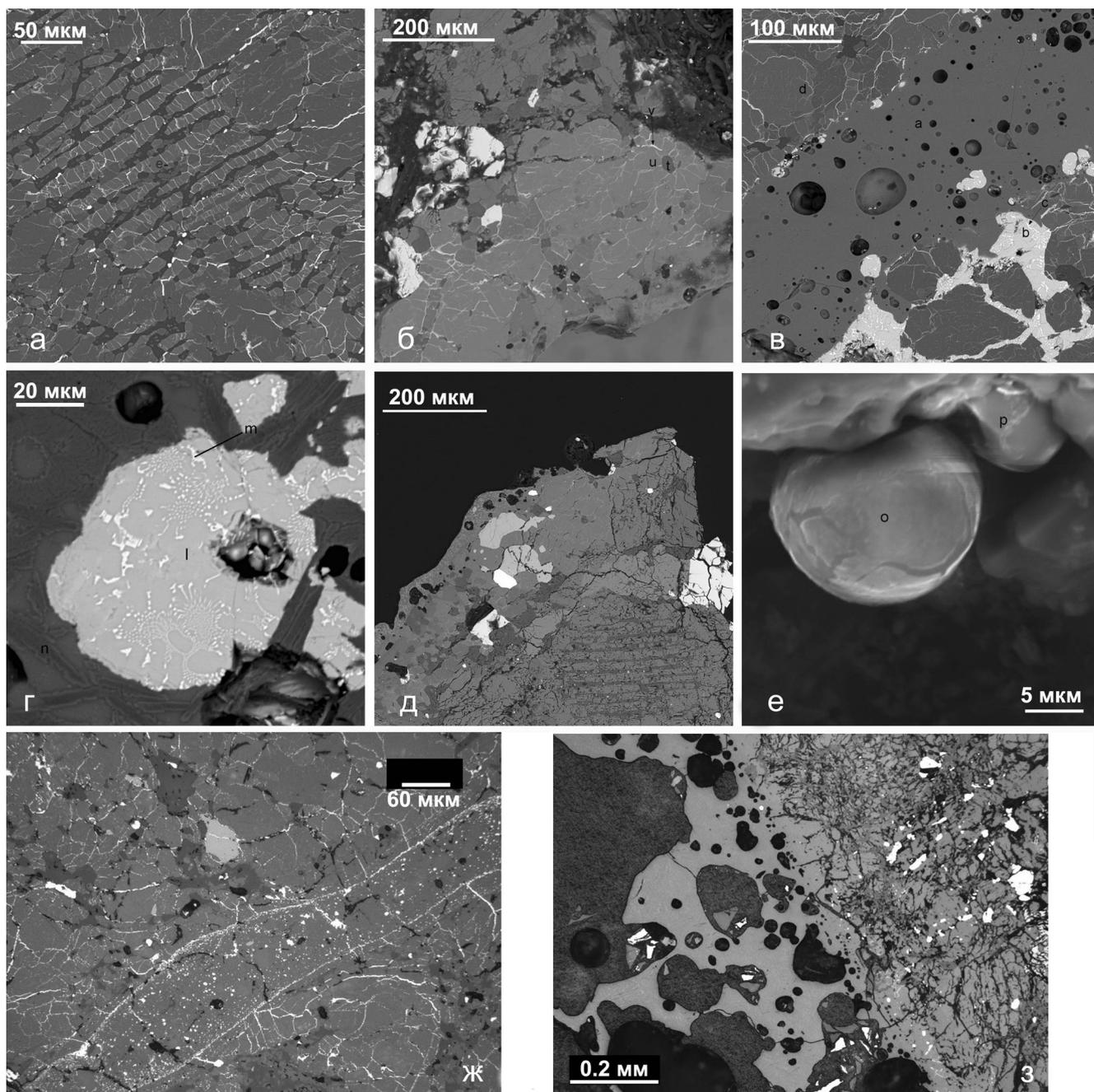


Рис. 4. Структуры, возникшие из-за термического воздействия.

а – “измененная” хондра с трещиноватым оливином, просечками троилита и пироксен-альбитовыми интерстициями (е – пироксен); б – неомогенное “стекловатое” вещество, образовавшееся при изотропизации оливина (u), альбита (t) и пироксена, у – троилит; в – прожилок “стекловатого” материала ультраосновного состава (точка а соответствует анализу 3 в табл. 4) в оплавленном хондрите : (d – оливин, b – троилит, c – никелистое железо); г – троилит (l) с графическими включениями Fe (m) и микро-спинифекс-структуры в силикатной матрице; д – зональная “стекловатая” корка, контактирующая со слабоизмененной оливиновой хондрой; е – сферы стекла состава Na-K-Ca-Mg-Si-Cl-S (o) и кристалл пироксена (p) в поре; ж – прожилок силикатного “стекловатого” вещества в оплавленном гетерогенном агрегате силикатов с каплями и просечками троилита и реликтом хромита; з – “стекловатая” поверхностная корка с порами на брекчированном хондрите (отраженный свет); а-е – фото в отраженных электронах, (СЭМ), ж, з – фото в отраженном свете.

са (рис. 4ж). Прожилки содержат многочисленные округлые включения троилита и никелистого железа, часто находящихся в графических срастани-

ях (рис. 4г), а также поры. Иногда в прожилках наблюдается раскристаллизация стекловатого материала с образованием микроструктур, подобных

Таблица 1. Состав оливина (мас. %) метеорита “Челябинск”

№ спектра	SiO ₂	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	№ п.п.	MnO	FeO	Сумма	Формула
13071b	37.83	34.50	н.о.	н.о.	1	0.54	27.11	99.98	(Mg _{1.37} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13071m	36.68	34.75	н.о.	н.о.	2	0.51	27.17	99.11	(Mg _{1.39} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13071n	37.16	34.61	н.о.	0.16	3	0.68	26.64	99.25	(Mg _{1.39} Fe _{0.60} Mn _{0.02}) _{2.00} (SiO ₄)
13071u	37.14	34.31	н.о.	н.о.	4	0.42	28.14	100.01	(Mg _{1.37} Fe _{0.63} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13072d	37.47	34.99	н.о.	н.о.	5	0.66	26.88	100.00	(Mg _{1.39} Fe _{0.60} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13072g	37.38	35.31	н.о.	н.о.	6	0.56	26.75	100.00	(Mg _{1.40} Fe _{0.59} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13072l	35.24	36.14	н.о.	н.о.	7	0.6	27.2	99.18	(Mg _{1.44} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13072m'	35.75	36.86	н.о.	н.о.	8	0.52	27.11	100.24	(Mg _{1.45} Fe _{0.60} Mn _{0.01}) _{2.05} (SiO ₄)
13072p'	35.74	36.37	н.о.	н.о.	9	0.46	27.16	99.73	
13072q'	35.59	36.75	н.о.	н.о.	10	0.5	26.58	99.42	(Mg _{1.45} Fe _{0.59} Mn _{0.01}) _{2.05} (SiO ₄)
13072r'	38.17	41.88	0.1	0.19	11	0.3	18.72	99.36	
13080i	37.23	35.19	н.о.	н.о.	12	0.62	26.96	100.00	(Mg _{1.40} Fe _{0.60} Mn _{0.01}) _{2.01} (SiO ₄)
13080j	37.06	34.96	н.о.	н.о.	13	0.48	27.5	100.00	(Mg _{1.39} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{2.01} (SiO ₄)
13080q	37.32	34.85	н.о.	н.о.	14	0.6	27.24	100.01	(Mg _{1.38} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13080e'	37.41	34.92	н.о.	н.о.	15	0.51	27.16	100.00	(Mg _{1.39} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{2.01} (SiO ₄)
13080o'	37.61	35.44	н.о.	н.о.	16	0.54	26.4	99.99	(Mg _{1.40} Fe _{0.59} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13080t'	37.66	35.49	н.о.	н.о.	17	0.57	26.28	100.00	(Mg _{1.40} Fe _{0.58} Mn _{0.01}) _{1.99} (SiO ₄)
13080y'	37.35	35.2	н.о.	н.о.	18	0.44	27.01	100.00	(Mg _{1.40} Fe _{0.60} Mn _{0.01}) _{2.01} (SiO ₄)
13080h'	37.77	36.16	н.о.	0.4	19	0.52	25.16	100.01	(Mg _{1.43} Fe _{0.56} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13089b	38.23	34.49	н.о.	н.о.	20	0.52	26.75	99.99	(Mg _{1.37} Fe _{0.60} Mn _{0.01}) _{1.98} (Si _{1.02} O ₄)
13089f	37.83	35.02	н.о.	н.о.	21	0.52	26.63	100.00	(Mg _{1.39} Fe _{0.59} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13091a	38.17	34.13	н.о.	н.о.	22	0.55	27.15	100.00	(Mg _{1.36} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{1.98} (SiO ₄)
13091b	37.68	34.50	н.о.	н.о.	23	0.58	27.24	100.00	(Mg _{1.37} Fe _{0.61} Mn _{0.01}) _{1.99} (SiO ₄)
13091c	37.75	34.76	н.о.	н.о.	24	0.46	27.03	100.00	(Mg _{1.38} Fe _{0.60} Mn _{0.01}) _{1.99} (SiO ₄)
13091i	37.17	34.04	н.о.	н.о.	25	0.49	27.68	99.38	(Mg _{1.37} Fe _{0.62} Mn _{0.01}) _{2.00} (SiO ₄)
13091p	38.92	34.6	н.о.	н.о.	26	0.53	25.95	100.00	(Mg _{1.37} Fe _{0.58} Mn _{0.01}) _{1.96} (Si _{1.04} O ₄)
13091t	38.54	34.36	н.о.	н.о.	27	0.54	26.56	100.00	(Mg _{1.37} Fe _{0.59} Mn _{0.01}) _{1.97} (Si _{1.03} O ₄)

Примечание: спектры 13071, 13080, 13089, 13091 – обломки из р-на п. Депутатского, 13072 – обломок из Чебаркуля. 13071, 13089 и 13091 относительно свежие, 13072 – значительно оплавленный, 13080 – агломерат свежих кусочков в оплавленном материале. Формулы рассчитаны на 3 катиона. Анализы 9 и 11 получены с оплавленных участков, на формулу оливина не рассчитываются.

спинифекс-структурам (рис. 4г). Форма включений сульфидов и металла указывает на начальное гомогенизированное состояние расплава и его ликвация при образовании прожилков.

Внешняя зона обломков мощностью до 0.7 мм представлена черным изотропным “стекловатым” веществом, содержащим многочисленные округлые выделения троилита с эвтектоидными вросками никелистого железа, редко – сульфидов и металлического никеля, а также поры (рис. 4д, з). Часто в этой зоне наблюдается раскристаллизация оливина из “стекла” с формированием мелкозернистых масс зональных кристаллов с высокомагнезиальным ядром и более железистой оторочкой. Обычно “стекловатая” корка зональна: зона черного непрозрачного изотропного агрегата, аналогичная описанным выше оплавленным участкам, сменяется зоной тонкокристаллического оливина и/или пироксена и у самой поверхности вновь сменяется черным непрозрачным “стеклом” (рис. 1в). Поверхностная зона мощностью 20–50 мкм развита фрагментарно, содержит реликты хромита, скелетные кристаллы хром-магнетита и поры, стенки которых инкрустированы скелетными кристалликами

хром-магнетита, оливина, пироксена, каплями силикатного стекла сложного состава, часто содержащего хлор (рис. 4е). В редких обломках в этой зоне присутствует пористый троилит.

Химический и минеральный состав. Химический состав метеорита (мас. %): SiO₂ – 39.73, TiO₂ – 0.13, Al₂O₃ – 2.09, Fe₂O₃ – 4.34, FeO – 25.14, MnO – 0.36, MgO – 24.89, CaO – 1.80, Na₂O – 1.05, K₂O – 0.18, H₂O – <0.10, P₂O₅ – 0.24, сумма – 99.95. Содержания цветных металлов (г/т): Co – 618, Cr – 492, Cu – 137, Zn – 65, Li – 8.3. Содержания никеля составили 1.32 мас. %.

Усредненный минеральный состав метеорита, определенный рентгеноструктурным методом для пробы массой 150 г (мас. %): рентгеноаморфная фаза – 35, форстерит железистый – 37, гиперстен – 11, клиногиперстен – 2, альбит – 8, троилит – 4, железо никелистое – 3.

По данным термогравиметрического анализа, суммарное количество троилита и никелистого железа составляет около 6.5 мас. %, что хорошо согласуется с данными рентгеноструктурного анализа.

Оливин входит в состав хондр и матрикса. В оливиновых и пироксен-оливиновых хондрах оливин

Таблица 2. Состав пироксена (мас. %) метеорита "Челябинск"

№ спектра	SiO ₂	MgO	CaO	MnO	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Сумма	Формула	*
1	54.39	27.15	0.74	0.45	16.99	0.20	н.о.	н.о.	н.о.	99.92	(Mg _{1.47} Fe _{0.51} Ca _{0.03} Mn _{0.01}) _{2.00} (Si _{1.97} Fe _{0.03}) _{2.00} O ₆	I
2	55.21	27.19	0.54	0.63	16.43	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.00	(Mg _{1.47} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.02}) _{2.01} (Si _{2.00} O _{6.00})	II
3	52.88	29.06	0.75	0.60	16.55	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.84	(Mg _{1.56} Fe _{0.39} Ca _{0.03} Mn _{0.02}) _{2.00} (Si _{1.90} Fe _{0.10}) _{2.00} O ₆	II
4	55.10	26.96	0.71	0.52	16.54	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.83	(Mg _{1.46} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.03}) _{2.00} (Si _{2.00} O _{6.00})	IV
5	54.78	26.86	0.82	0.57	16.33	н.о.	н.о.	0.29	н.о.	99.8	(Mg _{1.45} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.03}) _{2.00} (Si _{1.99} O _{6.00})	I
6	55.60	27.19	1.03	0.63	16.21	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.66	(Mg _{1.46} Fe _{0.49} Mn _{0.02} Ca _{0.04}) _{2.00} (Si _{2.00} O _{6.00})	I
7	54.86	27.43	0.58	0.57	16.24	н.о.	н.о.	0.15	н.о.	99.83	(Mg _{1.48} Fe _{0.49} Mn _{0.02} Ca _{0.02}) _{2.01} (Si _{1.99} O _{6.00})	III
8	55.17	26.99	0.61	0.59	16.2	н.о.	н.о.	0.17	н.о.	99.73	(Mg _{1.46} Fe _{0.49} Mn _{0.02} Ca _{0.02}) _{1.99} (Si _{2.00} O _{6.00})	III
9	55.15	27.16	0.71	0.58	16.17	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.77	(Mg _{1.47} Fe _{0.49} Mn _{0.02} Ca _{0.03}) _{2.00} (Si _{2.00} O _{6.00})	II
10	54.88	26.81	0.84	0.59	16.24	н.о.	н.о.	0.36	н.о.	99.72	(Mg _{1.45} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.03}) _{2.00} (Si _{1.99} O _{6.00})	IV
11	53.84	15.89	22.08	н.о.	6.04	н.о.	0.49	0.71	0.39	99.44	(Ca _{0.88} Mg _{0.88} Fe _{0.19} Na _{0.01} Ti _{0.01} Cr _{0.01}) _{1.98} (Si _{2.01} O _{6.00})	V
12	53.31	15.65	22.73	н.о.	5.72	н.о.	0.55	0.47	0.87	99.30	(Ca _{0.91} Mg _{0.87} Fe _{0.18} Na _{0.01} Ti _{0.01} Cr _{0.01}) _{2.00} (Si _{1.99} O _{6.00})	V
13	55.92	26.36	0.88	0.52	16.33	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.01	(Mg _{1.43} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.03}) _{1.97} (Si _{2.03} O _{6.00})	I
14	56.02	26.67	0.66	0.44	16.21	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.00	(Mg _{1.44} Fe _{0.51} Mn _{0.01} Ca _{0.03}) _{1.97} (Si _{2.03} O _{6.00})	IV
15	55.14	26.82	0.61	0.64	16.80	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.01	(Mg _{1.45} Fe _{0.51} Mn _{0.02} Ca _{0.02}) _{2.00} (Si _{2.00} O _{6.00})	III
16	55.40	26.81	0.63	0.62	16.54	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.00	(Mg _{1.45} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.02}) _{2.00} (Si _{2.01} O _{6.00})	I
18	55.52	26.83	0.60	0.64	16.41	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.00	(Mg _{1.45} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.02}) _{1.99} (Si _{2.01} O _{6.00})	IV
19	55.18	26.61	0.69	0.63	16.22	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.33	(Mg _{1.45} Fe _{0.49} Mn _{0.02} Ca _{0.03}) _{1.99} (Si _{2.01} O _{6.00})	II
20	55.18	26.82	0.79	0.48	16.75	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.02	(Mg _{1.45} Fe _{0.51} Mn _{0.01} Ca _{0.03}) _{2.00} (Si _{2.00} O _{6.00})	IV
21	54.96	26.51	0.72	0.54	16.46	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.19	(Mg _{1.44} Fe _{0.51} Mn _{0.01} Ca _{0.03}) _{1.99} (Si _{2.01} O _{6.00})	IV
22	55.22	26.61	0.53	0.56	16.40	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99.32	(Mg _{1.43} Fe _{0.50} Mn _{0.02} Ca _{0.02}) _{1.99} (Si _{2.01} O _{6.00})	IV

Примечание: * – пироксены из: I – тонкозернистой межхондровой массы, II – оливиновых и пироксен-оливиновых балочных хондр, III – радиально-лучистых и мелкозернистых пироксеновых хондр, IV – гипидиоморфные порфиридные кристаллы, V – пироксены из оплавленной поверхности зоны. 15, 18, 21, 22 – пироксены с ко-сум погасанием. Формулы пересчитаны на 4 катона.

образует скелетные кристаллы, формирующие балочные и колосниковые структуры (рис. 5а, рис. 3а, б, г). Характеризуется высоким рельефом и двупреломлением, соответствующим эталонным. В существенно пироксеновых хондрах лучистого строения встречается в виде гипидиоморфных (рис. 5б) и скелетных кристаллов, графически срастающихся с пироксеном. В межхондровом матриксе образует мелкозернистые агрегаты совместно с пироксеном, иногда порфиридные кристаллы, каймы радиального строения вокруг включений троилита. Встречается в виде округлых включений размером до 10 мкм в троилите и никелистом железе. При раскристаллизации "стекла" формирует параллельные и лучистые сростки (микроспинифекс-структуры) вытянутых зональных кристаллов с более высокомагнезиальным ядром и железистой оторочкой или зернистый агрегат микрокристаллов (рис. 4г). Для оливина характерен выдержанный состав, соответствующий железистому форстериту (табл. 1).

Пироксен в свежих участках образует хондры радиально-лучистого строения (рис. 5б) и входит в состав оливин-пироксеновых балочных хондр (рис. 2б), где развивается в интерстициях оливина как самостоятельно, так и в виде тонких агрегатов с альбитом. В межхондровом матриксе пироксен образует порфиридные идиоморфные с восьмиугольными сечениями и гипидиоморфные кристаллы размером до 0.5 мм, часто с отчетливыми трещинами пересекающей спайности, а также тонкозернистые агрегаты с оливином и тонкие взаимные прорастания с альбитом. Оптические свойства свежих пироксенов значительно варьируют: двупреломление меняется от начала второго порядка до серого, тогда как оплавленные пироксены оптически изотропны. Характерна сильная дисперсия (нет полного погасания). Для пироксенов характерно преимущественно прямое погасание, в некоторых радиально-лучистых агрегатах погасание косое, с углом до 30°. Отмечены крупные полисинтетически сдвоникованные удлиненно-призматические кристаллы (0.7 мм), в которых двойники гаснут под углом 15° (рис. 3д). Химический состав пироксенов выдержан и соответствует железистому энстатиту (гиперстену) или моноклинному аналогу, в соответствии с принятой номенклатурой (табл. 2).

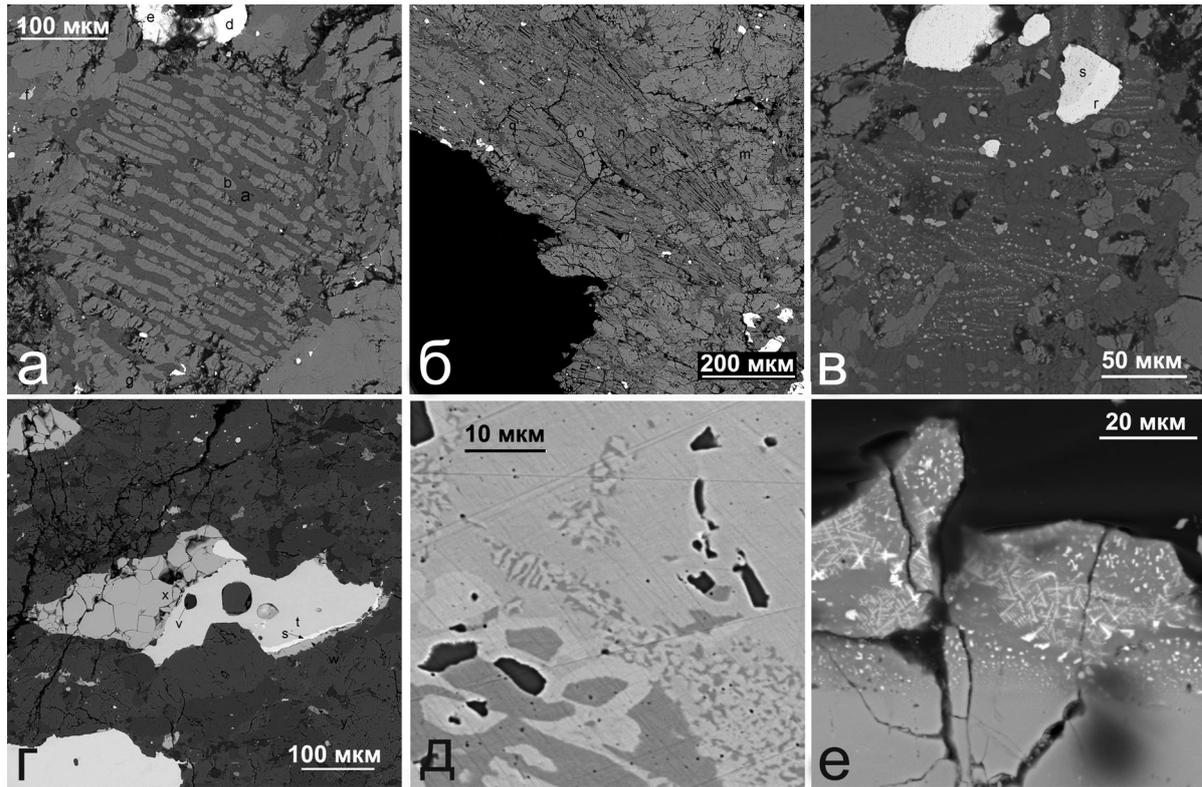


Рис. 5. Минералы метеорита “Челябинск”.

а – оливиновая хондра с альбитовым заполнением интерстиций а – плагиоклаз, b, g – оливин, с – пироксен, d – никелистое железо, e – троилит; б – лучистый сросток пироксена (m', n', p') с включениями оливина (o') и плагиоклаза (q'); в – плагиоклаз с включениями хромита (светло-серое) и пироксена (темно-серое) в межхондровом матрикесе, вверху – железо с различным содержанием никеля (s, r); г – сросток троилита (x), никелистого железа (t) и меди (s), v – альбит; д – графические структуры, образованные железом с различным содержанием никеля, темные включения – альбит; е – скелетные кристаллы хром-магнетита в поверхностной корке. Фото в отраженных электронах, СЭМ.

Таблица 3. Состав плагиоклазов и оптически изотропного вещества (мас. %) метеорита “Челябинск”

№	№ спектра	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	FeO	MgO	Сумма	Формула
1	13071a	65.10	21.55	10.47	1.08	0.94	0.61	н.о.	99.75	(Na _{0.89} K _{0.06} Ca _{0.04}) _{0.99} (Al _{1.12} Fe _{0.02} Si _{2.86}) _{4.00} O ₈
2	13071l	64.11	21.29	10.72	0.72	0.95	1.25	н.о.	99.04	(Na _{0.92} K _{0.04} Ca _{0.05}) _{1.01} (Al _{1.11} Fe _{0.05} Si _{2.84}) _{4.00} O ₈
3	13071q	64.41	22.88	10.11	0.58	1.48	0.45	н.о.	99.91	(Na _{0.86} K _{0.03} Ca _{0.07}) _{0.96} (Al _{1.19} Fe _{0.02} Si _{2.83}) _{4.04} O ₈
4	13071t	65.51	21.26	9.99	1.13	0.93	1.06	н.о.	99.88	(Na _{0.86} K _{0.06} Ca _{0.04}) _{0.96} (Al _{1.11} Fe _{0.04} Si _{2.89}) _{4.04} O ₈
5	13072e	64.48	21.24	10.49	0.63	0.88	1.76	0.53	99.48	(Na _{0.89} K _{0.02} Ca _{0.04} Mg _{0.03}) _{0.98} (Al _{1.10} Fe _{0.06} Si _{2.83}) _{4.01} O ₈
6	13072g'	63.22	22.16	12.99	0.17	0.95	0.8	н.о.	100.29	(Na _{1.08} Ca _{0.04}) _{1.12} (Al _{1.12} Fe _{0.03} Si _{2.72}) _{3.88} O ₈
7	13072n'	64.80	22.47	9.42	1.01	0.56	0.91	н.о.	99.17	(Na _{0.81} K _{0.03} Ca _{0.03}) _{0.87} (Al _{1.18} Fe _{0.03} Si _{2.89}) _{4.10} O ₈
8	13080h	66.15	21.43	10.18	0.71	0.99	0.54	н.о.	100.00	(Na _{0.87} K _{0.04} Ca _{0.05}) _{0.96} (Al _{1.11} Fe _{0.02} Si _{2.91}) _{4.04} O ₈
9	13080v	64.78	21.43	10.12	0.85	0.87	1.23	н.о.	99.28	(Na _{0.87} K _{0.05} Ca _{0.04}) _{0.96} (Al _{1.12} Fe _{0.05} Si _{2.87}) _{4.04} O ₈
10	13080a'	64.76	21	10.2	0.76	0.96	1.49	н.о.	99.17	(Na _{0.88} K _{0.06} Ca _{0.05}) _{0.99} (Al _{1.10} Fe _{0.06} Si _{2.88}) _{4.04} O ₈
11	13080f'	65.04	21.36	10.05	0.98	0.95	0.95	н.о.	99.33	(Na _{0.86} K _{0.06} Ca _{0.05}) _{0.97} (Al _{1.12} Fe _{0.04} Si _{2.88}) _{4.04} O ₈
12	13080p'	65.04	21.21	10.39	0.79	1.03	1.03	н.о.	99.49	(Na _{0.89} K _{0.04} Ca _{0.05}) _{0.98} (Al _{1.10} Fe _{0.04} Si _{2.87}) _{4.01} O ₈
13	13080q'	64.62	21.62	11.05	0.91	0.93	0.59	н.о.	99.72	(Na _{0.94} K _{0.05} Ca _{0.04}) _{1.03} (Al _{1.12} Fe _{0.02} Si _{2.83}) _{3.97} O ₈
14	13080s'	65.74	18.55	9.6	0.75	3.15	1.67	н.о.	99.46	(Na _{0.83} K _{0.04} Ca _{0.15}) _{1.02} (Al _{0.98} Fe _{0.06} Si _{2.94}) _{3.98} O ₈
15	13080u'	65.91	21.73	10.07	0.91	0.96	0.8	0.26	100.64	(Na _{0.85} K _{0.05} Ca _{0.04} Mg _{0.02}) _{0.96} (Al _{1.12} Fe _{0.03} Si _{2.88}) _{4.03} O ₈
16	13080w'	66.04	21.36	10.44	0.49	0.92	0.76	н.о.	100.01	(Na _{0.89} K _{0.03} Ca _{0.04}) _{0.96} (Al _{1.11} Fe _{0.03} Si _{2.90}) _{4.04} O ₈
17	13080a'	65.20	21.47	9.96	0.94	1.05	0.51	н.о.	99.13	(Na _{0.86} K _{0.05} Ca _{0.05}) _{0.96} (Al _{1.12} Fe _{0.02} Si _{2.90}) _{4.04} O ₈
18	13089a	66.68	21.79	9.60	0.86	0.97	0.48	н.о.	100.38	(Na _{0.82} K _{0.05} Ca _{0.05}) _{0.92} (Al _{1.13} Fe _{0.02} Si _{2.94}) _{4.08} O ₈
19	13089e	66.13	22.11	9.60	0.86	1.05	0.25	н.о.	100.00	(Na _{0.82} K _{0.05} Ca _{0.05}) _{0.92} (Al _{1.15} Fe _{0.01} Si _{2.92}) _{4.08} O ₈
20	13089k	68.28	19.37	8.79	0.8	0.98	1.78	н.о.	100.00	(Na _{0.76} K _{0.05} Ca _{0.05}) _{0.86} (Al _{1.02} Fe _{0.07} Si _{3.06}) _{4.14} O ₈
21	13091j	65.74	21.86	9.62	1.49	0.99	0.76	н.о.	100.46	(Na _{0.82} K _{0.08} Ca _{0.05}) _{0.95} (Al _{1.13} Fe _{0.03} Si _{2.89}) _{4.05} O ₈

Примечание. Анализы 3, 6, 7, 17 – плагиоклазы из оплавленной зоны (в т.ч. 6, 7 – значительно). Формулы пересчитаны на 3 катиона.

Таблица 4. Состав “стекловатого” вещества (мас. %) метеорита “Челябинск”

№ п.п.	№ спектра	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Сумма	*
1	13072г	39.46	н.о.	0.95	н.о.	42.48	0.27	н.о.	13.9	1.93	0.47	н.о.	н.о.	н.о.	98.99	I
2	13072w	42.22	н.о.	1.13	н.о.	42.9	0.4	0.38	10.71	1.8	0.4	н.о.	н.о.	н.о.	99.54	I
3	13072a	42.13	н.о.	2.17	0.54	25.05	2.02	н.о.	26.11	1.18	0.79	н.о.	н.о.	н.о.	99.2	II
4	13072j	39.29	н.о.	2.00	0.40	25.77	2.04	0.5	27.92	1.33	0.75	н.о.	н.о.	н.о.	99.25	II
5	13072k	46.71	0.28	5.52	0.19	3.74	9.66	0.51	30.67	0.12	2.05	н.о.	0.34	0.21	97.95	II
6	13080x'	43.93	н.о.	2.98	0.41	21.95	2.81	н.о.	26.13	0.56	1.49	0.1	н.о.	н.о.	100.36	I
7	13080g''	40.32	н.о.	1.08	0.24	39.4	1.01	н.о.	15.86	1.69	0.4	н.о.	н.о.	н.о.	100.00	I
8	13080j''	41.41	н.о.	0.54	0.13	45.6	0.29	н.о.	9.24	2.79	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100.00	I
9	13080k''	46.25	н.о.	3.78	н.о.	14.2	2.9	0.54	29.95	0.5	1.76	0.12	н.о.	н.о.	100.00	I
10	13091a'	38.02	н.о.	3.57	н.о.	13.36	14.42	0.43	18.2	н.о.	н.о.	н.о.	10.69	н.о.	98.69	III

Примечание. I – поверхностная корка со скелетными кристаллами хром-магнетита и порами, II – прожилки с порами и сульфидно-железистыми каплевидными включениями, III – прожилки в оплавленном апатите.

Среди продуктов раскристаллизации “стекловатой” корки встречаются гипидиоморфные зерна с более высокими цветами интерференции и косым погасанием, состав таких зерен соответствует диопсиду (табл. 2, ан. 11, 12).

Плаггиоклаз образует микрокристаллические агрегаты в интерстициях оливина и пироксена в хондрах и межхондровой массе (рис. 5а, в). Часто содержит тонкие включения пироксена и хромита. Оптически близок к изотропному. Также встречается в виде округлых включений, иногда совместных с оливином, в троилите и никелистом железе. По составу соответствует альбит-олигоклазу, характерна примесь калия и железа, незначительный избы-

ток алюминия в составе, возможно, связанный с погрешностями анализа (табл. 3). Примечательно, что плаггиоклазы из свежих и оплавленных участков не отличаются по составу. Однако при значительном изменении соотношение между основными элементами нарушается (табл. 3, ан. 6, 7), что свидетельствует о подвижности расплава.

“Стекловатое” вещество встречается в виде прожилков и поверхностной корки (рис. 4в–з). Оптически изотропно. Под электронным микроскопом при больших увеличениях в обратно-рассеянных электронах иногда видна микронеоднородность. Данные спектроскопии комбинационного рассеяния свидетельствуют об отсутствии стекла

Таблица 5. Состав троилита (1–16), никелистого пирротина (17) и хизлевудита (?) (18) (мас. %)

№ п.п.	№ спектра	S	Fe	Ni	Cu	Сумма	Формула	
1	13071e	35.86	63.91	н.о.	н.о.	99.77	Fe _{1.02} S _{1.00}	I
2	13071j	35.81	63.54	н.о.	н.о.	99.35	Fe _{1.01} S _{1.00}	I
3	13072b	35.2	61.58	3.22	н.о.	100.00	Fe _{1.00} Ni _{0.05} S _{1.00}	II
4	13072i	35.01	64.71	0.28	н.о.	100.00	Fe _{1.06} S _{1.00}	III
5	13072l	35.57	60.37	3.31	н.о.	99.25	Fe _{0.97} Ni _{0.05} S _{1.00}	II
6	13072a'	34.70	63.17	1.73	н.о.		Fe _{1.04} Ni _{0.03} S _{1.00}	II
7	13072j'	34.55	65.00	0.26	н.о.	99.81	Fe _{1.08} S _{1.00}	IV
8	13080d	36.57	63.43	н.о.	н.о.	100	Fe _{1.00} S _{1.00}	I
9	13080r	36.7	63.97	н.о.	н.о.	100.67	Fe _{1.00} S _{1.00}	I
10	13080w	36.13	62.07	н.о.	1.52	99.73	Fe _{0.99} Cu _{0.02} S _{1.00}	V
11	13080x	36.41	62.84	н.о.	н.о.	99.25	Fe _{0.99} S _{1.00}	I
12	13080h'	35.93	62.39	1.16	н.о.	99.49	Fe _{1.00} Ni _{0.02} S _{1.00}	II
13	13080m''	20.37	3.9	75.28	н.о.	99.55	тонкая смесь сульфида и металла	VI
14	13091l	36.74	63.26	н.о.	н.о.	100	Fe _{0.99} S _{1.00}	I
15	13091w	36.42	62.63	н.о.	н.о.	99.05	Fe _{0.99} S _{1.00}	I
16	13091z	6.05	64.25	29.08	н.о.	99.38	тонкая смесь сульфида и металла	V
17	13080i''	25.09	3.73	71.67	н.о.	100.45	Ni _{1.66} Fe _{0.09} S _{1.00}	VI
18	13091b'	38.28	43.36	18.42	н.о.	100.06	Fe _{0.65} Ni _{0.26} S _{1.00}	V

Примечание. 1 – из сростков с никелистым железом в свежих участках, 2 – каплевидные включения с графическими вросками железа в оплавленном плаггиоклазе и стекловатом веществе, 3 – включение в стекле в оплавленном апатите, 4 – кайма вокруг никелистого железа, 5 – контакт с медью, 6 – каплевидное включение в стекловатой корке с хром-магнетитом. Формулы пересчитаны на 1 атом серы.

Таблица 6. Состав никелистого железа (1–28) и самородного никеля (29) (мас. %) метеорита “Челябинск”

№ п.п.	№ спектра	Fe	Ni	Сумма	Формула	**
1	13071d	60.28	39.37	99.65	Fe _{0.62} Ni _{0.38}	I
2	13071g	73.51	26.85	100.36	Fe _{0.74} Ni _{0.26}	I
3	13071h	95.22	4.82	100.04	Fe _{0.95} Ni _{0.05}	I
4	13071k	71.11	28.82	99.93	Fe _{0.72} Ni _{0.28}	I
5	13071r	71.31	28.59	99.9	Fe _{0.72} Ni _{0.28}	I
6	13071s	95.95	3.65	99.61	Fe _{0.97} Ni _{0.03}	I
12	13072c	55.08	44.92	100	Fe _{0.56} Ni _{0.44}	II
7	13072h	73.63	26.37	100	Fe _{0.75} Ni _{0.25}	I
8	13072b'	95.59	3.47	99.06	Fe _{0.97} Ni _{0.03}	II
9	13072c'	71.66	28.18	99.84	Fe _{0.73} Ni _{0.27}	I
10	13072k'	93.39	5.95	99.34	Fe _{0.94} Ni _{0.06}	I
11	13072s'	89.8	10.01	99.81	Fe _{0.90} Ni _{0.10}	III
13	13080a	94.81	5.19	100	Fe _{0.95} Ni _{0.05}	II
14	13080b	61.84	38.16	100	Fe _{0.63} Ni _{0.37}	I
15	13080l	94.96	4.41	99.37	Fe _{0.96} Ni _{0.04}	I
16	13080m	96.41	2.83	99.24	Fe _{0.97} Ni _{0.03}	I
17	13080n	70.86	30.04	100.9	Fe _{0.71} Ni _{0.29}	I
18	13080o	50.83	49.23	100.06	Fe _{0.52} Ni _{0.48}	I
19	13080p	67	33.57	100.57	Fe _{0.68} Ni _{0.32}	I
20	13080t	93.81	5.37	99.19	Fe _{0.95} Ni _{0.05}	II
21	13080u	40.87	59.62	100.49	Fe _{0.42} Ni _{0.58}	I
22	13080c'	54.68	45.07	99.74	Fe _{0.56} Ni _{0.44}	II
23	13080d'	94.16	5.37	99.52	Fe _{0.95} Ni _{0.05}	I
24	13080i'	95.56	3.65	99.21	Fe _{0.96} Ni _{0.04}	II
25	13080j'	63.27	35.2	99.48	Fe _{0.65} Ni _{0.35}	I
26	13080k'	63.25	36.96	100.2	Fe _{0.64} Ni _{0.36}	I
27	13091m	48.14	52.29	100.44	Fe _{0.49} Ni _{0.51}	I
28	13091n	94.4	4.83	99.23	Fe _{0.95} Ni _{0.05}	I
29	13080l''	3.59	97.19	100.78	Ni _{0.96} Fe _{0.04}	III

Примечание. I – из сростков с троилитом из свежих участков, в одной ячейке объединены анализы, полученные для одного зерна; II – из сростков с медью и троилитом; III – из каплевидных включений в оплавленных участках. Формулы рассчитаны на 1 атом на формульную единицу.

Таблица 7. Состав самородной меди (мас. %)

№ п.п.	№ спектра	Cu	Fe	Ni	сумма	формула
1	13080c	95.50	3.30	1.21	100.00	Cu _{0.95} Fe _{0.04} Ni _{0.01}
2	13080s	93.32	4.27	2.12	100.61	Cu _{0.93} Fe _{0.05} Ni _{0.02}
3	13080z	95.95	2.39	1.32	99.66	Cu _{0.96} Fe _{0.03} Ni _{0.01}
4	13080g'	94.57	3.37	1.94	100.56	Cu _{0.94} Fe _{0.04} Ni _{0.02}

Примечание. Формулы рассчитаны на 1 атом на формульную единицу.

Таблица 8. Состав хромита (мас. %)

№ п.п.	№ спектра	Al ₂ O ₃	MgO	№ спектра	V ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO*	Сумма	Формула	Cr*
1	13071f	6.21	1.86	13071f	0.95	2.33	55.27	32.05	98.67	(Fe _{0.89} Mg _{0.10}) _{0.99} (Cr _{1.55} Al _{0.23} Fe _{0.11} Ti _{0.06} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.86
2	13071i	6.11	1.89	13071i	0.95	2.78	56.94	31.97	100.64	(Fe _{0.90} Mg _{0.10}) _{1.00} (Cr _{1.58} Al _{0.25} Fe _{0.09} Ti _{0.07} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.86
2	13072y	6.04	6.72	13072y	0.94	3.4	57.92	24.26	99.28	(Fe _{0.66} Mg _{0.34}) _{1.00} (Cr _{1.58} Al _{0.24} Ti _{0.09} Fe _{0.07} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.87
3	13072d'	6.26	1.86	13072d'	0.86	1.97	55.60	33.12	99.67	(Fe _{0.90} Mg _{0.10}) _{1.00} (Cr _{1.55} Al _{0.25} Fe _{0.12} Ti _{0.05} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.86
5	13072o'	5.93	2.38	13072o'	0.84	3.25	54.42	32.58	99.40	(Fe _{0.88} Mg _{0.12}) _{1.00} (Cr _{1.52} Al _{0.24} Fe _{0.13} Ti _{0.08} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.86
6	13080k	5.56	2.27	13080k	0.67	3.62	54.53	33.35	100.00	(Fe _{0.88} Mg _{0.12}) _{1.00} (Cr _{1.52} Al _{0.23} Fe _{0.15} Ti _{0.09} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.87
7	13080y	6.39	2.35	13080y	0.86	3.25	53.77	32.44	99.06	(Fe _{0.88} Mg _{0.12}) _{1.00} (Cr _{1.50} Al _{0.26} Fe _{0.13} Ti _{0.08} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.85
8	13080i'	6.22	1.97	13080i'	1.00	3.11	56.39	32.09	100.78	(Fe _{0.90} Mg _{0.10}) _{1.00} (Cr _{1.56} Al _{0.23} Fe _{0.09} Ti _{0.08} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.86
9	13080c''	6.98	2.62	13080c''	0.9	2.31	59.54	27.77	100.12	(Fe _{0.86} Mg _{0.13}) _{0.99} (Cr _{1.65} Al _{0.28} Ti _{0.06} V _{0.02}) _{2.01} O _{4.00}	0.85
10	13080d''	5.73	2.03	13080d''	0.98	3.26	56.09	31.91	100.00	(Fe _{0.90} Mg _{0.10}) _{1.00} (Cr _{1.56} Al _{0.23} Fe _{0.09} Ti _{0.08} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.87
11	13080e''	6.49	7.72	13080e''	0.89	1.75	60.50	22.33	99.68	(Fe _{0.62} Mg _{0.38}) _{1.00} (Cr _{1.63} Al _{0.23} Fe _{0.05} Ti _{0.04} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.86
12	13091v	5.43	2.54	13091v	0.94	3.77	56.14	31.85	100.67	(Fe _{0.87} Mg _{0.13}) _{1.00} (Cr _{1.55} Al _{0.23} Fe _{0.11} Ti _{0.10} V _{0.02}) _{2.00} O _{4.00}	0.88
13	13091x	9.49	3.38	13091x	0.27	2.17	54.09	29.63	99.03	(Fe _{0.83} Mg _{0.17}) _{1.00} (Cr _{1.48} Al _{0.38} Fe _{0.08} Ti _{0.06} V _{0.01}) _{2.00} O _{4.00}	0.80

Примечание. 2, 11 – зерна с розоватым оттенком из поверхностной корки; 4, 5, 9, 10 – реликты в стекловатой корке. Формулы пересчитаны на 4 катиона. Cr* = Cr/(Cr + Al + Fe³⁺)

Таблица 9. Состав ильменита (мас. %)

№ спектра	MgO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	Сумма	Формула
13072t'	3.81	52.74	0.32	41.97	1.32	100.16	(Fe _{0.86} Mg _{0.14}) _{1.00} (Ti _{0.95} Fe _{0.04} Cr _{0.01}) _{1.00} O _{3.00}

Примечание. Формула пересчитана на 2 катиона.

Таблица 10. Состав апатита (мас. %)

№ п.п.	№ спектра	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	FeO	Cl	Сумма	Формула
1	13072f'	н.о.	41.4	52.16	н.о.	6.33	99.89	Ca _{4.78} (PO ₄) ₃ Cl _{0.92}
2	13091d	0.46	40.51	52.30	н.о.	6.73	100	(Ca _{4.90} Na _{0.08}) _{4.98} (PO ₄) ₃ Cl _{1.00}
3	13091e	0.41	40.97	52.45	н.о.	6.21	100.04	(Ca _{4.86} Na _{0.07}) _{4.95} (PO ₄) ₃ Cl _{0.91}
4	13091f	0.53	40.74	51.99	0.27	6.46	99.99	(Ca _{4.84} Na _{0.09} Fe _{0.01}) _{4.94} (PO ₄) ₃ Cl _{0.95}
5	13091g	0.41	40.27	52.18	0.50	6.64	100	(Ca _{4.92} Na _{0.07} Fe _{0.02}) _{5.01} (PO ₄) ₃ Cl _{0.99}
6	13091k	0.50	40.72	52.41	н.о.	6.37	100	(Ca _{4.89} Na _{0.08}) _{4.97} (PO ₄) ₃ Cl _{0.94}
7	13091r	0.41	39.99	52.30	0.17	6.37	99.24	(Ca _{4.97} Na _{0.07}) _{5.04} (PO ₄) ₃ Cl _{0.96}

Примечание. Формула пересчитана на 3 атома фосфора.

как в свежих, так и в измененных участках. Сопоставление результатов КР-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа позволяет предположить, что размер кристаллических областей в оптически изотропных участках составляют первые элементарные ячейки. Капли стекла сложного силикатного состава присутствуют в порах в корке (рис. 4е). Предполагается, что структура этого вещества действительно стекловатая.

Состав “стекло” значительно варьирует, в том числе и на локальном уровне (табл. 4), но, в целом, соответствует ультраосновному составу хондрита, отличаясь несколько повышенными концентрациями глинозема, щелочей и фосфора.

Троилит в свежих и незначительно оплавленных участках образует ксеноморфные выделения размером до первых десятых долей миллиметра, часто в сростках с никелистым железом. В оплавленных участках образует тонкие просечки в трещинах оливина и пироксена (рис. 4а, б), встречается в альбите в виде капель. В “стекловатых” прожилках и поверхностной зоне троилит образует каплевидные включения в силикатах и содержит графические либо каплевидные вроски никелистого железа (рис. 4г). Состав троилита из свежих хондритов соответствует стехиометрической формуле, из измененных – содержит повышенное количество металлов, связанное с тонкими вросками никелистого железа (табл. 5). Пирротин с повышенным содержанием меди определен на контакте с самородной медью (табл. 4, ан. 10). Сульфидные капли из поверхностной корки иногда характеризуются повышенными содержаниями никеля (табл. 5, ан. 17, 18), при этом состав приближается к *никелистому пирротину* (табл. 5, ан. 18) или *хизлевудиту* (табл. 5, ан. 17).

Никелистое железо образует ксеноморфные зерна размером до 0.8 мм в межхондровом матриксе, обычно сростается с троилитом, редко – с медью (рис. 5г). Часто одно зерно представлено участками с различным содержанием никеля. Иногда наблюдаются графические структуры, образованные железом с различным содержанием никеля (рис. 5д). Состав никелистого железа варьирует и образует две основные группы – 3–10 мас. % и выше 25 мас. % никеля (табл. 6). Никель встречен в виде капель диаметром до 3 мкм с каймой сульфида в поверхностной корке (табл. 6, ан. 13).

Самородная медь встречена в одном обломке в виде выделений размером до 100 × 20 мкм в тесной ассоциации с никелистым железом и троилитом, а также в виде включений в никелистом железе (рис. 5а). В составе наблюдается примесь железа и никеля (табл. 7).

Хромит образует ксеноморфные, сильно трещиноватые зерна размером до 150 мкм, реже – гипидиоморфные кристаллы (5–10 мкм) в матриксе, а также тонкие включения в интерстициальном альбите. В межхондровом матриксе, оплавленных участках и поверхностной корке иногда встречаются зерна хромита с аномальным розовым оттенком в отраженном свете. Однако в корке также сохраняются реликты обычного хромита. В проходящем свете не просвечивает. Состав в целом выдержан (табл. 8), **розоватые зерна** характеризуются повышенным содержанием магния (табл. 8, анализы 2, 11). Хромит предельно высокохромистый и высокожелезистый, что характерно для хондритов.

Ильменит встречен в виде идиоморфного включения размером 7 мкм в троилите в оплавленном обломке. Минерал содержит примесь гейкилитового минала (табл. 9).

Хроммагнетит образует тонкие скелетные кристаллы размером до 4 мкм по удлинению (рис. 5е), а также каймы вокруг реликтового хромита в поверхностной корке.

Апатит встречается в свежих участках, в межхондровом матриксе, в виде округлых трещиноватых кристаллов размером до 0.5 мм. Одно выделение апатита обнаружено в поверхностной корке, при этом апатит сохраняет свойственную этому минералу анизотропию и гаснет как монокристалл. Трещина в апатите залечена силикатным стеклом (?) с повышенным содержанием фосфора (табл. 4, ан. 10) и троилитом. Состав апатита выдержан и соответствует хлор-апатиту (табл. 10). Апатит из поверхностной корки (табл. 10, ан. 2) по составу не отличается от апатита из межхондрового пространства.

Таким образом, изученные обломки метеорита, отобранные в различных районах падения, по минеральному составу и структуре, несмотря на локаль-

ные вариации, сходны между собой и соответствуют известным пироксен (гиперстен)-оливиновым хондритам [1].

Падение раскаленного метеорита в снег привело к закалке поверхностной корки и сохранению структур метеорита, а взаимодействие с атмосферой – к частичному окислению железа и образованию хром-магнетита. Плавление троилита, никелистого железа, альбита и силикатов магнезия и железа, частичная гомогенизация и последующая ликвидация расплава, позволяют оценить температуру на поверхности обломков метеорита не менее, чем 1800–2000°C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Planetary materials / J.J. Papike (ed.). Review of mineralogy, 1998. V. 36. P. 7-1–7-11. Mineralogical society of America.

Рецензент С.Г. Суставов

Petrography, mineralogy and structure of the meteorite “Chelyabinsk”

V. N. Anfilogov, E. V. Belogoub, I. A. Blinov, V. E. Ermyashev, L. Ya. Kabanova,
S. M. Lebedeva, G. F. Lonschakova, P. V. Khvorov.

Institute of Mineralogy, Urals Branch of RAS

The article presents the preliminary results of study of meteorite “Chelyabinsk” fragments. The slightly changed fragments, represent the aggregate of chondres and olivine and pyroxene porphyric-like crystals within fine-grained or crypto-grained matrix. The black vitreous-like matter with droplets of sulfides and nickeliferous iron, and pores covers of meteorite fragments. Chemical composition of fragments is (mas. %): SiO₂ – 39.73, TiO₂ – 0.13, Al₂O₃ – 2.09, Fe₂O₃ – 4.34, FeO – 25.14, MnO – 0.36, MgO – 24.89, CaO – 1.80, Na₂O – 1.05, K₂O – 0.18, H₂O < 0.10, P₂O₅ – 0.24, sum – 99.95. Non-ferrous metals (ppm): – Ni – 13200, Co – 618, Cr – 492, Cu – 137, Zn – 65, Li – 8.3. Average mineral composition (mas. %): x-ray amorphous matter – 35, iron-forsterite – 37, iron-enstatite, – 11, clyno-iron-enstatite – 2, albite – 8, troilite – 4, nickeliferous iron – 3, <1%: apatite, ilmenite, copper, nicel, nicel sulfides, Cr-magnetite. Chemical composition of the olivine, pyroxene, plagioclase, troilite, and chromite is kept, but nickel content in iron wide varies.

Key words: meteorite “Chelyabinsk”, iron-forsterite, iron-enstatite, clyno-iron-enstatite, albite, troilite, nickeliferous iron, apatite, ilmenite, copper, nicel, nicel sulfides, Cr-magnetite, Ni sulfide.