

УДК 552.63+523.681.2

DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-2-293-303

Вариации химического состава и особенности распределения редких элементов в хондритах фрагментов метеорита Челябинск

© 2019 г. В. С. Антипин¹, М. И. Кузьмин¹, А. С. Мехоношин¹, С. А. Язев²¹Институт геохимии Сибирского отделения РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, e-mail: antipin@igc.irk.ru²Иркутский государственный университет, 664003, Иркутск, ул. Советская, 119А, e-mail: syazev@gmail.com

Поступила в редакцию 04.05.2018 г., принята к печати 30.05.2018 г.

Объект исследований. В статье представлены результаты минералого-геохимических исследований 10 фрагментов метеорита Челябинск и дана оценка вариаций его химического состава. **Материалы и методы.** Изученные фрагменты изометричной либо удлиненной формы сложены светло-серой зернистой породой с хондритовой структурой. Большая часть их поверхности покрыта буровато-черной корой плавления толщиной до 1 мм. Изучение петрогенных компонентов метеорита выполнено методом химического силикатного анализа, а редких элементов – методом ICP MS. Все измерения осуществляли на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7700x фирмы Agilent Technologies. Состав сульфидов и металлических частиц определяли методом электронно-зондового микроанализа (PCMA) на микроанализаторе JXA8200 (Jeol, Япония). **Результаты.** Хондры и цементирующая их матрица сложены преимущественно оливином и ортопироксеном. Межхондровый матрикс состоит из пироксен-оливинового агрегата с плагиоклазом, апатитом, расплавленным стеклом и включениями рудных минералов (тенита, камасита, троилита, реже пирротина, пентландита, единичных зерен хромита, ильменита). Концентрация большинства редких и рудных элементов в пробах метеорита Челябинск близка к средним значениям для LL-хондрита. Вещество фрагментов изученного метеорита и средний LL-хондрит при нормировании по углестому хондриту наиболее близки к нему по уровню содержания элементов сидерофильной группы (Mo, Ni, Cr, Co, V, Cu). В то же время халькофильные элементы (Zn, Pb, Sn) в метеорите Челябинск имеют существенно более низкую (почти на порядок) концентрацию относительно C1. **Выводы.** В целом, сравнивая новые и опубликованные ранее аналитические данные (ICP MS), можно прийти к выводу об определенной геохимической неоднородности разных фрагментов метеоритного дожда, выпавшего на обширной территории Челябинской области. Результаты исследований могут свидетельствовать о том, что уже на ранних этапах формирования планет земной группы проявляется дифференциация метеоритного вещества, возможно связанная с импактными процессами.

Ключевые слова: метеорит, хондрит, состав фрагментов, минералы, редкие элементы

The variations of chemical composition and features of the distribution of rare elements in chondrites of fragments of the Chelyabinsk meteorite

Viktor S. Antipin¹, Mikhail I. Kuzmin¹, Alexei S. Mekhonoshin¹, Sergei A. Yazev²¹A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS, 1a Favorskii st., Irkutsk 664033, Russia²Irkutsk State University, 119A Sovetskaya st., Irkutsk 664003, Russia

Received 04.05.2018, accepted 30.05.2018

Research subject. This paper reports the results of a series of experiments carried out to study the mineral and geochemical features of 10 Chelyabinsk meteorite fragments. In addition, these fragments were analysed in terms of their chemical composition. **Materials and methods.** The fragments under study were represented by light-grey granular rocks of the chondrite structure having either isometric or elongated shape. Their surface was largely covered with a black-brownish fusion crust with a thickness of approximately 1 mm. The petrogenic components of the meteorite and the content of rare elements were studied using the methods of chemical silicate analysis and ICP MS respectively. All measurements were carried out using an Agilent 7700x quadrupole mass spectrometer produced by the Agilent Technologies company. The composition of sulphides and metal particles was determined by electron probe microanalysis (PCMA) using a JXA8200 microanalyser (Jeol, Japan). **Results.** The chondri and cementing matrix are found to be primarily composed of olivine and orthopyroxene. The inter-chondruli matrix is shown to consist of a pyroxene-olivine aggregate with inclusions of plagioclase, apatite, fused glass and ore minerals (tenite, kamasite, troilite, rarely pyrrhotine, pentlandite, single grains of chromite and ilmenite). The concentration of the majority of rare and ore elements in the Chelyabinsk meteorite samples is established to be close to their average values for LL-chondrite. When normalizing to coaly chondrite, the substance of the meteorite fragments and the average LL-chondrite were closest to coaly chondrite in terms of the content of siderophile elements (Mo,

Для цитирования: Антипин В.С., Кузьмин М.И., Мехоношин А.С., Язев С.А. (2019) Вариации химического состава и особенности распределения редких элементов в хондритах фрагментов метеорита Челябинск. *Литосфера*, 19(2), 293-303. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-2-293-303

For citation: Antipin V.S., Kuzmin M.I., Mekhonoshin A.S., Yazev S.A. (2019) The variations of chemical composition and features of the distribution of rare elements in chondrites of fragments of the Chelyabinsk meteorite. *Litosfera*, 19(2), 293-303. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-2-293-303

Ni, Cr, Co, V and Cu). At the same time, the studied meteorite fragments are shown to contain a significantly lower (nearly by one order) concentration of chalcophile elements (Zn, Pb and Sn) with regard to C1. *Conclusion.* A comparison of the obtained and published analytical data (ICP MS) has allowed us to make a conclusion on the geochemical heterogeneity of different meteorite remainst hat were scattered over a wide area of the Chelyabinsk Region. The acquired evidence suggests the differentiation of meteorite substance at early stages of the formation of terrestrial planets, which is likely to have occurred due to impact processes.

Keywords: *meteorite, chondrite, fragments composition, minerals, rare elements*

Acknowledgements

The authors are grateful to V.F. Yermolaeva and V.V. Molodzievskii – inhabitants of Chelyabinsk oblast and V.I. Grokhovsky (*Institute of Physics and Technology, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*) for the meteorite fragments they sent, and for helpful discussion on the Chelyabinsk meteorite as well as to all the colleagues who carried out the analyses at the Vinogradov Institute of Geochemistry.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из самых крупных природных событий за последние 100 лет – появление яркого болида, вспышка, сильный взрыв и выпадение метеоритного дождя на обширной территории Челябинской и соседних областей Урала – произошло 15.02.2013 г. Падение метеорита, вошедшего в международный каталог под названием Челябинск, вызвало большой интерес в научном мире и инициировало всесторонние комплексные исследования, которые еще не завершены. Вероятно, это наиболее крупное космическое тело, которое взорвалось в атмосфере Земли, со времен Тунгусской катастрофы в Сибири в 1908 г. Данное событие еще раз напомнило, что движение Земли в космосе происходит в тесной взаимосвязи с астероидами, метеороидами и другими телами Солнечной системы и проблема астероидно-кометной опасности для планеты представляется крайне серьезной и вполне реальной. В связи с этим любые фрагменты космического вещества должны подвергаться детальному изучению всеми доступными методами.

Образцы метеорита Челябинск начали исследоваться почти сразу после падения, в 2013 г. был опубликован спецвыпуск журнала “Геохимия” (№ 7), посвященный первым результатам опытов, проведенных сотрудниками ГЕОХИ РАН совместно с английскими учеными. Уральскими, дальневосточными и сибирскими исследователями представлены данные по петрографии, минералогии и геохимии фрагментов метеорита [Anfilogov et al, 2013; Берзин и др., 2013; Коротеев и др., 2013; Ханчук и др., 2013; Антипин и др., 2014]. Наиболее полная информация о метеорите Челябинск и результаты комплексных исследований его фрагментов приведены в сборнике статей “Метеорит Челябинск – год на Земле” [2014].

Размер метеороида при входе в атмосферу Земли в районе г. Челябинск составлял около 19 м, он двигался под углом 19° к горизонту со скоростью приблизительно 19 км/с, на величину которой указывают также данные NASA. Высота основной вспышки болида оценивается специалистами в 22–23 км. В момент взрыва метеороид превратился в

метеоритный дождь, и на земную поверхность выпали десятки, а возможно, и сотни тысяч фрагментов, общая масса которых могла равняться 7–12 тыс. т. Они рассеялись на огромной площади, образовав эллипс длиной более 100 км при ширине 10–20 км [Бадюков, Дудоров, 2013]. Самый крупный фрагмент метеорита массой около 540 кг был поднят в октябре 2013 г. из оз. Чебаркуль. По информации NASA, мощность взрыва оценивается в 440 кт ТНТ [Фортов и др., 2013].

Форма фрагментов метеорита обычно неправильная: иногда сферическая с гладкими ровными поверхностями, часто сложная со многими углублениями или удлинённая; либо это бесформенные фрагменты с регмаглиптами. Внутренняя структура иногда представлена неравномернообломочной брекчией [Колисниченко, 2014]. Внутри фрагментов часто фиксируются тонкие прожилки черного стекловатого вещества, которые разделяют хондры или их обломки, образующие типичные массивные или брекчиевидные текстуры. По современной классификации [Wasson, Kallemeien, 1988], метеорит Челябинск в соответствии с минеральным и химическим составом отнесен к довольно редкому типу хондритов LL-типа и петрологическому классу 5 [Галимов и др., 2013], что характеризует его как слабо дифференцированный хондрит. Фрагменты метеорита отобраны сразу после падения и не подверглись процессам выветривания, что особенно важно для проведения аналитических исследований. В данной статье представлены результаты минералого-геохимических исследований 10 фрагментов метеорита Челябинск и дана оценка вариаций его химического состава.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Местные жители Челябинской области передали в г. Иркутск три небольших фрагмента метеорита, два из них (обр. 8 и 10 массой 5.60 и 2.58 г) поступили в Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН для минералого-геохимических исследований. Остальные проанализированные образцы метеорита Челябинск (табл. 1) относятся к кол-

Таблица 1. Химический состав фрагментов метеорита Челябинск (оксиды – мас. %, элементы – г/т)

Table 1. Chemical composition of fragments of the Chelyabinsk meteorite (oxides in wt %, Elements in ppm)

Компонент	Фрагмент метеорита										LL-хондрит [Wasson, Kallemeyen, 1988]
	У 2	А 12	А 25	А 33	М 16	М 25	К 105	К 108	8	10	
SiO ₂	40.82	40.97	40.83	40.25	42.26	42.33	41.16	40.83	41.31	40.55	40.60
TiO ₂	0.17	0.16	0.16	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.13	0.12	0.13
Al ₂ O ₃	2.50	2.44	2.33	2.55	2.40	2.30	2.43	2.52	2.36	2.39	2.24
FeO _{общ}	24.14	23.89	23.50	24.66	22.82	22.66	23.36	24.56	25.76	26.23	26.62
MnO	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.34	0.33	0.35	0.34	0.35
MgO	25.27	25.20	25.63	25.18	25.69	25.76	25.03	25.48	25.61	25.63	25.22
CaO	1.72	1.84	1.75	1.58	1.82	1.58	1.79	1.71	2.02	1.98	1.92
Na ₂ O	1.04	1.01	1.00	1.03	0.98	0.98	1.01	1.01	0.91	0.55	0.95
K ₂ O	0.15	0.12	0.12	0.13	0.11	0.12	0.12	0.12	0.09	0.10	0.10
P ₂ O ₅	0.21	0.23	0.21	0.19	0.23	0.18	0.21	0.27	0.22	0.21	0.22
S	1.73	–	1.60	1.77	0.04	0.15	1.65	–	0.6–0.9	0.6–0.9	–
Сумма	98.08	96.19	97.46	97.80	96.81	96.53	97.24	96.98	99.31	98.65	98.89
Li	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00	2.00	1.00	2.00	2.50	1.85	2.10
Be	0.09	0.03	–	0.03	0.08	0.04	0.02	0.02	0.06	0.07	0.05
Cr	3737	3805	3128	3438	3577	3676	3710	3826	3799	3799	3740
Co	559	626	376	447	532	471	477	384	754	441	490
Ni	9808	13475	9386	11028	8432	9766	9285	7607	11677	9694	10200
Cu	70	115	79	87	–	66	70	62	72	68	80
Zn	74	53	51	52	55	52	53	52	47	43	46
Ga	4.8	5.3	4.7	5.4	5.0	4.7	4.9	4.6	5.4	5.3	5.0
Ge	8.8	13.4	7.6	8.3	7.9	8.4	7.6	6.2	11.6	8.4	9.9
Rb	2.39	2.67	1.88	3.20	2.50	2.10	2.74	1.63	4.22	3.02	3.10
Sr	11.3	12.1	12.7	14.6	14.2	12.6	12.5	15.0	14.4	18.0	11.1
Y	2.03	2.17	2.06	2.07	2.01	1.76	2.08	2.46	2.29	2.17	2.00
Zr	13.5	12.4	15.0	16.0	13.2	14.2	13.4	14.1	10.7	16.0	5.9
Mo	1.15	2.00	1.62	–	–	1.28	1.22	1.41	0.74	0.98	1.10
Hf	0.42	0.33	0.43	0.45	0.39	0.41	0.40	0.39	0.21	0.17	0.15
Pb	1.06	0.63	0.25	0.90	–	0.52	0.56	0.50	0.39	0.41	–
Sn	1.01	0.30	0.46	1.67	–	0.41	0.39	0.54	0.57	0.63	–
Nb	0.61	0.62	0.63	0.63	0.48	0.42	0.61	0.59	0.62	0.61	0.37
Ta	0.06	0.045	0.023	0.040	0.015	0.018	0.025	0.023	0.020	0.020	0.022
Th	0.150	0.170	0.120	0.160	0.096	0.085	0.097	0.120	0.080	0.060	0.043
U	0.056	0.030	0.039	0.066	0.039	0.038	0.043	0.055	0.046	0.029	0.013
La	0.530	0.670	0.560	0.700	0.460	0.390	0.540	0.670	0.750	0.570	0.315
Ce	1.320	1.490	1.310	1.880	1.220	1.030	1.330	1.620	1.610	1.310	0.907
Pr	0.190	0.210	0.180	0.220	0.160	0.150	0.180	0.230	0.200	0.170	0.122
Nd	0.910	1.030	0.940	1.050	0.890	0.750	0.930	1.110	1.040	0.880	0.660
Sm	0.280	0.290	0.300	0.260	0.280	0.210	0.290	0.320	0.300	0.260	0.200
Eu	0.100	0.110	0.098	0.100	0.083	0.090	0.910	0.100	0.110	0.097	0.076
Gd	0.460	0.410	0.360	0.410	0.380	0.320	0.370	0.420	0.350	0.330	0.303
Tb	0.060	0.067	0.060	0.067	0.065	0.052	0.640	0.069	0.063	0.062	0.048
Dy	0.430	0.460	0.420	0.460	0.450	0.380	0.450	0.570	0.440	0.380	0.351
Ho	0.094	0.097	0.100	0.100	0.094	0.083	0.095	0.120	0.088	0.085	0.077
Er	0.300	0.310	0.310	0.390	0.270	0.260	0.290	0.330	0.290	0.260	0.234
Tm	0.040	0.042	0.046	0.044	0.036	0.037	0.038	0.053	0.043	0.037	0.034
Yb	0.29	0.28	0.28	0.30	0.27	0.26	0.29	0.29	0.31	0.25	0.22
Lu	0.046	0.050	0.041	0.050	0.045	0.044	0.044	0.052	0.047	0.041	0.033
K/Rb	523	374	532	338	367	476	365	613	178	276	269
La/Yb	1.83	2.39	2.00	2.33	1.70	1.50	1.86	2.31	2.42	2.28	1.43
Сумма РЗЭ	5.05	5.52	5.00	6.03	4.70	4.05	6.40	5.95	5.64	4.73	3.58

лекции лаборатории Extra Terra Consortum (Физико-технологический институт Уральского федерального университета им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург).

Аналитические методы

Изучение петрогенных компонентов метеорита выполнено методом химического силикатного анализа, а редких элементов – методом ICP MS с использованием научного оборудования ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН. Все измерения осуществлялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7700x фирмы Agilent Technologies в Центре коллективного пользования “Байкальский центр нанотехнологий” в технопарке при Иркутском государственном техническом университете (БЦНТ ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск). Аналитики: Л.А. Чувашова, О.В. Зарубина, Н.В. Брянский, Т.В. Ожогина. Состав сульфидов и металлических частиц определяли в ИГХ СО РАН (г. Иркутск) методом электронно-зондового микроанализа (РСМА) на микроанализаторе JXA8200 (Jeol, Япония). Аналитик Л.А. Павлова. Анализировали зерна минералов из полированных образцов. Измерение интенсивностей рентгеновского излучения сульфидов и минералов платиновой группы выполняли на волновых спектрометрах при ускоряющем напряжении 20–27 кВ и токе зонда 10–20 нА, с диаметром зонда ≈ 1 мкм. X-ray Ka линии были использованы для измерения S, Fe, Ni и Co.

Метрологические характеристики методики определяли на контрольных образцах известного состава. Образцы сравнения и контрольные образцы охарактеризованы как стандартные образцы предприятия в Институте геологии, геофизики и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Относительная погрешность определения Fe, Co, Ni, S составила 20.0–25.0 отн. % в диапазоне концентраций 0.1–1.0 мас. %; 7.0–10.0 – 1.0–5.0; 4.0–5.0 – 5.0–10.0; 2.0–3.0 – 10.0–20.0; 2.0 – 25.0–40.0; 1.0–1.5 отн. % – 40–70 мас. % соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованные фрагменты метеорита Челябинск изометричной либо удлиненной формы, часто с углублениями или небольшими выступами на ровной поверхности. Они обычно представлены светло-серой зернистой породой с хондритовой структурой (рис. 1). Большая часть их поверхности покрыта буровато-черной корой плавления толщиной до 1 мм. Хондры имеют размеры около 1 мм и часто округлые очертания, но обычно форма их угловатая, приобретенная в результате дробления. Хондры и цементирующая их матрица сложены преимущественно оливином и ортопироксеном. Межхондровый матрикс представлен криптозерни-

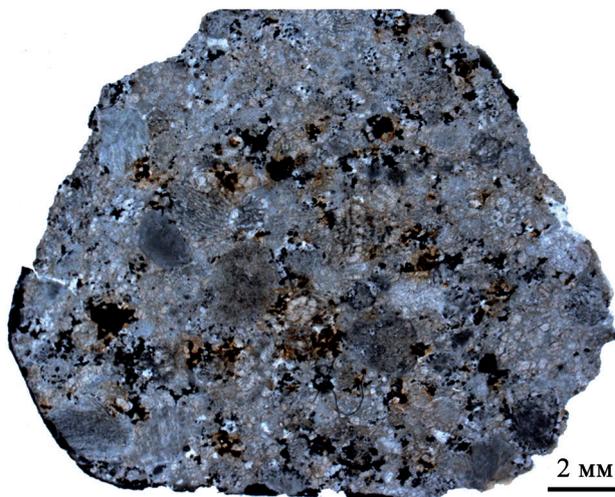


Рис. 1. Метеорит Челябинск. Фото образца.

Fig. 1. Meteorite Chelyabinsk. Photo of sample.

стым слабо раскристаллизованным веществом, состоящим из пироксен-оливинового агрегата с плагиоклазом, апатитом, расплавленным стеклом и включениями рудных минералов (тэнита, камасита, трюилита, реже пирротина, пентландита, единичных зерен хромита, ильменита). Оливин в матриксе метеорита (рис. 2) слагает идиоморфные зерна размером до 0.03–0.50 мм и встречается также в хондрах. Он часто образует графические сростания с пироксеном и имеет вещественный состав, отвечающий железистому форстериту. Пироксены встречаются как в хондрах, так и в матриксе породы, они образуют более ксеноморфные выделения по отноше-

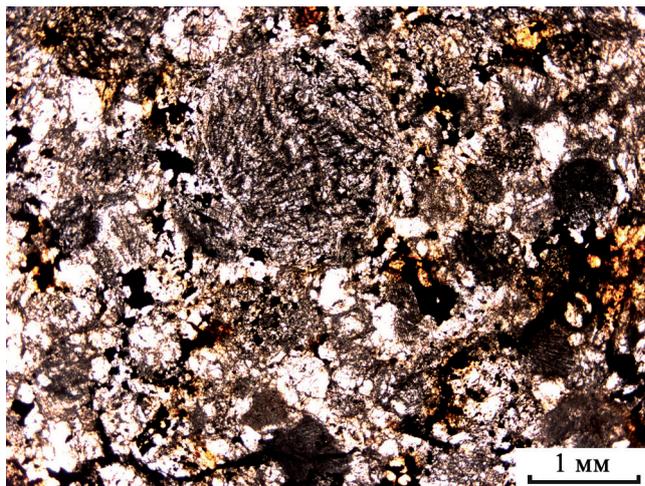


Рис. 2. Метеорит Челябинск. Фото шлифа с хондрой. Никели параллельны.

Fig. 2. Meteorite Chelyabinsk. Photo of microsection with chondrule. Nicols are parallel.

нию к зернам оливина. Кроме того, оливин формирует очень мелкие округлые включения в троилите и металле, при этом он характеризуется устойчивым химическим составом и относится к хризолиту с 25–27% фаялитового минала, 0.39–0.46% MnO и практически не содержит никеля (табл. 2). В местах плавления состав оливина несколько отличается появлением алюминия, кальция и снижением содержания магния, что можно объяснить переходом в расплав в первую очередь присутствующих в метеорите плагиоклазов.

При изучении взаимоотношений рудных минералов установлено, что металлические минералы Fe и Ni, обычно сложенные агрегатами камасита и тэнита, образуют ксеноморфные интерстициальные зерна размером до 0.3 мм и часто находятся в ассоциации с троилитом (табл. 3), который их обрастает как более поздний минерал (рис. 3, 4). Как правило, зерна тэнита подчиняются по форме окружающим его зернам силикатов, но иногда наблюдались капли металла внутри зерен оливина и троилита (рис. 5). Судя по взаимоотношениям рудных и силикатных минералов, можно предположить, что тэнит формировался позднее оливина и пироксена, а камасит – после тэнита. В некоторых зернах образуется эмульсионная структура с троилитом (см. рис. 4). Внутри металлических зерен иногда наблюдаются постепенные переходы между тэнитом и камаситом. На рис. 6 светлые участки зер-

Таблица 2. Химический состав оливина, мас. %

Table 2. Chemical composition of olivine, wt %

№ п.п.	SiO ₂	FeO	MgO	NiO	MnO	Сумма
1	36.92	25.21	36.80	Н.о.	0.41	99.34
2	37.70	25.38	36.23	Н.о.	0.39	99.70
3	37.53	25.82	37.36	Н.о.	0.42	101.13
4	37.60	25.58	37.55	Н.о.	0.46	101.18
5	37.47	25.72	37.45	Н.о.	0.42	101.06
6	38.02	25.78	36.71	0.24	0.44	101.19
7	38.16	25.93	37.00	0.23	0.39	101.71
8	38.53	25.84	36.98	Н.о.	0.40	101.75
9	37.90	25.60	37.35	Н.о.	0.45	101.29
10	38.22	25.68	37.52	Н.о.	0.42	101.84
11	38.00	25.59	37.69	Н.о.	0.42	101.70
12	38.22	25.58	37.02	0.28	0.45	101.55
13	37.23	26.94	37.41	0.91	0.40	102.89
14	37.84	26.23	36.94	Н.о.	0.47	101.48
15	38.36	25.50	36.98	Н.о.	0.39	101.23
16	38.31	25.97	37.33	Н.о.	0.44	102.04
17	38.34	25.71	36.65	Н.о.	0.40	101.10
18	38.08	25.58	37.16	Н.о.	0.39	101.21
19	36.82	25.71	37.80	Н.о.	0.40	100.73

Примечание. 1–5, 8–11 крупные зерна оливина; 6, 7, 12 – включение оливина в металле; 13–19 – включение оливина в троилите.

Note. 1–5, 8–11 – coarse grains of olivine; 6, 7, 12 – inclusion of olivine in metal; 13–19 – inclusion of olivine in troilite.

Таблица 3. Химический состав троилита, мас. %

Table 3. Chemical composition of troilite, wt %

№ п.п.	Fe	Co	Ni	S	Сумма
1	63.65	Н.о.	0.22	34.84	98.71
2	62.92	Н.о.	0.23	35.39	98.53
3	63.53	Н.о.	0.28	34.70	98.51
4	63.58	Н.о.	0.21	34.75	98.55
5	62.99	Н.о.	0.34	35.50	98.83
6	62.95	Н.о.	0.13	35.02	98.59
7	62.65	0.12	0.28	35.56	98.61
8	63.32	Н.о.	0.44	34.90	98.66
9	63.46	0.12	1.68	33.72	98.98
10	63.39	0.12	0.18	35.22	98.92

Примечание. 1 – включение в оливине, 2–6 – крупные зерна троилита, 7–10 – включение в металле.

Note. 1 – inclusion in olivine, 2–6 – coarse grains of troilite, 7–10 – inclusion in metal.

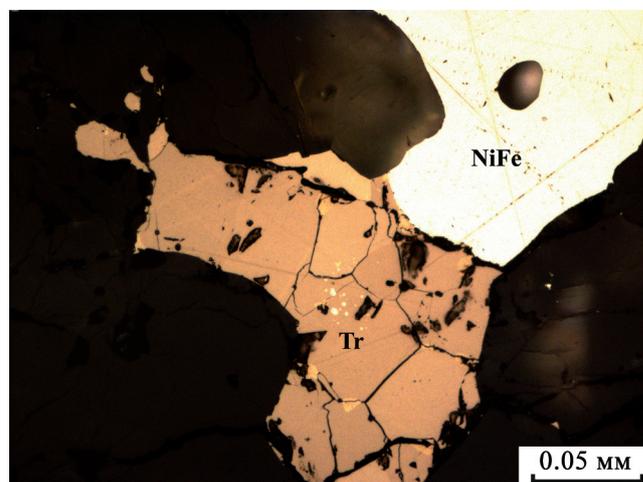


Рис. 3. Взаимоотношение троилит (Tr)–никелистое железо (NiFe). Фото шлифа.

Fig. 3. Relationship of troilite (Tr)–nickel ferrum (NiFe). Photo of polished section.

на сложены тэнитом (49.31% Ni), темные – камаситом (4.7% Ni). Мелкие включения металла в троилите и оливине представлены гомогенными каплями тэнита (рис. 7). Состав металлических минералов характеризуется четким изоморфизмом Fe ↔ Ni (рис. 8).

В табл. 1 приведены результаты анализа химического состава исследованных фрагментов метеорита Челябинск по содержанию главных петрогенных и большой группы (35) редких элементов. Сравнение установленных составов фрагментов со средним составом LL-хондрита показало их полную сходимость для большинства исследованных образцов, что дополнительно подтверждает вывод о принадлежности данного метеорита к группе LL5. Близкими к этим составам были определены

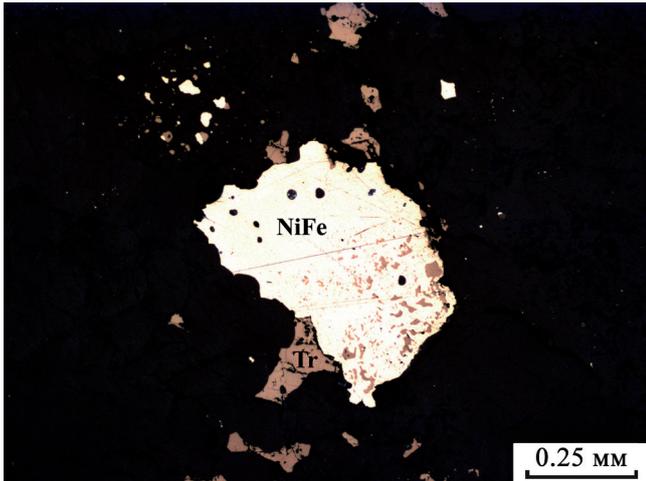


Рис. 4. Эмульсионные выделения троилита (*Tr*) в никелистом железе (*NiFe*). Фото шлифа.

Fig. 4. Emulsion crystallization of troilite (*Tr*) in *NiFe*. Photo of polished section.

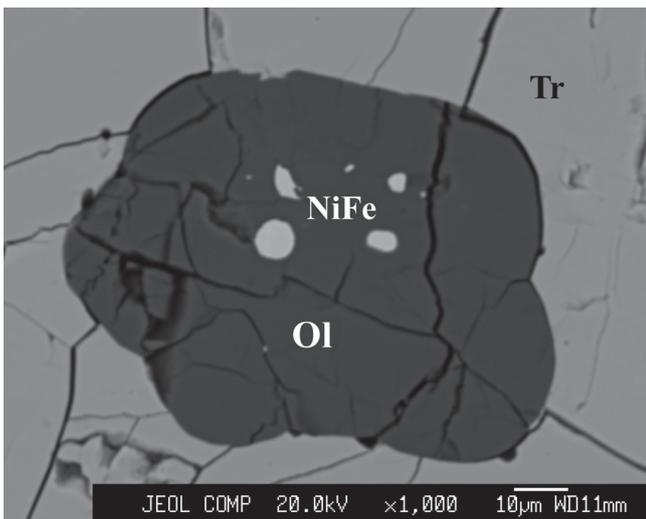


Рис. 5. Включения никелистого железа (*NiFe*) в оливине (*Ol*), расположенного в троилите (*Tr*). Фото в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 5. Inclusions of *NiFe* in olivine (*Ol*), inclined in troilite (*Tr*). BSE image.

ранее также фрагменты метеорита Челябинск в работе [Галимов и др., 2013]. Тем не менее новые данные фиксируют некоторые вариации химического состава исследованных фрагментов метеорита. Из всех проанализированных образцов два, представленные светлой компонентой (M16, M25), характеризуются несколько повышенным содержанием SiO_2 и более низкой концентрацией $\text{FeO}_{\text{общ}}$ и S относительно таковых в остальных образцах, представленных темной компонентой (см. табл. 1). Фраг-

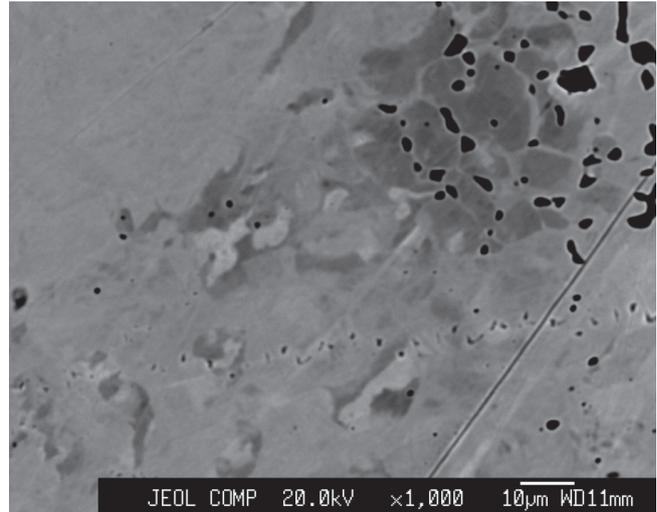


Рис. 6. Взаимоотношения между камаситом (серое и темно-серое) и тенитом (светлое). Фото в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 6. Relationship of kamacite (grey and dark grey) and tenite (bright). BSE image.

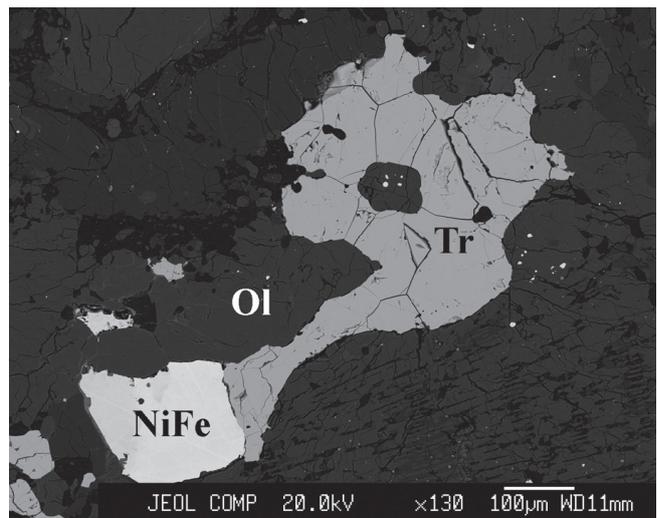


Рис. 7. Взаимоотношения никелистого железа (*NiFe*) с троилитом (*Tr*) и оливином (*Ol*). Фото в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 7. Relationship of *NiFe* and troilite (*Tr*) and olivine (*Ol*). BSE image.

менты темной компоненты существенно обогащены $\text{FeO}_{\text{общ}}$ и S, что может быть связано с большей долей в расплаве сульфидных фаз. Именно темные разновидности изученного хондрита наиболее приближены к среднему составу LL-хондрита [Wasson, Kallemeyen, 1988]. Необходимо отметить, что приведенные ранее в работе [Галимов и др., 2013] значения содержания $\text{FeO}_{\text{общ}}$, а также Al_2O_3 в светлой

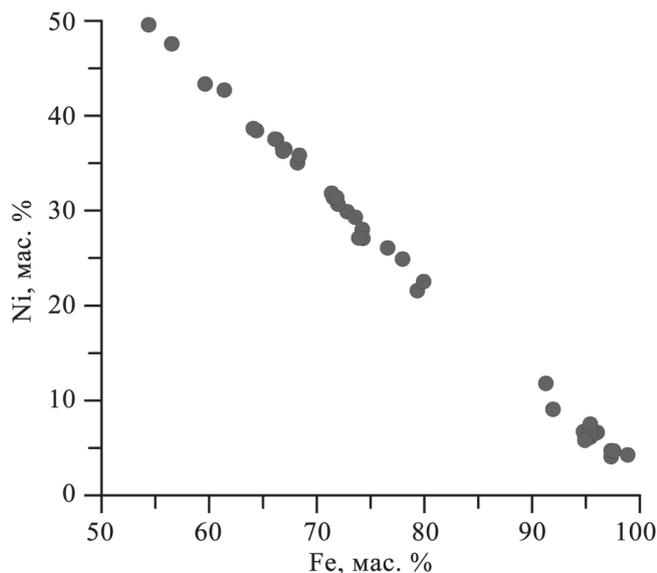


Рис. 8. Соотношение Fe–Ni в металлических минералах.

Fig. 8. Correlation Fe–Ni in metal minerals.

компоненте, по сравнению с таковыми темной разновидности метеорита, заметно ниже, а величины содержания остальных главных элементов в обоих типах пород практически не различаются.

Многие исследователи фиксировали тонкие прожилки черного или бурого стекловатого вещества, которые разделяют хондры или их обломки, и определяли их как серую компоненту. Интерстиции между зернами оливина и пироксенов, а также трещины внутри зерен минералов выполнены расплавленным стеклом (рис. 9), которое по составу является существенно кремнекислым (табл. 4). Новые данные по составу расплавленного стекла сходны с таковыми в работах [Берзин и др., 2013; Коротеев и др., 2013], авторы отмечали, что стекло близко к со-

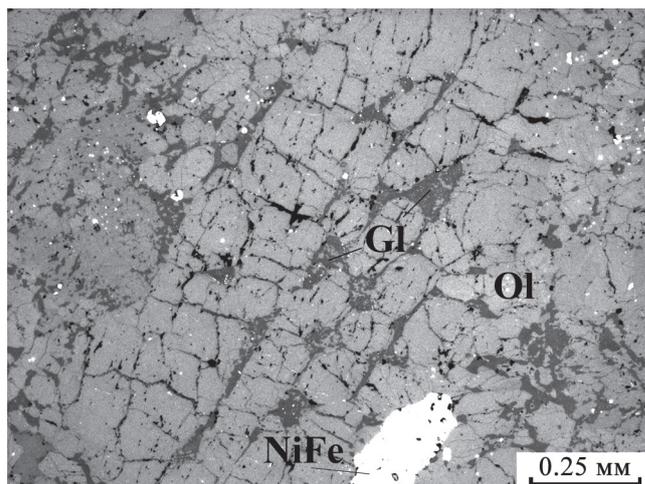


Рис. 9. Включения стекла (Gl) и никелистого железа (NiFe) в оливине (Ol).

Fig. 9. Inclusions of glass (Gl) and (NiFe) in olivine (Ol).

ставу плагиоклаза, но отличается от него более низким содержанием Na и повышенным содержанием K. Эти же особенности состава расплавленного стекла свойственны и новым изученным фрагментам метеорита Челябинск.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Более ранними микронзондовыми исследованиями [Галимов и др., 2013; Анфилогов и др., 2013; Берзин и др., 2013] установлено, что главными минеральными фазами метеорита Челябинск являются оливин и ортопироксен. Химический состав ортопироксена соответствует железистому энстатиту (гиперстену), в котором до 25% ферросилитового минала, а клинопироксен образует единичные зерна авгита и клинобронзита с характерным по-

Таблица 4. Состав расплавленного стекла в фрагментах метеорита Челябинск, мас. %

Table 4. Chemical composition of melt glass in the fragments of the Chelyabinsk meteorite, wt %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Сумма
69.07	21.88	Н.о.	0.68	Н.о.	Н.о.	1.92	2.17	1.32	Н.о.	97.03
66.51	23.03	0.16	0.55	Н.о.	Н.о.	2.37	2.76	0.97	Н.о.	96.34
66.82	22.70	0.13	0.54	Н.о.	Н.о.	1.99	1.60	1.44	Н.о.	95.22
66.01	22.18	Н.о.	0.78	Н.о.	Н.о.	2.12	7.16	0.49	Н.о.	98.73
68.02	22.83	Н.о.	0.72	Н.о.	Н.о.	2.28	4.31	0.82	Н.о.	98.99
66.21	23.04	0.21	0.82	Н.о.	0.20	2.62	6.03	0.50	Н.о.	99.63
66.85	21.87	Н.о.	0.67	Н.о.	Н.о.	2.42	3.99	0.63	Н.о.	96.42
69.47	23.14	Н.о.	0.49	Н.о.	Н.о.	2.07	1.53	1.31	Н.о.	98.00
Состав расплавленного стекла в фрагментах метеорита Челябинск [Берзин и др., 2013]										
Черный хондрит (среднее из анализов четырех фрагментов)										
67.71	22.32	0.10	1.07	0.01	0.22	0.61	3.59	1.46	0.03	97.16
Черный прожилок в сером хондрите (анализ одного фрагмента)										
67.77	21.75	0.04	0.89	0.06	0.17	1.54	4.02	1.88	0.02	98.17

лисинтетическим двойникованием и в сростании с ортопироксеном. Вещество стекла черного или бурого цвета, находящееся на поверхности фрагментов метеорита в виде корки, а также прожилков, существенно варьирует по составу. В участках метеорита с корой плавления видны включения сплавов Fe-Ni (камасит + тэнит), троилита и хизлевудита, которые образуют сростки и представлены выделениями неправильной формы. Иногда присутствуют мелкие включения самородной меди, хромит и ильменит. В матрице фрагментов метеорита отмечены также плагиоклаз, никелистый пирротин, хло-рапатит, мерриллит [Колисниченко, 2014].

Из анализа состава минералов следует, что метеорит Челябинск, принадлежащий к типу LL-хондрита, характеризуется, с одной стороны, относительно повышенным содержанием тэнита, заметно повышенным содержанием троилита, а с другой – отсутствием шрейберзита. Известно, что в железных метеоритах, где практически нет троилита и широко распространен шрейберзит, содержание тэнита относительно низкое [Печерский и др., 2012]. Троилит в метеорите Челябинск образует отдельные зерна и полигонально-зернистые агрегаты разме-

ром до 0.3 мм, а также каймы обрастания вокруг металлических частиц и участвует в строении всех типов прожилков (см. рис. 3). Независимо от минеральных ассоциаций троилит обладает устойчивым химическим составом. Из примесей отмечается Ni (обычно не более 1 мас. %) (см. табл. 3). Главные носители магнетизма метеорита Челябинск – Fe-Ni сплавы. Состав их заметно варьирует, но при этом установлен четкий разрыв по содержанию в сплаве никеля: 1) 4–17% Ni, 2) 30–55% Ni. Первая группа, очевидно, относится к камаситу и мартенситу, вторая – по концентрации никеля отнесена к тэниту, и они не смешиваются. Следующая группа минералов – Fe-сульфиды с преобладанием троилита, где изредка отмечается пирротин. Для хромита характерны примеси Mg, Al, Ti [Антипин и др., 2014; Метеорит Челябинск..., 2014].

Концентрация большинства редких и рудных элементов в пробах метеорита Челябинск близка к ее средним значениям для LL-хондрита [Wasson, Kallemeyen, 1988] (см. табл. 1), а их распределение (нормированное по CI-хондритам) закономерно повторяет форму графиков в последнем на спайдерграмме (рис. 10). Вещество фрагментов исследо-

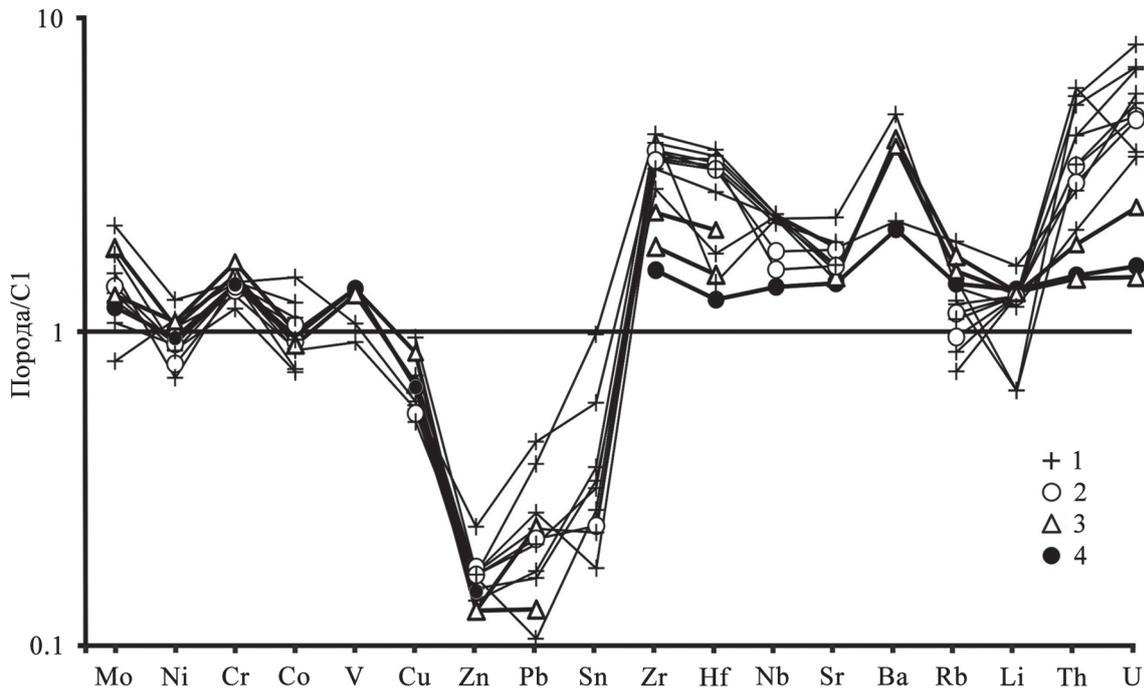


Рис. 10. Распределение редких элементов в хондрите Челябинск, нормированное по содержанию в CI-хондритах в сравнении с хондритом LL-типа.

1 – темная компонента метеорита, 2 – светлая компонента, 3 – анализы фрагментов метеорита по данным [Галимов и др., 2013], 4 – LL-хондрит [Wasson, Kallemeyen, 1988].

Fig. 10. The distribution of rare elements in the Chelyabinsk chondrite normalized to their contents in CI chondrites and compared to the LL-type chondrite.

1 – dark component, 2 – bright component, 3 – ICP MS analyses of the meteorite carried out at the [Galimov et al., 2013], 4 – LL-chondrite [Wasson, Kallemeyen, 1988].

ванного метеорита и средний LL-хондрит при нормировании к углестому хондриту наиболее близки к нему по уровню содержания элементов сидерофильной группы (Mo, Ni, Cr, Co, V, Cu). В то же время халькофильные элементы (Zn, Pb, Sn) в метеорите Челябинск и среднем хондрите LL имеют существенно более низкую (почти на порядок) концентрацию относительно C1. Среди элементов халькофильной группы также отмечены наиболее широкие вариации их нормированных содержаний, особенно характерные для Pb и Sn (см. рис. 10). Совсем иная картина распределения свойственна некоторым высокозарядным и литофильным элементам (Nb, Zr, Hf, Sr, Ba, Th, U), которые отличаются заметно повышенным уровнем нормированных содержаний в метеорите Челябинск (см. рис. 10), что отмечалось также по ранее опубликованным геохимическим данным [Галимов и др., 2013; Берзин и др., 2013]. Судя по новым проанализированным фрагментам, метеорит Челябинск максимально обогащен такими высокозарядными элементами, как Zr, Hf, Nb, Th и U. При этом необходимо подчеркнуть, что темная компонента метеорита, как правило, в большей степени обогащена указанными элементами, чем светлая. Вполне можно допустить, что это обогащение перечисленными элементами связано с процессом дифференциации метеоритного вещества при его импактном плавлении.

Вариации концентрации и закономерности распределения редкоземельных элементов заслуживают специального обсуждения. Суммарное содержание РЗЭ в исследованных образцах хондрита Челябинск составляет в среднем 5.31 г/т и практически совпадает со средним значением суммы редких земель по трем образцам метеорита (5.24 г/т) в работе уральских ученых [Берзин и др., 2013]. Однако оно заметно выше по сравнению с суммарным содержанием РЗЭ в метеорите Челябинск (3.68 г/т) по данным работы [Галимов и др., 2013], а также относительно среднего значения суммы редких земель (3.58 г/т) в LL-хондрите [Wasson, Kallemeyen, 1988]. Установленное обогащение РЗЭ новых исследованных образцов метеорита Челябинск относительно среднего LL-хондрита обусловлено более высоким содержанием в них легких лантаноидов, что фиксируется также повышенным значением для них отношения La/Yb (1.5–2.4) по сравнению с величиной La/Yb в LL-хондрите (1.4) (см. табл. 1, рис. 11). Распределение РЗЭ в LL-хондрите характеризуется отсутствием Eu аномалии, что было подтверждено также на примере отдельных образцов челябинского метеорита [Галимов и др., 2013] (см. рис. 11). Вместе с тем проанализированные нами некоторые фрагменты Челябинска, представленные обычно темной компонентой, фиксируют появление заметного европиевого минимума, что вполне может

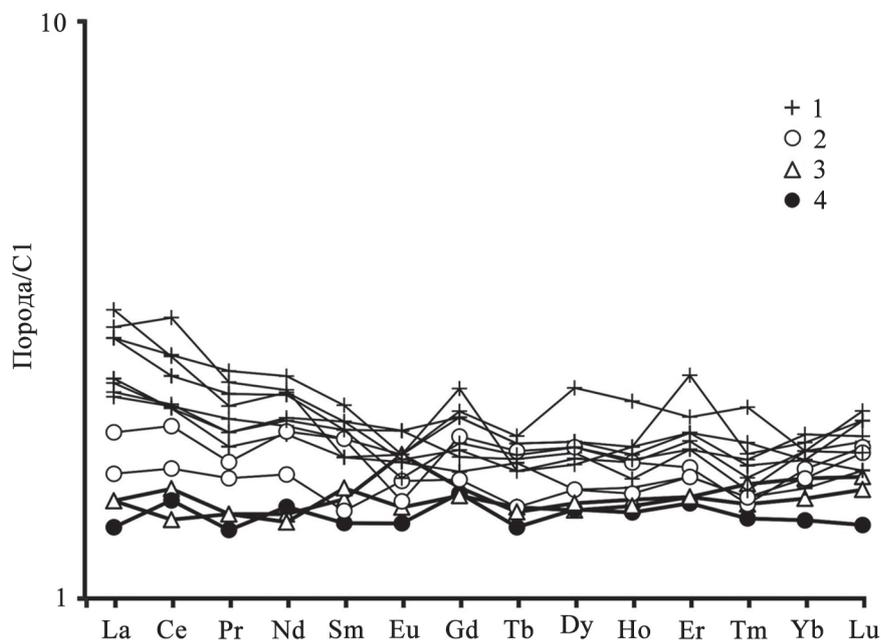


Рис. 11. Распределение РЗЭ в фрагментах метеорита Челябинск.

1 – темная компонента метеорита; 2 – светлая компонента; 3 – анализы фрагментов метеорита по данным [Галимов и др., 2013]; 4 – хондрит LL [Wasson, Kallemeyen, 1988].

Fig. 11. The distribution of REE in the Chelyabinsk chondrite.

1 – dark component; 2 – bright component; 3 – analyses of the meteorite carried out at the data of [Galimov et al., 2013]; 4 – chondrite LL [Wasson, Kallemeyen, 1988].

быть связано с процессом дифференциации метеоритного вещества. Таким образом, главной геохимической особенностью распределения REE в изученной коллекции фрагментов метеорита Челябинск являются заметное обогащение их легкими лантаноидами и плавное снижение концентрации в сторону тяжелых редких земель вплоть до уровня их содержания в среднем LL-хондрите.

Минералого-геохимические исследования 10 фрагментов метеорита Челябинск подтвердили установленную ранее принадлежность его к хондриту LL-типа. Несмотря на сходство их общего химического состава, выявлено обогащение рассмотренных образцов метеорита некоторыми литофильными, высокозарядными и легкими редкоземельными элементами. Установленные закономерности распределения Nb, Zr, Hf, Sr, Ba, Th, U, а также легких РЗЭ свидетельствуют о заметном обогащении ими фрагментов Челябинска относительно их средних содержаний в хондрите LL [Wasson, Kallemeyen, 1988] и о значительных вариациях редкоэлементных характеристик. В целом, сравнивая вновь полученные и опубликованные ранее аналитические данные с использованием прецизионного метода ICP MS, можно прийти к выводу об определенной геохимической неоднородности различных фрагментов метеоритного дождя, выпавшего на обширной территории Челябинской области. Результаты исследований могут свидетельствовать о том, что уже на ранних этапах формирования планетезималей проявляется дифференциация метеоритного вещества, возможно связанная с импактными процессами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведения первых анализов фрагментов метеорита Челябинск уже в 2013 г. стало очевидно, что это самое крупное в мире падение на Землю хондрита LL-типа. Было собрано огромное количество обломков метеорита, общая масса которых вместе с наиболее крупным фрагментом, упавшим в оз. Чебаркуль, составляет более 1 т. На территории России падений хондритов LL-типа ранее не наблюдалось [Назаров, 2014].

С применением Pb-Pb метода был определен возраст темной компоненты метеорита Челябинск, который составил 4538 ± 2 млн лет и оказался наиболее древним среди всех известных ранее хондритов типа LL [Bouvier, 2013]. Это и дало возможность предположить, что родительское тело метеорита образовалось в начале формирования планетезималей и в первые миллионы лет, еще до отделения от родительского астероида, испытало крупное импактное событие, о чем свидетельствуют трещины в структуре метеорита Челябинск, выполненные черным стеклом. По результатам изотопно-геохимических исследований метеорита незави-

симо было проведено U-Pb датирование апатита С.-Х. Ли в Пекине (Китай) (4452 ± 21 млн лет) и К. Тетрадой в Хиросиме (Япония) (4433 ± 110 млн лет) [Скублов и др., 2015]. По мнению исследователей метеорита Челябинск, эти относительно более молодые возраста датируют крупнейшее импактное событие. Однако полученные для Челябинска Sm-Nd изотопные данные фиксируют другое импактное событие (290 млн лет назад), которое могло привести к существенному перераспределению петрогенных и редкоземельных элементов в более поздней истории астероида, являющегося родительским для метеорита Челябинск [Галимов и др., 2013]. Поэтому ученые допускают, что в его космической истории могло быть несколько ударных событий, определивших трещиноватую структуру, наличие многочисленных прожилков стекловатого черного или бурого вещества, которое покрывало большую часть найденных фрагментов. Значительная фрагментация определила превращение метеорита в метеоритный дождь в момент взрыва. По-видимому, разновозрастные импактные процессы могли быть причиной появления значительной геохимической неоднородности, связанной с дифференциацией на полнокристаллическую (более светлую) и стекловатую (черную или бурую) части метеоритного вещества.

Петролого-геохимические исследования подтвердили, что общий химический состав всех изученных фрагментов Челябинска соответствует среднему составу LL-хондрита, однако выявлены вполне определенные геохимические различия стекловатой и полнокристаллической разновидностей метеорита. Так, по отношению к среднему редкоэлементному составу хондрита LL установлено обогащение изученных образцов метеорита некоторыми литофильными, высокозарядными и легкими редкоземельными элементами. Вероятно, уже на ранних этапах формирования планет земной группы проявляется дифференциация метеоритного вещества, которая усиливается в результате столкновений и взаимодействия космических тел в главном поясе астероидов. Таким образом, процесс фракционирования элементов при образовании различных стекловатых компонентов метеорита Челябинск устанавливается геохимическими исследованиями.

Авторы выражают благодарность жителям Челябинской области В.Ф. Ермолаевой и В.В. Молодзиевскому за присланные фрагменты метеорита и особую благодарность В.И. Гроховскому за предстательственную коллекцию предоставленных для исследований образцов метеорита, а также за замечания по тексту статьи и полезную дискуссию. Авторы весьма признательны всем коллегам, выполнившим аналитические и графические работы в лабораториях ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН и ИрГТУ (г. Иркутск).

Исследование проведено в рамках государственного задания по Проекту IX.129.1.3. (0350-2016-0029) и при поддержке проекта государственного задания Минобрнауки № 3.9620.2017/8БЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антипин В.С., Кузьмин М.И., Печерский Д.М., Цельмович В.А., Язев С.А. (2014) Вещество метеорита Челябинск: результаты геохимических и термомагнитных исследований. *Докл. АН*, **458**(1), 57-60.
- Анфилогов В.Н., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Еремышев В.Е., Кабанова Л.Я., Лебедева С.М., Лонщакова Г.Ф., Хворов П.В. (2013) Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск. *Литосфера*, (3) 118-129.
- Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е. (2013) Фрагменты челябинского метеоритного дождя: распределение по массам, размерам и возможная масса максимального фрагмента. *Геохимия*, (7), 643-646.
- Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. (2013) Особенности минерального и геохимического состава метеорита Челябинск. *Литосфера*, (3), 106-117.
- Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова Н.Н., Рощина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С. (2013) Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск. *Геохимия*, (7), 580-598.
- Колисниченко С.В. (2014) Метеорит Челябинск: хроника событий. *Метеорит Челябинск – год на Земле. Мат-лы Всерос. науч. конф.* Челябинск: Мин-во культуры Челяб. обл., 19-55.
- Коротеев В.А., Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. (2013) Состав и строение метеорита Челябинск. *Докл. АН*, **451**(4), 446-450.
- Метеорит Челябинск – год на Земле. (2014) *Мат-лы Всерос. науч. конф.* Челябинск: Мин-во культуры Челяб. обл., 694 с.
- Назаров М.А. (2014) Метеоритный ливень над Уралом. *Природа*, (5), 3-6.
- Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А., Шаронова З.В. (2012) Внеземные магнитные минералы. *Физика земли*, (7-8), 103-120.
- Скублов С.Г., Гусева Н.С., Пресняков С.Л., Ли С.-Х., Марин Ю.Б., Сергеев С.А., Бережная Н.Г., Тюленева Н.В., Алексеев В.И. (2015) U-Pb возраст циркона и история импактных преобразований метеорита Челябинск. *Докл. АН*, **462**(4), 461-466.
- Фортвов В.Е., Султанов В.Г., Шутов А.В. (2013) Взрыв челябинского суперболида в атмосфере Земли: рядовое событие или уникальное стечение обстоятельств? *Геохимия*, (7), 609-628.
- Ханчук А.И., Гроховский В.И., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А., Кияшко С.И. (2013) Первые данные изотопного состава кислорода, углерода и серы метеорита Челябинск. *Докл. АН*, **452**(3), 317-320.
- Bouvier A. (2013) Pb-Pb chronometry of the dark melt lithology of the Chelyabinsk LL-chondrite. *Proc. Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution V Conf., LPI*, 3087-3087.
- Wasson J.T., Kallemeyen B.W. (1988) Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A325**, 535-544.

REFERENCES

- Anfilogov V.N., Belogoub E.V., Blinov I.A., Eremyshhev V.E., Kabanova L.Ya., Lebedeva S.M., Lonschakova G.F., Khvorov P.V. (2013) Petrography, mineralogy and structure of the meteorite Chelyabinsk. *Litosfera*, (3), 118-129. (In Russian)
- Antipin V.S., Kuz'min M.I., Pecherskii D.M., Tsel'movich V.A., Yazev S.A. (2014) The substance of the Chelyabinsk meteorite: Results of geochemical and thermomagnetic studies. *Dokl. Earth Sci.* **458**(1), 1082-1085.
- Badyukov D.D., Dudorov A.E. (2013) Fragments of the Chelyabinsk meteorite shower: Distribution of masses and sizes and constraints on the mass of the largest fragment. *Geochem. Int.*, **51**(7), 583-586.
- Berzin S.V., Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Khiller V.V. (2013) Structure, the mineralogical and geochemical composition of the meteorite Chelyabinsk. *Litosfera*, (3), 106-117. (In Russian)
- Bouvier A. (2013) Pb-Pb chronometry of the dark melt lithology of the Chelyabinsk LL chondrite. *Proc. Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution V Conf., LPI*, 3087-3087.
- Fortov V.E., Sultanov V.G., Shutov A.V. (2013) Chelyabinsk superbolide explosion in the Earth's atmosphere: A common phenomenon or unique coincidence? *Geochem. Int.*, **51**(7), 549-567.
- Galimov E.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A., Kostitsyn Yu.A., Kubrakova I.V., Kononkova N.N., Roshchina I.A., Alexeev V.A., Kashkarov L.L., Badyukov D.D., Sevastyanov V.S. (2013) Analytical results for the material of the Chelyabinsk meteorite. *Geochem. Int.*, **51**(7), 522-539.
- Khanchuk A.I., Grokhovskii V.I., Ignat'ev A.V., Velivetskaya T.A., Kiyashko S.I. (2013) The first data on the oxygen, carbon and sulphur isotope composition of the Chelyabinsk meteorite. *Dokl. Earth Sci.*, **452**(1), 967-970.
- Kolisnichenko S.V. (2014) Meteorite Chelyabinsk: chronicle of the events. *Meteorit Chelyabinsk – god na Zemle. Mat-ly Vseros. nauch. konf.* [Meteorite Chelyabinsk – one year on the earth. Collection of the sci. conf.]. Chelyabinsk, Min-vo Kul'tury Chelyabinskoi obl. Publ., 19-55. (In Russian)
- Koroteev V.A., Berzin S.V., Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Khiller V.V. (2013) Composition and structure of the Chelyabinsk meteorite. *Dokl. Earth Sci.*, **451**(2), 839-842.
- Meteorit Chelyabinsk – god na Zemle. Mat-ly vseros. nauch. konf.* [Meteorite Chelyabinsk – one year on the earth. Collection of the sci. conf.]. (2014) Chelyabinsk, Min-vo Kul'tury Chelyabinskoi obl. Publ., 694 p. (In Russian)
- Nazarov M.A. (2014) Meteoritic rain above Ural. *Priroda*, (5), 3-6. (In Russian)
- Pecherskii D.M., Markov G.P., Tsel'movich V.A., Sharonova Z.V. (2012) Extraterrestrial magnetic minerals. *Fizika Zemli*, (7-8), 103-120. (In Russian)
- Skublov S.G., Guseva N.S., Presnyakov S.L., Li S.Kh., Marin Yu.B., Sergeev S.A., Berezhnaya N.G., Tuleneva N.V., Alexeev V.I. (2015) U-Pb age of zircon and the history of impact transformations of the Chelyabinsk meteorite. *Dokl. Earth Sci.*, **462**(2), 586-591.
- Wasson J.T., Kallemeyen B.W. (1988) Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A325**, 535-544.