ЖЕЛЕЗНЫЙ МЕТЕОРИТ БОЛЬШОЙ ДОЛГУЧАН: РЕЗУЛЬТАТЫ МИНЕРАЛОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. И. Силаев¹, А. В. Кокин², В. Н. Филиппов¹, Д. В. Киселёва³, Н. С. Нефедьева⁴

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
silae@geo.komisc.ru

²РАНХиГС, Ростов-на-Дону, *alex@avkokin.ru*

³Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, *podarenka@mail.ru*

⁴Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар

Обсуждаются результаты минералогическо-геохимических исследований практически не изученного железного метеорита Большой Долгучан. Метеорит характеризуется атакситовой структурой, на 85—90 % железоникелевым составом, содержит более 50 микроэлементов, аномально обогащаясь Pt, Rh, Ru, Ir, Ti, W, Pb, Mo, B, Re. Выявлена примесь свободного изотопно-легкого углерода. Минеральный состав определяется железоникелевыми твердыми растворами и интерметаллидами, троилитом, беспрецедентным по химическому и номинальному составу хромшпинелидом. Впервые в метеоритах обнаружена кремниевая фаза, представляющая собой, вероятно, гидриды кремния или (и) силицид лития. По совокупности микроструктурных и минералогическо-геохимических свойств Большой Долгучан целесообразно отнести к группе единичных аномалов UNGR.

Ключевые слова: железный метеорит, микроструктура, железоникелевые твердые растворы и интерметаллиды, троилит, хромит, кремниевая фаза.

IRON METEORITE BIG DOLGUCHAN: RESULTS OF MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL RESEARCHES

V. I. Silaev¹, V. A. Kokin², V. N. Filippov¹, D. V. Kiseleva³, N. S. Nefedeva⁴

¹Institute of Geology, Komi Scientific Center, UB RAS,

²RANHGS, Rostov-on-Don

³Institute of Geology and Geochemistry UB RAS

⁴Syktывkar State University

The results of mineralogical and geochemical studies of iron meteorite Big Dolguchan are discussed. The meteorite is characterized by taxitic structure, 85—90 % nickel-iron composition contains more than 50 microelements, abnormally enriched Pt, Rh, Ru, Ir, Ti, W, Pb, Mo, B, Re. Also the admixture of free isotopically light carbon is revealed. The mineral composition is determined by the iron-nickel intermetallic compounds and alloys, troilite unprecedented chemical and nominal composition of chromespinelides. For the first time in meteorites we discovered a silicon phase, which is probably composed of silicon hydrides or (and) lithium silicide. From the combination of microstructural and mineralogical and geochemical properties of the Big Dolguchan is to be attributed to a group of single Anomalies UNGR.

Keywords: iron meteorite, microstructure, intermetallic compounds and alloys, nickel-iron, troilite, chromite, silicon phase.

Введение

Согласно современной статистике, среди упавших на Землю за последние 100—200 лет метеоритов [4, 18] резко преобладают (92.5—93.3 % встречаемости) каменные — хондриты и ахондриты. На железные метеориты (сидериты) приходится 5.3—5.7 %, а на железокаменные всего 0.8—1.3 %. Очевидно, что относительная редкость железных метеоритов не может не сказываться на степени их изученности, хотя именно они и представляют собой наиболее ценный в научном отношении объект исследований. Последнее обусловлено по крайней мере двумя причинами. Во-первых, есть основания полагать, что железные метеориты как минимум не моложе Солнца, поскольку образовались за счет газопылевого облака, оставшегося после взрыва первоначальной сверхновой горячей массивной звезды [14, 17], и поэтому являются непосредственным продуктом звездного нуклеосинтеза. Во-вторых, железные метеориты могут представлять собой обломки металлических ядер планет земного типа, в которых происходили недостаточно пока понятные нам обменные процессы, сильно повлиявшие на формирование каменной мантии [12, 13].

Объект исследований

Объектом изучения послужил один из железных метеоритов, найденных в Восточной Сибири. Как известно, к настоящему времени здесь обнару-

жено 12 метеоритов (в последовательности мест падения с запада на восток) — Тунгусский, Нохтуйск, Попигаевский, Жиганск, Ундюлюнг, Бургали, Онелло, Пот-7, Большой Долгучан, Эльга, Тобычан, Семчан — из которых один является хондритом LL4 (Ундюлюнг), а остальные — палласитами и сидеритами, подразделенными по структуре на октаэдриты и атакситы [1, 3, 5, 6, 8]. По химической классификации некоторые из упомянутых железных метеоритов соответствуют группам IAB, IIЕ, IVA. В отношении других этот вопрос пока еще не решен. Наименее изученным в настоящее время восточносибирским метеоритом является железный метеорит Большой Долгучан, найденный в сентябре 1992 г. горным мастером В. Ф. Романовым при отработке аллювиальной золотой россыпи на одноименной реке — притоке р. Онелло, впадающей, в свою очередь, в р. Хандыгу. Метеорит находился под толщей аллювиальных отложений мощностью от 5 до 20 и более метров, что свидетельствует о значительной давности его падения. Результаты предварительных исследований [7, 11] сразу же указали на уникальные особенности Большого Долгучана.

Исследуемый метеорит, названный так А. В. Кокиным, характеризуется уплощенно-каплевидной формой, типичной регмаглиптовой скульптурой поверхности, первоначальным размером 7.5 × 4.5 × 1.5 см, массой около 260 г, весьма однородным строением в разрезе (рис. 1). После находки метеорита небольшой его фрагмент (12.8 г) был передан в Институт геологии и мине-

Рис. 1. Внешний вид (а, б) и внутреннее строение (в) исследованного фрагмента железного метеорита Большой Долгучан
Fig. 1. Appearance (a, б) and internal structure (в) of the studied fragment of iron meteorite Bolshoy Dolguchan

ралогии СО РАН, где состав впервые был определен Г. Н. Гамяниным (неопубликованные данные). Основная часть метеорита (156 г) в настоящее время находится в коллекции Геологического музея им. А. А. Чернова при Институте геологии Коми НЦ УрО РАН.

Методы исследований

В ходе наших исследований использовались оптическая микроскопия (ПОЛАМ Р-312 в сочетании с компьютеризированным комплексом OLYMPUS BX51); рентгенофлуоресцентный анализ (XRF-1800 Shimadzu); определение содержания микроэлементов методом ИСП-МС (Perkin Elmer ELAN 9000); аналитическая СЭМ (JSM-6400, оснащенный энергодисперсионным и волновым спектрометрами); анализ валового содержания углерода методом кулонометрического титрования по величине pH (анализатор АН-7529М); рентгенофазовый анализ (Shimadzu XRD-6000); изотопная масс-спектрометрия (Delta V Advantage, международный стандарт USGS-40 и лабораторный стандарт C_8H_9NO). Большая часть анализов была осуществлена в Центре коллективного пользования «Геонаука» при Институте геологии Коми НЦ УрО РАН.

Результаты исследований

Валовый химический состав Большого Долгучана может быть представлен следующим образом (мас. %): Fe 85.64—89.08, Ni 8.79—9.26, Co 0.73—1.13, Si 0.51—1.41, S 0.06—0.35, P 0.08—0.43, Ca 0.12—1.03, Al 0.38—0.60, K 0.04—0.36. Полученные данные в отношении железа и никеля вполне типичны для железных метеоритов, но содержание кремния является повышенным раза в два. В составе исследуемого метеорита обнаружены более 50 микроэлементов, которые по результатам нормирования на средний хондрит (рис. 2, а) можно подразделить на *дефицитные* — хондритофилы (в скобках среднее содержание, мг/т): Mg (234117), Se (43), Zn (3363), Be (76), Zr (1480), Te (29), Hf (28), Ti (39076), Na (560777), Sr (2314), Li (891), Y (236), Ln (1192), Au (88), Sn (626), Rb (4352); *сопоставимые*: Ag (97), Cs (108); *избыточные* — сидеритофилы: Sb (129), Cr (37282), Pd (1737), Th (93), U (156), Ba (17952), Ga (11506), Ge (42300) и *аномально избыточные*: Pt (19500), Tl (11), W (1599), Pb (2342), Rh (2039), Ru (15559), Mo (10951), Ir (26391), Re (3088) и особенно В (161122).

Тренд лантаноидов (рис. 2, б) имеет отрицательный уклон, т. е. относительные содержания этих ми-

Рис. 2. Распределение микроэлементов в метеорите Большой Долгучан по хондритнормированным концентрациям, оконтурены элементы, аномально обогащающие метеорит (а) и соответствующий тренд хондритнормированных концентраций (б)

Fig. 2. Distribution of microelements in meteorite Bolshoy Dolguchan for chondrite normalized concentrations, elements are contoured, which anomalously enriching meteorite (а) and corresponding trend of chondrite normalized concentration (б)

кроэлементов сокращаются в направлении от легких лантаноидов к тяжелым. Получается, что железный метеорит Большой Долгучан относительно хондритов на 1—1.5 порядка обеднен именно тяжелыми лантаноидами самариевой и особенно иттриевой подгрупп. Это пока представляет для нас космогеохимическую загадку.

В качестве незначительной примеси (0.07 мас. %) в Большом Долгучане обнаружен свободный углерод с изотопным составом $\delta^{13}C_{PDB} = -24.9\text{‰}$, что вполне сопоставимо с хондритом Челябинск [15, 16].

В результате травления полированной поверхности 2—3 % спиртовым раствором HNO_3 в Большом Долгучане выявлена малоcontrastная микроструктура, обусловленная в основном срастанием двух разли-

Рис. 3. Вариации выявленной травлением микроструктуры метеорита Большой Долгучан: а — СЭМ-изображение в режиме упругоотраженных электронов; б—м — изображения в отраженном свете. Пояснения в тексте

Fig. 3. Variations in the microstructure, revealed by etching, in meteorite Bolshoy Dolguchan: а — SEM image in elastically backscattered electrons mode; б—м — reflected light images. Explanations are in the text

Рис. 4. Выделения кремниевой фазы (а—з) и пустоты, образовавшиеся после их кислотного выщелачивания (и, к) в метеорите Большой Долгучан. Минералы: Si — кремниевая фаза, FeNi — железоникелевые сплавы и интерметаллиды. СЭМ-изображения в режимах вторичных (а, в, д, ж, и, к) и упругоотраженных (б, г, е, з) электронов

Fig. 4. Silicon phase (а-з) and voids after acid leaching (и, к) in meteorite Big Dolguchan. Minerals: Si — silicon phase, FeNi — iron-nickel alloys and intermetallides. SEM images in secondary (а, в, д, ж, и, к) and elastically reflected (б, г, е, з) electrons

Таблица 1

Химический состав железоникелевой фазы, мас. %

Table 1

Chemical composition of FeNi phase, wt.%

№ п/п No	Fe	Ni	S	Эмпирические формулы Empirical formulas	Формулы с целочисленными коэффициентами Integral coefficient formulas
1	92.67	7.33	не обн.	$\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.07}$	Fe_{13}Ni
2	91.44	8.56	«	$\text{Fe}_{0.92}\text{Ni}_{0.08}$	Fe_{11}Ni
3	91.36	8.63	«	$\text{Fe}_{0.92}\text{Ni}_{0.08}$	Fe_{11}Ni
4	92.24	7.76	«	$\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.07}$	Fe_{13}Ni
5	92.06	7.94	«	$\text{Fe}_{0.92}\text{Ni}_{0.08}$	Fe_{12}Ni
6	92.59	7.41	«	$\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.07}$	Fe_{13}Ni
7	70.08	29.92	«	$\text{Fe}_{0.71}\text{Ni}_{0.29}$	Fe_5Ni
8	91.82	8.18	«	$\text{Fe}_{0.92}\text{Ni}_{0.08}$	Fe_{11}Ni
9	93.05	6.59	«	$\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.07}$	Fe_{13}Ni
10	87.29	12.71	«	$\text{Fe}_{0.88}\text{Ni}_{0.12}$	Fe_7Ni
11	73.10	26.90	«	$\text{Fe}_{0.74}\text{Ni}_{0.26}$	Fe_3Ni
12	91.90	8.10	«	$\text{Fe}_{0.92}\text{Ni}_{0.08}$	Fe_{11}Ni
13	93.09	6.91	«	$\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.07}$	Fe_{13}Ni
14	75.02	24.98	«	$\text{Fe}_{0.76}\text{Ni}_{0.24}$	Fe_3Ni
15	75.24	24.76	«	$\text{Fe}_{0.76}\text{Ni}_{0.24}$	Fe_3Ni
16	93.40	6.59	«	$\text{Fe}_{0.94}\text{Ni}_{0.06}$	Fe_{15}Ni
17	93.65	6.35	«	$\text{Fe}_{0.94}\text{Ni}_{0.06}$	Fe_{15}Ni
18	91.62	8.38	«	$\text{Fe}_{0.92}\text{Ni}_{0.08}$	Fe_{11}Ni
19	74.34	25.66	«	$\text{Fe}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}$	Fe_3Ni
20	90.91	9.09	«	$\text{Fe}_{0.51}\text{Ni}_{0.49}$	FeNi
21	91.00	9.00	«	$\text{Fe}_{0.91}\text{Ni}_{0.09}$	Fe_{10}Ni
22	89.41	10.59	«	$\text{Fe}_{0.90}\text{Ni}_{0.10}$	Fe_9Ni
23	90.88	9.12	«	$\text{Fe}_{0.91}\text{Ni}_{0.09}$	Fe_{10}Ni
24	47.29	52.06	0.65	$0.98\text{Fe}_{0.48}\text{Ni}_{0.52} + 0.02\text{FeS}$	FeNi
25	45.74	53.55	0.71	$0.97\text{Fe}_{0.53}\text{Ni}_{0.47} + 0.03\text{FeS}$	Fe_8Ni_7
26	92.62	7.38	не обн.	$\text{Fe}_{0.93}\text{Ni}_{0.07}$	Fe_{13}Ni
27	93.50	6.50	«	$\text{Fe}_{0.94}\text{Ni}_{0.06}$	Fe_{15}Ni
Размах / Range	45.74–93.65	6.35–52.06	0–0.71	$\text{Fe}_{0.51-0.94}\text{Ni}_{0.06-0.49}$	$\text{Fe}_{1-15}\text{Ni}_{1-7}$
Среднее Average	85.09	14.85	0.05		
СКО MSE	13.32	13.17	0.18		

Примечание. Размах — пределы колебания, среднее — среднее арифметическое, СКО — среднее квадратическое отклонение.

Note. Range — limits of fluctuations, Average — arithmetic average, MSE — mean square error.

чающихся по составу железоникелевых фаз (рис. 3, а). Первая из фаз богаче никелем, однороднее по составу и вследствие этого более устойчива к растворению. Вторая фаза, напротив, богаче железом и поэтому проявляет большую растворимость. Микросимплектитовые сращения этих фаз, образованные пластинчатыми индивидами субмикронного размера, имеют вид веерообразных, местами спутанно-волоконистых агрегатов (рис. 3, б–г). На некоторых участках наблюдается решетчатая микроструктура (рис. 3, д–ж). При изменении формы индивидов от пластинчато-ламелевидной до изометричной микроструктура метеорита становится еще более неоднородной (рис. 3, з–м).

Характер срастаний индивидов свидетельствует об их образовании путем совместной кристаллизации. В целом можно констатировать, что выявляемая травлением картина не демонстрирует достаточно развитых видманштеттеновых или неймановских фигур. На этом основании структуру метеорита Большой Долгучан действительно можно определить как атакситовую.

По результатам рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов минеральный состав Большого Долгучана на 95 % состоит из самородных железоникелевых интерметаллидов и нестехиометричных по составу фаз (табл. 1). По частоте встречаемости резко преобладает (58 %) камасит состава $\text{Fe}_{0.90-0.97}\text{Ni}_{0.03-0.10}\text{Cr}_{0-0.01}$. Более редким (22 %) является тетраэзит состава $\text{Fe}_{0.43-0.58}\text{Ni}_{0.42-0.57}$, тетрагональная структура которого подтверждена рентгенодифрактометрическим методом ($a_0 = 0.22535$ нм; $c_0 = 0.3582$ нм). Еще реже (20 %) отмечаются неупорядоченные по составу железоникелевые фазы — плесситы состава $\text{Fe}_{0.68-0.88}\text{Ni}_{0.12-0.29}\text{Cr}_{0-0.05}$. Типоморфной особенностью железоникелевых интерметаллидов и фаз в исследуемом метеорите является спорадически встречающаяся в них незначительная примесь серы. В сравнении с хондритом Челябинск, в котором явно преобладают плесситы, Большой Долгучан характеризуется гораздо более упорядоченным составом железоникелевых минералов (рис. 4).

Вторым по содержанию (около 2 %) минеральным компонентом Большого Долгучана выступает неопределенная пока ближе кремниевая фаза, в составе которой кроме железа никаких дополнительных к кремнию элементов, включая и легкие — О, С и N, пока не установлено (табл. 2). Следовательно, обнаруженная в Большом Долгучане кремниевая фаза не является ни оксидом, ни нитридом, ни карбидом. При этом она характеризуется значительным дефицитом суммы и бурно растворяется с пузырением при кислотном травлении. На таком основании можно предположить, что выявленная фаза все же является соединением кремния с каким-то неопределенным пока легким химическим элементом, например водородом (гидриды кремния) или литием (силициды лития).

Следует напомнить, что именно присутствие лития в кремниевой фазе может объяснить бурную реакцию последней с раствором кислот. Проведенные расчеты показали, что при относительно невысоком массовом содержании — около 1 г/т — атомная концентрация лития относительно кремния в Большом Долгучане превышает таковую в Солнечной системе в 6—7 раз, а в хондрите Челябинск — в 13—15 раз.

Под микроскопом кремниевая фаза представлена довольно равномерно распределенными в железоникелевом матриксе частицами, большей частью неправильными, часто стержневидными по форме, размером 5—30 мкм (рис. 5, а—з). После кислотного травления на месте выделений кремниевой фазы образуются конусообразные пустоты, точно соответствующие по форме и размеру растворившимся индивидам (рис. 5, и, к).

Характерной примесью в исследуемом метеорите является моносulfид, наблюдающийся спорадически в виде ультрамикронезовых амёбообразных по форме выделений (рис. 6, а—в). По данным рентгенофазового анализа он может быть отнесен к троилиту. Однако результаты рентгеноспектрального микрозондового анализа показывают, что в этом минерале при его видимой гомофазности практически всегда выявляется избыток железа и никеля, рассчитывающийся на 9—20 %-ю примесь железоникелевого минерала по составу в большинстве случаев отвечает камситу. Исходя из такой гипотезы, нестехиометричные составы sulfида мы рассчитали на твердые растворы железоникелевой фазы в троилите и твердые растворы троилита в железоникелевой фазе (табл. 3). Оказалось, что по частоте встречаемости предполагаемые твердые растворы практически равноправны, но состав нормативной железоникелевой фазы в твердых растворах на основе троилита всегда оказывается гораздо более железистым, чем состав железоникелевой фазы с растворенным в ней троилитом.

В целом полученная картина приводит к выводу об эпигенетическом по отношению к железоникелевой матрице образовании sulfидов. Не исключено, что появление sulfидной фазы в Большом Долгучане произошло в результате sulfуризации первоначально бессернистых металлических сплавов, в ходе которой в sulfидную фазу из железоникелевой матрицы переходило преимущественно железо, а остаток обогащался никелем, образуя внутри выделений sulfида включения модифицированной фазы железистого никеля (рис. 6, г—е).

Химический состав кремниевой фазы, мас. %

Chemical composition of Si phase, wt. %

№ п/п / No	Si	Fe	Ni	Сумма / Total
1	71.18	1.34	не обн. n/d	72.52
2	77.29	1.34	«	78.63
3	77.49	1.47	«	78.96
4	74.96	1.28	«	76.24
5	82.41	1.90	«	84.31
6	80.16	3.24	«	83.40
7	78.72	4.52	«	83.24
8	62.34	2.70	«	65.04
9	71.74	2.76	«	74.50
10	75.86	3.14	«	79.0
11	90.10	4.49	0.48	95.07
12	67.18	1.43	не обн.	68.61
13	67.37	9.44	«	76.81
14	77.49	3.61	«	81.10
15	58.50	7.02	«	65.52
16	65.41	7.01	«	72.42
17	74.46	2.28	«	76.74
18	61.66	11.98	0.69	74.33
19	64.64	7.75	не обн.	72.39
20	63.65	2.60	«	66.25
21	67.64	4.54	«	72.18
Размах / Range	61.66—90.10	1.34—11.98	0—0.69	65.04—95.07
Среднее / Average	71.92	4.09	0.06	76.06
СКО / MSE	8.0	2.96	0.18	7.17

Таблица 2

Table 2

Рис. 5. Микрогнездовые выделения моносulfидов (Tr) в железоникелевом матриксе (а–в); внутри сульфидных выделений наблюдаются включения новообразованной фазы железистого никеля — NiFe (г–е). СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов

Fig. 5. Micronest locations of monosulfides (Tr) in iron-nickel matrix (a–b), inside the sulfide formations inclusions of newly formed phases of ferrous nickel are visible — NiFe (c–e). SEM images in the mode of elastically scattered electrons

Рис. 6. Единичные зерна хромшпинелидов (Хрм) в железоникелевом (FeNi) матриксе. СЭМ-изображения в режимах вторичных (а) и упругоотраженных (б–г) электронов

Fig. 6. Single grains of chromspinelides (CRM) in FeNi matrix. SEM images in secondary (a) and elastically reflected (b–d) electrons

Изредка в исследуемом метеорите встречается хромшпинелид, представленный единичными зернами неправильной формы размером от 5×10 до 60×120 мкм (рис. 7). Под оптическим микроскопом видно (рис. 3, м), что железоникелевые фазы образуют вокруг зерен хромшпинелидов микроструктуры обтекания, что свидетельствует о раннем, додеформационном образовании этих зерен в металлическом матриксе.

По химическому составу (табл. 4) хромшпинелид в Большом Долгучане весьма необычен — $(\text{Fe}_{0.95-0.97}\text{Mn}_{0-0.14}\text{Ni}_{0-0.03})(\text{Cr}_{1.68-2}\text{Fe}_{0.04-0.32})_2\text{O}_4$. Пересчет полу-

ченных данных на миналы показывает, что этот минерал на 80–95 мол. % состоит из хромита. Из минальных примесей в нем присутствуют магнетит, манганохромит и никромит. На фоне земных [10] и даже лунных [9] хромшпинелидов хромит, обнаруженный в Большом Долгучане, выглядит еще более аномальным, чем хромит, выявленный в хондрите Челябинск [15, 16].

Хромшпинелиды земного происхождения, как известно, всегда характеризуются полиминальностью, реализуя в своем составе множество трендов изменения химического состава (рис. 8). Это объясня-

Таблица 3

Химический состав троилита, мас. %

Table 3

Chemical composition of troilite, wt. %

№ п/п No	Fe	Ni	Cr	S	Эмпирические формулы Empirical formulas
1	68.29	2.80	не обн.	28.91	$0.83\text{FeS} + 0.17\text{Fe}_{0.87}\text{Ni}_{0.13}$
2	67.50	0.78	«	31.72	$0.90\text{FeS} + 0.10\text{Fe}_{0.94}\text{Ni}_{0.06}$
3	67.07	0.69	«	32.24	$0.91\text{FeS} + 0.09\text{Fe}_{0.94}\text{Ni}_{0.06}$
4	70.50	-	«	29.50	$0.84\text{FeS} + 0.16\text{Fe}$
5	67.43	0.66	«	31.91	$0.90\text{FeS} + 0.10\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$
6	70.59	0.72	«	28.69	$0.83\text{FeS} + 0.17\text{Fe}_{0.97}\text{Ni}_{0.03}$
7	67.88	0.80	«	31.32	$0.89\text{FeS} + 0.11\text{Fe}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}$
8	69.11	0.65	«	30.24	$0.86\text{FeS} + 0.14\text{Fe}_{0.96}\text{Ni}_{0.04}$
9	64.26	5.55	1.01	29.18	$0.84\text{FeS} + 0.16\text{Fe}_{0.68}\text{Ni}_{0.06}$
10	67.94	3.98	0.96	27.12	$0.85\text{FeS} + 0.15\text{Fe}_{0.75}\text{Ni}_{0.20}\text{Cr}_{0.05}$
11	70.28	1.01	не обн.	28.71	$0.67\text{FeS} + 0.33\text{Fe}_{0.98}\text{Ni}_{0.02}$
12	76.75	1.32	«	21.93	$0.66\text{FeS} + 0.34\text{Fe}_{0.97}\text{Ni}_{0.03}$
13	55.58	23.51	1.14	19.77	$0.47\text{FeS} + 0.53\text{Fe}_{0.71}\text{Ni}_{0.27}\text{Cr}_{0.02}$
14	54.57	31.99	не обн.	13.44	$0.43\text{FeS} + 0.57\text{Fe}_{0.51}\text{Ni}_{0.49}$
15	85.20	2.21	0.24	12.35	$0.40\text{FeS} + 0.60\text{Fe}_{0.96}\text{Ni}_{0.03}\text{Cr}_{0.01}$
16	83.43	2.22	0.25	14.10	$0.34\text{FeS} + 0.66\text{Fe}_{0.96}\text{Ni}_{0.03}\text{Cr}_{0.01}$
17	59.90	24.63	не обн.	15.47	$0.49\text{FeS} + 0.51\text{Fe}_{0.58}\text{Ni}_{0.42}$
18	49.45	37.88	«	12.67	$0.41\text{FeS} + 0.59\text{Fe}_{0.43}\text{Ni}_{0.57}$
19	48.72	47.64	«	3.64	$0.22\text{FeS} + 0.78\text{Fe}_{0.91}\text{Ni}_{0.09}$
20	49.46	47.11	«	3.43	$0.12\text{FeS} + 0.88\text{Fe}_{0.49}\text{Ni}_{0.51}$
21	51.18	40.98	«	7.84	$0.40\text{FeS} + 0.60\text{Fe}_{0.91}\text{Ni}_{0.09}$
22	47.37	49.92	«	2.71	$0.10\text{FeS} + 0.9\text{Fe}_{0.47}\text{Ni}_{0.53}$
23	46.77	51.11	«	2.12	$0.08\text{FeS} + 0.92\text{Fe}_{0.49}\text{Ni}_{0.51}$
24	46.55	52.11	«	1.34	$0.05\text{FeS} + 0.95\text{Fe}_{0.47}\text{Ni}_{0.53}$
25	44.58	54.46	«	0.96	$0.03\text{FeS} + 0.97\text{Fe}_{0.45}\text{Ni}_{0.55}$

Рис. 7. Распределение железоникелевых фаз по составу: 1 — вариационная кривая для Большого Долгучана; 2 — гистограмма и вариационная кривая для хондрита Челябинск. Ниже графика отрезками показаны интервалы колебаний составов интерметаллидов в системе Fe–Ni (К — камасит, Т — тетратэнит, А — аваруйт) и моды в распределении железоникелевых фаз в метеорите Большой Долгучан (БД)

Fig. 7. Distribution of iron-nickel phases by composition: 1 — variation curve for Bolshoy Dolguchan; 2 — histogram and variation curve for chondrite Chelyabinsk. Below graph shows the lengths of the intervals intermetallide compounds fluctuations in the Fe–Ni system (K — kamasite, T — tetratene, A — avaruite) and modes in the distribution of iron-nickel phases in meteorite Bolshoy Dolguchan (BD)

ют полифазальностью, а то и полигенностью соответствующих горных пород [2]. Например, для наиболее глубоких по происхождению кимберлитовых хромшпинелидов выявляются шесть таких трендов, отражающих широкое разнообразие пропорций между всеми компонентами состава хромшпинелидных твердых растворов. Минералы из лунного реголита выглядят гораздо более однородными, но при этом все равно содержат довольно много алюминия при очень низком содержании магния. Хромшпинелиды из хондрита Челябинск в общем похожи на лунные, но отличаются гораздо меньшим содержанием алюминия и несколько более широким варьированием магнезиальности. Хромит же из железного метеорита Большой Долгучан выпадает из круга сопоставляемых хромшпинелидов земного и космического происхождения, характеризуясь предельно высоким содержанием хрома и отсутствием в своем составе регистрируемых микрозондовым методом содержаний магния и алюминия.

Заключение

По совокупности атакситового микростроения, особенностям химического и минерального состава, ассоциации микроэлементов железный метеорит Большой Долгучан не может быть отнесен ни к одной из уже определившихся в рамках Международной химической классификации групп. В настоящее время наиболее целесообразно отнести его к единичным аномалам группы UNGR. При этом следует подчеркнуть, что обнаружение кремниевой фазы, не отме-

Таблица 4

Химический состав хромшпинелидов в метеорите Большой Долгучан, мас. %

Table 4

Chemical composition of chromspinelides in meteorite Bolshoy Dolguchan, wt%

№ п/п No	Компоненты, мас. % / Components, wt %					Миналы, мол. % / Minerals, mol %			
	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	MnO	Сумма	FeCr ₂ O ₄	NiCr ₂ O ₄	MnCr ₂ O ₄	FeFe ₂ O ₄
1	44.12	54.55	0.84	не обн. n/d	99.51	81	3	—	16
2	31.75	65.80	0.53	1.30	99.38	94	2	4	—
3	34.91	63.93	не обн. n/d	1.07	99.91	95	—	3	2
4	35.06	63.47	«	1.29	99.82	93	—	4	3
5	34.59	63.68	«	1.39	99.66	93	—	5	2
6	33.65	64.28	«	1.34	99.27	95	—	4	1
Сред- нее Average	35.68	62.62	0.23	1.06	не опр. N/d	91.83	0.83	3.33	4
СКО MSE	4.31	4.04	0.37	0.53		5.38	1.33	1.75	5.97

Эмпирические формулы / Empirical formulas: 1 — (Fe_{0.97}Ni_{0.03})(Cr_{1.68}Fe_{0.32})₂O₄; 2 — (Fe_{0.92}Mn_{0.14}Ni_{0.02})_{0.98}Cr₂O₄; 3 — (Fe_{0.97}Mn_{0.03})(Cr_{1.96}Fe_{0.00324})₂O₄; 4 — (Fe_{0.96}Mn_{0.04})(Cr_{1.94}Fe_{0.06})₂O₄; 5 — (Fe_{0.95}Mn_{0.05})(Cr_{1.94}Fe_{0.06})₂O₄; 6 — (Fe_{0.96}Mn_{0.04})(Cr_{1.98}Fe_{0.02})₂O₄.

Рис. 8. Состав хромшпинелидов в метеорите Большой Долгучан (БД), хондрите Челябинск (МЧ) и лунном реголите (Луна) на фоне картины химизма хромшпинелидов земного происхождения в кимберлитах Верхне-Мунского поля (1, 2 — трубки соответственно Заполярная и Новинка) и Прианабарского района (3). Тренды химизма на а: 1 — магнотерритохромитовый, 2 — магнотерритохромитово-магнотерритохромитовый, 3 — магнотерритохромитово-магнотерритохромитовый; на б: 1 — шпинелехромитовый, 2 — герцинитохромитовый, 3 — магнетитохромитовый. Данные по кимберлитам заимствованы у В. К. Гаранина

Fig. 8. Composition of Cr-spinelides in meteorite Bolshoy Dolguchan (BD), Chelyabinsk chondrite (ChM) and lunar regolith (Moon) on the background of the picture of chemistry of terrestrial origin of the chromspinelides in kimberlites of Upper Muna field (1, 2 — pipes respectively Zapolyarnaya and Novinka) and Prianabarskogo area (3). Trends of the chemistry in a: 1 — magnetic-ferritic-chromitic, 2 — magnetic ferritochromitic-magnetic chromitic-chromitic, 3 — magnetic chromitic-magnetic-chromitic-chromitic; in б: 1 — spinel-chromitic, 2 — hercynitic-chromitic, 3 — magnetite chromitic. Data for kimberlites are taken from V. K. Garaniina

чающейся ранее ни в каменных, ни в железных метеоритах, делает Большой Долгучан приоритетным объектом исследований по программам изучения закономерностей первичного нуклеосинтеза, гетерогенной аккреции космического вещества и образования кремнево-железоникелевых зародышей планет земного типа.

Литература

1. Алявдин В. Ф. Железный метеорит Бургазли // Метеоритика. 1969. XXIX. С. 76—90.
2. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Поисковая минералогия алмаза. Новосибирск: Гео, 2010. 650 с.
3. Вронский Б. И. О находке железного метеорита Эльга // Метеоритика. 1962. XXII. С. 47—50.

4. Дудоров А. Е., Еретнова О. В. Частота падения метеоритов // Вестник Челябинского университета. № 1. Физика 19. С. 58—67.
5. Заславская Н. Н., Колесов Г. М., Барсукова Л. Д., Мигдисова Л. Ф. Химико-минералогический состав и структура железных метеоритов Жиганск, Билибино, Анюйский // Метеоритика. 1984. XLIII. С. 30—35.
6. Иванова Г. М., Кузнецова И. К. Железный метеорит Тобычан // Метеоритика. 1976. XXXV. С. 47—52.
7. Кокин А. В., Силаев В. И., Филиппов В. Н., Неведьева Н. С. Железный метеорит Большой Долгучан из Якутии как объект минералого-геохимического исследования // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Якутск. 2014. С. 37—40.
8. Копылова А. Г., Олейников Б. В., Соболев Н. В., Сушко О. А. Новый железный метеорит Онелло — уникальный высоконикелистый атаксит // Доклады РАН. 1999. Т. 368. № 2. С. 236—238.
9. Макеев А. Б. Лунные хромшпинелиды из реголита станций Луна-16, -20, -24 // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии. Сыктывкар, 2013. С. 97—99.
10. Маракушев А. А., Черенкова А. Ф., Черенков В. Г., Панях Н. А. Полифазальность алмазных пород кимберлитовых и лампроитовых трубок // Доклады РАН. 1994. Т. 337. № 4. С. 490—493.
11. Неведьева Н. С. Результаты минералого-геохимических исследований железного метеорита Большой Долгучан // Геолого-археологические исследования в Тимано-Североуральском регионе. Сыктывкар. 2014. С. 50—56.
12. Пушкарев Ю. Д., Старченко С. В. Твердое ядро как протопланетный зародыш и новый взгляд на природу магнитного поля // Материалы всесоюзной конференции. М., 2012. С. 154—158.
13. Рингвуд А. Е. О химической эволюции и плотности планет // Геохимия. 1960. № 1. 81 с.
14. Рыжов В. Н. Звездный нуклеосинтез — источник происхождения химических элементов // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 6 (8). С. 81—87.
15. Силаев В. И., Голубева И. И., Филиппов В. Н., Лютоев В. П., Симакова Ю. С., Потапов С. С., Петровский В. А., Хазов А. Ф. Метеорит Челябинск: минералого-петрографическая характеристика // Вестник Пермского университета. Геология. 2013. № 2. С. 8—27.
16. Силаев В. И., Филиппов В. Н., Голубева И. И., Лютоев В. П., Потапов С. С., Симакова Ю. С., Петровский В. А., Хазов А. Ф. Метеорит Челябинск. Результаты минералого-геохимических исследований // Метеорит Челябинск — год на Земле. Челябинск, 2014. С. 441—473.
17. Тейлор Р. Дж. Происхождение химических элементов. М.: Мир, 1978. 232 с.
18. Hughes D. W. Meteoritic falls and finds: some statistics // Meteorites. 1981. № 16. С. 269—281.
4. Dudorov A. E., Eretnova O. V. *Chastota padeniya meteoritov* (Frequency of meteorite fall). Vestnik Chelyabinskogo universiteta, No. 1, Fizika 19, pp. 58—67.
5. Zaslavskaya N. N., Kolesov G. M., Barsukova L. D., Migdisova L. F. *Himiko-mineralogicheskii sostav i struktura zheleznykh meteoritov Zhigansk, Bilibino, Anyuiskii* (Chemical and mineralogical composition and structure of iron meteorites Zhigansk, Bilibino, Anyuiskii). Meteoritika, 1984, XLIII, pp. 30—35.
6. Ivanova G. M., Kuznetsova I. K. *Zheleznyi meteorit Tobychan* (Tobychan iron meteorite). Meteoritika, 1976, XXXV, pp. 47—52.
7. Kokin A. V., Silaev V. I., Filippov V. N., Nefedeva N. S. *Zheleznyi meteorit Bolshoi Dolguchan iz Yakutii kak obekt mineralogo-geohimicheskogo issledovaniya* (Iron meteorite Bolshoy Dolguchan) as object of mineralogical-geochemical researches). *Geologiya i mineralno-syryevye resursy Severo-Vostoka Rossii*. Yakutsk, 2014, pp. 37—40.
8. Kopylova A. G., Oleinikov B. V., Sobolev N. V., Sushko O. A. *Novyi zheleznyi meteorit Onello — unikalnyi vysokonikelistyi ataksit* (New iron meteorite Onello — unique high nickel ataksite), *Doklady RAN*, 1999, V. 368, No. 2, pp. 236—238.
9. Makeev A. B. *Lunnye hromshpinelidy iz regolita stantsii Luna-16, -20, -24* (Moon chromespinelides from regolite of stations Luna-16, -20, -24). *Sovremennye problemy teoreticheskoi, eksperimentalnoi i prikladnoi mineralogii*. Syktyvkar, 2013, pp. 97—99.
10. Marakushev A. A., Cherenkova A. F., Cherenkov V. G., Paneyah N. A. *Polifatsialnost almaznykh porod kimberlitovykh i lamproitovykh trubok* (Polifacies of diamond rocks of kimberlite and lamproite pipes). *Doklady RAN*, 1994, V. 337, No. 4, pp. 490—493.
11. Nefed'eva N. S. *Rezultaty mineralogo-geohimicheskikh issledovaniy zheleznogo meteorita «Bolshoi Dolguchan»* (Results of mineralogical and geochemical researches of iron meteorite Bolshoy Dolguchan). *Geologo-arheologicheskoe issledovaniya v Timano-Severouralskom regione*. Syktyvkar, 2014, pp. 50—56.
12. Pushkarev Yu. D., Starchenko S. V. *Tverdoe yadro kak protoplanetnyi zarodysh i novyi vzglyad na prirodu magnitnogo polya* (Solid core as protoplanet nucleus and new approaches on nature of magnetic field). *Proceedings. Moscow*, 2012, pp. 154—158.
13. Ringvud A. E. *O himicheskoi evolyutsii i plotnosti planet* (Chemical evolution and density of planets). *Geokhimiya*, 1960, No. 1, 81 pp.
14. Ryzhov V. N. *Zvezdnyi nukleosintez — istochnik proishozhdeniya himicheskikh elementov* (Stellar nucleosynthesis — source of chemical elements). *Sorosovskii obrazovatelnyi zhurnal*. 2000, No. 6 (8), pp. 81—87.
15. Silaev V. I., Golubeva I. I., Filippov V. N., Lyutoev V. P., Simakova Yu. S., Potapov S. S., Petrovskii V. A., Hazov A. F. *Meteorit «Chelyabinsk»: mineralogo-petrograficheskaya harakteristika* (Chelyabinsk meteorite: mineralogical and petrographical characteristics). *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2013, No. 2, pp. 8—27.
16. Silaev V. I., Filippov V. N., Golubeva I. I., Lyutoev V. P., Potapov S. S., Simakova Yu. S., Petrovskii V. A., Hazov A. F. *Meteorit Chelyabinsk. Rezultaty mineralogo-geohimicheskikh issledovaniy* (Chelyabinsk meteorite. Results of mineralogical and geochemical studies). *Meteorit Chelyabinsk — god na Zemle*. Chelyabinsk, 2014, pp. 441—473.
17. Teilor R. Dzh. *Proishozhdenie himicheskikh elementov* (Origin of chemical elements). *Moscow, Mir*, 1978, 232 pp.
18. Hughes D. W. Meteoritic falls and finds: some statistics. *Meteorites*. 1981, No. 16, pp. 269—281.

References

1. Alyavdin V. F. *Zheleznyi meteorit Burgavli* (Burgavli iron meteorite) Meteoritika, 1969, XXIX, pp. 76—90.
2. Afanasev V. P., Zinchuk N. N., Pohilenko N. P. *Poiskovaya mineralogiya alмага* (Search mineralogy of diamond). Novosibirsk, Geo, 2010, 650 pp.
3. Vronskii B. I. *O nahodke zheleznogo meteorita Elga* (Elga iron meteorite). Meteoritika, 1962, XXII, pp. 47—50.

17. Teilor R. Dzh. *Proishozhdenie himicheskikh elementov* (Origin of chemical elements). Moscow, Mir, 1978, 232 pp.
18. Hughes D. W. Meteoritic falls and finds: some statistics. Meteorites. 1981, No. 16, pp. 269—281.