МИНЕРАЛЫ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 552.63

ЯРАТКУЛОВО – НОВЫЙ *Н*-ХОНДРИТ НА УРАЛЕ: МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В.В. Шарыгин¹, С.В. Колисниченко²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск; sharygin@igm.nsc.ru ²Центр геологического краеведения «Санарка», г. Челябинск; sanarka@mail.ru

YARATKULOVO – A NEW *H*-CHONDRITE IN THE URALS: MINERALOGICAL DATA

V.V. Sharygin¹, S.V. Kolisnichenko²

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk; sharygin@igm.nsc.ru ²Centre for Local Geological History «Sanarka», Chelyabinsk; sanarka@mail.ru

Метеорит Яраткулово был найден в 2016 году на территории Аргаяшского района Челябинской области. Он представляет собой «хондритовую брекчию», в которой относительно светлые крупнозернистые фрагменты (исходный хондрит) «погружены» в тёмно-бурую более мелкозернистую массу (импактные ассоциации). Хондры встречаются очень редко. По минералого-петрологическим характеристикам метеорит Яраткулово относится к петрологическому типу H5, степень ударного метаморфизма S5, степень выветривания W3. Хондрит содержит оливин ($Fo_{79.1}Fa_{20.4}Tph_{0.5}$), ортопироксен ($En_{79.8}Fs_{19.0}Wo_{1.2}$), Сг-содержащий клинопироксен ($En_{46.8}Fs_{8.2}Wo_{45.0}$), плагиоклаз (маскеленит) ($Ab_{83.7}An_{10.5}Or_{5.8}$), хромит, хлорапатит, мерриллит, троилит и Fe-Ni металлы (камасит, тэнит, тетратэнит). Также выявлены субмикронные зёрна SiO₂-полиморфа и саркопсида-графтонита. Вторичные гипергенные продукты образуют многочисленные прожилки, рассекающие весь метеорит, а также псевдоморфозы по троилиту и металлу. Они представлены гётитом, «гидрогётитом» и Fe-гидросульфидом, реже – гипсом и Fe-Ni-сульфатом.

Илл. 10. Табл. 4. Библ. 21.

Ключевые слова: хондрит, импактный расплав, хондры, хлорапатит, мерриллит, гётит, Яраткулово, Урал.

The Yaratkulovo meteorite was found in 2016 in the Argayash district of the Chelyabinsk region. It is a «chondrite breccia», in which the light coarse-grained fragments (primary chondrite) occur in the dark fine-grained matrix (impact assemblages). Chondrules are very rare. By mineralogy and petrology, the Yaratkulovo meteorite belongs to H5 chondrite type, its impact degree is S5, and weathering degree is W3. The chondrite contains olivine (Fo_{79.1}Fa_{20.4}Tph_{0.5}), orthopyroxene (En_{79.8}Fs_{19.0}Wo_{1.2}), Cr-bearing clinopyroxene (En_{46.8}Fs_{8.2}Wo_{45.0}), plagioclase (maskelenite) (Ab_{83.7}An_{10.5}Or_{5.8}), chromite, chlorapatite, merrillite, troilite and Fe-Ni metals (kamacite, taenite, tetrataenite), as well as micron-sized grains of the SiO₂ polymorph and sarcopside-graftonite. Supergene minerals (goethite, «hydrogoethite», Fe-hydrosulfide, and rare gypsum and Fe-Ni-sulfate) form numerous veinlets in meteorite and pseudomorphs after troilite and metals.

Figures 10. Tables 4. References 21.

Key words: chondrite, impact melt, chondrules, chlorapatite, merrillite, goethite, Yaratkulovo, Urals.

Введение

Падение метеорита Челябинск в феврале 2013 года [4] спровоцировало «метеоритный бум» по поиску новых метеоритов и фрагментов ранее известных метеоритов. За последние несколько лет найдено несколько новых образцов метеорита Кунашак [8], метеоритов Царёв, Чинге и других. Всё это также способствовало детальному исследованию всех найденных на Урале метеоритов, включая метеорит Челябинск [1–7, 9, 10, 15–17].

Данная работа представляет собой первые результаты исследования вещественного состава метеорита Яраткулово, найденного в мае 2016 года на территории Аргаяшского района Челябинской области. Метеорит был зарегистрирован 10 декабря 2016 года в Международном метеоритном обществе (International Society for Meteoritics and Planetary Science) под названием «Yaratkulova».

Методы исследования

Для исследований использовались отдельные мелкие кусочки метеорита, помещённые в шашку, шлифы и полированные срезы метеорита Яраткулово. Предварительная оптическая идентификация минералов была проведена на микроскопе Olympus BX-51 (отражённый свет). Химический состав минералов метеорита был детально изучен на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU с энергодисперсионным спектрометром (EDS) (система микроанализа INCA Energy 450 XMax-80, Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск). На этом приборе были также сделаны фотографии в обратнорассеянных электронах (BSE) и элементные карты для различных минеральных ассоциаций. Условия EDS-анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного пучка 1 нА, время набора спектров 20-60 сек. В качестве образцов сравнения для большинства элементов были использованы простые химические соединения и металлы: SiO₂ (Si, O), Al₂O₂ (Al), диопсид (Mg, Ca), альбит (Na), ортоклаз (K), Ca₂P₂O₇ (P), Ti, Fe, Mn, Zn и другие. Для количественной оптимизации (нормировка на ток зонда и калибровка спектрометра по энергии) применялся металлический Со.

После EDS, большинство анализов главных минералов было повторено на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8100 (Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск) в режиме волновой дисперсии (WDS). Условия WDS-анализа для силикатов, фосфатов и оксидов: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 20 нА, диаметр пучка 2 мкм, стандарты – Мл-гранат (Мл, Fe), диопсид (Ca, Si, Mg), альбит (Na), ортоклаз (K, Al), рутил (Ti), хромит (Cr), хлорапатит (P, Cl), V₂O₅ (V) и Sr-силикатное стекло (Sr). Время набора на пике (фоне) для каждого элемента составляло 10 (5 + 5) сек. Коррекция на матричные эффекты выполнялась по методу РАР. Ошибка определения главных элементов составляла менее 2 отн. %. Для анализа металлов и сульфидов использовались другие параметры и стандарты: ток 30 нА, коррекция ZAF, троилит (S), халькопирит (Cu), железо (Fe), кобальт (Со), сплав Fe-Ni-Co (Ni). Для более корректного определения Со, время набора на пике (фоне) для этого элемента было увеличено до 20 (10 + 10) сек. Предел обнаружения для Со составлял 0.0087 мас. %. В процессе анализа удалось избежать наложения Fe Кβ на Со Ка за счёт использования разных спектрометров (LiF и LiFH), но при этом постоянно проводилась проверка стандарта Fe.

История находки и строение метеорита

Метеорит был найден 3 мая 2016 года на территории Аргаяшского района Челябинской области при поисковых работах. Место находки расположено в 3.5 км юго-западнее дер. Яраткулово («Яраткулова»). Авторы находки – исследователь-краевед Л.Б. Пудовкин и минералог С.В. Колисниченко. Район для поисков был выбран не случайно. Один из авторов данной статьи (С.В. Колисниченко), начиная с 1989 года, дважды наблюдал на утреннем небосклоне низколетящие искрящие болиды к западу от Челябинска. Все это подталкивало к поисковым работам именно в Аргаяшском районе.

Местность в районе дер. Яраткулово представлена чередованием лесных массивов и полей. Рельеф равнинный, слегка всхолмлённый. Метеорит был обнаружен на пастбище в почвенном слое на глубине от 3 до 10–12 см. Общая масса метеорита 399.15 грамм. Было найдено 7 фрагментов (в граммах: 190, 136, 33.35, 15.6, 16.0, 7.0 и 1.2), которые легко складываются в единое целое. Все обломки были обнаружены на площади 5×6 м, что говорит о том, что метеорит, возможно, раскололся на отдельные фрагменты либо от удара о землю, либо при использовании некогда пахотных земель.



Форма метеоритного тела округлая, многогранная, угловатая. Поверхность шероховатая, неровная. На одной из сторон видны сохранившиеся регмаглипты с выемками типа «отпечатков пальцев». Это говорит о том, что данный объект представляет лишь малую часть расколовшегося при полете в атмосфере космического тела, упавшего на Землю, и, возможно, является частью небольшого метеоритного дождя. В целом метеорит мог иметь размер 25 × 30 × 30 см и более.

На поверхности метеорит имеет светло-коричневатый цвет за счёт гидроокислов железа (рис. 1). Окраска пятнистая неравномерная, местами иногда просматривается сохранившаяся блестящая кора оплавления. По крупным фрагментам проходят параллельные волнистые трещины шириной до 2–3 мм, исчезающие с глубиной. Местами они заполнены гидроксидами железа, иногда гипсом.

Метеорит Яраткулово представляет собой «хондритовую брекчию» (см. рис. 1), в которой относительно светлые крупнозернистые фрагменты размером 0.5–1.5 см (исходный хондрит) «погружены» в тёмно-бурую более мелкозернистую мас*Рис. 1.* Общий вид одного из фрагментов метеорита Яраткулово (а) и его внутреннее брекчиевидное строение (б).

Fig. 1. General view of a fragment of the Yaratkulovo meteorite (a) and its inner breccia-like structure (6).

су (импактные ассоциации). Следует отметить, что весь метеорит пронизан сетью тонких прожилков гидроксидов железа, которые также заполняют все трещинки в минералах, а иногда и межзерновое пространство. Хондры встречаются очень редко. Количество троилита и металла невелико, бо́льшая часть их замещена Fe-гидроксидами. Продукты замещения вокруг силикатов и других минералов практически отсутствуют. Исходя из этих данных, степень выветривания метеорита соответствует W3 (> 60 % металла и троилита замещены). В целом, метеорит Яраткулово по своему строению сильно напоминает «хондритовую брекчию» в метеорите Челябинск (светлый хондрит в тёмной импактной мелкозернистой массе), что наиболее характерно для чебаркульского тела и крупных фрагментов метеоритного дождя [1-3, 9, 15-17]. Все это свидетельствует об очень сложной доземной истории метеорита Яраткулово.

Минералого-генетические ассоциации в метеорите Яраткулово

Несколько фрагментов метеорита Яраткулово были изучены нами на сканирующем микроскопе. Как и в других хондритах, в метеорите Яраткулово можно выделить четыре основных парагенезиса: первичный хондрит (хондры, матрикс); импактные ассоциации; кора оплавления и продукты вторичных замещений. К настоящему времени в метеорите Яраткулово найдены 22 минерала (табл. 1).

Первичная хондритовая ассоциация (примерно 30 % от объёма) образует относительно светлые крупнозернистые фрагменты размером 0.5–1.5 см в тёмно-бурой более мелкозернистой массе (импактные ассоциации) метеорита (см. рис. 1). Форма этих фрагментов округлая, овальная, иногда угловатая, и они, по-видимому, представляют собой участки, не затронутые процессами плавления (рис. 2, 3). Средне-крупнозернистая масса в основном состоит из оливина, ортопироксена, плагиоклаза (маске-

Таблица 1

Список минералов, выявленных в хондрите Яраткулово

Table 1

Минерал	Формула	Минерал	Формула
Камасит	α-(Fe,Ni)	Диопсид	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆
Тэнит	γ-(Fe,Ni)	Альбит	(Na,Ca)AlSi ₃ O ₈
Тетратэнит	FeNi	Ортоклаз	(K,Na,)AlSi ₃ O ₈
Троилит	FeS	Маскеленит	(Na,Ca,K)AlSi ₃ O ₈
Fe-гидросульфид	(Fe,Ni) ₃ S ₄ · H ₂ O	Серпентин	(Mg,Fe) ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Гётит	(Fe,Ni)O(OH)	Клинохлор	(Mg,Fe) Al(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₈
<i>Fe-гидроксиды</i>	(Fe,Ni)(OH) ₃	Хлорапатит	Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl
SiO, полиморф	SiO,	Мерриллит	$Ca_{o}Na(Mg,Fe)(PO_{4})_{7}$
Хромит	$(Fe, Mg)(Cr, Al)_{2}O_{4}$	Саркопсид-графтонит	$Fe_3(PO_4)_2$
Форстерит	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	Гипс	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Энстатит	$(Mg,Fe)_2Si_2O_6$	Fe-Ni-сульфат	(Fe,Ni)SO ₄

List of minerals found in the Yaratkulovo chondrite

Примечание. Минералы идентифицированы по ЭДС-спектрам и элементным картам на сканирующем микроскопе (слабо идентифицированные выделены курсивом).

Note. Minerals are identified by EDS and elemental maps on a SEM (poorly identified minerals are typed in italic).



Рис. 2. Минеральная ассоциация во фрагменте исходного хондрита метеорита Яраткулово (BSE-фото) и распределение Fe и Ni в тэните (Tn) и тетратэните (Ttn).

Ol – оливин; Opx – ортопироксен; Pl – альбит; Crt – хромит; Ар – хлорапатит; Tro – троилит; Gt – гётит и другие Fe-гидроксиды.

Fig. 2. Mineral assemblage in a fragment of initial chondrite (BSE image) of the Yaratkulovo meteorite and distribution of Fe and Ni in taenite (Tn) and tetrataenite (Ttn).

Ol - olivine, Opx - orthopyroxene, Pl - albite; Crt - chromite; Ap - chlorapatite; Tro - troilite; Gt - goethite and other Fe-hydroxides.

ленита) и отдельных обособлений троилита и Fe-Ni-металла. Клинопироксен, хромит, хлорапатит и мерриллит локально появляются в этой ассоциации (см. рис. 2, 3). Во всех зёрнах минералов постоянно присутствуют микротрещиноватость, а большинство трещин заполнено теперь Fe-гидрооксидами. Оптические исследования шлифа метеорита Яраткулово показали, что по степени ударного метаморфизма он относится к S5: для оливина (а иногда и ортопироксена) характерны сильный мозаицизм, хорошо проявленные планарные трещины (три направления) и планарные элементы; в пироксене иногда наблюдается полисинтетическое двойникование; плагиоклаз подвергся частичной или полной изотропизации (маскеленит). В поляризованном свете в некоторых зёрнах плагиоклаза достаточно чётко видно, что центральная часть – это собственно плагиоклаз, тогда как краевая часть представляет собой изотропную фазу (маскелинит).

Количество хондр незначительное (петрологический тип 5), размеры их варьируют, но обычно не превышают 1–1.5 мм. Они имеют округлую или овальную форму и тонкоскелетное, мелко-микрозернистое или колосниковое строение (рис. 4). Минеральный состав хондр также варьирует, но в большинстве случаев ортопироксен является преобладающей фазой. Взаимоотношения фаз позволяют выявить последовательность их кристаллизации: оливин \rightarrow ортопироксен \rightarrow клинопироксен \rightarrow плагиоклаз (полевошпатовое стекло). Хромит, фосфаты, троилит и Fe-Ni-металл в хондрах очень редки. Следует отметить некоторые особенности для ортопироксена из хондр: в некоторых случаях его



Рис. 3. Мерриллит и хлорапатит в исходной хондритовой ассоциации метеорита Яраткулово (BSE-фото).

Мег – мерриллит, Срх – клинопироксен. Прочие символы см. рис. 2.

Fig. 3. Merrillite and chlorapatite inside initial chondrite assemblage of the Yaratkulovo meteorite (BSE image).

Mer – merrillite, Cpx – clinopyroxene. For other symbols, see Fig. 2.



Puc. 4. Хондры разного минерального состава и строения в исходной хондритовой ассоциации метеорита Яраткулово (BSE-фото).

Gl – стекло, Qu – полиморф SiO₂. Прочие символы см. рис. 2, 3.

Fig. 4. Chondrules with different mineral composition and structure inside initial chondrite assemblage of the Yaratku-lovo meteorite (BSE images).

Gl – silicate glass, Qu – SiO₂ polymorph. For other symbols, see Figs. 2 and 3.

МИНЕРАЛОГИЯ № 1 2017



Рис. 5. Обособления Fe-Ni металла в исходной хондритовой ассоциации метеорита Яраткулово (BSE-фото).

Ктс – камасит, Тп – тэнит, Тtn – тетратэнит, Src – саркопсид-графтонит; прочие символы см. рис. 2, 3.

Fig. 5. Aggregates of Fe-Ni metal inside initial chondrite assemblage of the Yaratkulovo meteorite (BSE images).

Kmc - kamacite, Tn - taenite, Ttn tetrataenite, Src - sarcopside-graftonite. For other symbols, see Figs. 2 and 3.



Символы см. рис. 2-5.

Fig. 6. Olivine-plagioclase chondrule and porphyritic aggregates in the impact area of the Yaratkulovo meteorite (BSE images).

For symbols, see Figs. 2–5.

зёрна имеют неоднородное строение за счёт появления зон или участков более магнезиального состава (см. рис. 4). Иногда такие участки ориентированы в одном направлении, что пока сложно интерпретировать; не исключено, что это результат ударного метаморфизма. Интерстиционная фаза в хондрах представлена плагиоклазом или полевошпатовым стеклом (маскеленитом), которые иногда трудноразличимы в случае их однородного строения. В одной из хондр были выявлены признаки девитрификации стекла с появлением субмикронных зёрен SiO₂-полиморфа (см. рис. 4). Некоторые микрозернистые обособления, которые также можно отнести к хондрам, содержат только плагиоклаз и хромит.

Троилит и Fe-Ni-металл образуют отдельные обособления до 0.5–1 мм в матриксе (см. рис. 2, 5), редко встречаются совместно и обычно частично или полностью замещены Fe-гидроксидами. Обособления металла различаются по минеральному составу: некоторые из них однородны и представлены камаситом, а другие – агрегатами камасит + тэнит ± тетратэнит, камасит + тетратэнит или тэнит + тетратэнит (см. рис. 2, 5). В качестве кристаллических включений в металле могут присутствовать силикаты, фосфаты и хромит.

Импактные ассоциации занимают до 70 % объёма метеорита (см. рис. 1) и являются продуктами частичного плавления исходного хондрита при ударном метаморфизме. Следует отметить, что на макроуровне отчётливо видны различия между исходным хондритом и импактными регионами (участками), тогда как в аншлифах и на BSEфотографиях они уже слабо различимы. В целом, импактные ассоциации – очень сложные образования, поскольку представляют собой «кашу», в которой присутствуют мелкие реликты исходного хондрита (сростки и отдельные зёрна минералов), порфировидные обособления, «ударные прожилки», реликты хондр, обильные интерстициальные обособления с признаками скелетного роста (при быстрой закалке). Иногда переходы между этими литологическими единицами трудноразличимы.

Наиболее чётко выделяются порфировидные образования (см. рис. 6). Форма их округло-угловатая, овальная, менисковидная, величина до 1.5-2 мм. Иногда они «слипаются» между собой. На начальной стадии исследований мы рассматривали их как слегка деформированные хондры с порфировой структурой (кристаллы оливина + закалённая межзерновая ассоциация). Однако постоянное присутствие вокруг них «ударных прожилков» с обильными металл-сульфидными глобулами предполагает более сложный их генезис. В большинстве случаев такие обособления содержат идеально огранённые кристаллы оливина (до 150 микрон) и межзерновую ассоциацию с признаками быстрой закалки, представленную плагиоклазом (стеклом) и клинопироксеном, иногда с хромитом и металлсульфидными глобулами (см. рис. 6). Обособления с ортопироксеном встречаются реже, причём ортопироксен образует как отдельные кристаллы, так и оторочки вокруг оливина. Скелетные формы роста (резкая закалка) характерны преимущественно для клинопироксена из порфировидных образований, а также из интерстиций между отдельными зёрнами (рис. 7).

Мелкие реликты исходного хондрита имеют микро-среднезернистую структуру и содержат оливин, ортопироксен и плагиоклаз (рис. 8). «Ударные прожилки» в основном занимают интерстиции между фрагментами разного состава в импактных ассоциациях. В некоторых случаях они действительно образуют своеобразные прожилки (см. рис. 8), содержащие округлые зёрна оливина, иногда орто-

Рис. 7. Скелетные формы роста клинопироксена в интерстициях и порфировых обособлениях импактной области метеорита Яраткулово (BSE-фото).

Fig. 7. Interstitial skeletal clinopyroxene crystals and those in porphyritic aggregates of the impact area of the Yaratkulovo meteorite (BSE images).





Рис. 8. «Ударный прожилок», импактная область метеорита Яраткулово (BSE-фото).

Fig. 8. «Impact vein», impact area of the Yaratkulovo meteorite (BSE images).

пироксена и плагиоклаза, а также металл-сульфидные глобулы и криптокристаллический интерстиционный агрегат. Глобулы содержат троилит и Fe-Ni-металл, причём зёрна металла обычно зональны: центр – камасит; край – тэнит или тетратэнит.

Кора оплавления в метеорите Яраткулово присутствует локально; к сожалению, в изученные фрагменты она не попала.

Вторичные гипергенные продукты имеют широкое распространение. В основном это прожилки, рассекающие весь метеорит, а также псевдоморфозы по зёрнам троилита и металла (рис. 9). Вторичные минералы представлены гётитом, «гидрогётитом» и пластинчатым Fe-гидросульфидом. При за-



Рис. 9. Вторичные гидроксиды и гидросульфид в продуктах замещения троилита и металла в метеорите Яраткулово (BSE-фото).

Gt – гётит, Hgt – «гидрогётит», HS – пластинчатый гидросульфид.

Fig. 9. Secondary hydroxides and hydrosulfide in alteration products after troilite and metal of the Yaratkulovo meteorite (BSE images).

 Gt – goethite, Hgt – «hydrogoethite», HS – tabular hydrosulfide.

мещении троилита выявлена последовательность: троилит → гидросульфид → гётит → «гидрогётит» (см. рис. 9). Некоторые зёрна троилита иногда замещены только гидросульфидом. В крупных трещинках помимо гётита и «гидрогётита» присутствует гипс, а также Fe-Ni-сульфат.

Химический состав минералов

Химический состав главных минералов метеорита Яраткулово в целом варьирует не очень значительно; средние составы их приведены в таблицах 2 и 3.

Оливин относится к форстериту с содержанием фаялитового минала 17.4-22.5 мол. % (в среднем 20.4), тефроитового минала не более 0.7 мол. %. Ортопироксен в основном представлен энстатитом с 17-24 мол. % ферросилитового минала (в среднем 19). Содержание волластонитового компонента 0.3-2.7 мол. % (в среднем 1.2). Исключение составляют более высокомагнезиальные составы из хондр (см. рис. 4), для которых характерны более низкие концентрации FeO (3.8-9.1 мас. %). Клинопироксен содержит (мас. %): Cr₂O₂ 0.5–1.0, TiO₂ 0.3-0.8, Al₂O₃ 0.5-0.9, MnO 0.2-0.3, - и по составу соответствует $En_{45.2-48.1}Fs_{6.2-10.7}Wo_{43.8-46.9}$. Плагиоклаз относится к альбиту-олигоклазу с 5.3–18.1 мол. % анортитового и 3.3-7.8 мол. % ортоклазового миналов. Хромит содержит 12.3-14.1 мол. % глинозёмистых миналов и 2.9-3.6 мол. % ульвошпинели. В составе хлорапатита определены примеси (мас. %): SrO 0.05–0.15, Na₂O 0.3–0.5 и SiO₂ 0.1–0.3, и лишь в некоторых зёрнах – значимые количества F (0.5-0.9 мас. %). Мерриллит также содержит примеси SrO < 0.1 мас. %, SiO₂ < 0.1 мас. % и FeO 0.5-1.6 мас. %. Троилит по своему составу близок к идеальному FeS. Камасит характеризуется незначительными колебаниями состава (Ni 4.5-8.2; Со 0.4-0.6 мас. %) в отличие от тэнита и тетратэнита (см. табл. 3; рис. 10). Широкие вариации состава тэнита, особенно в области низких концентраций Ni + Co (см. рис. 10), подразумевают, что не всегда это однородная фаза, поскольку возможно появление тонкокристаллического агрегата плессита (камасит + тэнит) или тэнита и тетратэнита. В одном из обособлений камасита (см. рис. 5) были выявлены ориентированные выделения тетратэнита, а также округлые-овальные глобулы Fe-фосфата (до 1 микрона). По качественному EDS анализу и элементным картам фосфат был идентифицирован как саркопсид-графтонит.

На классификационной диаграмме для обыкновенных хондритов (фаялитовый компонент в оливине – ферросилитовый компонент в ортопироксене) [18, 4] метеорит Яраткулово по-

Таблица 2

Table 2

Химический состав (мас. %, WDS-EDS) главных минералов метеорита Яраткулово

Chemical composition (wt. %, wDS-EDS) of major minerals of the faratkulovo meteorite														
Минерал	Форст	герит	оит Энстатит		Диопсид		Альбит		Хромит		Хлорапатит		Мерриллит	
	n=70	sd	n=63	sd	<i>n</i> =14	sd	n=33	sd	<i>n</i> =27	sd	<i>n=23</i>	sd	n=30	sd
P_2O_5	-		_		-		-		_		40.48	0.29	46.25	0.33
SiO ₂	39.04	0.17	56.16	0.31	53.90	0.31	64.77	0.37	_		0.11	0.04	0.03	0.03
TiO_2	_		0.09	0.11	0.48	0.15	_		2.33	0.21	_		—	
Cr_2O_3	_		0.16	0.14	0.81	0.12	_		56.43	0.42	_		—	
$V_2 O_3$	_		_		_		_		0.69	0.07	_		_	
Al_2O_3	_		0.08	0.13	0.67	0.16	21.48	0.21	6.22	0.29	_		_	
FeO	19.02	1.06	12.32	0.77	4.96	0.83	0.83	0.26	30.32	0.68	1.24	0.54	0.94	0.29
MnO	0.47	0.06	0.47	0.08	0.26	0.04	_		0.93	0.11	0.01	0.02	0.01	0.01
ZnO	_		_		_		_		0.18	0.24	_		—	
MgO	41.42	0.80	30.17	0.74	16.83	0.31	_		2.75	0.38	_		3.55	0.10
CaO	0.03	0.06	0.64	0.21	21.40	0.43	2.20	0.61	_		52.87	0.46	46.42	0.22
SrO	_		_		-		_		-		0.10	0.04	0.02	0.02
Na ₂ O	-		_		0.67	0.09	9.71	0.40	_		0.40	0.05	2.82	0.12
K ₂ O	-		_		-		1.02	0.32	_		_		0.06	0.02
F	-		_		_		_		-		0.29	0.40	_	
Cl	_		_		_		_		_		6.25	0.40	-	
SO_3	_		_		_		_		_		0.07	0.11	—	
Сумма	99.98		100.11		99.91		99.96		99.85		101.84		100.11	
$O-(Cl,F)_2$											1.54			
Сумма											100.30			
Состав	Fo791Fa2	₀₄ Tph ₀₅	En _{79.8} Fs ₁	Wo_{12}	En ₄₆₈ Fs ₈	2W0450	Ab _{83 7} An	$0.50r_{5.8}$	Crt	81.6	Cl-Aj	5 _{90 5}	Mer	87.0

hemical composition (wt. %, WDS-EDS) of major minerals of the Yaratkulovo meteorit

Примечание. Здесь и в табл. 3, n – среднее, sd – стандартное отклонение. Прочерк – не обнаружено. Note. Here and in Table 3, n – average, sd – standard deviation. Dash – not detected.

МИНЕРАЛОГИЯ № 1 2017

Таблица 3

Средний химический состав (мас. %) металлов и сульфидов в метеорите Яраткулово Table 3

Минерал	Кама	сит	Тэн	ИТ	Тетрат	энит	Троилит		Гидросу	льфид
	<i>n</i> = 41	sd	<i>n</i> = 43	sd	n = 20	sd	<i>n</i> = 26	sd	<i>n</i> = 9	sd
Fe	93.31	0.92	64.70	5.40	51.99	2.30	63.47	0.14	50.55	4.10
Co	0.50	0.06	0.13	0.05	0.14	0.04	0.00	0.01	0.38	0.14
Ni	6.17	0.87	35.15	5.53	47.91	2.12	0.02	0.04	2.93	1.13
Cu	_	_	0.09	0.04	0.07	0.06	_	_	_	_
S	_	_	_	_	_	_	36.49	0.09	39.98	2.76
0	_	_	_	_	_	_	_	_	5.31	1.77
Сумма	99.99		100.06		100.11		99.99		99.15	

Average chemical composition (wt. %) of metals and sulfides of the Yaratkulovo meteorite



падает в область Н-хондритов, пограничных с L-хондритами. По концентрации Со в камасите [20, 4] метеорит Яраткулово также располагается в поле Н-хондритов (Со 0.4–0.6 мас. %, в среднем 0.5 мас. %).

Вторичные Fe-гидроксиды характеризуются постоянным присутствием примесей SiO₂ до 6 мас. %, SO₃ до 1.5 мас. % и других компонентов, широкими вариациями содержаний NiO от нуля до 6.5 мас. % – в зависимости от замещаемого минерала (троилита или Fe-Ni-металла). В целом, гётит и «гидрогётит» хорошо различаются в отражённом свете и на BSE фотографиях (см. рис. 3, 5, 6, 9). В химическом плане различия также существенны: в гётите FeO_t 79– 88 мас. % при сумме 86–90 мас. %, а в «гидрогётите» FeO_t 62–72 мас. % при сумме 73–80 мас. %. Химический состав пластинчатого Fe-гидросульфида (см. табл. 3) значительно варьирует по всем ос*Рис.* 10. Вариации состава Ni + Co) (мас. %).

Fig. 10. Compositional variations of metals from the Yaratkulovo meteorite on the Fe - (Ni + Co) diagram (wt. %).

новным компонентам. В отличие от троилита, большинство зерен Fe-гидросульфида постоянно содержит Ni (2.2–5.5 мас. %), Co (0.2–0.6 мас. %) и кислород (3.7–8.0 мас. %), что хорошо проявляется на элементных картах. Лишь единичные зерна характеризуются низкими концентрациями Ni (0.5 мас. %) и Co (0.05 мас. %). К сожалению, нам пока не удалось идентифицировать этот минерал; вполне возможно, что по составу он близок к Fe₃S₄· H_2O .

Обсуждение и выводы

Структурно-текстурные характеристики метеорита Яраткулово свидетельствуют о том, что он (или его родительское тело) до падения на Землю подвергся существенной трансформации за счёт столкновения с другими космическими объектами. Минералого-петрографические исследования показывают, что метеорит Яраткулово можно отнести к петрологическому типу H5 [19], поскольку хондры ещё различимы. По степени ударного метаморфизма его следует рассматривать как S5 [21] по оптическим характеристикам главных минералов в исходном хондрите и из-за обилия «ударных прожилков». Степень выветривания метеорита соответствует W3, поскольку более 60 % металла и троилита замещено Fe-гидроксидами, а продукты изменения силикатов незначительны. В целом, по химизму некоторых минералов метеорит Яраткулово, по-видимому, немного тяготеет к L-хондритам [18, 20].

К сожалению, пока не понятен генезис порфировидных образований в импактной ассоциации метеорита Яраткулово. Что это на самом деле – специфические хондры или продукты дробления исходного хондрита на начальных стадиях ударного метаморфизма на отдельные мелкие фрагменты, которые затем подверглись частичному (полному) плавлению и быстрой закалке? Нельзя также исключать и другой вариант – наличие двух импактных событий. Первое ударное событие способствовало образованию импактных ассоциаций, подобных выявленным в Челябинском метеорите (оливин + закалённая межзерновая ассоциация) [2, 15–17], а второе ударное событие привело к дроблению этих участков на отдельные фрагменты и повторному частичному плавлению.

Время падения метеорита Яраткулово неизвестно. Однако высокая степень выветривания свидетельствует о том, что падение, скорее всего, было очень древним (более 100 лет). Наш аргумент – это сопоставление с метеоритом Кунашак, упавшим в 1949 году на северо-востоке Челябинской области. Местоположения этих двух метеоритов характеризуются одинаковыми климатическими условиями.

Таблица 4

Сравнительная характеристика обыкновенных хондритов Урала

Table 4

	Год	Петроло-	Степень	Степень					
Метеорит	падения,	гический	ударного	выветри-	Fa	Fs	Ab	Kms	Ссылки
	находки	ТИП	метаморфизма	вания					
Яраткулово	2016	Н5	S5	W3	21	19	84	6.1	Наши данные
									Анфилогов и др., 2013;
									Берзин и др., 2013;
		LL5	S4-S5-S6	W0	28	24	86		Галимов и др., 2013;
Челябинск	2013							5.3	Коротеев и др., 2013;
									Шарыгин и др., 2014;
									2015; Бадюков и др.,
									2015
Vanomor	1040	L5-L6	S5	W0	25	21	85	7.0	Мигдисова, Кононкова,
Кунашак	1747							7.0	1990; Ерохин и др., 2015
Урал	1981	Н5-Н6	S4-S5	W3	20	18	83	56	Коротеев и др., 2014;
								5.0	Ерохин и др., 2016а
Озёрное 1		L5 L5(LL5)-L6	S4 ?	W1-3	27 27	22 23		6.3	Хотинок, 1986; Логинов,
Озёрное 2	1983-1985								2004; Ерохин и др.,
									2016а-б
Свердловск	1985	H4-H5	>S4	W0-1	20	19		6.4	Логинов, 2004
Северный	1965	Н3	S4 ?	W3	19	20	82	73	Логинов, 2004; Ерохин и
Колчим	1705	115	54.		17	20	02	7.5	др., 2016а
Каргаполье	1961	H4	S4	W3-4	19) 19			Овчинников, Юдин,
									1966; Логинов, 2004;
		T /T T A #							Ерохин и др., 2016а
Мокроусово	1968	L/LL4-5	S4 ?	W3	19	16	74	6.1	Логинов, 2004
	1007	<u>H4-H5</u>	64.9	- NVO	20	20			н 2004
Оханск	1887	H4	S4 ?	WÜ	20	20			Логинов, 2004

Comparison of ordinary chondrites of the Urals

Примечание. Fa, Fs, Ab – доля компонента (мол. %): фаялитового (Fa) в оливине, ферросилитового (Fs) в ортопироксене, альбитового (Ab) в плагиоклазе; Kms – содержание Ni (мас. %) в камасите. Для некоторых метеоритов использованы данные с сайтов *geo.web.ru/db/meteorites/* (Метеоритная коллекция PAH) и *www.lpi.usra.edu/meteor/* (International Society for Meteoritics and Planetary Science). Жирный шрифт – год падения метеорита; курсив – год находки.

Note. Fa, Fs, Ab – content (mol. %) of fayalite (Fa) in olivine, ferrosillite (Fs) in orthopyroxene, and albite (Ab) in plagioclase; Kms – Ni content of kamacite (wt. %). Data from *geo.web.ru/db/meteorites/* (Meteorite Collection of RAS) and *www.lpi.usra.edu/meteor/* (International Society for Meteoritics and Planetary Science) were used for some meteorites. Bold font – year of meteorite fall; italic font – year of meteorite finding. Находки новых фрагментов метеорита Кунашак за последние два года показали, что степень выветривания их очень незначительна, несмотря на относительно продолжительный период (более 50 лет) пребывания на Земле.

Если учитывать древнее падение, то возникает вопрос – не является ли метеорит Яраткулово отголоском одного из ранее найденных метеоритов на Урале? Среди всех обыкновенных метеоритов Урала (табл. 4) Яраткулово наиболее близок к метеориту «Урал» [11, 14] по своим минералого-петрологическим характеристикам. Однако расстояние между местами падения этих метеоритов составляет более 350 км.

Авторы крайне признательны Н.С. Карманову, М.В. Хлестову и Е.Н. Нигматулиной (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за помощь в проведении исследований на сканирующем микроскопе и микрозонде. Авторы благодарны В.И. Гроховскому (ФТИ УрФУ) и В.И. Поповой (ИМин УрО РАН) за критические замечания.

Литература

1. Анфилогов В.Н., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Еремяшев 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.

2. Бадюков Д.Д., Райтала Й., Костама П., Игнатьев А.В. (2015) Метеорит Челябинск: ударный метаморфизм, импактный расплав и ударная адиабата. Петрология. 23(2), 115–128.

3. Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. (2013) Особенности минерального и геохимического состава метеорита «Челябинск». Литосфера. (3), 106–117.

4. Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Н.Н. Кононкова, Рощина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С. (2013) Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск. Геохимия. 51(7), 580–598.

5. Ерохин Ю.В., Коротеев В.А., Хиллер В.В., Бурлаков Е.В., Иванов К.С., Клейменов Д.А. (2015) Метеорит. «Кунашак»: новые данные по минералогии. Доклады АН. 464(5), 599–602.

6. Ерохин Ю.В., Берзин С.В., Хиллер В.В., Иванов К.С. (2016) Пентландит из обыкновенных хондритов Урала. Литосфера. (3), 139–146. 7. Ерохин Ю.В., Коротеев В.А., Хиллер В.В., Бурлаков Е.В., Иванов К.С., Клеймёнов Д.А. (2016) Метеорит «Озерное»: новые данные по минералогии. Доклады АН. 471(5), 579–582.

8. Колисниченко С.В. Новая находка метеорита Кунашак (2014). Минералогический альманах. 19(13), 12–13.

9. Коротеев В.А., Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. (2013) Состав и структура метеорита «Челябинск». Доклады АН. 451, 446–450.

10. Коротеев В.А., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Бурлаков Е.В., Иванов К.С., Клейменов Д.А. (2014) Метеорит «Урал»: новые данные по минералогии. Доклады АН. 459(1), 80–83.

11. Логинов В.Н. (2004) Метеориты Урала. Екатеринбург: УГГУ, 80 с.

12. Мигдисова Л.Ф., Кононкова Н.Н. (1990) Хондрит Кунашак – химические признаки ударного метаморфизма. *Метеоритика*. № 49. С. 57–70.

13. Овчинников Л.Н., Юдин И.А. (1966) Исследование каменного метеорита Каргаполье. Метеоритика. (27), 76–88.

14. Хотинок Р.Л. (1986). Новые метеориты СССР: Мокроусово, Урал, Озерное, Муслюмово, Ивановка, Бурхала. Метеоритика. (45), 108–109.

15. Шарыгин В.В., Карманов Н.С., Подгорных Н.М., Томиленко А.А. (2014) Минералогия и петрография «проплавленного» фрагмента метеорита Челябинск. Матер. Всеросс. науч. конфер. «Метеорит Челябинск – год на Земле». Челябинск: ЧГКМ, 637–653.

16. Шарыгин В.В., Яковлев Г.А., Карманов Н.С., Гроховский В.И., Подгорных Н.М. (2015) Минеральные ассоциации в пустотах тёмной литологии метеорита «Челябинск» (чебаркульский фрагмент). Матер. Всеросс. конференции «Онтогения, филогения, система минералогии», Миасс: ИМин УрО РАН, 2015, 205–217.

17. Andronikov A.V., Andronikova I.E., Hill D.H. (2015) Impact history of the Chelyabinsk meteorite: Electron microprobe and LA-ICP-MS study of sulfides and metals. *Planetary and Space Science*. 118, 54–78.

18. Bearley A.J., Jones R.H. (1998) Chapter 3. Chondritic Meteorites. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. *Mineralogical Society of America*. 36: Planetary Materials, 3-001–3-398.

19. Lodders K., Fegley B. (1998) The planetary Scientific companion. N.Y.: Oxford Univ. Press, 371 p.

20. Reisener R.J., Goldstein J.I. (2003) Ordinary chondrite metallography: Part 2. Formation of zoned and unzoned metal particles in relatively unshocked H, L, and LL chondrites. *Meteoritics and Planetary Sciences*. 38(11), 1679–1696.

21. Stoffler D., Keil K., Scott E.R.D. (1991) Shock metamorphism in ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 55. 3845–3867.

Поступила в редакцию 19 января 2017 г