

ПЕНТЛАНДИТ ИЗ ОБЫКНОВЕННЫХ ХОНДРИТОВ УРАЛА

© 2016 г. Ю. В. Ерохин, С. В. Берзин, В. В. Хиллер, К. С. Иванов

Институт геологии и геохимии УрО РАН

Поступила в редакцию 21.01.2016 г.

Принята к печати 12.04.2016 г.

Приводятся новые данные о химическом составе и морфологии выделений пентландита из метеоритов Урал (Н5-6), Кунашак (L5-6), Озерное (L5), Северный Колчим (Н3), Каргаполье (Н4) и Челябинск (LL5). В пентландите из обыкновенных хондритов выявлено закономерное уменьшение отношения Ni/Fe в ряду Н – L – LL хондритов, а также по направлению от 3 к 5-6 петрологическим типам внутри этих групп. Показано, что по Cu/Ni-отношению пентландит из изученных хондритов группы Н отличается от пентландита из L и LL хондритов.

Ключевые слова: пентландит, типохимизм, обыкновенные хондриты, Урал.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время нами проводится ревизия уральских метеоритов, выставленных в экспозиции Уральского геологического музея при Уральском государственном горном университете (г. Екатеринбург). В результате исследований были получены новые данные по минералогии некоторых обыкновенных хондритов, упавших и найденных в разное время в пределах Уральского региона, существенно дополняющие прежние литературные сведения. В статье приводятся результаты изучения пентландита из метеоритов Урал (Н5-6), Кунашак (L5-6), Озерное (L5), Северный Колчим (Н3), Каргаполье (Н4) и Челябинск (LL5), относящихся к классу обыкновенных хондритов. К сожалению, пентландит достаточно часто пропускается при исследовании метеоритов, хотя и является часто встречающимся второстепенным сульфидным минералом хондритов [27 и др.]. Как выяснилось, пентландит является вполне обычным минералом и для уральских метеоритов.

ОБЪЕКТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Хондрит Урал. Метеорит был найден местным жителем Л.А. Орловым в 1981 году рядом с поселком Урал (примерно в 60 км северо-восточнее г. Курган) [11, 12]. Позднее в 1984 году он был передан для изучения в Уральскую комиссию по метеоритам (вес переданного метеорита составлял 9.4 кг) и на данный момент его фрагмент (весом 360 гр.) хранится в Уральском геологическом музее. Метеорит определяется как обычный хондрит класса Н5-6 [8], он подвергся выветриванию, за счет чего приобрел коричневый цвет (как снаружи, так и внутри), местами на поверхности сохранились зоны опла-

вления. Минеральный состав: оливин (хризолит), ортопироксен (бронзит), клинопироксен (диопсид), плагиоклаз (альбит), хромит, камасит, тэнит, троилит, пентландит, а также вторичные гипергенные минералы (гетит, магнетит и арагонит) [8, 11, 12].

Пентландит в метеорите Урал встречается совместно с троилитом, который слагает отдельные зерна и их скопления размером до 0.5 мм, сростается с металлами (камаситом и тэнитом) и местами корродируется гидроокислами железа. Химический состав троилита является стандартным и не содержит каких-либо примесей. При этом в краевых частях зерен отмечается нарастание содержания никеля (до 13.6 мас. %) и кобальта (до 1.1 мас. %) вплоть до появления кайм и скоплений пентландита (табл. 1, ан. 1). По химическому составу минерал относится к железистому пентландиту и содержит значительную примесь кобальта (до 4.8 мас. %).

Хондрит Кунашак. Метеорит в виде каменного дождя выпал утром 11 июня 1949 года на территории Кунашакского района в Челябинской области [10–12 и др.]. Практически сразу было собрано около 200 кг фрагментов и большая их часть хранится в различных музеях, в том числе и в Уральском геологическом музее. Летом 2014 года в районе падения метеорита Кунашак был обнаружен новый фрагмент массой до 2.5 кг [9]. Метеорит определяется как хондрит класса L5-6 [4], на изломе серовато-белый с сетью черных прожилков стекловатого вещества, местами на поверхности сохранились зоны оплавления. Минеральный состав: оливин, диопсид, ортопироксен, маскелинит (полевошпатовое стекло), плагиоклаз, хромит, магнетит, камасит, мерриллит, троилит, пирротин, тэнит, вюстит и лавренсит [5, 11–13, 18, 19, 23]. Нашими исследованиями дополнительно установлены пентландит, авгит, ильменит и хлорапатит; пирротин,

Таблица 1. Химический состав пентландита (мас. %) из обыкновенных хондритов**Table 1.** Composition of a pentlandite (wt %) in ordinary chondrites

№	Cr	Fe	Co	Ni	Zn	Cu	S	Сумма
1	0.07	35.75	4.77	Урал (H5-6) 26.03	–	0.03	33.00	99.65
2	0.01	45.30	0.44	Кунашак (L5-6) 16.17	–	4.63	33.16	99.71
3	0.01	45.15	0.35	15.80	0.01	5.05	32.96	99.33
4	0.03	46.99	0.19	17.46	0.05	0.87	33.46	99.05
5	0.04	48.24	0.20	16.66	–	0.71	33.17	99.02
6	0.05	32.70	1.81	Озерное (L5) 31.13	0.02	0.97	32.54	99.22
7	0.05	35.49	2.39	27.38	0.02	0.61	33.14	99.08
8	0.02	24.53	1.22	Северный Колчим (H3) 40.23	–	–	33.02	99.02
9	0.08	27.32	2.18	36.07	–	–	33.63	99.28
10	0.23	25.41	1.47	38.30	0.05	0.08	33.54	99.08
11	0.05	35.85	0.17	Каргаполье (H4) 30.24	–	0.15	33.30	99.83
12	0.01	29.70	0.93	34.93	–	0.53	32.72	98.84
13	–	46.08	0.51	Челябинск (LL5) 20.79	–	0.66	33.15	101.19
14	–	46.10	0.51	20.06	–	0.81	32.19	99.68
15	–	45.09	0.54	20.95	–	0.97	32.48	100.02
16	–	47.36	0.23	Cosina (H5) [28] 18.29	–	–	33.79	99.67
17	–	29.30	0.52	Саратов (L4) [22] 37.60	–	–	32.50	99.94
18	<0.03	50.60	0.45	Крымка (LL3) (углеродистое включение в хондрите) [32] 15.10	–	0.19	33.00	99.40
19	0.01	48.40	1.27	NWA 4859 (LL5-6) [26] 16.40	–	–	33.10	99.20
20	0.01	47.70	0.77	17.10	–	–	33.50	99.10
21	<0.04	43.60	0.59	LAR 06299 (LL impact breccia) [30] 22.00	–	–	33.60	99.80

Примечание. Анализы сделаны на микроанализаторе CAMECA SX 100 (ИГГ УрО РАН, аналитик В.В. Хиллер).

Note. Analyses have been made on microanalyzer CAMECA SX 100 (IGG UB RAS, the analyst V.V. Khiller).

диопсид и лавренсит отнесены к сомнительным находкам [4]. Возраст метеорита оценивается в пределах 4.09 млрд лет [29].

Пентландит в метеорите Кунашак слагает два типа выделений. Первый ассоциирует с троилитом, который слагает отдельные зерна и их скопления размером до 0.5 мм и сростается с металлами. При этом, троилит часто содержит мелкие хорошо окристаллизованные (кубические) включения железистого пентландита (см. табл. 1, ан. 2, 3) с высоким содержанием меди (до 5.1 мас. %), размером до 10-15 мкм (рис. 1). Другой тип пентландита оказался менее медистым (см. табл. 1, ан. 4, 5), он наблюдается в виде отдельных мелких зерен, размером до 50 мкм, в матрице хондрита и не ассоциирует с троилитом.

Хондрит Озерное. Метеорит был найден в 1983 году пастухом Н.Л. Хисматуллиным в 4 км

севернее участка Озерный Зауральского совхоза Альменевского района Курганской области (примерно в 100 км юго-западнее г. Курган) [11, 12]. Интересно, что немного позднее в 1985 году этот же человек обнаружил второй кусок идентичного хондрита у поселка Озерное в этом же районе, и общая масса обоих фрагментов составила около 3.66 кг. Они оба были переданы для изучения в Уральскую комиссию по метеоритам, и на данный момент небольшой фрагмент (его мы и изучили) от первого куска хранится в Уральском геологическом музее. Кстати, в международном реестре [24] два фрагмента метеорита относятся к одному хондриту Озерное, хотя уральский исследователь В.Н. Логинов считает, что они отличаются друг от друга и предлагает их называть – Озерное-I и Озерное-II. В этом случае нами изучались образцы от хондрита Озерное-I. Метеорит определяет-

ся как обычный хондрит класса L5 (иногда LL5) [11] или L6 [24], он подвергся выветриванию, за счет чего приобрел коричневый цвет, местами на поверхности сохранились зоны оплавления. Минеральный состав: оливин (хризолит), ортопироксен (бронзит), клинопироксен (авгит), плагиоклаз (альбит), маскелинит, хромит, ильменит, камасит, тэнит, мерриллит, хлорапатит, троилит, пентландит, а также вторичные гипергенные минералы (гетит и гидрогетит) [11, 12 и наши данные].

Пентландит в метеорите Озерное встречается совместно с троилитом, который слагает отдельные зерна и их скопления размером до 0.2–0.3 мм. При этом сульфид не срastается с металлами (камаситом и тэнитом) и местами корродируется гидроокислами железа. Химический состав троилита является стандартным и не содержит каких-либо примесей. При этом в краевых частях зерен отмечается нарастание содержания никеля (до 3.2 мас. %) вплоть до появления кайм и скоплений пентландита (см. табл. 1, ан. 6, 7). По химическому составу минерал относится как к железистому, так и к собственно пентландиту (по классификации [17]) и содержит заметную примесь кобальта (до 2.4 мас. %) и меди (до 1 мас. %).

Хондрит Северный Колчим. Метеорит был найден летом 1965 года геологом В.А. Сиговым на западном склоне Среднего Урала в Красновишерском районе Пермской области, примерно в 9 км от прииска Северный Колчим. Метеорит находился в корнях вывороченной ели на высоте 1.5 м над землей. Падение метеорита, судя по возрасту ели, произошло более 100 лет назад. Образец имел овальную форму размером 9 × 11 × 12 см и весил около 2 кг [11, 12]. На данный момент самый крупный фрагмент от метеорита (весом 1.39 кг) хранится в Уральском геологическом музее, именно его мы и изучили. Метеорит определяется как обычный хондрит класса H3[6], он подвергся сильному выветриванию, за счет чего приобрел коричневый цвет (как снаружи, так и внутри), местами на поверхности сохранились буровато-черные зоны оплавления. Минеральный состав: оливин (хризолит), ортопироксен (бронзит), плагиоклаз (альбит и битовнит), хромит, камасит, тэнит, медь, троилит, пентландит, стекловатое вещество, магнетит, ильменит, рутил, шрейберзит, а также вторичные гипергенные минералы (гетит, пирит, бравоит, халькозин, ковеллин и глинистое вещество) [6, 12, 20]. Такое большое количество установленных минералов говорит не о полной изученности метеорита Северный Колчим, а лишь об определении минералов с помощью оптических методов. К слову, недавняя публикация [12] показала, что определение бравоита в метеорите было ошибочным [20], и на самом деле это был пентландит.

Пентландит в метеорите Северный Колчим встречается совместно с троилитом, который сла-

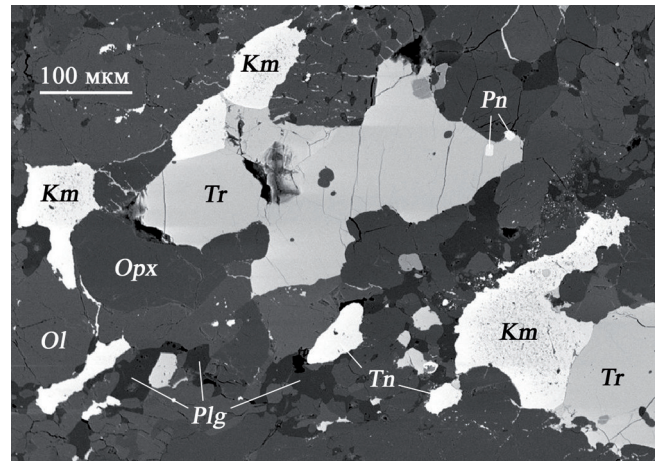


Рис. 1. Пентландит в матрице метеорита Кунашак.

Фото в отраженных электронах, CAMECA SX 100. *Ol* – оливин, *Opx* – ортопироксен, *Plg* – плагиоклаз, *Km* – камасит, *Tn* – тэнит, *Tr* – троилит, *Pn* – пентландит.

Fig. 1. Pentlandite at a matrix of meteorite Kunashak.

BSE-image, CAMECA SX 100. *Ol* – olivine, *Opx* – orthopyroxene, *Plg* – plagioclase, *Km* – kamacite, *Tn* – taenite, *Tr* – troilite, *Pn* – pentlandite.

гает отдельные зерна и их скопления размером до 0.5 мм. При этом сульфид не срastается с металлами и местами корродируется гидроокислами железа. Химический состав троилита немного различается в зависимости от крупности зерен: крупные зерна не содержат каких-либо примесей, а мелкие характеризуются заметным присутствием никеля (до 2–3 мас. %). При этом в краевых частях крупных зерен троилита отмечаются тонкие каймы, мощностью не более 3–5 мкм, пентландита (см. табл. 1, ан. 8–10). По химическому составу минерал относится к никелистой разновидности и содержит заметную примесь кобальта (до 2.2 мас. %).

Хондрит Каргаполье. Летом 1961 года во время сенокоса житель поселка Каргаполье Курганской области Д.С. Охапкин нашел камень темного цвета с оплавленной поверхностью (в 12–13 км северо-восточнее ж/д станции Каргаполье). Он лежал в ямке глубиной до 10 см, заросшей травой. Известный исследователь метеоритов И.А. Юдин в 1963 году изучил место падения данного камня и доставил два фрагмента (его расколлот автор находки) в Уральскую комиссию по метеоритам в г. Свердловск. Общий вес метеорита составил 21.8 кг, большую часть отправили в СССР АН (г. Москва), а меньшую (около 9 кг) оставили в Уральском геологическом музее [11, 12], именно его мы и изучили. Кстати, судя по строению метеорита, было сделано предположение, что он отвалился от более крупного материнского тела. Метеорит определяется как обычный хондрит класса H4 [14], он подвергся сильному выветриванию, за счет че-

го приобрел коричневый цвет, местами на поверхности сохранились зоны оплавления и регмаглипты (застывшие капли расплава). Минеральный состав: оливин (хризолит), ортопироксен (бронзит), клинопироксен, хромит, камасит, троилит, магнетит, а также вторичные гипергенные минералы (гетит, иддингсит, бравоит и каолинит) [12, 14, 20]. Наши исследования позволили установить в этом хондрите пентландит.

Пентландит в метеорите Каргаполье встречается совместно с троилитом, который слагает отдельные зерна и их скопления размером до 0.5 мм. При этом троилит сростается с камаситом и местами корродируется гидроокислами железа. Химический состав троилита является стандартным и не содержит каких-либо примесей. При этом в краевых частях зерен отмечается нарастание содержания никеля (до 8–9 мас. %) вплоть до появления кайм и скоплений пентландита (см. табл. 1, ан. 11, 12). По химическому составу минерал относится как к железистому пентландиту, так и к собственно пентландиту (по классификации [17]) и содержит примеси кобальта (до 0.9 мас. %) и меди (до 0.5 мас. %).

Хондрит Челябинск. Метеорит вошел в атмосферу Земли 15 февраля 2013 года около 9:20 утра по местному времени. Он вызвал значительной силы взрыв на высоте 30–50 км и падение многочисленных фрагментов на большой территории Челябинской области. Наиболее крупные фрагменты метеорита упали в озеро Чебаркуль, расположенное в 78 км западнее г. Челябинск, откуда их (общей массой свыше 500 кг) извлекли осенью 2013 года. Небольшие обломки метеорита были найдены авторами через 7 дней после падения в 2–3 км к югу от пос. Депутатское (Еткульский район, Челябинская область), их извлекли из снежного покрова. Изучение этих фрагментов позволило нам одними из первых опубликовать данные о вещественном составе хондрита Челябинск [7]. Метеорит определяется как обычный хондрит класса LL5 [3 и многие другие], он не подвергся выветриванию, на поверхности отмечаются зоны оплавления, окраска серовато-белая (внутренняя часть) и темно-серая до черной (с поверхности и в зонах дробления). Минеральный состав: оливин (хризолит), ортопироксен (бронзит), клинопироксен (авгит), плагиоклаз (альбит-олигоклаз), маскелинит, хромит, камасит, тэнит, троилит, пентландит [2, 15 и др.]. В некоторых работах для метеорита дополнительно упоминались диопсид, ильменит, магнетит, пирротин, хизлевудит, самородные никель и медь [1], а также фаялит, вюстит, аваруйт, годлевскит, хиббингит и другие минералы [16 и др.].

Пентландит в метеорите Челябинск ассоциирует с троилитом, который слагает отдельные зерна и их сростания размером до 0.3 мм, образованные полигонально-зернистым агрегатом в перекристаллизованной матрице. В наиболее крупных зер-

нах троилита наблюдаются мелкие округлые включения другого сульфида, размером до 20–25 мкм. По данным микрозондового анализа (см. табл. 1, ан. 13–15), они представлены железистым пентландитом. В нем установлены примеси меди (до 1 мас. %) и кобальта (до 0.6 мас. %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Морфологически пентландит в изученных обыкновенных хондритах слагает три типа выделений: 1) каймы и скопления в краевой части зерен троилита – самый распространенный тип; 2) обособленные мелкие зерна в матрице хондрита без сростаний с троилитом (встречается редко, например, в метеорите Кунашак); 3) мелкие хорошо окристаллизованные (кубические) включения (в метеорите Кунашак) или округлые включения в матрице троилита (в метеорите Челябинск). Если отбросить редкие типы выделений пентландита, то практически весь этот минерал в уральских метеоритах формировался на заключительной стадии кристаллизации зерен троилита.

В ходе работы установлено, что в изученных нами обыкновенных хондритах отмечается достаточно широкий спектр химических составов пентландита. Для разделения полученных анализов можно использовать известную классификацию [17], где низкокобальтовый пентландит ($Co < 10$ ат. %) по Ni/Fe отношению делится на три разновидности: никелистый пентландит ($Ni/Fe > 1.30$), собственно пентландит (Ni/Fe в пределах 0.90–1.30) и железистый пентландит ($Ni/Fe < 0.90$). По этой классификации анализы пентландита из метеорита Северный Колчим (НЗ) попадают в поле никелистого пентландита, два анализа сульфидов из хондритов Озерное (L5) и Каргаполье (Н4) – в поле собственно пентландита, а остальные анализы ложатся в поле железистого пентландита.

При сопоставлении составов пентландита из исследованных обыкновенных хондритов, а также составов пентландита из обыкновенных хондритов, описанных в литературных источниках (см. табл. 1), становится очевидно, что разные отношения Ni/Fe в пентландите типоморфны для различных групп обыкновенных хондритов (Н, L и LL), а также для различных петрологических типов внутри этих групп (рис. 2). Содержания никеля в пентландите закономерно убывает в ряду Н – L – LL хондритов, а поля составов этих групп существенно перекрываются (за исключением LL-хондритов, где все пентландиты являются железистыми). При этом соотношение Ni/Fe убывает по направлению от 3 к 5-6 петрологическому типу в ряду Н–L хондритов, т.е. по направлению от слабо измененных хондритов к хондритам с наибольшей степенью и более высокой температурой метаморфических преобразований. Интересно, что в хондритах не со-

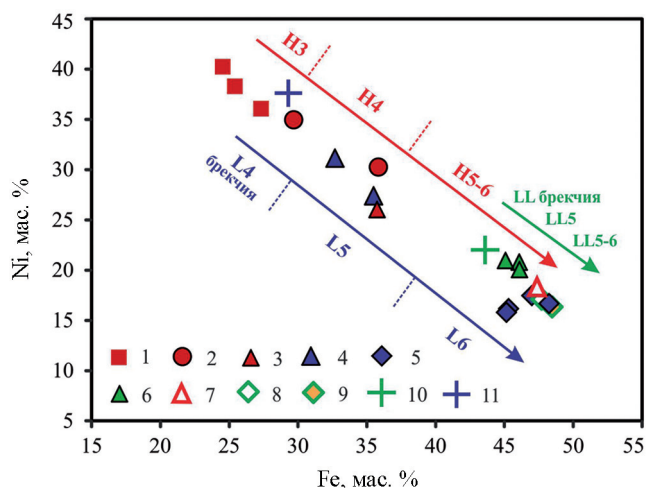


Рис. 2. Отношение никеля к железу в пентландите из обыкновенных хондритов.

1 – Северный Колчим (H3), 2 – Каргаполье (H4), 3 – Урал (H5-6), 4 – Озерное (L5), 5 – Кунашак (L6), 6 – Челябинск (LL5), 7 – Cosina (H5) [28], 8 – NWA 4859 (LL5-6) [26] (мелкозернистый пентландит), 9 – NWA 4859 (LL5-6) [26] (крупнозернистый пентландит), 10 – LAR 06299 (LL импактная брекчия) [30], 11 – Саратов (L4) (экспериментальная ударно-расплавная брекчия) [22].

Fig. 2. Nickel versus iron by pentlandite in ordinary chondrites.

1 – Severny Kolchim (H3), 2 – Kargapole (H4), 3 – Ural (H5-6), 4 – Ozerное (L5), 5 – Kunashak (L6), 6 – Chelyabinsk (LL5), 7 – Cosina (H5) [28], 8 – NWA 4859 (LL5-6) [26] (fine-grained pentlandite), 9 – NWA 4859 (LL5-6) [26] (coarse-grained pentlandite), 10 – LAR 06299 (LL impact breccia) [30], 11 – Saratov (L4) (experimental shock melt breccia) [22].

блюдается привычное правило, по которому пентландит, ассоциирующий с троилитом должен быть обязательно железистым и низко никелевым [25]. Мы объясняем это неравновесной кристаллизацией пентландита в хондрите.

Кроме того, группы изученных обыкновенных хондритов характеризуются различными содержаниями никеля и меди. На диаграмме Ni-Cu (рис. 3) точки составов пентландита из H-хондритов образуют обособленное поле составов за счет повышенных содержаний никеля и низкого количества меди. Точки составов пентландита из L и LL хондритов образуют единое поле и характеризуются пониженным содержанием никеля и одновременно повышенным содержанием меди. При этом практически не наблюдается вариаций содержаний меди между пентландами из разных петрологических типов внутри описанных групп. Зато, как и отмечалось выше, в метеорите Кунашак (L5-6) наблюдается существенное различие в содержании меди (см. табл. 1) между двумя морфологическими разновидностями пентландита: Cu – 4.6–5.1% – в зернах пентландита, находящихся в виде идиоморф-

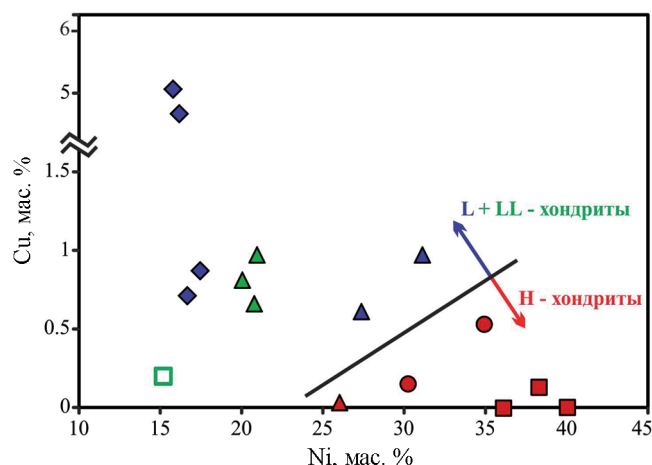


Рис. 3. Отношение меди к никелю в пентландите из различных типов обыкновенных хондритов.

Условные обозначения – см. рис. 2.

Fig. 3. Copper versus nickel by pentlandite in any type of ordinary chondrites.

Legend as in a fig. 2.

ных включений в троилите и Cu – 0.7–0.9% – в зернах пентландита, находящихся обособленно от скоплений зерен троилита, при практически одинаковых соотношениях Fe/Ni. Скорее всего, это связано либо с разными этапами формирования этих двух разновидностей пентландита, представляющих в таком случае две генерации этого минерала, либо с диффузией меди в пределах зерна троилита с последующей концентрацией во включениях пентландита. Несмотря на то, что содержания меди в пентландите достигают порой нескольких процентов, определение этого металла практически никогда не проводится. По крайней мере, нам, за редким исключением [32], не удалось найти литературных данных о содержании примеси меди в пентландите из других обыкновенных хондритов.

Традиционно считается, что в метеоритах пентландит может образоваться четырьмя разными способами: 1) охлаждение первичного высокотемпературного Fe-Ni-S расплава (пентландит начинает выпадать при температуре около 610°C); 2) термический метаморфизм в Fe-Ni-S ассоциации при температуре более 610°C с последующим охлаждением; 3) отжиг Fe-Ni-S ассоциации ≈ 600–230°C; 4) вторичные изменения ранних сульфидов с участием воды [31, 33]. Причем считалось, что в углистых хондритах пентландит всегда формируется за счет вторичных изменений ранних сульфидов с участием воды, но в последнее время было установлено, что пентландит в углистых хондритах (и в любых других хондритах) формируется либо в процессе охлаждения первичного расплава или охлаждения после термического метамор-

физма $>610^{\circ}\text{C}$ [31]. Помимо этого существует точка зрения относительно формирования пентландита в результате реакции между троилитом и металлом в процессе земного выветривания в условиях аридного климата [21].

Во всех изученных нами обыкновенных хондритах, кроме метеоритов Кунашак и Челябинск, пентландит наблюдается в краевых частях зерен троилита в перекристаллизованной матрице. По всей видимости, это связано с зарождением индивидов пентландита на поздних стадиях кристаллизации троилита при относительно низких температурах, или, возможно, с наложенными изменениями с участием воды [31]. С другой стороны, отмечаемая нами зависимость химического состава пентландита от петрологического типа обыкновенных хондритов, скорее всего, указывает на то, что его образование происходило в ходе длительного теплового метаморфизма хондритовой матрицы.

ВЫВОДЫ

Таким образом, нами впервые установлен и описан пентландит в метеоритах Урал, Озерное, Каргаполье, Кунашак, Челябинск, а также подтверждена его находка в хондрите Северный Колчим. Изучены морфологические особенности выделений пентландита и его взаимоотношения с троилитом – главным сульфидным минералом в данных метеоритах. По результатам изучения химического состава пентландита выявлено закономерное уменьшение Ni/Fe отношения в ряду $\text{H} - \text{L} - \text{LL}$ хондритов, а также по направлению от 3-го к 5-6-му петрологическим типам внутри этих групп, т.е. по данным состава сульфида мы можем определить петрологический тип хондрита. Установлено, что на диаграмме $\text{Ni}-\text{Cu}$ пентландиты из хондритов группы H образуют обособленное поле составов, отличаясь от своих аналогов из L и LL хондритов. Формирование пентландита, по всей видимости, связано с длительной высокотемпературной перекристаллизацией матрицы обыкновенных (ординарных) хондритов.

Исследования выполнены при поддержке проекта РФФИ № 14-05-00464-а “Состав и строение метеоритов Урала”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфилов В.Н., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Еремяшев В.Е., Кабанова Л.Я., Лебедева С.М., Лонцакова Г.Ф., Хворов П.В. (2013) Петрография, минералогия и строение метеорита “Челябинск”. *Литосфера*. (3), 118-129.
2. Берзин С.В., Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Хиллер В.В. (2013) Особенности минерального и геохимического состава метеорита “Челябинск”. *Литосфера*. (3), 106-117.
3. Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова Н.Н., Рошина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С. (2013) Результаты вещественного анализа метеорита “Челябинск”. *Геохимия*. (7), 580-598.
4. 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. *Докл. АН*. **464**(5), 599-602.
5. Заварицкий А.Н., Кваша Л.Г. (1952) Метеориты СССР. М.: АН СССР, 247 с.
6. Иванов О.К. (1969) Хондрит Северный Колчим. *Метеоритика*. **29**, 48-56.
7. 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.
8. 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. *Докл. АН*. **459**(1), 80-83.
9. Колисниченко С.В. (2014) Новая находка метеорита Кунашак. *Минералогический альманах*. **19**(13), 12-13.
10. Кринов Е.Л. (1950) Каменный метеоритный дождь Кунашак. *Метеоритика*. **8**, 67-77.
11. Логинов В.Н. (1991) Сравнительное исследование вещественного состава метеоритов разных петрологических типов. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 66 с.
12. Логинов В.Н. (2004) Метеориты Урала. Екатеринбург: УГГУ, 80 с.
13. Мигдисова Л.Ф., Кононкова Н.Н. (1990) Хондрит Кунашак – химические признаки ударного метаморфизма. *Метеоритика*. **49**, 57-70.
14. Овчинников Л.Н., Юдин И.А. (1966) Исследование каменного метеорита Каргаполье. *Метеоритика*. **27**, 76-88.
15. Степанов С.Ю., Берзин С.В. (2015) Микроэлементный состав троилита, железа и никелистого железа метеорита Челябинск. *Литосфера*. (1), 98-108.
16. Шарыгин В.В., Карманов Н.С., Подгорных Н.М., Томиленко А.А. (2014) Минералогия и петрография “проплавленного” фрагмента метеорита Челябинск. *Метеорит Челябинск – год на Земле. Материалы Всероссийской научной конференции*. Челябинск, 637-653.
17. Шишкин Н.Н., Карпенков А.М., Кулагов Э.А., Митенков Г.А. (1974) О классификации минералов группы пентландита. *Докл. АН СССР*. **217**(1), 194-197.
18. Юдин И.А. (1952) Минералогическое и химическое исследование каменного метеорита Кунашак. *Метеоритика*. **10**, 42-56.
19. Юдин И.А. (1955) Кора плавления каменного метеорита Кунашак. *Метеоритика*. **13**, 143-146.
20. Юдин И.А. (1970) Микроскопическое исследование вторичных минералов метеоритов. *Метеоритика*. **30**, 158-168.
21. Bevan A.W.R., Downes P.J., Thompson M. (2001) Little Minnie Creek, an L4(S2) ordinary chondritic meteorite from Western Australia. *J. Royal Soc. West. Austr.* **84**, 149-152.
22. Bezaeva N.S., Badjukov D.D., Rochette P., Gattacceca J., Trukhin V.I., Kozlov E.A., Uehara M. (2010) Experi-

- mental shock metamorphism of the L4 ordinary chondrite Saratov induced by spherical shock waves up to 400 GPa. *Meteor. Planet. Science*. **45**(6), 1007-1020.
23. Dunaway J.K., Moersch J., Taylor L.A. (2006) Petrogenesis and potential pairing of the Kunashak and Park Forest chondrites. *XXXVII Lunar and Planet. Science Conf.* League City, Texas, Abstr. № 1891.
 24. Graham A.L. (1988) The meteoritical bulletin. *Meteoritics*. **23**, 171-173.
 25. Harris D.C., Nickel E.H. (1972) Pentlandite composition and associations in some mineral deposits. *Canad. Miner.* **11**, 861-878.
 26. Jamsja N., Ruzicka A. (2010) Shock and thermal history of Northwest Africa 4859, an annealed impact-melt breccia of LL chondrite parentage containing unusual igneous features and pentlandite. *Meteor. Planet. Science*. **45**(5), 828-849.
 27. Ramdohr P. (1972) Lunar pentlandite and sulfidization reaction in microbreccia 14315,9. *Earth Planet. Sci. Lett.* **15**, 113-115.
 28. Reyes-Salas A., Linares C., Macias-Romo C., Ortega F. (2007) An analytical SEM study of morphology and composition of metals and others opaque phases in the stone meteorite Cosina. An ordinary chondrite H5. *Acta Microscop.* **16**(1-2), 109-110.
 29. Rotenberg E.D. (2009) The decay-constant of ⁸⁷Rb and a combined U-Pb, Rb-Sr chronology of ordinary chondrites. Ph.D. Thesis, University of Toronto, 203 p.
 30. Rubin A.E., Moore W.B. (2011) What's up? Preservation of gravitational direction in the Larkman Nunatak 06299 LL impact melt breccia. *Meteor. Planet. Science*. **46**(5), 737-747.
 31. Schrader D.L., McCoy T.J., Davidson J. (2015) Widespread evidence for high-temperature formation of pentlandite in chondrites. *XLVI Lunar and Planet. Science Conf.* Lunar Planet. Inst., Houston, Abstr. № 1604.
 32. Semenenko V.P., Girich A.L. (1995) Mineralogy of a unique graphite-containing fragment in the Krymka chondrite (LL3). *Miner. Magaz.* **59**, 443-454.
 33. Sugaki A., Kitakare A. (1998) High form of pentlandite and its thermal stability. *Amer. Miner.* **83**, 133-140.

Pentlandite from ordinary chondrites of the Urals

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

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

Some new data on the chemical composition and morphology of the pentlandite from meteorites Ural (H5-6), Kunashak (L5-6), Ozeroye (L5), Severny Kolchim (H3), Kargapole (H4), and Chelyabinsk (LL5) are resulted in the paper. We found a natural decrease in the Ni/Fe ratio in pentlandite from ordinary chondrites by the chondrite series H–L–LL and by direction from 3-d to 5–6-th petrological types within these groups. It is shown that the ratio of Cu/Ni pentlandite of the studied H chondrites is different from pentlandite of L and LL chondrites.

Key-words: *pentlandite, typochemistry, ordinary chondrites, Urals.*

REFERENCES

1. Anfilogov V.N., Belogub E.V., Blinov I.A., Eremjashov V.E., Kabanova L.Ja., Lebedeva S.M., Lonschakova G.F., Hvorov P.V. (2013) Petrography, mineralogy and structure of meteorite "Chelyabinsk". *Litosfera*. (3), 118-129. (In Russian)
2. Berzin S.V., Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Khiller V.V. (2013) Features of mineral and geochemical composition of the meteorite "Chelyabinsk". *Litosfera*. (3), 106-117. (In Russian)
3. Galimov E.M., Kolotov V.P., Nazarov M.A., Kostitsyn Yu.A., Kubrakova I.V., Kononkova N.N., Roshchina I.A., Alekseev V.A., Kashkarov L.L., Badyukov D.D., Sevast'janov V.S. (2013) The results of matter analysis of a real meteorite "Chelyabinsk". *Geokhimiya*. (7), 580-598. (In Russian)
4. Erokhin Yu.V., Koroteev V.A., Khiller V.V., Burlakov E.V., Ivanov K.S., Clejmenov D.A. (2015) Meteorite "Kunashak": New data on the mineralogy. *Dokl. Akad. Nauk*. **464**(5), 599-602. (In Russian)
5. Zavaritskiy A.N., Kvasha L.G. (1952) *Meteority SSSR*. [Meteorites of USSR]. Moscow: AN SSSR Publ., 247 p. (In Russian)
6. Ivanov O.K. (1969) Chondrite North Kolchim. *Meteoritika*. **29**, 48-56. (In Russian)
7. Koroteev V.A., Berzin S.V., Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Khiller V.V. (2013) The composition and structure of the meteorite "Chelyabinsk". *Dokl. Akad. Nauk*. **451**(4), 446-450. (In Russian)
8. Koroteev V.A., Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Burlakov E.V., Ivanov K.S., Clejmenov D.A. (2014) Meteorite "Ural": New data on the mineralogy. *Dokl. Akad. Nauk*. **459**(1), 80-83. (In Russian)
9. Kolisnichenko S.V. (2014) New find of meteorite Kunashak. *Mineralogicheskij al'manakh*. **19**(13), 12-13.
10. Krinov E.L. (1950) Stone meteor rain Kunashak. *Meteoritika*. (8), 67-77. (In Russian)
11. Loginov V.N. (1991) *Sravnitel'noe issledovanie veshchestvennogo sostava meteoritov raznykh petrolo-*

- gicheskikh tipov* [A comparative study of the material composition of meteorites of different petrological types]. Avtoref. diss. ... dokt. geol.-min. nauk. Ekaterinburg: IGG UB AN SSSR, 66 p. (In Russian)
12. Loginov V.N. (2004) *Meteority Urala* [Meteorites of the Urals] Ekaterinburg: UGGU Publ., 80 p. (In Russian)
 13. Migdisova L.F., Kononkova N.N. (1990). Chondrite Kunashak – chemical signs of shock metamorphism. *Meteoritika*. **49**, 57-70. (In Russian)
 14. Ovchinnikov L.N., Yudin I.A. (1966) Research stony meteorite Kargapol'e. *Meteoritika*. **27**, 76-88. (In Russian)
 15. Stepanov S.Yu., Berzin S.V. (2015) Microelement composition troilite, iron and nickel-iron meteorite Chelyabinsk. *Litosfera*. (1), 98-108. (In Russian)
 16. Sharygin V.V., Karmanov N.S., Podgornykh N.M., Tomilenko A.A. (2014) Mineralogy and petrography "melting" fragment of the meteorite Chelyabinsk. *Meteorit Chelyabinsk – god na Zemle. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferentsii*. Chelyabinsk, 637-653. (In Russian)
 17. Shishkin N.N., Karpenkov A.M., Kulagov E.A., Mitenkov G.A. (1974) On the classification of minerals pentlandite group. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. **217**(1), 194-197. (In Russian)
 18. Yudin I.A. (1952) The mineralogical and chemical study of stony meteorite Kunashak. *Meteoritika*. **10**, 42-56. (In Russian)
 19. Yudin I.A. (1955) Bark melting stony meteorite Kunashak. *Meteoritika*. **13**, 143-146. (In Russian)
 20. Yudin I.A. (1970) Microscopic examination of secondary minerals of meteorites *Meteoritika*. **30**, 158-168. (In Russian)
 21. Bevan A.W.R., Downes P.J., Thompson M. (2001) Little Minnie Creek, an L4(S2) ordinary chondritic meteorite from Western Australia. *Jour. Royal Soc. West. Austr.* **84**, 149-152.
 22. Bezaeva N.S., Badjukov D.D., Rochette P., Gattaccca J., Trukhin V.I., Kozlov E.A., Uehara M. (2010) Experimental shock metamorphism of the L4 ordinary chondrite Saratov induced by spherical shock waves up to 400 GPa. *Meteor. Planet. Science*. **45**(6), 1007-1020.
 23. Dunaway J.K., Moersch J., Taylor L.A. (2006) Petrogenesis and potential pairing of the Kunashak and Park Forest chondrites. *XXXVII Lunar and Planet. Science Conf.* League City, Texas, Abstr. № 1891.
 24. Graham A.L. (1988) The meteoritical bulletin. *Meteoritics*. **23**, 171-173.
 25. Harris D.C., Nickel E.H. (1972) Pentlandite composition and associations in some mineral deposits. *Canad. Miner.* **11**, 861-878.
 26. Jamsja N., Ruzicka A. (2010) Shock and thermal history of Northwest Africa 4859, an annealed impact-melt breccia of LL chondrite parentage containing unusual igneous features and pentlandite. *Meteor. Planet. Science*. **45**(5), 828-849.
 27. Ramdohr P. (1972) Lunar pentlandite and sulfidization reaction in microbreccia 14315,9. *Earth Planet. Sci. Lett.* **15**, 113-115.
 28. Reyes-Salas A., Linares C., Macias-Romo C., Ortega F. (2007) An analytical SEM study of morphology and composition of metals and others opaque phases in the stone meteorite Cosina. An ordinary chondrite H5. *Acta Microscop.* **16**(1-2), 109-110.
 29. Rotenberg E.D. (2009) The decay-constant of ⁸⁷Rb and a combined U-Pb, Rb-Sr chronology of ordinary chondrites. Ph.D. Thesis, University of Toronto, 203 p.
 30. Rubin A.E., Moore W.B. (2011) What's up? Preservation of gravitational direction in the Larkman Nunatak 06299 LL impact melt breccia. *Meteor. Planet. Science*. **46**(5), 737-747.
 31. Schrader D.L., McCoy T.J., Davidson J. (2015) Widespread evidence for high-temperature formation of pentlandite in chondrites. *XLVI Lunar and Planet. Science Conf.* Lunar Planet. Inst., Houston, Abstr. № 1604.
 32. Semenenko V.P., Girich A.L. (1995) Mineralogy of a unique graphite-containing fragment in the Krymka chondrite (LL3). *Miner. Magaz.* **59**, 443-454.
 33. Sugaki A., Kitakare A. (1998) High form of pentlandite and its thermal stability. *Amer. Miner.* **83**, 133-140.