

УДК 552.321.6+553.46

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-3

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТИТОВЫХ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ В СЕРПЕНТИНИТАХ КАЛКАНСКОЙ ПЛОЩАДИ (ЗОНА ГЛАВНОГО УРАЛЬСКОГО РАЗЛОМА, ЮЖНЫЙ УРАЛ)**Д.Е. Савельев***Институт геологии Уфимского федерального научного центра РАН,
ул. К. Маркса 16/2, Уфа, 450077 Россия; savl71@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 26.03.2021 г., принята к печати 16.08.2021 г.

MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL FEATURES OF MAGNETITE OCCURRENCES IN SERPENTINITES OF THE KALKAN AREA (MAIN URALIAN FAULT ZONE, SOUTH URALS)**D.E. Saveliev***Institute of Geology, Ufa Federal Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
ul. K. Marksa 16/2, Ufa, 450077 Russia; savl71@mail.ru*

Received 26.03.2021, accepted 16.08.2021

Аннотация. Изучен минеральный и химический состав руд магнетитовых проявлений, локализованных в серпентинитах Калканской площади меланжевой зоны Главного Уральского разлома на Южном Урале. В магнетитовых рудах обнаружена обильная медная минерализация, представленная тонкими выделениями самородной меди, сульфидами (ковеллин, борнит, минералы ряда халькозин-дигенит), хлоридами (нантокит), карбонатами и силикатами Cu. Магнетит часто содержит включения кобальтсодержащего пентландита, редкие зерна сульфидов Ag и Bi, а также аваруит и хизлевудит. Во всех рудопроявлениях присутствуют реликты хромшпинелидов, состав которых (умеренные и высокие значения $Cr / (Cr + Al)$) указывает на сильную деплетированность перидотитового протолита, а геодинамическая обстановка их образования, скорее всего, соответствует верхней мантии преддугового бассейна. Предполагается двухстадийное образование рудопроявлений. На ранней стадии произошло образование рассеянного магнетита с вкрапленностью Cu-Fe-Co сульфидов в серпентинизированных ультрамафитах на дне океанического бассейна под воздействием металлоносных флюидов. В коллизивной обстановке произошла тектоническая переработка серпентинитов с формированием небольших тел массивных магнетитовых руд и образованием сульфидов Cu, Ag, Bi и самородных минералов.

Ключевые слова: серпентиниты, ультрамафиты, офиолиты, самородная медь, сульфиды меди и никеля, магнетит, аваруит, нантокит, Главный Уральский разлом

Abstract. Chemical and mineralogical composition of magnetite occurrences from serpentinites of the Kalkan mélange area of the Main Uralian Fault zone (South Urals) are studied. Abundant Cu minerals including native copper, Cu sulfides (covellite, bornite, minerals of the chalcocite-digenite series), chlorides (nantokite), Cu carbonates and Cu silicates are found in magnetite ores. Magnetite also contains abundant inclusions of cobaltpentlandite, rare Ag and Bi sulfides, heazlewoodite and awaruite. All magnetite occurrences host relicts of chromites, the composition of which (moderate to high $Cr / (Cr + Al)$ values) indicates strong depletion of a peridotite protolith, which formed in the upper mantle below a forearc basin. A two-stage formation model of the magnetite occurrences is suggested. At an early stage, the disseminated magnetite with inclusions of Cu-Fe-Co sulfides formed under the influence of metalliferous fluids in serpentinized ultramafic rocks at the bottom of the oceanic basin. During collision, serpentinites were tectonized with the formation of small bodies of massive magnetite ores and Cu, Ag and Bi sulfides and native minerals.

Keywords: serpentinite, ultramafic rock, ophiolites, native copper, base-metal sulfides, magnetite, awaruite, nantokite, Main Uralian Fault.

Для цитирования: Савельев Д.Е. Минералого-геохимические особенности магнетитовых рудопоявлений в серпентинитах Калканской площади (зона Главного Уральского разлома, Южный Урал). Минералогия, 7(3), 48–67. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-3.

For citation: Saveliev D.E. Mineralogical-geochemical features of magnetite occurrences in serpentinites of the Kalkan area (Main Uralian Fault Zone, South Urals). Mineralogy, 7(3), 48–67. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-3-3.

Введение

Шовная структура, разделяющая палеоконтинентальный и палеоокеанический секторы Урала, традиционно именуется зоной Главного Уральского разлома (ГУР). Она ограничивает Магнитогорскую мегазону с запада и часто выделяется как ее составная часть в виде Вознесенско-Присакмарской зоны. Характерной чертой строения зоны ГУР является широкое распространение пород офиолитовой ассоциации, включая мантийные ультрамафиты, магматиты переходного комплекса (верлиты, пироксениты), габбро, базальты и глубоководные осадки. Стратифицированные образования относятся к поляковской свите ордовикского возраста, причем базальтоиды сочетают в себе континентально-рифтогенные и океанические характеристики (Пучков, 2000). В зоне ГУР ненарушенные разрезы офиолитовой ассоциации не сохранились, и обычно все ее члены встречаются в виде блоков внутри серпентинитового меланжа, для которого характерно восточное падение преимущественно под углами 20–40° (Пучков, 2000).

Зона ГУР на всем своем протяжении насыщена породами ультраосновного состава, при этом слабо измененные ультрамафиты встречаются редко и представляют собой крупные будины внутри серпентинитового меланжа. В пределах Учалинского района Республики Башкортостан они образуют несколько массивов офиолитового типа: Нуралинский, Юшкадинский, Миндякский и Калканский. Первые три массива приурочены к западной полосе и имеют преимущественно лерцолитовый состав, а последний в восточной полосе является существенно гарцбургитовым. Значительно большим распространением пользуются полностью измененные ультрамафиты, превращенные в интенсивно тектонизированные хризотилитовые серпентиниты.

Поскольку основным критерием выделения ГУР является наличие серпентинитового меланжа,

ширина зоны изменяется в значительном диапазоне – от нескольких десятков метров до первых километров. Калканская площадь расположена в пределах одного из «расширений» зоны ГУР (рис. 1), и географически в настоящей статье под ней понимается территория, сложенная серпентинитовым меланжем, от широты оз. Белое на севере до г. Учалы на юге.

В зоне ГУР серпентиниты вмещают различные по составу месторождения и рудопоявления: хромитовые, медно-кобальтовые колчеданные, золоторудные (Зайков и др., 2009; Полезные..., 2016). Одним из специфических типов оруденения, характерных для серпентинитов Калканской площади, являются магнетитовые залежи с вкрапленностью минералов Cu. По данным геологосъемочных и тематических исследований (Вецлер и др., 1954ф; Анисимов и др., 1978ф), с этими проявлениями связаны повышенные концентрации Cu, Co, Ni и Au. Перспективы рудопоявлений считаются не выясненными (Анисимов и др., 1978ф), а их минералогия недостаточно освещена в литературе. Настоящая работа преследует цель восполнить существующий пробел.

Методика исследований

Отбор образцов проводился из бортов старых горных выработок, отвалов и штабелей магнетитовой руды. Горные выработки были опробованы как идентифицированные с известными рудопоявлениями (Баталинское (точка Кл-1), Калканское (точки Кл-8, Кл-10)), так и находящиеся за их пределами (точки Кл-6, 7). Из образцов весом 0.5–1.0 кг изготавливались аншлифы (по 3–5 штук) для минералогических исследований, а остальной материал использовался для подготовки проб для химического анализа. Предварительное изучение аншлифов проводилось на оптическом микроскопе Полам Р-311 в отраженном свете. Поскольку большая часть минералов (за исключением магнетита,

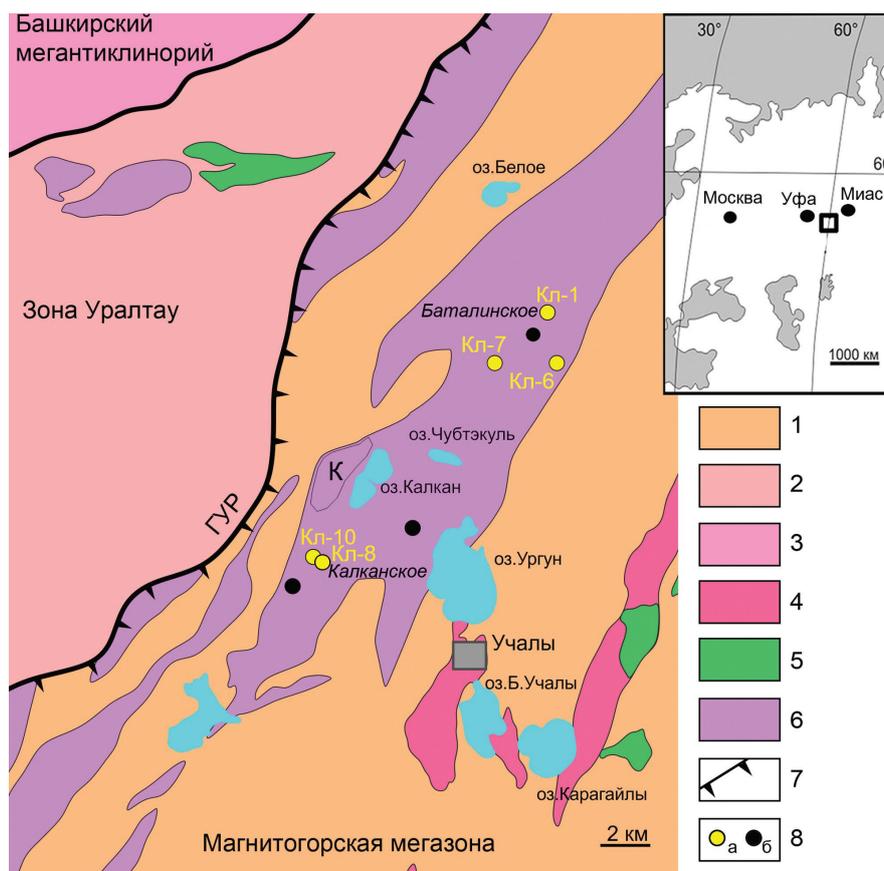


Рис. 1. Схема геологического строения фрагмента зоны Главного Уральского разлома в районе г. Учалы.

1 – палеозойские осадочные и вулканогенно-осадочные породы Магнитогорской мезозоны; 2 – докембрийские и нижнепалеозойские осадочные и метаморфические породы зоны Уралтау; 3 – докембрийские осадочные породы Башкирского мегантиклинория; 4 – гранитоиды; 5 – габброиды; 6 – преимущественно серпентиниты и серпентинизированные ультрамафиты офиолитового комплекса (К – Калканский массив – наименее серпентинизированные гарцбургиты с подчиненными дунитами); 7 – Главный Уральский разлом (надвиг); 8 – магнетитовые (а) и хромититовые (б) рудопоявления в серпентинитах.

Fig. 1. Schematic geological map of a fragment of the Main Uralian Fault near the town of Uchaly.

1 – Paleozoic sedimentary and volcanosedimentary rocks of the Magnitogorsk Megazone; 2 – Precambrian and Lower Paleozoic sedimentary and metamorphic rocks of the Uraltau Zone; 3 – Precambrian sedimentary rocks of the Bashkirian Meganticlinorium; 4 – granitoids; 5 – gabbroids; 6 – mostly serpentinite and serpentinitized ultramafic rocks of ophiolite assemblages (K – Kalkan massif – less serpentinitized harzburgite with minor dunite); 7 – Main Uralian Fault (thrust); 8 – magnetite (a) and chromitite (b) occurrences in serpentinites.

хромшпинелидов и силикатов) имеет мелкие размеры (1–30 мкм), при их описании сделан акцент на результаты электронно-микроскопических исследований.

Химический состав серпентинитов и магнетитовых руд определен рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре VRA-30 (Германия) (Cr и W аноды, 40 кВ, 30 мА) в Институте геологии УФИЦ РАН (ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа, аналитики В.Ф. Юлдашбаева, С.В. Мичурин). Истертые пробы весом 5 г со связующим веществом (5 капель ПВС-8) прессовались при давлении 25–27 т/см² на

подложке из борной кислоты. Предел обнаружения при измерении содержаний V, As составлял 20 г/т, Ni, Cu, Zn и Cr – 10 г/т, Co – 5 г/т. Определение Au и Ag проводилось атомно-абсорбционным методом в той же лаборатории (аналитик Н.Г. Христофорова), пределы обнаружения составляют для Au – 0.1 г/т, для Ag – 0.05 г/т.

Электронно-микроскопические исследования проводились в полированных аншлифах на СЭМ Vega 3 SBH Tescan с ЭДА x-Act Oxford Instruments (Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСМ РАН, г. Уфа)) при следую-

щих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1 нА, время накопления спектра 60 секунд в точечном режиме. Спектры обработаны автоматически в программном пакете AzTec One с использованием методики TrueQ. Формулы минералов рассчитаны на один (куприт и тенорит) и четыре (хромшпинелиды) атома кислорода, а также на один (ковеллин, халькозин, акантит, сфалерит), два (паркерит), четыре (анилит, борнит), пять (дигенит, джирит) и восемь (пентландит) атомов серы. В формуле хромшпинелидов количество двух- и трехвалентного железа определялось по стехиометрии минерала.

Результаты исследований

Краткая геологическая позиция. В поле серпентинитового меланжа, примыкающего к Калканскому ультрамафитовому массиву, известно несколько небольших магнетитовых проявлений (рис. 1). *Баталинское* рудопроявление расположено западнее урочища Баталино, на правом борту долины ручья Шартымка. Оруденение локализовано в рассланцованных серпентинитах. По данным (Вецлер и др., 1954ф) рудная минерализация прослежена на 20 м и представлена жиллообразным телом существенно магнетитового состава мощностью 0.1–0.3 м с корками малахита и азурита. Оруденение вскрыто горной выработкой и канавами, сильно заплывшими и заросшими к моменту опробования. *Рудопроявления* точек Кл-6 и Кл-7 расположены в 350–500 м южнее Баталинского и также локализованы в рассланцованных апогарцбургитовых серпентинитах. Магнетитовые руды вскрыты в серии небольших шурфов и канав. *Калканское* рудопроявление расположено в 2 км юго-восточнее д. Калканово, где в долине руч. Алкашай на нескольких участках отмечаются небольшие старые карьеры и канавы. Территория проявления сложена преимущественно апогарцбургитовыми серпентинитами, которые часто переходят в интенсивно рассланцованные хризотилитовые серпентиниты. В юго-восточной части участка ультрамафиты граничат с базальтами и базальтовыми порфиридами, а также туфами с подчиненными прослоями кремнистых пород. В приконтактовой с базальтоидами зоне присутствуют небольшие выходы интенсивно ожелезненных лиственитов (Полезные..., 2016). Среди серпентинитов отмечаются выходы пироксенитов, габбродолеритов и гранит-порфиров. Магнетитовые руды с примазка-

ми медной зелени образуют тела жиллообразной и гнездовидной формы.

Химический и минеральный состав руд. Согласно фондовым источникам (Вецлер и др., 1954ф), на рудопроявлениях рассматриваемой территории магнетитовые руды в серпентинитах характеризуются значительными вариациями содержаний основных рудных компонентов (мас. %): Cu – от сотых долей до 6.1–7.98, Ni – до 0.9, Co – до 0.15. Нами определен химический состав нескольких образцов магнетитовых руд и минерализованных серпентинитов (табл. 1).

В образцах отмечается значительный разброс содержаний SiO_2 , MgO и FeO , а концентрация CaO , Al_2O_3 , MnO , TiO_2 , P_2O_5 не превышает первых мас. % либо находится ниже предела обнаружения (Na_2O , K_2O). Основными примесными элементами являются S, Cu, Ni, Cr, Co, V, Zn. Наиболее высокие содержания Cu (1.34–3.06 мас. %) установлены в образцах оруденелых серпентинитов из рудопроявлений Баталинского, Калканского и точки Кл-7. Содержание Ni варьирует в пределах 0.05–0.2 мас. %, Co – 0.03–0.06 мас. %.

Концентрация суммарного железа в образцах, в целом, эквивалентна содержанию магнетита. Из бинарных диаграмм (рис. 2) следует, что содержание Cu и Ni обратно пропорционально концентрации магнетита в образцах. В то же время, в образцах с низкими содержаниями Co какая-либо связь с концентрацией магнетита отсутствует, но повышенные значения Co всегда связаны с богатыми магнетитовыми рудами. Поведение благородных металлов не обнаруживает отчетливой связи с содержанием FeO .

Образцы *Баталинского* рудопроявления представлены серпентинитами и хлорит-серпентиновыми породами, содержащими редкую вкрапленность магнетита, налеты медной зелени и тонкие включения самородной меди (рис. 3а), а также рудными образцами с содержанием магнетита 20–30 об. %. Помимо магнетита и минералов Cu, серпентиниты содержат много реликтовых зерен ксеноморфных и гипидиоморфных хромшпинелидов, часто образующих агрегаты (рис. 3б).

Размер выделений самородной меди в серпентинитах (обр. Кл-1/6) достигает 3–5 мм, в некоторых случаях минерал окислен с образованием агрегатов куприта и тенорита (рис. 3в, г). По периферии выделений самородной меди наблюдается кайма из силикатов и карбонатов (диоптаз, малахит), а оксиды Cu ассоциируют с минералом состава CuCl

Таблица 1

Химический состав серпентинитов и магнетитовых руд изученных проявлений (мас. %)

Table 1

Chemical composition of serpentinites and magnetite ores of studied occurrences (wt. %)

| № обр. | Кл-1/7 | Кл-6/3 | Кл-6/4 | Кл-7/2 | Кл-7/3 | Кл-8/3 | Кл-10/3 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| SiO ₂ | 22.79 | 6.09 | 14.66 | 30.6 | 3.93 | 7.84 | 21.64 |
| TiO ₂ | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.04 |
| Al ₂ O ₃ | 2.89 | 0.50 | 0.39 | 0.79 | 1.50 | 1.44 | 1.27 |
| FeO _{общ} | 41.23 | 87.45 | 70.77 | 19.1 | 86.03 | 79.68 | 47.28 |
| MnO | 0.11 | 0.15 | 0.08 | 0.17 | 0.21 | 0.20 | 0.06 |
| MgO | 21.0 | 4.00 | 11.0 | 33.0 | 4.00 | 4.00 | 19.0 |
| CaO | 0.11 | 0.30 | 0.08 | 0.11 | 0.12 | 4.42 | 1.45 |
| Na ₂ O | <0.10 | <0.10 | <0.10 | <0.10 | <0.10 | <0.10 | <0.10 |
| K ₂ O | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| P ₂ O ₅ | 0.37 | 0.037 | 0.056 | 0.124 | 0.028 | 0.024 | 0.195 |
| S _{общ} | 0.26 | 0.07 | 0.268 | 0.129 | 0.066 | 0.063 | 0.126 |
| ппп | 6.72 | 0.20 | 1.08 | 11.96 | 2.22 | 0.98 | 6.40 |
| V | 0.0065 | 0.002 | 0.0032 | 0.0039 | 0.0024 | 0.0011 | 0.0046 |
| Cr | 0.1722 | 0.0739 | 0.2886 | 0.3818 | 0.1667 | 0.2565 | 0.2267 |
| Co | 0.0332 | 0.0246 | 0.0281 | 0.0271 | 0.0555 | 0.0571 | 0.0374 |
| Ni | 0.1683 | 0.0791 | 0.0658 | 0.2229 | 0.0311 | 0.0523 | 0.1133 |
| Cu | 3.055 | 0.0666 | 0.2675 | 2.768 | 0.6348 | 0.2138 | 1.339 |
| Zn | 0.0091 | 0.005 | 0.0292 | 0.0098 | 0.0034 | 0.0029 | 0.0046 |
| As | 0.0014 | 0.0019 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.0123 | <0.001 |
| Сумма | 99.00 | 99.07 | 99.07 | 99.36 | 99.02 | 99.09 | 99.18 |
| Ag, г/т | 3.46 | 3.26 | 0.25 | 0.12 | 0.48 | 0.21 | 0.27 |
| Au, г/т | 0.41 | 0.19 | <0.10 | <0.10 | 0.17 | 0.15 | 0.16 |

Примечание. Образцы: Кл-1/7 – Баталинское рудопроявление; Кл-6/3, 6/4 – проявление точка Кл-6; Кл-7/2, 7/3 – рудопроявление точка Кл-7 на южном склоне г. Майдыурт; Кл-10/3 – Калканское рудопроявление; Кл-6/3, 6/4, 7/3, 8/3 – массивные магнетитовые руды; Кл-1/7, 10/3 – вкрапленные магнетитовые руды («оруденелые серпентиниты»); Кл-7/2 – серпентиниты; FeO_{общ} = FeO + Fe₂O₃.

Note. Samples: Кл-1/7 – Batalinskoe occurrence; Кл-6/3, 6/4 – occurrences of mineralization point Кл-6; Кл-7/2, 7/3 – occurrence of mineralization point Кл-7 at the southern slope of Mt. Maydyurt; Кл-10/3 – Kalkan occurrence; Кл-6/3, 6/4, 7/3, 8/3 – massive magnetite ore; Кл-1/7, 10/3 – disseminated magnetite ore («ore-bearing serpentinite»); Кл-7/2 – serpentinite; FeO_{общ} = FeO + Fe₂O₃.

(нантоцит?) и также оконтурены тонкодисперсными агрегатами силикатов и карбонатов. Иногда к последним приурочены тонкие выделения акантита (рис. 3в), который встречен также внутри псевдоморфоз по неизвестному минералу, сложенных или силикатами (хлорит, серпентин), или оксидами и сульфидами Cu (рис. 3д, е).

В рудных образцах (Кл-1/7) внутри магнетитовых агрегатов отмечаются обильные выделения сульфидов Cu и самородной меди размером преимущественно менее 25 мкм. Карбонаты и силикаты Cu образуют как тонкую сеть жилков, пересекающих серпентинит и магнетитовые шпильки, так и изометричные выделения размером 10–30 мкм со сглаженными очертаниями, включенные в магне-

титовые агрегаты (рис. 4а) либо располагающиеся внутри серпентина (рис. 4б).

Большая часть тонких включений в магнетите (рис. 4в, г) представлена сульфидами Cu, химические анализы которых пересчитываются на формулы CuS, Cu₂S, Cu₉S₅ и, соответственно, могут быть представлены ковеллином, минералами ряда халькозин-дигенит, а также, возможно, анилитом и джиритом (табл. 2). Кроме медных минералов в магнетитовых рудах также обнаружен акантит (рис. 4д), встречено несколько выделений хизлевудита Ni₃S₂ и минерала, рассчитывающегося на формулу Ni₃(Bi,Fe)₂S₂ (рис. 4е), что наиболее близко к формуле паркерита, в которой место свинца занимает железо (табл. 3).

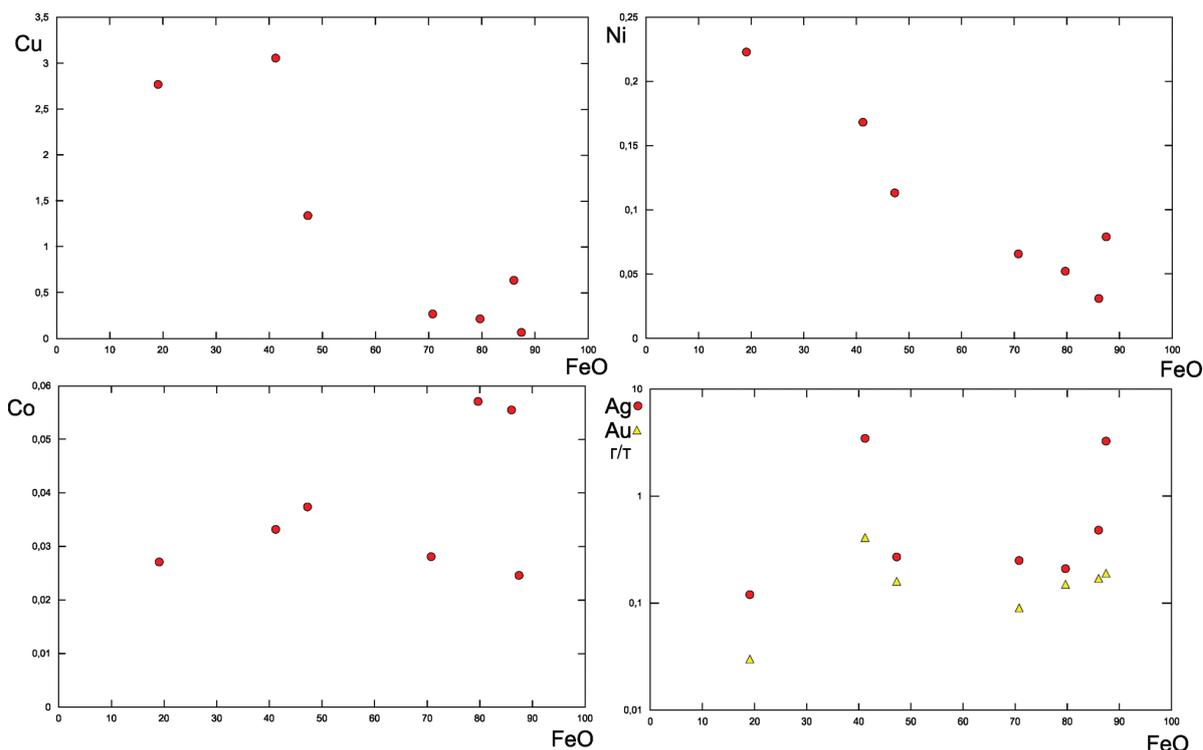


Рис. 2. Зависимость между содержаниями Cu, Ni, Co, Au, Ag и Fe в магнетитовых рудах.
 Fig. 2. Correlation between Cu, Ni, Co, Au, Ag and Fe contents in magnetite ores.

Реликтовые хромшпинелиды серпентинитов Баталинского рудопоявления характеризуются значительными вариациями содержаний (мас. %) MgO (2.03–11.3) и Al₂O₃ (1.3–24.44) при выдержанных концентрациях Cr₂O₃ (43.27–51.28) и суммарного железа (20.3–37.4) (табл. 4). Магнетит имеет выдержанный состав без заметных примесей. Главным нерудным минералом является серпентин (хризотил), в составе которого часто обнаруживается Cu в количестве 2.24–2.76 мас. %.

В магнетитовых рудах проявления точки Кл-6 часто встречаются реликтовые ксеноморфные и гипидиоморфные зерна хромшпинелидов (рис. 5а, б), внутренние части которых сохраняют первичный состав, характерный для акцессорных шпинелидов перидотитов (табл. 4), а по периферии в некоторых случаях (рис. 5б) развивается кайма хроммагнетита как переходная зона к вмещающему магнетиту. В других случаях отмечается резкий контакт хромшпинелидов и магнетита (рис. 5а).

Интерстициальное пространство между магнетитовыми агрегатами занято серпентином (хризотилом), иногда в ассоциации с хлоритом. К магнетиту приурочены многочисленные мелкие включения сульфидов Zn (рис. 5б, д), кобальтсодержащего пентландита (рис. 5б, в, д, е), минералов состава Cu-Fe-S (рис. 5б, д, е), хизлевудита и гидроксидов

сложного состава (рис. 5г). Часто магнетитовые агрегаты «цементируют» в себе участки серпентина, хлорита, диоптаза (рис. 5д), а также пересекаются прожилками карбонатов Cu (рис. 5в, е).

На проявлении точки Кл-7 встречены массивные и вкрапленные магнетитовые руды. В них также присутствуют реликтовые идиоморфные и гипидиоморфные зерна хромшпинелидов с каймой хроммагнетита (рис. 6а). Характерной особенностью вкрапленных руд является «звездчатая» морфология магнетитовых агрегатов (рис. 6б, в), интерстиции между которыми заполнены серпентином и, реже, хлоритом. Наиболее характерными включениями в магнетите являются кобальтсодержащий пентландит и минералы состава Cu-Fe-S, образующие выделения овальной либо неправильной формы размером от долей до 10–15 мкм (рис. 6в–е).

Магнетит Калканского проявления (обр. Кл-10/3) образует тонкозернистые прожилки в серпентине, сплошные зернистые агрегаты, а также шлировидные выделения (рис. 7). Примеси в магнетите не выявлены. Серпентин, заполняющий пространство между рудными зернами, демонстрирует повышенные содержания Cu (до 2.08 мас. %) и Ni (0.5–1.07 мас. %), а в отдельных случаях Co (до 0.4 мас. %). В магнетитовых агрегатах и серпенти-

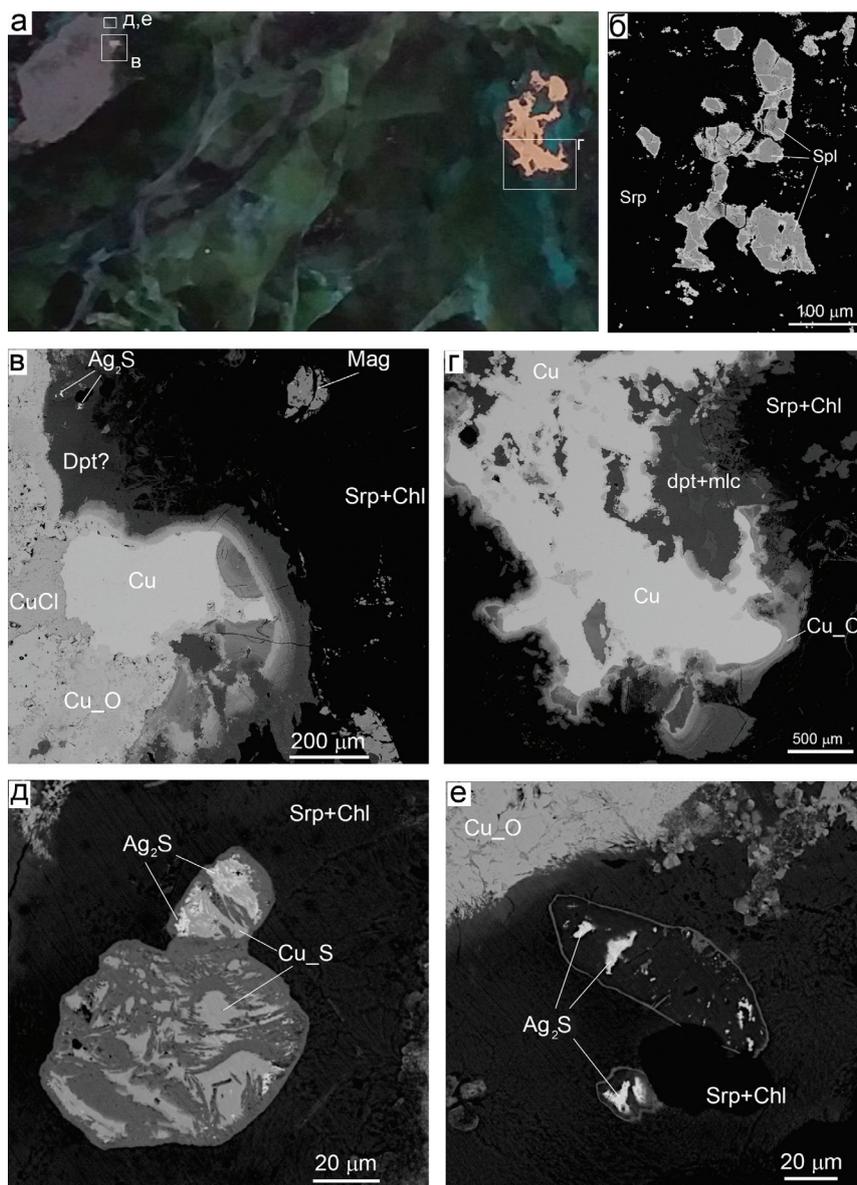


Рис. 3. Рудная минерализация в серпентините Баталинского рудопроявления:

а – серпентинит с крупными выделениями оксидов и самородной меди; б – реликтовые акцессорные хромшпинелиды в серпентините; в – тонкие выделения акантита во внешней кайме сростка куприта, нантокита и самородной меди; г – выделение самородной меди с оторочкой из оксидов, карбонатов и силикатов меди; д – псевдоморфоза по неизвестному минералу с выделениями сульфида меди и акантита; е – выделения акантита внутри псевдоморфозы по неизвестному минералу, замещенному серпентином; в–е – детали рис. 3а.

Fig. 3. Ore mineralization in serpentinite from the Batalinskoe occurrence:

а – serpentinite with large aggregates of native copper and Cu oxide; б – relict chromite grains in serpentinite; в – tiny acanthite grains in cuprite-nantokite-native copper rim; г – native copper with Cu oxide-carbonate-silicate rim; д – pseudomorph after an unidentified mineral with Cu sulfide and acanthite; е – acanthite within pseudomorph after unidentified mineral replaced by serpentine; в–е – details of Fig. 3а.

не встречаются прожилки и гнезда карбонатов Cu, которые в некоторых случаях обогащены Ni и Co (рис. 7е).

Медная минерализация приурочена к внутренним частям магнетитовых агрегатов и представлена

тончайшими выделениями (1–25 мкм) самородной меди и сульфидов ряда халькозин (Cu_2S) – дигенит (Cu_9S_5) (рис. 7а, б, д). В виде примеси в них часто присутствует Fe, а иногда также отмечаются Ni и Co (табл. 5). В количественном отношении с наход-

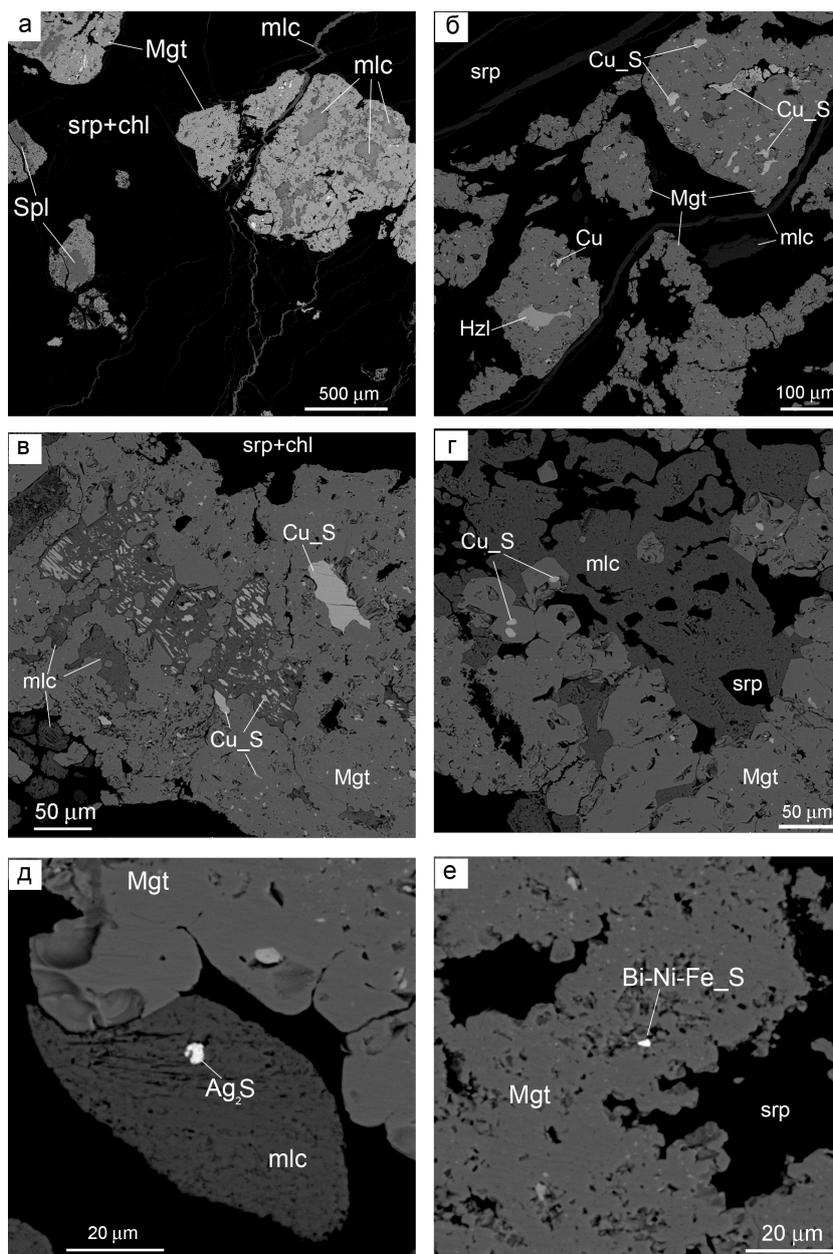


Рис. 4. Магнетитовые руды Баталинского рудопоявления:

а – вкрапленность магнетита и реликтовые зерна хромшпинелидов в серпентин-хлоритовом агрегате; б – магнетитовый агрегат с выделениями хизлевуудита, сульфидов меди и мелкими включениями самородной меди в серпентините; в, г – малахит-магнетитовый агрегат с обильными выделениями сульфидов меди; д – тонкое выделение акантита внутри малахита; е – тонкое выделение фазы Bi-Ni-Fe-S в магнетите

Fig. 4. Magnetite ores of the Batalinskoe occurrence:

а – disseminated magnetite and relict chromite grains in serpentinite; б – magnetite aggregate with heazlewoodite, Cu sulfide and tiny inclusions of native copper; в, г – malachite-magnetite aggregate with abundant fine grains of Cu sulfides; д – tiny acanthite grains in malachite; е – tiny grains of a Bi-Ni-Fe-S phase in magnetite.

ками сульфидов Cu соизмеримо присутствие выделений самородной меди с незначительной примесью Ni и Fe, а также кобальтсодержащего пентландита (12.43–16.36 мас. % Co).

В единичных случаях определен состав минералов (табл. 5, 6): 1) близкого к пентландиту, но содержащего примерно одинаковые количества Fe, Ni, Co и Cu; 2) близкого к борниту, но с заметными количествами Co (2.05–5.26 мас. %) и Ni (7.01–

Таблица 2

Химический состав сульфидов Cu из Баталинского медно-магнетитового проявления (мас. %)

Table 2

Composition of Cu sulfides from the Batalinskoe Cu magnetite occurrence (wt. %)

| № п/п | № образца | Минерал | Fe | Co | Ni | Cu | Ag | S | Сумма | Кристаллохимическая формула |
|-------|-----------|-----------|------|------|------|-------|------|-------|--------|--|
| 1 | Кл-1/6 | | – | – | – | 64.64 | 3.18 | 31.33 | 100.00 | $Cu_{1.04}Ag_{0.03}S_{1.00}$ |
| 2 | Кл-1/7 | Ковеллин | 1.28 | – | – | 62.70 | 2.02 | 33.99 | 99.99 | $Cu_{0.93}Fe_{0.02}Ag_{0.02}S_{1.00}$ |
| 3 | | | 3.29 | – | – | 64.60 | – | 32.11 | 100.00 | $Cu_{1.01}Fe_{0.06}S_{1.00}$ |
| 4 | | | 1.69 | – | – | 75.73 | – | 22.58 | 100.00 | $Cu_{8.45}Fe_{0.21}S_{5.00}$ |
| 5 | | Дигенит? | 2.16 | – | – | 75.65 | – | 22.19 | 100.00 | $Cu_{8.59}Fe_{0.28}S_{5.00}$ |
| 6 | | | 2.63 | – | – | 75.52 | – | 21.85 | 100.00 | $Cu_{8.71}Fe_{0.34}S_{5.00}$ |
| 7 | | | 2.66 | – | – | 75.92 | – | 21.42 | 100.00 | $Cu_{8.93}Fe_{0.36}S_{5.00}$ |
| 8 | | | 5.08 | – | – | 73.91 | – | 21.01 | 100.00 | $Cu_{1.77}Fe_{0.14}S_{1.00}$ |
| 9 | | Халькозин | 6.46 | – | – | 72.53 | – | 21.01 | 100.00 | $Cu_{1.74}Fe_{0.18}S_{1.00}$ |
| 10 | | | 4.50 | – | – | 74.64 | – | 20.86 | 100.00 | $Cu_{1.80}Fe_{0.12}S_{1.00}$ |
| 11 | | | 5.99 | 2.28 | 1.30 | 69.62 | – | 20.81 | 100.00 | $Cu_{1.69}Fe_{0.16}Co_{0.06}Ni_{0.03}S_{1.00}$ |
| 12 | | | 3.27 | – | – | 75.92 | – | 20.81 | 100.00 | $Cu_{1.84}Fe_{0.09}S_{1.00}$ |
| 13 | | | 5.68 | – | – | 73.56 | – | 20.76 | 100.00 | $Cu_{1.79}Fe_{0.16}S_{1.00}$ |
| 14 | | | 4.65 | – | – | 74.63 | – | 20.72 | 100.00 | $Cu_{1.82}Fe_{0.13}S_{1.00}$ |
| 15 | | | 3.58 | – | – | 74.35 | – | 20.45 | 98.38 | $Cu_{1.83}Fe_{0.10}S_{1.00}$ |
| 16 | | | 5.31 | – | – | 74.50 | – | 20.20 | 100.00 | $Cu_{1.86}Fe_{0.15}S_{1.00}$ |
| 17 | | | 6.08 | – | – | 73.81 | – | 20.11 | 100.00 | $Cu_{1.85}Fe_{0.17}S_{1.00}$ |
| 18 | | | 6.78 | – | – | 73.11 | – | 20.11 | 100.00 | $Cu_{1.83}Fe_{0.19}S_{1.00}$ |

Примечание. Здесь и далее, прочерк – концентрация элемента ниже предела обнаружения.

Note. Hereinafter, dash – element content is below detection limit.

Таблица 3

Химический состав минералов Ag и Bi из Баталинского медно-магнетитового проявления (мас. %)

Table 3

Composition of Ag and Bi minerals from the Batalinskoe Cu magnetite occurrence (wt. %)

| № п/п | № образца | Минерал | Fe | Ni | Cu | Ag | Bi | S | Сумма | Кристаллохимическая формула |
|-------|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | Кл-1/7 | Акантит | 0.91 | – | 4.03 | 82.24 | – | 12.82 | 100.00 | $Ag_{1.90}Cu_{0.16}Fe_{0.04}S_{1.00}$ |
| 2 | | | 1.59 | – | 3.19 | 82.81 | – | 12.41 | 100.00 | $Ag_{1.98}Cu_{0.13}Fe_{0.07}S_{1.00}$ |
| 3 | Кл-1/6 | | – | – | 8.79 | 80.02 | – | 11.19 | 100.00 | $Ag_{2.12}Cu_{0.40}S_{1.00}$ |
| 4 | | – | – | 7.24 | 80.71 | – | 12.05 | 100.00 | $Ag_{1.99}Cu_{0.30}S_{1.00}$ | |
| 5 | Кл-1/7 | Фаза Fe- | 11.25 | 26.57 | – | – | 52.16 | 10.01 | 99.99 | $Ni_{2.90}Bi_{1.60}Fe_{1.28}S_{2.00}$ |
| 6 | | Ni-Bi-S | 11.52 | 25.02 | – | – | 53.78 | 9.68 | 100.00 | $Ni_{2.82}Bi_{1.70}Fe_{1.36}S_{2.00}$ |

7.33 мас. %), 3) близкого по составу к кобальтпентландиту ($Co_{6.41}Ni_{1.512}Fe_{0.515}Cu_{0.14}Ga_{0.087}S_{8.664}$) с примесью Ga до 0.79 мас. %, 4) сфалерита с примесью Fe до 12 мас. %.

Хромшпинелиды в рудах Калканского проявления почти полностью замещены вторичным магнетитом, а редкие реликтовые зерна характеризуются сходным составом с таковыми Баталинского проявления (мас. %): выдержанные концентрации Cr_2O_3 (42.76–47.94) при значительных вариациях содержаний $FeO + Fe_2O_3$ (19.44–43.72) и резких скачках концентраций MgO (1.52–12.53) и Al_2O_3 (7.32–20.15) (табл. 4).

Обсуждение результатов

Минеральные ассоциации, подобные описанным в серпентинитах Калканской площади, известны во многих офиолитах мира. Наиболее изучены магнетитовые рудные тела в серпентинитах комплексов Бу-Аззер (Морокко), Наин, Сабзевар (Иран), офиолитах Омана (Hodel et al., 2017; Khedr, Arai, 2018; Eslami et al., 2018; 2021), а сульфидная и самородная минерализация в ассоциации с магнетитом – в серпентинизированных ультрамафитах Коста-Рики (Schwarzenbach et al., 2014), Срединно-Атлантического хребта (САХ) (Klein, Bach, 2009), массиве Акойе на Филиппинах (Abrajano, Pasteris,

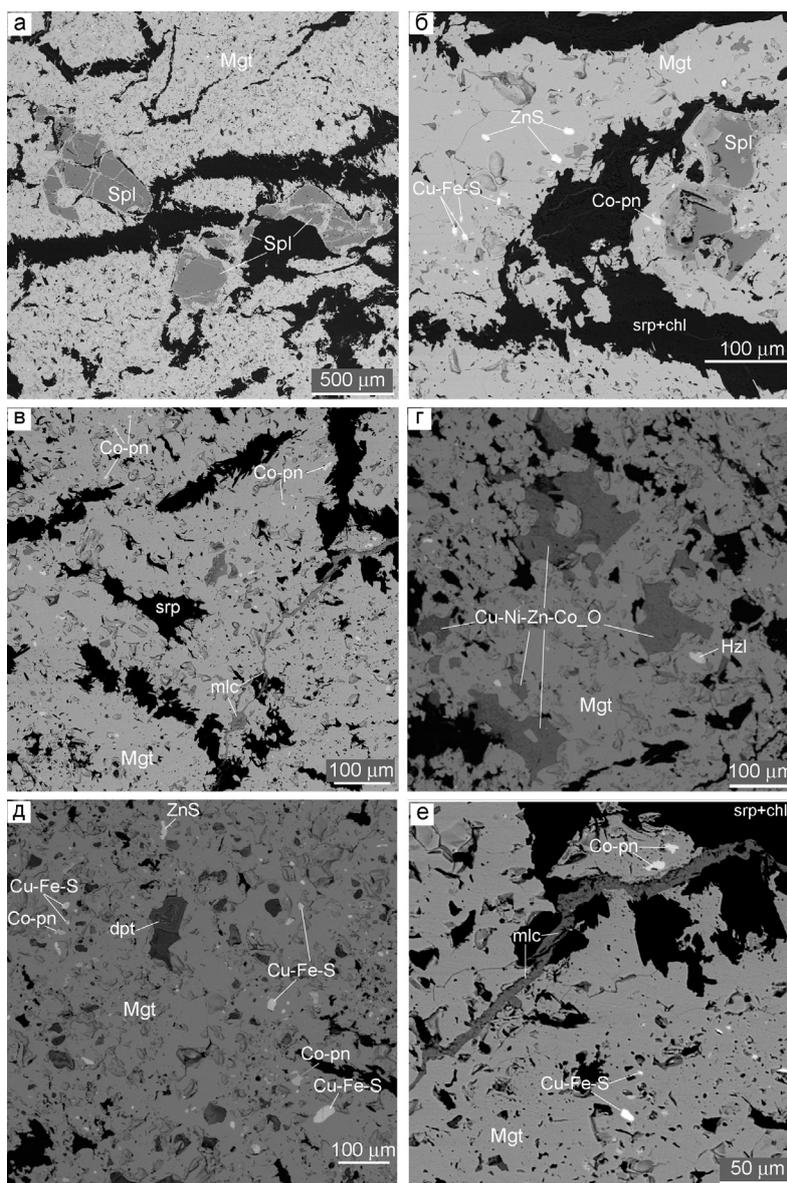


Рис. 5. Магнетитовые руды и акцессорная минерализация в образце Кл-6/4:

а – сплошная магнетитовая руда с реликтовыми зёрнами хромшпинелидов; б – тонкие выделения сульфидов Cu-Fe, сфалерита и хромшпинелидов в магнетитовом агрегате; в – обильные выделения кобальтсодержащего пентландита в малахит-магнетитовом агрегате; г – крупные ксеноморфные выделения оксидов состава Cu-Ni-Zn-Co в сплошной магнетитовой руде; д – магнетитовая руда с обильными включениями силиката меди (диоптаза) и тонкими выделениями кобальтсодержащего пентландита, сфалерита и сульфидов меди; е – выделения кобальтсодержащего пентландита вблизи малахитового прожилка в магнетитовом агрегате.

Fig. 5. Magnetite ores and accessory mineralization in sample Кл-6/4:

а – massive magnetite ore with relict chromite grains; б – tiny Cu-Fe sulfides, sphalerite and chromite in magnetite aggregate; в – abundant inclusions of Co-bearing pentlandite in malachite-magnetite aggregate; г – large anhedral grains of Cu-Ni-Zn-Co oxides in massive magnetite ore; д – magnetite ore with abundant inclusions of Cu silicate (diopside) and tiny Co-bearing pentlandite, sphalerite and Cu sulfides; е – Co-bearing pentlandite near malachite veinlet in magnetite aggregate.

1989), офиолитах Ирана (Eslami et al., 2021). В ассоциации с магнетитовыми скоплениями и во вмещающих серпентинитах описаны различные самородные минералы (медь, аварунит), оксиды и гидроксиды Fe и Cu, сульфиды Cu, Ni, Co.

Сопоставление магнетитовых проявлений Калканского района с некоторыми магнетитовыми рудопоявлениями в серпентинитах других районов мира показывает, что большая часть самородных и сульфидных минералов встречается

Таблица 4
Table 4

Химический состав хромшпинелидов из магнетитовых руд и серпентинитов (мас. %)

Compositions of chromite from magnetite ores and serpentinites (wt. %)

| № п/п | № образца | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | MgO | FeO | TiO ₂ | MnO | V ₂ O ₃ | ZnO | Сумма | Cr | Al | Mg | Fe ⁺³ | Fe ⁺² | Ti | Mn | V | Zn |
|-------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------|-------|-------------------------------|------|--------|--------|-------|-------|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | 23.65 | 43.67 | 11.30 | 21.39 | — | — | — | — | 100.01 | 1.069 | 0.863 | 0.521 | 0.066 | 0.481 | — | — | — | — |
| 2 | Кл-1/7 | 24.44 | 43.63 | 11.24 | 20.69 | — | — | — | — | 100.00 | 1.065 | 0.889 | 0.517 | 0.041 | 0.488 | — | — | — | — |
| 3 | | 1.30 | 45.48 | 3.78 | 37.21 | 1.72 | 10.51 | — | — | 100.00 | 1.305 | 0.055 | 0.205 | 0.586 | 0.478 | 0.047 | 0.323 | — | — |
| 4 | | 2.13 | 51.28 | 2.03 | 37.40 | 1.57 | 4.29 | — | — | 100.00 | 1.480 | 0.092 | 0.111 | 0.342 | 0.762 | 0.043 | 0.133 | 0.038 | — |
| 5 | | 19.89 | 47.94 | 12.20 | 19.51 | — | — | — | — | 100.00 | 1.185 | 0.733 | 0.568 | 0.073 | 0.429 | — | — | 0.011 | — |
| 6 | Кл-10/3 | 20.15 | 47.87 | 12.53 | 19.44 | — | — | — | — | 99.99 | 1.179 | 0.740 | 0.582 | 0.073 | 0.425 | — | — | — | — |
| 7 | | 7.32 | 45.83 | 6.08 | 40.37 | — | — | — | — | 99.99 | 1.255 | 0.299 | 0.314 | 0.429 | 0.692 | — | — | 0.011 | — |
| 8 | | 8.72 | 42.76 | 2.06 | 43.57 | 1.27 | 0.91 | — | — | 100.00 | 1.197 | 0.364 | 0.109 | 0.374 | 0.875 | 0.034 | 0.027 | 0.020 | — |
| 9 | | 26.63 | 42.19 | 13.31 | 17.87 | — | — | — | — | 100.00 | 1.007 | 0.948 | 0.599 | 0.042 | 0.404 | — | — | — | — |
| 10 | Кл-1/6 | 26.57 | 42.67 | 13.49 | 17.27 | — | — | — | — | 100.00 | 1.017 | 0.944 | 0.606 | 0.029 | 0.403 | — | — | — | — |
| 11 | | 26.82 | 42.08 | 13.06 | 17.79 | — | — | — | — | 100.00 | 1.005 | 0.955 | 0.588 | 0.041 | 0.404 | — | — | 0.006 | — |
| 12 | | 0.44 | 32.24 | 2.977 | 50.79 | — | 10.94 | — | 2.60 | 99.99 | 0.94 | 0.019 | 0.164 | 0.965 | 0.493 | — | 0.342 | — | 0.077 |
| 13 | | 1.17 | 45.48 | 3.08 | 48.75 | 0.26 | — | — | — | 100.00 | 1.290 | 0.049 | 0.164 | 0.641 | 0.810 | 0.007 | 0.030 | 0.007 | — |
| 14 | Кл-6/4 | 18.40 | 48.73 | 10.29 | 22.58 | — | — | — | — | 100.00 | 1.228 | 0.691 | 0.489 | 0.086 | 0.506 | — | — | — | — |
| 15 | | 17.32 | 51.28 | 12.36 | 19.04 | — | — | — | — | 100.00 | 1.280 | 0.645 | 0.581 | 0.072 | 0.422 | — | — | — | — |
| 16 | | 17.40 | 50.52 | 11.63 | 20.46 | — | — | — | — | 100.01 | 1.267 | 0.650 | 0.549 | 0.083 | 0.451 | — | — | — | — |
| 17 | | Кл-7/2 | 1.01 | 35.53 | 5.84 | 44.04 | — | — | — | 1.65 | 100.01 | 1.010 | 0.043 | 0.313 | 0.894 | 0.331 | — | 0.363 | — |
| 18 | 28.59 | | 39.78 | 14.91 | 16.72 | — | — | — | — | 100.00 | 0.933 | 1.000 | 0.659 | 0.061 | 0.347 | — | — | — | — |

практически на всех объектах, при этом наиболее распространенными минералами являются аварунит, пентландит, хизлевудит, халькопирит, самородная медь, а также реликтовые зерна хромшпинелидов (табл. 7). Из силикатных минералов, помимо серпентина, на большинстве рудопроявлений встречены хлорит и андрадит. Уникальность рудопроявлений Калканской площади заключается в присутствии относительно крупных выделений хлорида Cu – нантокита, который не был описан ни на одном из других подобных объектов.

Составы минералов системы Fe-Ni-Cu-Co-S на диаграмме (рис. 8а) образуют три неравнозначных поля, два из которых являются очень узкими и соответствуют аваруниту и самородной меди, а наиболее обширное поле охватывает составы сульфидов: от пирротина к халькопириту и пентландиту и далее к обедненным в отношении серы хизлевудиту и халькозину. Близкая картина наблюдается для акцессорной минерализации из серпентинитов офиолитового комплекса Санта-Елена на Коста-Рике (Schwarzenbach et al., 2014). Отличие заключается в том, что в проявлениях Калканской площади почти отсутствуют сульфиды железа – пирротин и пирит.

На треугольной диаграмме Cu-S-Fe (рис. 8б) анализы изученных включений в магнетитовых рудах образуют компактный рой точек, почти совпадающий с полем «борнитового твердого раствора» (между составами собственно борнита, дигенита и халькозина), от которого отходит два прерывистых тренда в направлении точек ковеллина и халькопирита. Помимо них, есть также несколько точек, отклоняющихся от борнита в направлении стороны Cu-Fe. Тесная ассоциация минералов меди с серпентином и хлоритом говорит о низкотемпературных условиях и высоком содержании водного флюида при их образовании, либо о формировании их в условиях гипергенеза.

В экспериментальной работе (Kaneda et al., 1986) предложена диаграмма для определения температуры образования пентландита в зависимости от его состава в координатах Fe₉S₈-Ni₉S₈-Co₉S₈ (рис. 8в). Одной из интересных особенностей пентландита изученных проявлений является постоянное присутствие Co в значительных количествах (6.45–49.3 мас. %).

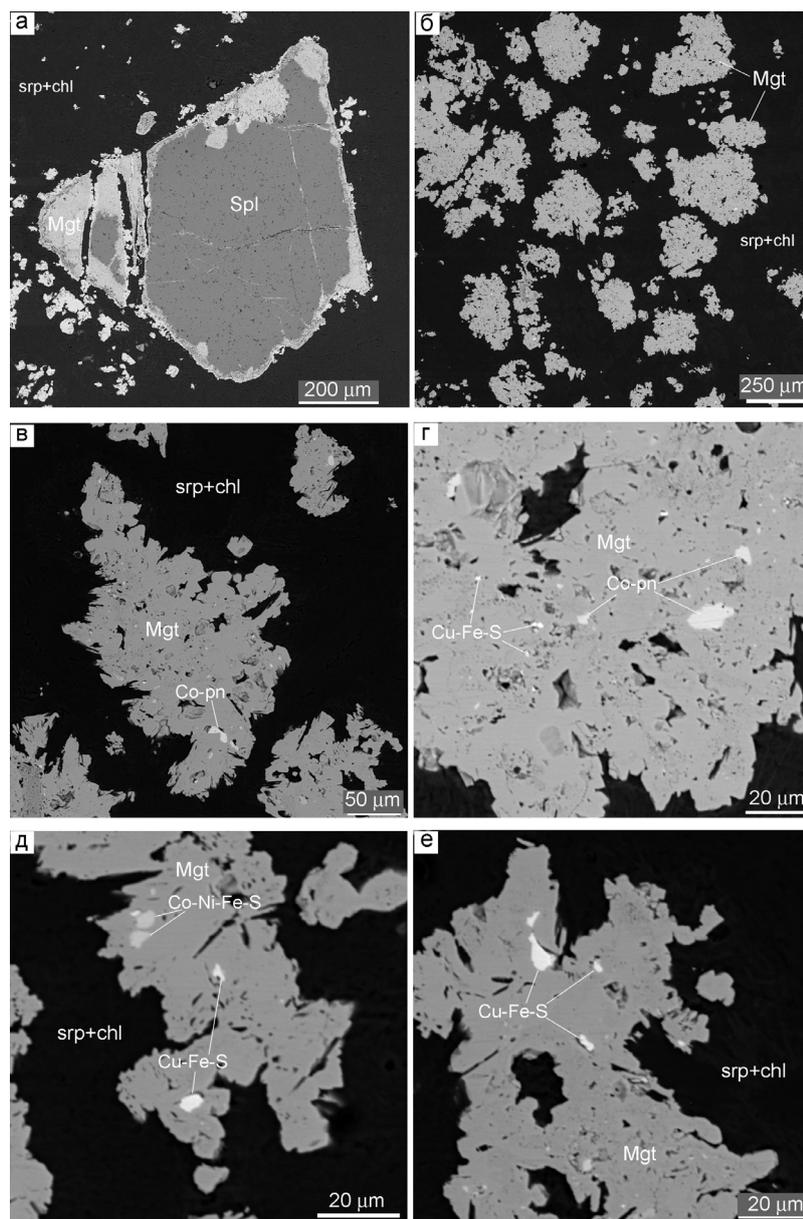


Рис. 6. Магнетитовые руды и акцессорная минерализация в образце КЛ-7/2:

а – реликтовое идиоморфное зерно хромшпинелида с тонкой каймой магнетита; б – вкрапленность корродированных по краям зерен магнетита в серпентин-хлоритовом матриксе; в – включения кобальтсодержащего пентландита в корродированном зерне магнетита (деталь рис. 6б); г – выделения кобальтсодержащего пентландита и сульфидов меди в зернах магнетита; д, е – выделения кобальтпентландита и сульфидов Cu в магнетите.

Fig. 6. Magnetite ores and accessory mineralization in sample КЛ-7/2:

а – relict euhedral chromite grain with narrow magnetite rim; б – disseminated corroded magnetite grains in serpentine-chlorite matrix; в – Co-bearing pentlandite inclusions in corroded magnetite grain (detail of image 6б); г – tiny Co-bearing pentlandite and Cu sulfide grains in magnetite; д, е – cobaltpentlandite and Cu sulfide inclusions in magnetite.

Сравнение состава изученных зерен с экспериментальными данными показывает значительный температурный диапазон их образования (от 200 до 500 °С). Два анализа попадают в область, соответствующую высокотемпературным условиям кристаллизации (более 600 °С).

Реликтовые хромшпинелиды и геодинамическая интерпретация. Все описанные магнетитовые рудопроявления приурочены к хризотилowym серпентинитам зоны Главного Уральского разлома и содержат акцессорную вкрапленность хромшпинелидов, внутренние части которых сохранили

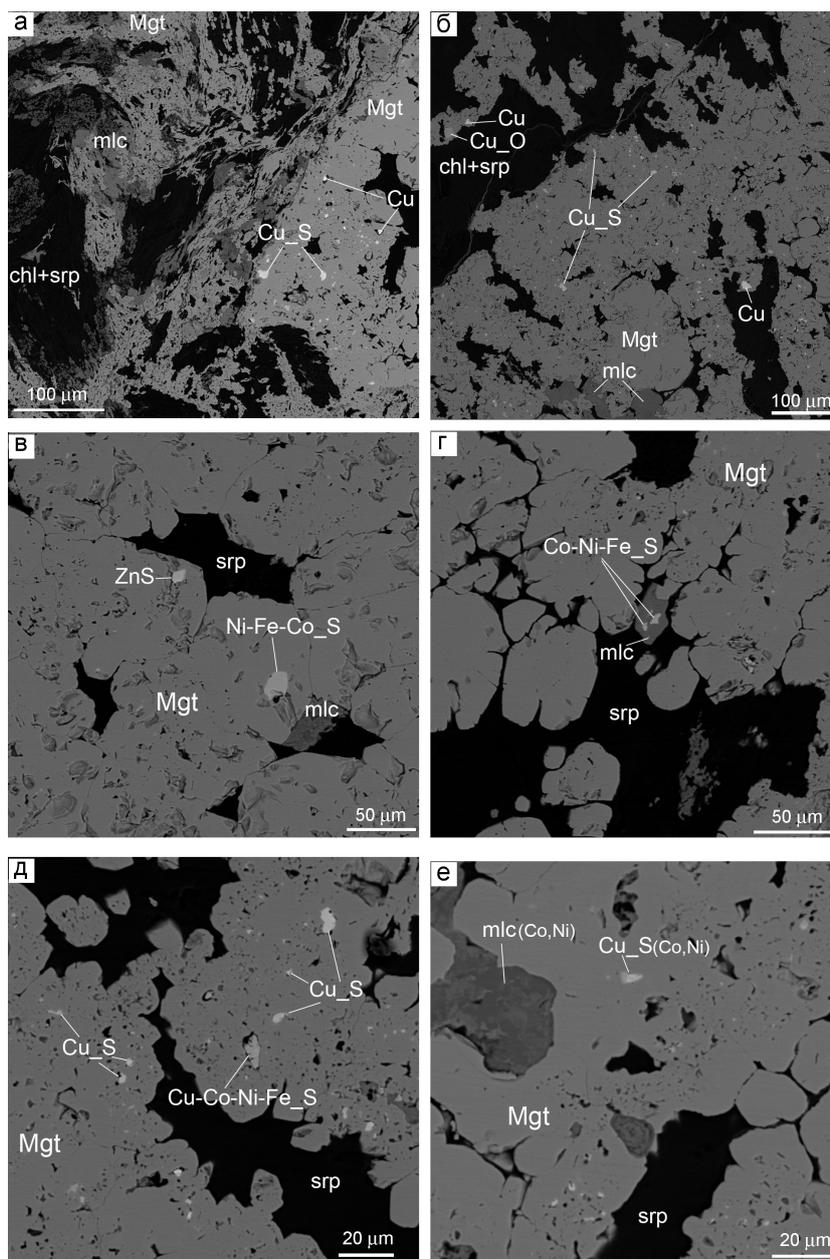


Рис. 7. Магнетитовые руды и акцессорная минерализация Калканского рудопроявления (обр. Кл-10/3):

а – граница тонкозернистого серпентин-хлорит-малахит-магнетитового агрегата и среднезернистой сплошной магнетитовой руды с тонкими включениями сульфидов меди и самородной меди; б – обильные тонкие выделения самородной меди, халькозина и куприта внутри и по границам магнетитового агрегата; в – включения сфалерита и кобальтсодержащего пентландита в магнетите; г – тонкие включения кобальтпентландита в малахите в окружении зерен магнетита; д – многочисленные выделения сульфидов (Cu-Co-содержащий пентландит, халькозин, дигенит) в магнетитовой руде; е – включения малахита и борнита с примесями Co и Ni в магнетите

Fig. 7. Magnetite ores and accessory mineralization of the Kalkan occurrence (sample Кл-10/3):

а – boundary between fine-grained serpentine-chlorite-malachite-magnetite aggregate and massive medium-grained magnetite ore with fine inclusions of Cu sulfides and native copper; б – abundant fine grains of native copper, chalcocite and cuprite within magnetite aggregate and along its boundaries; в – sphalerite and Co-bearing pentlandite inclusions in magnetite; г – malachite surrounded by magnetite grains with tiny cobaltpentlandite inclusions; д – numerous grains sulfides (Cu-Co-bearing pentlandite, chalcocite, digenite) in magnetite ore; е – inclusions of malachite and Co- and Ni-bearing bornite in magnetite.

Таблица 5

Химический состав сульфидов меди из магнетитовых проявлений Калканское и точек Кл-6, 7 (мас. %)

Table 5

Composition of Cu sulfides from the Kalkan and mineralization points Кл-6 and 7 magnetite occurrences (wt. %)

| № п/п | № образца | Минерал | Fe | Co | Ni | Cu | S | Сумма | Кристаллохимическая формула | |
|-------|-----------|--------------------|----------|-------|------|-------|-------|--------|--|--|
| 1 | Кл-10/3 | Халькозин | 4.83 | – | – | 74.84 | 20.33 | 100.00 | $(\text{Cu}_{1.86}\text{Fe}_{0.14})_{2.00}\text{S}_{1.00}$ | |
| 2 | | | 6.71 | – | – | 71.88 | 21.41 | 100.00 | $(\text{Cu}_{1.69}\text{Fe}_{0.18})_{1.87}\text{S}_{1.00}$ | |
| 3 | | Анилит? | 8.39 | – | – | 68.27 | 23.34 | 100.00 | $(\text{Cu}_{5.90}\text{Fe}_{0.82})_{6.72}\text{S}_{4.00}$ | |
| 4 | | | 5.59 | – | – | 71.65 | 22.77 | 100.01 | $(\text{Cu}_{6.34}\text{Fe}_{0.56})_{6.90}\text{S}_{4.00}$ | |
| 5 | | | 7.13 | – | – | 69.99 | 22.88 | 100.00 | $(\text{Cu}_{6.17}\text{Fe}_{0.71})_{6.88}\text{S}_{4.00}$ | |
| 6 | | Джирит | 6.96 | – | – | 69.14 | 23.90 | 100.00 | $(\text{Cu}_{7.29}\text{Fe}_{0.83})_{8.12}\text{S}_{5.00}$ | |
| 7 | | Дигенит | 6.37 | – | – | 71.79 | 21.83 | 99.99 | $(\text{Cu}_{8.29}\text{Fe}_{0.83})_{9.12}\text{S}_{5.00}$ | |
| 8 | | | 6.59 | – | – | 71.53 | 21.88 | 100.00 | $(\text{Cu}_{8.24}\text{Fe}_{0.86})_{9.10}\text{S}_{5.00}$ | |
| 9 | | | 7.55 | – | – | 70.43 | 22.02 | 100.00 | $(\text{Cu}_{8.06}\text{Fe}_{0.98})_{9.04}\text{S}_{5.00}$ | |
| 10 | | Борнит? | 16.14 | 5.26 | 7.33 | 45.28 | 25.99 | 100.00 | $(\text{Cu}_{3.51}\text{Fe}_{1.42}\text{Ni}_{0.61}\text{Co}_{0.44})_{5.98}\text{S}_{4.00}$ | |
| 11 | | | 8.89 | 2.05 | 7.01 | 55.75 | 26.30 | 100.00 | $(\text{Cu}_{4.27}\text{Fe}_{0.77}\text{Ni}_{0.58}\text{Co}_{0.17})_{5.79}\text{S}_{4.00}$ | |
| 12 | | | 7.56 | – | – | 67.55 | 24.89 | 100.00 | $(\text{Cu}_{5.47}\text{Fe}_{0.69})_{6.17}\text{S}_{4.00}$ | |
| 13 | Кл-7/2 | Халькозин | 11.30 | – | 3.37 | 64.25 | 21.07 | 99.99 | $(\text{Cu}_{1.53}\text{Fe}_{0.31}\text{Ni}_{0.09})_{1.92}\text{S}_{1.00}$ | |
| 14 | | | 13.15 | – | 2.94 | 63.34 | 20.57 | 100.00 | $(\text{Cu}_{1.54}\text{Fe}_{0.37}\text{Ni}_{0.08})_{1.98}\text{S}_{1.00}$ | |
| 15 | | | 5.59 | – | – | 72.97 | 21.44 | 100.00 | $(\text{Cu}_{1.70}\text{Fe}_{0.15})_{1.85}\text{S}_{1.00}$ | |
| 16 | | Анилит | 5.87 | – | – | 71.96 | 22.17 | 100.00 | $(\text{Cu}_{6.49}\text{Fe}_{0.61})_{7.10}\text{S}_{4.00}$ | |
| 17 | | | 5.49 | – | – | 72.27 | 22.24 | 100.00 | $(\text{Cu}_{6.50}\text{Fe}_{0.56})_{7.06}\text{S}_{4.00}$ | |
| 18 | | Дигенит | 5.56 | – | – | 72.53 | 21.91 | 100.00 | $(\text{Cu}_{8.28}\text{Fe}_{0.73})_{9.01}\text{S}_{5.00}$ | |
| 19 | | | 5.76 | – | – | 72.54 | 21.70 | 100.00 | $(\text{Cu}_{8.36}\text{Fe}_{0.76})_{9.12}\text{S}_{5.00}$ | |
| 20 | | Кл-7/3 | Ковеллин | 6.07 | – | – | 63.63 | 30.29 | 99.99 | $(\text{Cu}_{1.05}\text{Fe}_{0.12})_{1.17}\text{S}_{1.00}$ |
| 21 | | | | 25.92 | – | – | 43.02 | 31.06 | 100.00 | $(\text{Cu}_{0.69}\text{Fe}_{0.48})_{1.17}\text{S}_{1.00}$ |
| 22 | Кл-7/2 | Фаза Cu-Fe-Ni-Co-S | 13.52 | 6.77 | 3.23 | 50.54 | 25.94 | 100.00 | $\text{Cu}_{0.97}\text{Fe}_{0.30}\text{Ni}_{0.07}\text{Co}_{0.14}\text{S}_{1.00}$ | |
| 23 | Кл-6/4 | Фаза Cu-Fe-S | 11.96 | – | – | 61.9 | 26.14 | 100.00 | $\text{Cu}_{1.18}\text{Fe}_{0.26}\text{S}_{1.00}$ | |
| 24 | | | 15.19 | – | – | 56.65 | 28.16 | 100.00 | $\text{Cu}_{1.01}\text{Fe}_{0.31}\text{S}_{1.00}$ | |
| 25 | | | 17.83 | – | – | 52.88 | 29.29 | 100.00 | $\text{Cu}_{0.90}\text{Fe}_{0.35}\text{S}_{1.00}$ | |
| 26 | | | 13.74 | – | – | 58.48 | 25.82 | 98.04 | $\text{Cu}_{1.13}\text{Fe}_{0.30}\text{S}_{1.00}$ | |
| 27 | | | 13.39 | – | – | 59.76 | 26.86 | 100.01 | $\text{Cu}_{1.11}\text{Fe}_{0.29}\text{S}_{1.00}$ | |
| 28 | | | 9.37 | – | – | 65.26 | 24.21 | 98.84 | $\text{Cu}_{1.35}\text{Fe}_{0.22}\text{S}_{1.00}$ | |

реликтовый состав, унаследованный от первичных перидотитов верхней мантии Уральского палеобасейна. Это позволяет провести палеогеодинамическую интерпретацию, опираясь на состав аксессуарных шпинелидов из различных тектонических обстановок (Arai, 1994; Савельев, 2013).

Анализы внутренних зон хромшпинелидов образуют компактный рой точек в центральной части диаграммы, указывая на преимущественно среднехромистый состав шпинелидов и умеренную магнетизальность (рис. 9а). Они попадают в область наложения полей составов аксессуарных шпинелидов из мантии срединно-океанических хребтов и над-

субдукционных обстановок. Показатель $\#Cr^* = Cr / (Cr + Al + Fe^{3+})$ становится актуальным при рассмотрении составов метаморфизованных шпинелидов. На треугольной диаграмме (рис. 9б) составы внутренних зон шпинелидов концентрируются в средней части стороны Al–Cr, что говорит об умеренной деплетированности исходного мантийного субстрата. Анализы краевых (метаморфизованных) участков тяготеют к стороне Cr–Fe треугольника.

О генезисе магнетита и самородных минералов. Минеральные ассоциации, возникающие в результате серпентинизации ультрамафитов, могут иметь неоднозначную интерпретацию окислитель-

Таблица 6

Химический состав сульфидов системы Fe-Ni-Co из медно-магнетитовых проявлений
Калканское и точек Кл-6, 7 (мас. %)

Table 6

Composition of Fe-Ni-Co sulfides from the Kalkan and
mineralization points Кл-6 and 7 Cu magnetite occurrences (wt. %)

| № п/п | № образца | Минерал | Fe | Co | Ni | Cu | Ga | S | Сумма | Кристаллохимическая формула |
|-------|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| 1 | Кл-10/3 | Кобальт-содержащий пентландит | 29.33 | 13.28 | 23.61 | – | – | 33.78 | 100.00 | $(\text{Fe}_{3.97}\text{Ni}_{3.03}\text{Co}_{1.71})_{8.71}\text{S}_{8.00}$ |
| 2 | | | 35.12 | 13.85 | 15.90 | – | – | 35.13 | 100.00 | $(\text{Fe}_{4.57}\text{Ni}_{1.96}\text{Co}_{1.71})_{8.25}\text{S}_{8.00}$ |
| 3 | | | 37.59 | 12.43 | 14.85 | – | – | 35.14 | 100.01 | $(\text{Fe}_{4.89}\text{Ni}_{1.83}\text{Co}_{1.54})_{8.26}\text{S}_{8.00}$ |
| 4 | | | 23.98 | 16.39 | 25.89 | – | – | 33.74 | 100.00 | $(\text{Fe}_{3.25}\text{Ni}_{3.33}\text{Co}_{2.11})_{8.69}\text{S}_{8.00}$ |
| 5 | | | 23.85 | 13.52 | 29.01 | – | – | 33.62 | 100.00 | $(\text{Ni}_{3.74}\text{Fe}_{3.24}\text{Co}_{1.75})_{8.73}\text{S}_{8.00}$ |
| 6 | | Су-Со-содержащий пентландит | 13.00 | 18.35 | 17.24 | 18.65 | – | 32.76 | 100.00 | $(\text{Co}_{2.43}\text{Cu}_{2.30}\text{Ni}_{2.28}\text{Fe}_{1.81})_{8.82}\text{S}_{8.00}$ |
| 7 | | | 3.76 | 49.30 | 11.63 | 1.16 | 0.79 | 33.37 | 100.01 | $(\text{Co}_{6.40}\text{Ni}_{1.52}\text{Fe}_{0.48}\text{Cu}_{0.16}\text{Ga}_{0.08})_{8.64}\text{S}_{8.00}$ |
| 8 | Кл-7/2 | Кобальтпентландит | 9.83 | 46.26 | 10.76 | – | – | 33.16 | 100.01 | $(\text{Co}_{6.08}\text{Ni}_{1.44}\text{Fe}_{1.36})_{8.88}\text{S}_{8.00}$ |
| 9 | | | 7.52 | 51.24 | 7.81 | – | – | 33.43 | 100.00 | $(\text{Co}_{6.64}\text{Fe}_{1.04}\text{Ni}_{1.04})_{8.72}\text{S}_{8.00}$ |
| 10 | | | 12.08 | 45.40 | 10.20 | – | – | 32.32 | 100.00 | $(\text{Co}_{6.08}\text{Fe}_{1.68}\text{Ni}_{1.36})_{9.12}\text{S}_{8.00}$ |
| 11 | Кл-6/4 | Кобальт-содержащий пентландит | 31.86 | 6.66 | 27.14 | – | – | 34.34 | 100.00 | $(\text{Fe}_{4.24}\text{Ni}_{3.43}\text{Co}_{0.84})_{8.51}\text{S}_{8.00}$ |
| 12 | | | 32.36 | 6.45 | 25.29 | – | – | 35.42 | 99.52 | $(\text{Fe}_{4.18}\text{Ni}_{3.10}\text{Co}_{0.79})_{8.07}\text{S}_{8.00}$ |
| 13 | | | 30.68 | 9.62 | 25.64 | – | – | 34.06 | 100.00 | $(\text{Fe}_{4.12}\text{Ni}_{3.27}\text{Co}_{1.23})_{8.61}\text{S}_{8.00}$ |
| 14 | Кл-7/2 | Кобальт-содержащий пентландит | 24.16 | 16.63 | 27.41 | – | – | 31.8 | 100.00 | $(\text{Ni}_{3.74}\text{Fe}_{3.47}\text{Co}_{2.27})_{9.48}\text{S}_{8.00}$ |
| 15 | | | 19.59 | 11.52 | 35.64 | – | – | 33.24 | 99.99 | $(\text{Ni}_{4.65}\text{Fe}_{2.69}\text{Co}_{1.50})_{8.85}\text{S}_{8.00}$ |
| 16 | | | 21.87 | 11.7 | 34.13 | – | – | 32.31 | 100.01 | $(\text{Ni}_{4.58}\text{Fe}_{3.09}\text{Co}_{1.57})_{9.25}\text{S}_{8.00}$ |
| 17 | | | 27.15 | 16.38 | 26.22 | – | – | 30.25 | 100.00 | $(\text{Fe}_{4.10}\text{Ni}_{3.76}\text{Co}_{2.35})_{10.21}\text{S}_{8.00}$ |
| 18 | Кл-6/4 | Пирротин | 61.06 | – | – | – | – | 38.94 | 100.00 | $\text{Fe}_{0.90}\text{S}_{1.00}$ |
| 19 | | Хизлевудит | 3.68 | – | 68.7 | – | – | 27.61 | 99.99 | $(\text{Ni}_{2.70}\text{Fe}_{0.15})_{2.85}\text{S}_{2.00}$ |
| 20 | | 4.88 | – | 68.16 | – | – | 26.95 | 99.99 | $(\text{Ni}_{2.74}\text{Fe}_{0.21})_{2.95}\text{S}_{2.00}$ | |

Таблица 7

Сравнительная минералогическая характеристика магнетитовых рудопроявлений в серпентинитах
некоторых массивов мира

Table 7

Comparative mineralogical characteristic of magnetite occurrences in serpentinites from selected world massifs

| Минерал, ряд | Формула | Наин | Санта-Елена | САХ | Калкан |
|----------------------|---|------|-------------|-----|--------|
| Аваруит | Ni_3Fe | + | + | + | + |
| Медь | Cu | | + | | + |
| Пирротин | FeS | | + | + | |
| Пентландит | $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ | + | + | + | + |
| Кобальтпентландит | Co_9S_8 | | | + | + |
| Хизлевудит-полидимит | $\text{Ni}_3\text{S}_2\text{-Ni}_3\text{S}_4$ | | + | + | + |
| Виоларит | FeNi_2S_4 | | + | + | |
| Халькопирит | CuFeS_2 | + | + | + | + |
| Ковеллин-халькозин | $\text{CuS-Cu}_2\text{S}$ | | + | | + |
| Магнетит | Fe_3O_4 | + | + | + | + |
| Хромшпинелид | $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_4$ | + | + | + | + |
| Куприт | Cu_2O | + | | | + |
| Нантокит | CuCl | | | | + |

Примечание. Данные взяты: массив Наин (Иран) (Eslami et al., 2018), офиолиты Санта-Елена (Коста-Рика) (Schwarzenbach et al., 2014), ультрамафиты Срединно-Атлантического хребта (Klein, Bach, 2009), Калкан – рудопроявления Калканской площади (данные настоящего исследования)

Note. Data are taken from: Наин – Nain massif (Iran) (Eslami et al., 2018); Санта-Елена – Santa-Elena ophiolite (Costa-Rica) (Schwarzenbach et al., 2014); САХ – ultramafic rocks of the Mid-Atlantic Ridge (Klein, Bach, 2009), Калкан – Kalkan area (this study).

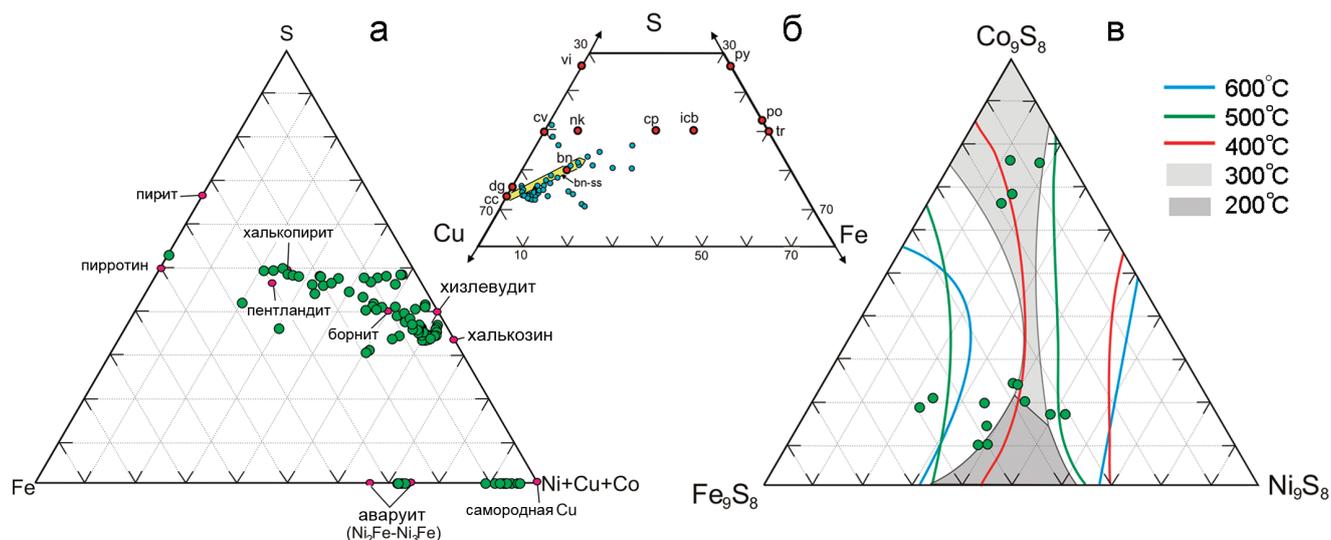


Рис. 8. Положение составов Fe-Cu-Ni-Co-S минералов на тройных диаграммах Fe-S-(Ni + Cu + Co), Cu-S-Fe и Fe₉S₈-Co₉S₈-Ni₉S₈.

а – точки составов минералов по данным (Schwarzenbach et al., 2014); б – сокращения и поля по данным (Yund, Kullerud, 1966; Brown et al., 2020): cv – ковеллин CuS; cc – халькозин Cu₂S; dg – дигенит Cu_{7,2}S₄; vi – вилламанинит CuS₂; bn – борнит Cu₅FeS₄; cp – халькопирит CuFeS₂; icb – изокубанит CuFe₂S₃; tr – троилит FeS; po – пирротин Fe₇S₈; py – пирит FeS₂; nk – нукундамит Cu_{5,5}FeS_{6,5} (Cu_{3,9}Fe_{0,6}S₄); желтое – поле борнитового твердого раствора; в – изолинии проведены по (Kaneda et al., 1986), цифры соответствуют граничным температурным условиям.

Fig. 8. Composition of Fe-Cu-Ni-Co-S minerals on Fe-S-(Ni + Cu + Co), Cu-S-Fe and Fe₉S₈-Co₉S₈-Ni₉S₈ diagrams. а – composition of minerals after (Schwarzenbach et al., 2014); б – abbreviations and compositional fields after (Yund, Kullerud, 1966; Brown et al., 2020): cv – covellite CuS; cc – chalcocite Cu₂S; dg – digenite Cu_{7,2}S₄; vi – villamaninite CuS₂; bn – bornite Cu₅FeS₄; cp – chalcopyrite CuFeS₂; icb – isocubanite CuFe₂S₃; tr – troilite FeS; po – pyrrhotite Fe₇S₈; py – pyrite FeS₂; nk – nukundamite Cu_{5,5}FeS_{6,5} (Cu_{3,9}Fe_{0,6}S₄), yellow – bornite solid solution field; в – isolines according to (Kaneda et al., 1986), numbers are temperature boundaries.

но-восстановительных условий их образования. С одной стороны, обширная гидратация оливина и пироксенов с переходом двухвалентного железа в трехвалентное и образование петельчатого серпентина (α -лизардита) предполагает окислительную обстановку. Выделение новообразованных зерен магнетита происходит при относительно более высоких температурах серпентинизации в ассоциации с β -лизардитом, хризотилом и антигоритом (Варлаков, 1986). С другой стороны, именно с серпентинизацией связывается образование разнообразных аксессуарных минералов, в том числе – самородных, сульфидов, оксидов, карбонатов, образование которых требует как восстановительных, так и окислительных условий.

В большинстве публикаций образование природных сплавов связывается с низкотемпературной серпентинизацией ультрамафитов, которая сопровождается выделением водорода (Frost, 1985). Предполагается, что таким образом в породах создаются сильно восстановительные условия, благоприятствующие образованию самородных минера-

лов (Klein, Bach, 2009; Schwarzenbach et al., 2014). Но в этом случае необходимо констатировать противоречие, которое связано с одновременным протеканием двух процессов: окисление железа из породобразующих силикатов, в результате чего образуется магнетит, требует окислительных условий среды, а локальное образование малых концентраций самородных фаз – восстановительных. В упомянутых выше работах внимание акцентируется на втором (менее масштабном) процессе, и поэтому предлагаемые модели вряд ли применимы для объяснения наблюдаемых ассоциаций.

В работе (Урусов и др., 1997) детально рассмотрена проблема сохранения легкорастворимых самородных металлов (ЛСМ) в низкотемпературных условиях. Авторы цитируемой работы справедливо указывают на то, что во многих случаях при рассмотрении генезиса ЛСМ исследователи делают методологическую ошибку, «разделяя вопросы об условиях их образования и причинах сохранения» (!). В подавляющем большинстве исследований априорно предполагается, что для образования

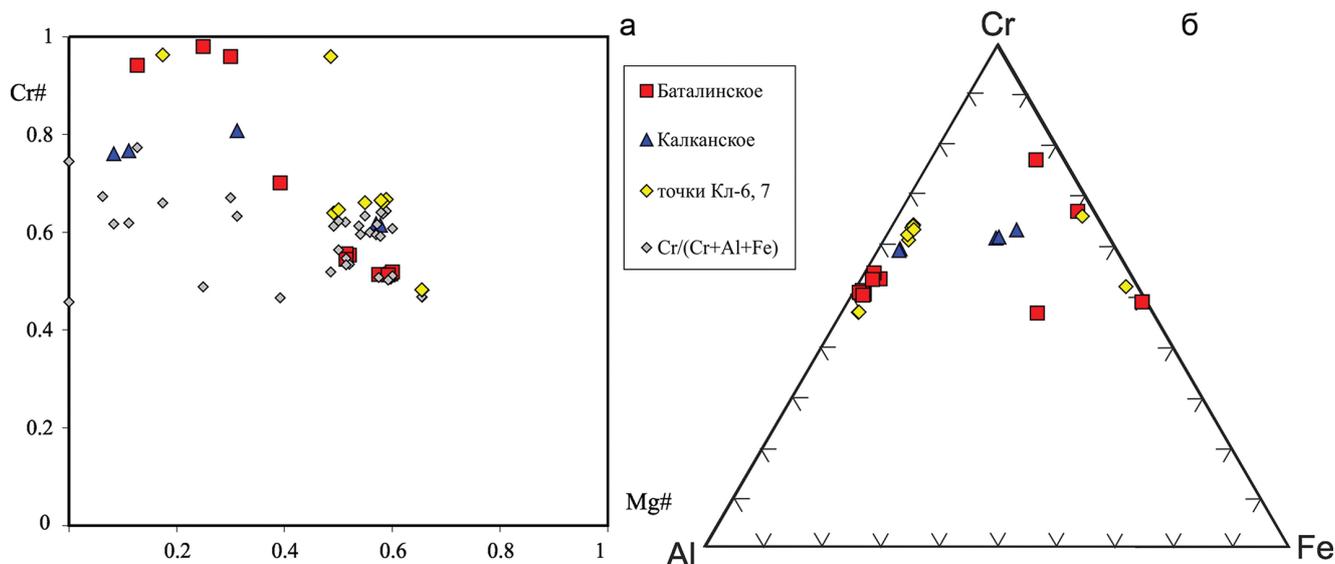


Рис. 9. Состав хромшпинелидов из магнетитовых руд и серпентинитов рудопроявлений Калканской площади. а – бинарная диаграмма в координатах $\#Mg - \#Cr$, где $\#Mg = Mg / (Mg + Fe^{+2})$ и $\#Cr = Cr / (Cr + Al)$ (ат. %), серыми ромбами показаны результаты для $\#Cr^* = Cr / (Cr + Al + Fe^{3+})$, ат. %; б – тройная диаграмма для трехвалентных катионов хромшпинелидов ($Al-Cr-Fe^{3+}$, ат. %)

Fig. 9. Composition of relict chromite from magnetite ores and serpentinite of the Kalkan area.

а – binary diagram $\#Mg - \#Cr$, where $\#Mg = Mg / (Mg + Fe^{+2})$ and $\#Cr = Cr / (Cr + Al)$, at. %; gray rhombs indicate $\#Cr^* = Cr / (Cr + Al + Fe^{3+})$, at.%; б – ternary diagram for trivalent cations in spinel ($Al-Cr-Fe^{3+}$, at. %).

ЛСМ необходимо участие восстановленных флюидов и сильно восстановительных условий среды, что противоречит окислительным условиям перехода $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$. Если же ставить вопрос о причинах сохранения самородных фаз, то согласно (Урусов и др., 1997), можно предположить несколько правдоподобных вариантов: 1) дисперсные ЛСМ представляют собой псевдоморфозы, образовавшиеся в условиях ограниченного объема при относительно невысоких температурах в твердом состоянии; 2) образование вокруг частиц ЛСМ когерентных или частично когерентных нерастворимых оболочек; 3) образование частиц ЛСМ в состоянии метастабильного «вынужденного равновесия», устанавливающегося в результате поверхностной сегрегации примесных элементов.

О генезисе магнетитовых тел. Механизм образования рудных магнетитовых тел массивного и густовкрапленного строения в серпентинитах рассмотрен в многочисленных работах (Eslami et al., 2018; 2021; Hodel et al., 2017; Paraskevopoulos, Economou, 1980; Rossetti et al., 2009; и др.). В качестве одного из возможных вариантов предложено образование их на месте подформных залежей хромитов как результат окисления хромшпинелидов. Данный механизм предлагается в работах

(Paraskevopoulos, Economou, 1980; Rossetti et al., 2009). В качестве обоснования обычно приводятся факты обнаружения реликтов первичных шпинелидов внутри магнетитовых агрегатов. Недавно на примере массива Сабзевар (Иран) проведена ревизия этой концепции, и на количественной основе показано, что замещение хромшпинелидов магнетитом не может быть единственной причиной формирования рудных тел вследствие малой растворимости хромита и очень низкой подвижности хрома в этом процессе (Eslami et al., 2021). По данным авторов цитируемой работы, для формирования магнетитовых залежей важное значение также имеет поступление железа в результате серпентинизации оливина, а также перенос его флюидом на расстояние более 10 м.

Помимо этого, предполагается возможность синкинематического образования рудных скопленных магнетита, связанного с деформацией серпентинитов в сдвиговой зоне и одновременным поступлением флюида (Eslami et al., 2018). Для объяснения генезиса магнетитовых руд района Бу-Аззер предложен механизм, предполагающий растворение и вынос железа из серпентинитов с прогрессирующим замещением хромшпинелидов и дальнейшим переотложением магнетита (Hodel et al.,

2017). Считается также, что горячие окисленные водные флюиды эффективно растворяют и повторно мобилизуют Fe в форме комплексов с OH⁻, F⁻ или Cl⁻, а также переносят ряд других рудообразующих элементов (Hodel et al., 2017; Eslami et al., 2018). Во многих случаях, рассмотренных в литературе, присутствие хлорсодержащих флюидов предполагается гипотетически, но в изученных нами проявлениях Калканской площади крупные выделения нантокита, возможно, являются подтверждением обогащения флюидов хлором. Альтернативным объяснением присутствия нантокита в ассоциации с самородной медью и купритом может быть его гипергенная природа. В настоящее время нет убедительных доказательств в пользу какого-либо из двух предложенных вариантов.

Заключение

Изученные магнетитовые тела в серпентинитах ГУР демонстрируют значительное сходство с аналогичными образованиями, описанными как в различных офиолитовых комплексах мира, так и в серпентинитах дна современных океанических бассейнов. Учитывая состав описанных выше минералов Fe, Cu, Ni, Co и аксессуарных шпинелидов, а также значительную дислоцированность вмещающих рудопроявления серпентинитов, можно предложить следующую интерпретацию образования рудной минерализации.

Магнетитовые проявления Калканской площади, локализованные в серпентинитах Главного Уральского разлома (Баталинское, Калканское и другие), изначально могли быть сформированы в серпентинизированных ультрамафитах дна палеоокеанического или преддугового бассейна путем просачивания металлоносных (Fe, Cu, Co) гидротермальных растворов с низкой концентрацией серы. Это подтверждается, с одной стороны, сходством минерального состава изученных рудопроявлений с таковым из современных океанических серпентинитов (табл. 7), а с другой, составом реликтовых хромшпинелидов, демонстрирующих соответствующие индикаторные геохимические характеристики (Cr / Cr + Al). По-видимому, на данном этапе образовались первичные сульфиды Cu, Ni, Co и магнетит (в результате замещения хромшпинелидов и серпентинизации оливина).

Впоследствии в коллизионной обстановке ультрамафиты были вовлечены в относительно низкотемпературные тектонические процессы

«скупчивания земной коры» мобильного пояса. На этой стадии произошла полная серпентинизация первичных минералов ультрамафитов, которая сопровождалась замещением хромшпинелидов магнетитом, дополнительным высвобождением Ni из оливина, образованием вторичных сульфидов Cu, Ag и Bi, самородной меди, карбонатно-силикатных прожилков. Интенсивная дислоцированность пород на масштабном уровне минеральных агрегатов привела к тектонической перегруппировке материала с концентрацией магнетита в небольшие рудные тела.

Автор благодарен рецензенту и редакторам (Е.В. Белогуб и И.Ю. Мелекесцевой), чьи ценные замечания позволили значительно улучшить текст рукописи. Автор также благодарит С.Н. Сергеева и И.И. Мусабинова за проведение электронно-микроскопических исследований, которые были выполнены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов». Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 0246–2019–0078.

Литература

- Анисимов И.С., Сопко Л.Н., Ямаев Ф.А.** (1978ф) Геологическое строение центральной части Учалинского рудного района. Отчет по геологическому доизучению масштаба 1:50000 объекта Ургунская площадь. Геологический отчет. Уфа, БТГУ.
- Варлаков А.С.** (1986) Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск, ИГГ УНЦ АН СССР, 224 с.
- Вецлер Я.Я., Биков М.Ш., Лысенко В.С.** (1954ф) Геологическое строение района верховьев рек Урала, Краснохты и Кизникой. Отчет о результатах работ Учалинской поисково-съёмочной партии ЮУГУ за 1953 год. Геологический отчет. Уфа, БТГУ.
- Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Артемьев Д.А., Юминов А.М., Симонов В.А., Дунаев А.Ю.** (2009) Геология и колчеданное оруденение южного фланга Главного Уральского разлома. Миасс, ИМиН УрО РАН, 376 с.
- Полезные ископаемые Республики Башкортостан (металлы) (2016). Авторы-составители: Ковалев С.Г., Салихов Д.Н., Пучков В.Н. и др. Уфа, Альфа-реклама, 554 с.
- Пучков В.Н.** (2000) Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа, Даурия, 146 с.
- Савельев Д.Е.** (2013) Состав аксессуарных хромшпинелидов из ультрабазитов Южного Урала как отражение геодинамической обстановки формирования массивов. *Вестник Пермского университета. Геология*, **1**, 17–25.

- Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В.** (1997) Геохимия твердого тела. М., ГЕОС, 500 с.
- Abrajano T.A., Pasteris J.D.** (1989) Zambales ophiolite, Philippines II. Sulfide petrology of the critical zone of the Acoje Massif. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **103**, 64–77.
- Arai S.** (1994) Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*, **113**, 191–204.
- Brown J.L., Dyer S.C., Mungall J.E., Christy A.G., Ellis D.J.** (2020) High-pressure Cu–Fe–S phase equilibria: some experimental and thermodynamic constraints on sulfides in subduction zones and the lithospheric mantle. *Journal of Petrology*, 61(4), ega43.
- Eslami A., Arai S., Miura M., Mackizadeh M.A.** (2018) Metallogeny of the mantle-hosted magnetite ores of the Nain ophiolite, Central Iran: implications for high mobility and re-concentration of Fe promoted by multi-episodic serpentinization. *Ore Geology Reviews*, **95**, 80–694.
- Eslami A., Malvoisin B., Brunet F., Kananian A., Bach W., Grieco G., Cavallo A., Diego Gatta G.** (2021) Podiform magnetite ore(s) in the Sabzevar ophiolite (NE Iran): oceanic hydrothermal alteration of a chromite deposit. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **176**, 43.
- Frost B.R.** (1985) On the stability of sulfides, oxides, and native metals in serpentinite. *Journal of Petrology*, **26**(1), 31–63.
- Hodel F., Macouin M., Triantafyllou A., Carlut J., Berger J., Rouse S., Ennih N., Trindade R.I.F.** (2017) Unusual massive magnetite veins and highly altered Cr-spinels as relics of a Cl-rich acidic hydrothermal event in Neoproterozoic serpentinites (Bou Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research*, **300**, 151–167.
- Kaneda H., Takenouchi S., Shoji T.** (1986) Stability of pentlandite in the Fe–Ni–Co–S system. *Mineralium Deposita*, **21**, 169–180.
- Khedr M.Z., Arai S.** (2018) Composite origin of magnetite deposits hosted in Oman peridotites: evidence for iron mobility during serpentinization. *Ore Geology Reviews*, **101**, 180–198.
- Klein F., Bach W.** (2009) Fe–Ni–Co–O–S phase relations in peridotite–seawater interactions. *Journal of Petrology*, **50**(1), 37–59
- Paraskevopoulos G.M., Economou M.I.** (1980) Genesis of magnetite ore occurrences by metasomatism of chromite ores in Greece. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, **140**, 29–53.
- Rossetti P., Gatta G.D., Diella V., Carbonin S., Della Giusta A., Ferrario A.** (2009) The magnetite ore districts of the southern Aosta Valley (Western Alps, Italy): a mineralogical study of metasomatized chromite ore. *Mineralogical Magazine*, **73**, 737–751.
- Schwarzenbach E.M., Gazel E., Caddick M.J.** (2014) Hydrothermal processes in partially serpentinized peridotites from Costa Rica: Evidence from native copper and complex sulfide assemblages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **168**, 1079.
- Yund R.A., Kullerud G.** (1966) Thermal stability of assemblages in the Cu–Fe–S system. *Journal of Petrology*, **7**, 454–488.

References

Abrajano T.A., Pasteris J.D. (1989) Zambales ophiolite, Philippines II. Sulfide petrology of the critical zone of the Acoje Massif. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **103**, 64–77.

Anisimov I.S., Sopko P.F., Yamaev F.A. (1978) [Geological structure of the central part of the Uchaly ore district. Additional geological study on a scale of 1:50000 of the Urgun area]. Unpublished report. Ufa, BTGU. (in Russian)

Arai S. (1994) Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*, **113**, 191–204.

Brown J.L., Dyer S.C., Mungall J.E., Christy A.G., Ellis D.J. (2020) High-pressure Cu–Fe–S phase equilibria: some experimental and thermodynamic constraints on sulfides in subduction zones and the lithospheric mantle. *Journal of Petrology*, 61(4), ega43.

Eslami A., Arai S., Miura M., Mackizadeh M.A. (2018) Metallogeny of the mantle-hosted magnetite ores of the Nain ophiolite, Central Iran: implications for high mobility and re-concentration of Fe promoted by multi-episodic serpentinization. *Ore Geology Reviews*, **95**, 80–694.

Eslami A., Malvoisin B., Brunet F., Kananian A., Bach W., Grieco G., Cavallo A., Diego Gatta G. (2021) Podiform magnetite ore(s) in the Sabzevar ophiolite (NE Iran): oceanic hydrothermal alteration of a chromite deposit. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **176**, 43.

Frost B.R. (1985) On the stability of sulfides, oxides, and native metals in serpentinite. *Journal of Petrology*, **26**(1), 31–63.

Hodel F., Macouin M., Triantafyllou A., Carlut J., Berger J., Rouse S., Ennih N., Trindade R.I.F. (2017) Unusual massive magnetite veins and highly altered Cr-spinels as relics of a Cl-rich acidic hydrothermal event in Neoproterozoic serpentinites (Bou Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco). *Precambrian Research*, **300**, 151–167.

Kaneda H., Takenouchi S., Shoji T. (1986) Stability of pentlandite in the Fe–Ni–Co–S system. *Mineralium Deposita*, **21**, 169–180.

Khedr M.Z., Arai S. (2018) Composite origin of magnetite deposits hosted in Oman peridotites: evidence for iron mobility during serpentinization. *Ore Geology Reviews*, **101**, 180–198.

Klein F., Bach W. (2009) Fe–Ni–Co–O–S phase relations in peridotite–seawater interactions. *Journal of Petrology*, **50**(1), 37–59.

Mineral resources of the Republic of Bashkortostan (metals) (2016) Authors: S.G. Kovalyev, D.N. Salikhov, V.N. Puchkov et al. Ufa, Alfa-Reklama, 554 p. (in Russian)

Paraskevopoulos G.M., Economou M.I. (1980) Genesis of magnetite ore occurrences by metasomatism of chromite ores in Greece. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, **140**, 29–53.

Puchkov V.N. (2000) [Paleogeodynamics of the South and Central Urals]. Ufa, Dauriya. 146 p. (in Russian)

Rossetti P., Gatta G.D., Diella V., Carbonin S., Della Giusta A., Ferrario A. (2009) The magnetite ore districts of the southern Aosta Valley (Western Alps, Italy): a mineralogical study of metasomatized chromite ore. *Mineralogical Magazine*, **73**, 737–751.

Saveliev D.E. (2013) [Composition of accessory chromites from ultramafic rocks of the Southern Urals as a reflection of geodynamical setting of massifs]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya [Bulletin of the Perm University. Geology]*, **1**, 17–25. (in Russian)

Schwarzenbach E.M., Gazel E., Caddick M.J. (2014) Hydrothermal processes in partially serpentinitized peridotites from Costa Rica: Evidence from native copper

and complex sulfide assemblages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **168**, 1079.

Urusov V.S., Tauson V.L., Akimov V.V. (1997) [Solid state geochemistry]. Moscow, GEOS, 500 p. (in Russian)

Varlakov A.S. (1986) [Petrology of serpentinitization of ultramafic rocks of fold regions]. Sverdlovsk, IGG UNTs AN SSSR, 224 p. (in Russian)

Vetsler Y.Y., Bikov M.S., Lysenko V.S. (1954) [Geological structure of the upper reaches of the Ural, Krasnokhta and Kiznikai rivers. Unpublished report of the Uchaly Geological Survey Party of 1953]. Ufa, BTGU. (in Russian)

Yund R.A., Kullerud G. (1966) Thermal stability of assemblages in the Cu-Fe-S system. *Journal of Petrology*, **7**, 454–488.

Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Artemiev D.A., Yuminov A.M., Simonov V.A., Dunaev A.Yu. (2009) [Geology and massive sulfide ores of the southern part of the Main Uralian Fault]. Miass, IMin UrO RAN, 376 p. (in Russian)