ХРОНИКА

УДК 553.43; 553.481

НОВЫЕ СВЕДЕНИЯ О НЕОПРОТЕРОЗОЙСКОМ ГИГАНТЕ – МЕДНО-НИКЕЛЕВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ЦЗИНЬЧУАНЬ (JINCHUAN) (ЦЗИНЬЧАН, ГАНЬСЮ, КИТАЙСКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА)

И. И. Никулин 1 , И. Г. Коробков 2

¹ Санкт-Петербург, ООО «Норильскгеология» ² «Росгеология» АО «Северо-Западное ПГО»

Поступила в редакцию 3 мая 2018 г.

SUMMARY OF THE MAIN INFORMATION ABOUT GIANT NEOPROTEROZOIC COPPER-NICKEL DEPOSIT JINCHUAN (JINCHANG, GANSU, CHINA)

Введение

В ходе полевых работ 2017 года авторами с коллегами из Норильскгеологии в сопровождении профессором Кси-Ян Сонгом (Институт геохимии рудных месторождений, Guanshanhu district, Guiyang), и консультации геологов рудников компании Jinchuan JII, были изучены интрузивные породы основного и ультраосновного состава медно-никелевого месторождения Цзиньчуань (Jinchuan), расположенного на северо-западе Китайской народной республики – район Цзиньчан (Jinchang) провинции Ганьсю (Gansu). Оно представляет собой третье месторождение в мире по запасам никеля после Норильского района и комплекса Садбери [1]. По данным геологической службы провинции Ганьсю известные запасы по месторождению составляют [2]: более 500 млн. т сульфидных руд, где Ni - 5,45 млн. т (при среднем содержании 1,06 %), Си – 3,89 млн. т (при ср. 0,75 %), ЭПГ (элементы платиновой группы) – 135 т (при ср. 0,26 г/т). Объемная доля руды всего месторождения распределена следующим образом (по Jinchuan Mining staff, 2000): Ni - 1,05 %, Cu - 0,66 %, Co - 0,031 %, Pt - 0,23 Γ/T , Pd -0.11 Γ/T , Os -0.01 Γ/T , Ir -0.01 Γ/T , Ru -0.01г/т, Rh -0.005 г/т, Se -0.001%, Te -0.0003 % и S -4,28 %, и (по [3]): Аи – 0,1–0,6 г/т.

Краткая геологическая характеристика

Месторождение Цзиньчуань сложено интрузивным комплексом ультраосновного состава неопротерозойского возраста у юго-западной окраины Сино-Корейской плиты. По материалам различных исследователей возрастные значения комплекса составляют: 827±8 млн. лет [4], 833±35 млн. лет [5], 831,8 ±0,6 млн. лет [6]. Породы комплекса прорывают с северозапада на юго-восток Лонгшушанский террейн, кото-

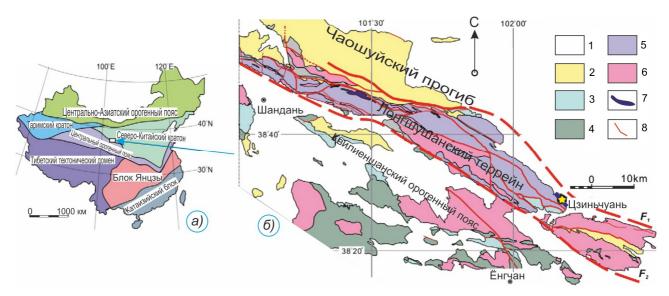
рый приурочен к юго-западной окраине Северо-Китайского кратона [3, 7] (рис. 1а). В Лонгшушанском террейне неопротерозойские и палеозойские конгломераты, песчаники и известняки несогласно перекрывают палеопротерозой-мезопротерозойские метаморфические образования (гнейсы, сланцы, мрамора и граниты), в которых комплекс Цзиньчуань контролируется надвигом альпийского этапа развития территории (рис. 1б). За счёт альпийского тектогенеза весь рудный комплекс приобрёл субвертикальное положение и в настоящее время имеет юго-западное падение под 50°-80°. Всего в пределах террейна известны несколько интрузий с сульфидной минерализацией такие как Jinchuan, Zangbutai, Qingjingzi, и интрузии Qingshiyao, Xijing, Maocaoquan и Dongwan, в которых сульфидная минерализация не обнаружена.

Протяжённость интрузивного комплекса Цзиньчуань с северо-запада на юго-восток составляет около 6,5 км при ширине отдельных блоков от 20 до 500 м, которые разделяются с запада на восток серией поперечных разломов на сегменты III, I, II и IV (рис. 2). Комплекс Цзиньчуань сложен четырьмя дайками ультраосновного состава [8]. По многочисленным данным структурных, петрографических и геохимических исследований дайки относятся к двум различным типам интрузий — западной, имеющей поперечную зональность, и восточной, представленной расслоенным массивом. В плане они разделены разломом F16-1 север-северо-восточного простирания.

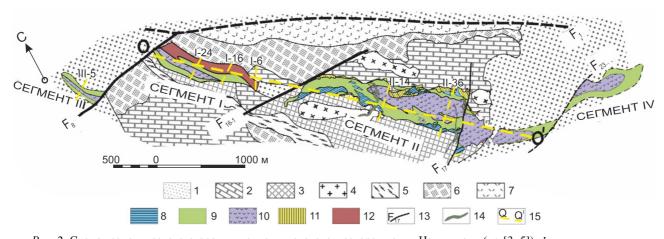
В пределах восточной интрузии оконтурены два наиболее крупных рудных тела (№ 1 и № 2), а третье по величине рудное тело (№ 24) зафиксировано в составе западной интрузии. Большинство исследователей считает, что образование Цзиньчуань произошло за счёт многофазных прото-оливиновых магматиче-

ских инъекций с насыщенной сульфидной минерализацией из глубокозалегающей промежуточной магматической камеры. Кроме того, высказывается предположение, что исходная магма рудных тел N 1 и N 2 испытала сегрегацию некоторой доли сульфидной

матрицы перед тем, как войти в промежуточную камеру, которая являлась частью подводящей системы магматического расплава, в результате чего сульфиды этих тел имеют низкое содержание минералов платиновой группы (МПГ) [9].



 $Puc.\ 1.$ Структурно-тектоническая карта КНР (а) и региона исследований (б) (по [1, 5]): I – кайнозойские отложения; 2 – меловые песчаники; 3 – девон-юрский блок пород; 4 – кембрий-силурийский комплекс отложений; 5 – протерозойские граниты и метаморфические породы; 6 – палеозойские гранитные интрузии; 7 – протерозойские основные и ультраосновные интрузии; 8 – разломы.



 $Puc.\ 2.\$ Схема геологического строения медно-никелевого месторождения Цзиньчуань (по [3, 5]): I – четвертичные отложения; 2 – мраморы; 3 – мигматиты; 4 – граниты; 5 – сланцы; 6 – гнейсы; 7 – амфиболиты; 8 – плагиоклазовые лерцолиты; 9 – лерцолиты; 10 – дуниты; 11 – пироксениты; 12 – окисленные руды; 13 – тектонические нарушения и их нумерация; 14 – дайки диабазов; 15 – геологический разрез.

Методы исследований

Изучение месторождения авторами проводилось в забоях рудничных штреков на глубине более 600 м, в бортах отработанного карьера и в естественных обнажениях с отбором образцов. Отобранные образцы изучались прецизионными методами в аншлифах в лаборатории Горного университета (г. Санкт-Петербург). Петрографическое описание аншлифов и минераграфические исследования руд проводились на

микроскопе Axio Scope.A1 Zeiss и металлографическом микроскопе ММН-2 ЛОМО-Микросистемы с нижним расположением стола и использованием цифровой видеокамеры. Данные валового химического состава руд любезно предоставлены профессором Кси-Ян Сонгом.

Определение фазового состава горных пород и медно-никелевых руд выполнялись на рентгеновских дифрактометрах ДРОН-6 НПП «Буревестник», X`Pert

PRO MPD PANalytical и XRD-6000 Shimadzu.

Электронная микроскопия и изучение распределений химических элементов в заданных участках поверхности образцов проводились в низковакуумном режиме работы с графитовым напылением токопроводящим слоем в растровом электронном микроскопе JSM-6460LV Jeol с приставками «Oxford» и электронным микроскопом-микроанализатором MV 2300 фирмы CamScan.

Силикатный анализ состава пород и руд в препарированном виде плавленных таблеток (смеси анализируемой пробы с флюсом (50 % метабората лития и 50 % тетрабората лития) в отношении 1:9 в золото-платиновых тиглях на установке Classe Fluxer-Bis фирмы Claisse Fluxer (Канада)) выполнялся на ренгено-флуоресцентном энергодисперсионном спектрометре Epsilon3 PANalytical, а также рентгено-флуоресцентном EDS-спектрометре ED-2000 Oxford.

Атомно-абсорбционный анализ проводился на Perkin Elmer Aanalyst-800 со встроенным блоком электротермического атомизатора различных типов нагревов и на спектрометре AA6300 Shimadzu.

Единичные определения в породах концентраций цветных металлов и элементов платиновой группы проведены в Испытательном аналитическом центре Института ГИПРОНИКЕЛЬ ПАО «НорНикель» (г. Санкт-Петербург) по методикам, соответствующим ГОСТам РФ.

Петрография интрузивного комплекса

Западная интрузия делится на сегменты I и III по разлому F8 (рис. 2) на нижний (Lower unit) и верхний (Upper unit) мегациклические блоки с разными петрографическими особенностями (рис. 3а), разделённые чёткими контактами [8]. Предполагается, что в нижнем блоке базальные породы изначально были представлены крупнозернистыми дунитами (оливиносульфидными кумулатами), в которых зёрна оливина имеют размеры в среднем 4-7 мм, достигая иногда 10 мм (рис. 4а). Вверх по разрезу дуниты сменяются крупнозернистыми лерцолитами, содержащими у основания небольшое количество пироксенитов. Оливиновые зёрна в этих породах находятся в контакте друг с другом или изолированы друг от друга сульфидами, либо включены в крупные клинопироксеновые ойкокристаллы, тем самым, образуя сидеронитовые структуры. В верхнем мегациклическом блоке пород преобладает кумулусный оливин с размерами зёрен до 0,5-3,0 мм. В небольших количествах присутствует клинопироксен и ортопироксен. От основания блока к его верхней части содержание оливина уменьшается, а пироксена постепенно увеличивается. Это привело к тому, что мелкозернистые дуниты сменяются лерцолитами и мелкозернистыми пироксенитами. Клинопироксен в виде ойкокристаллов включает часть кумулусного оливина. Таким образом, эти породы являются по сути ортокумулятами оливина с

пойкилитовым клинопироксеном. В нижней части западной интрузии встречаются ксенолиты мраморов с размерами до первого десятка метров [7, 10].

Восточная интрузия по разлому F23 делится на сегменты II и IV (рис. 2), сложенные преимущественно средне- и крупнозернистыми лерцолитами и сульфидизированными дунитами. В своей западной части она характеризуется концентрическим распределением типов пород, где образовано наиболее крупное рудное тело № 1, состоящее из сидеронитового и вкрапленного оливино-сульфидного кумулата, который сконцентрирован в теле лерцолитов. Восточная часть интрузии представлена средне- и крупнозернистыми дунитами (оливино-сульфидным кумулатом) и сульфитизированными лерцолитами, которые формируют рудное тело № 2, а также бессульфидными лерцолитами [9]. Мелкозернистые дуниты встречаются только в верхней части сегмента II.

За весь геологический период развития территории под воздействием различных геологических процессов, в том числе в результате тектонических преобразований региона, большая часть пород ультраосновного интрузивного комплекса Цзиньчуань подверглась слабому метаморфизму, метасоматическим и гипергенным преобразованиям. При этом состав изначальных пород изменён в разной степени [10, 11, 12, 13, 14]. На отдельных участках изменения проявились незначительно, в пределах других - все первичные минеральные фазы преобразованы в серпентин, тремолит-актинолит, хлорит и магнетит. В оливиновых дунитах развит преимущественно серпентин (рис. 4а, б), в меньшей степени оливин замещён хлоритом, амфиболом и мелкозернистым магнетитом. Серпентин здесь представлен клинохризотилом (т. 1 и 2, 3, см. рис. 4б) и антигоритом (т. 6, см. рис. 4б). В интерстициях по пироксену и плагиоклазу развиты хлорит, амфибол, эпидот, клиноцоизит и Na-ПШ. Предполагается, что до 30 % объёма (в среднем 10 %) сульфидов замещено магнетитом, серпентином и хлоритом. В серпентинизированных дунитах шпинель представлена магнезиоферритом (Mg,Ca) $Fe^{3+}_{2}O_{4}$ (т. 11, рис. 4a) и хромитом (т. 12, рис. 4а), реже ульвошпинелью (т. 14, рис. 4б). Сидеронитовая структура в результате замещения вторичными магнетитом [15] и силикатами не деформирована (рис. 5а).

В экзоконтактах в основной массе мраморов широко развиты серпентинизация и хлоритизация (рис. 4в-г). Серпентин слагает не только прожилки, но и крупные самостоятельные массивного облика агрегаты (рис. 4ж) с размерами до 1,5 м в поперечнике. Здесь серпентин представлен преимущественно хризотилом (рис. 4в). В коре выветривания серпентинитов наиболее развита хлоритизация по железистому лизардиту (т. 2, рис. 4г). В обнажениях на контактах ультраосновных даек встречены магнетитовые прожилки мощностью до 20 см без малейших признаков окисления, которые при изломе становятся рыхлыми; повсеместно отмечаются прожилки малахита.

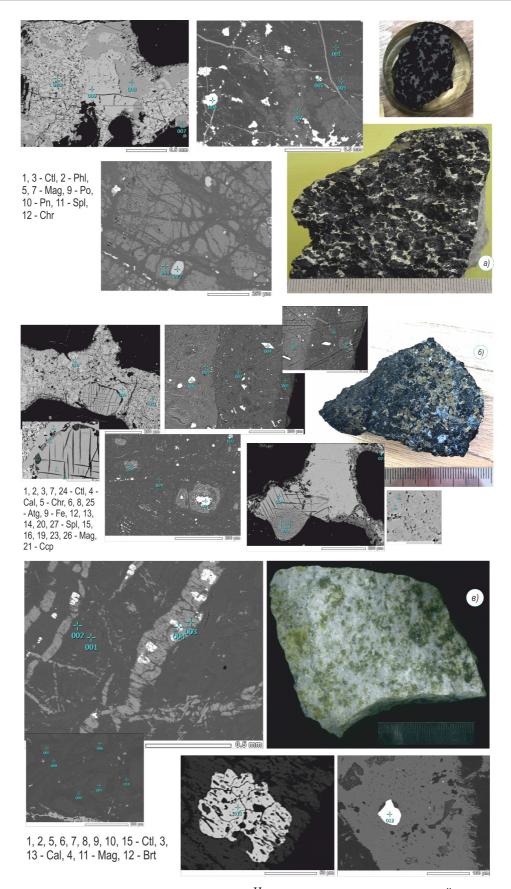
F₈

Сегмент I

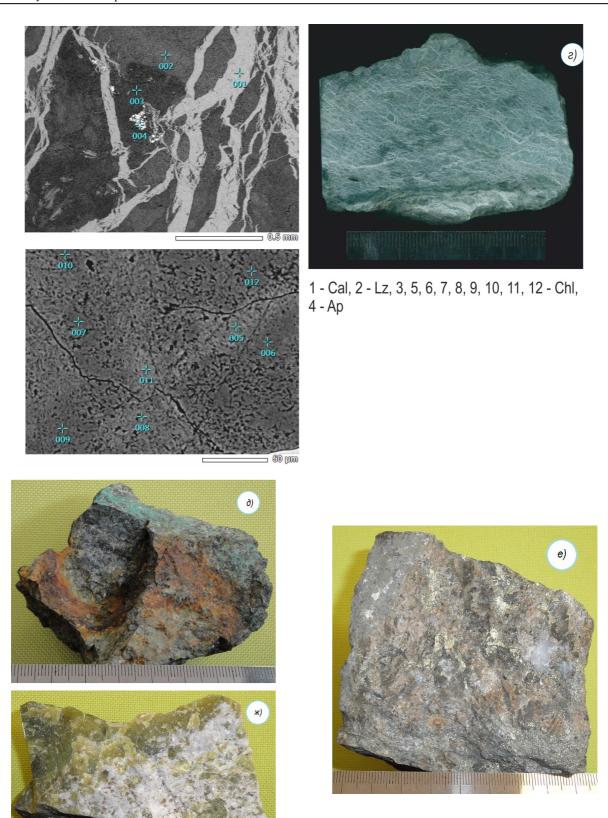
Сегмент II

профиль Q-Q'

Рис. 3. Геологические разрезы медно-никелевого месторождения Цзиньчуань (по [3, 5]): 1 - мраморы, 2 - гнейсы, 3 - дуниты, 4 - лерцолиты, 5 - вкрапленные руды, 6 - лерцолиты с вкрапленниками сульфидов, 7 - сетчатые руды, 8 - лерцолиты с сетчатыми текстурами сульфидов, 9 - массивные руды, 10 - пироксенит, 11 - граниты, 12 - разлом.



Puc.~4. Типичные породы медно-никелевого месторождения Цзиньчуань: a – серпентинизированный среднезернистый оливинит (рудное тело №1), абс. отм. 1100 м (глуб. 600 м); δ – серпентинизированный сидеронитовый перидотит (рудное тело №2) с серпентин-кальцитовым прожилком, абс. отм. 1130 м; ϵ – серпентинизированный мрамор из обнажения экзоконтакта интрузива.



Продолжение рис. 4. Типичные породы медно-никелевого месторождения Цзиньчуань: ε – хлоритизированный серпентинит (пропилит) из обнажения выветрелого экзоконтакта интрузива; δ – выветрелый пироксенит малахитом, абс. отм. 1710 м; e – выветрелый норит с халькопиритом и плагиоклазом, абс. отм. 1650 м; ж – криптосерпентинит (агрегат скрытокристаллического хризотила массивного облика), абс. отм. 1630 м. Ap – апатит, Atg – антигорит, Brt – барит, Cal – кальцит, Ccp – халькопирит, Chl – хлорит, Chr – хромит, Ctl - хризотил, Ctl – хризотил, Ctl

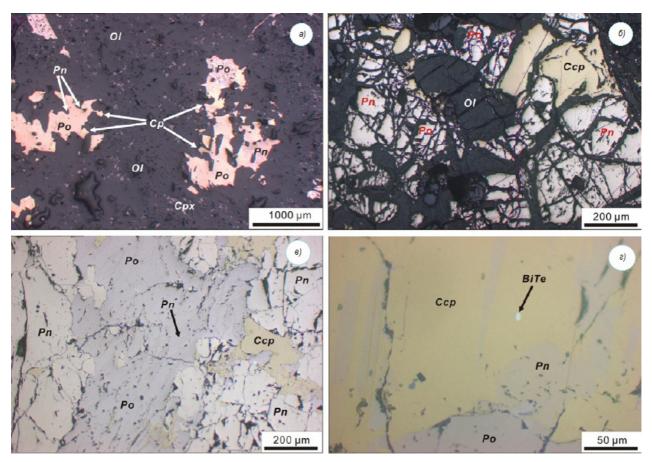


Рис. 5. Разновидности руд в шлифах (образцы Кси-Ян Сонга): a – вкрапленная; δ – сетчатая; ϵ – массивная; ϵ – богатая медная. Ol – оливин; Cpx – клинопироксен; Pn – пентландит; Po – пирротин; Ccp – халькопирит.

Особенности медно-никелевых руд

Три крупнейших рудных тела (№ 1, № 2 и №24) содержат >85 % запасов месторождения. Рудные тела № 1 и № 2 сосредоточены в сегменте II (рис. 2, 3). В протерозойских метаморфических породах под основным интрузивом обнаружено несколько отдельных сульфидных рудных тел (по данным из геологических отчётов Jinchuan Nonferrous Metal Corporation, 1997, 2003). В нижней части сегментов I и III локализовано рудное тело № 24 таблитчато-блоковой формы. Зона оруденения развита в прибортовой части интрузии. Она имеет протяжённость около 1,3 км при ширине от 20 до 70 м, в юго-западном направлении понижаясь на глубины 300-500 м. Руды обычно прослеживаются над пироксенитами, а также на контактах с метаморфическими породами, где пироксениты отсутствуют [2]. Основная сульфидная минерализация рудного тела № 24 представлена сетчатыми (и мелкими массивными), вкрапленными и богатыми медью рудами [2, 16]. Рудное тело № 1 в западной части сегмента II локализовано в лерцолитах и оливиновых пироксенитах на глубинах от 200 м до >1100 м (рис. 3). Оно простирается вдоль разлома на 1,5 км с переменной шириной от нескольких десятков метров до 150 м. Это самая большая залежь содержит до 50 % от общего объема запасов Ni и Cu. Рудное тело № 2 в восточной части сегмента II характеризуется протяжённостью 1,3 км и шириной около 120 м. Оно локализовано в подошве интрузива сразу под лерцолитами. Массивные руды проявлены по трещинам внутри или у основания рудного тела № 2. Вкрапленные и сетчатые сульфидные руды развиты главным образом в дунитах.

В рудном теле № 24 в пределах западной интрузии встречаются основных четыре типа сульфидной минерализации (рис. 5):

- 1. Сульфиды слабовкрапленные, развитые в основании верхнего блока. Этот тип минерализации встречается как в дунитах сегмента I, так и в дунитах, и в лерцолитах сегмента III. Сульфиды (пирротин, пентландит и незначительное количество халькопирита) слагают интерстиции между зернами оливинов и пироксенов.
- 2. Вкрапленные сульфиды нижнего блока. Они составляют основные запасы рудного тела № 24. Тонкая зона с редкой сульфидной вкрапленностью в восточной части сегмента I к западу увеличивается в мощности, переходя на сегмент III (рис. 3, б). Эти руды представлены преимущественно пирротином, пентландитом и халькопиритом. Кроме того, в них отмечается магматический (по [2]) магнетит, агрегаты которого заключены в силикаты и в их межкристаллическое пространство.
 - 3. Сетчатая сульфидизация нижнего блока. Под

вкрапленными рудами это основная разновидность минерализации рудного тела № 24. Между разведочными линиями 8 и 24 в сегменте I ширина залежи достигает 60 м (рис. 2), но уменьшается к западу и отсутствует в сегменте III (рис. 3). Сетчатые руды представлены пирротином, пентландитом и незначительным количеством халькопирита (рис. 5б). Кроме того, в восточных частях рудного тела № 24 среди сетчатых руд встречаются небольшие залежи массивных руд, которые также состоят из пирротина, пентландита и незначительного количества халькопирита. Ксеноморфный пентландит распространён как самостоятельно, так и в виде закономерно расположенных пластинчатых и пламенеобразных выделений в агрегатах пирротина (рис. 5а). В сетчатых и массивных сульфидах часто присутствует магнетит.

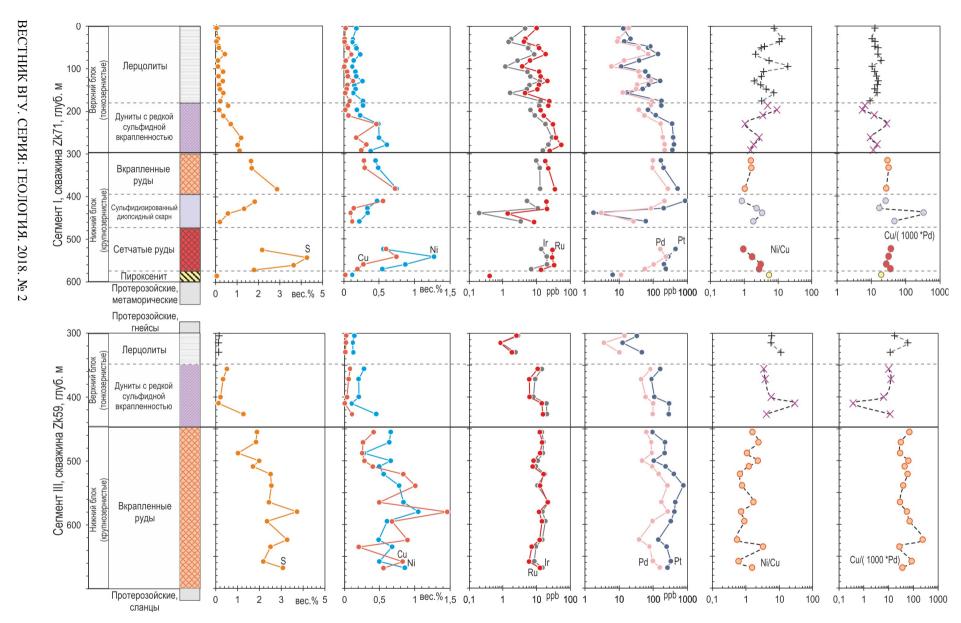
4. Сульфиды меди. Они встречаются как в подошве рудного тела № 24, так и под восточной частью западной интрузии в отдельных ультрабазитах среди протерозойских метаморфических пород (Jinchuan Nonferrous Metal Corporation, 1997, 2003). Вкрапленные и сетчатые халькопиритовые руды с пирротином и подчинённым количеством пентландита имеют мощность до 10 м и длину первые десятки метров (рис. 3е).

Рудное тело № 24 является наиболее обогащённым МПГ. Проанализированы два образца типичных вкрапленных руд, три с сетчатой и один с массивной сульфидной минерализацией. Во вкрапленных рудах между зернами оливина и клинопироксена преобладает пирротин, в меньшей степени пентландит и незначительное содержание халькопирита. Сетчатые руды состоят из 15-40 % сульфидов и 60-85 % оливина округлой формы. В них тоже малое количество халькопирита (1-4 %) относительно пентландита (4-10 %). Пирротин является преобладающим сульфидом (10-30 %). Пентландит образует спайные выколки в виде зерен октаэдрической формы, (в диаметре 0,2-2,0 мм) взаимно прорастая внутри ксеноморфного пирротина, или в виде закономерно расположенных пластинчатых и пламенеобразных выделений в агрегатах пирротин. Халькопирит обычно встречается в виде ксеноморфных агрегатов, вкрапленных в другие сульфиды, или в виде очень мелких прожилков, секущих силикаты. Массивные руды обычно выполняют небольшие трещины сплошным агрегатом или иногда представлены прожилками неправильной или линзовидной формы. Массивные руды содержат >70 % сульфидов, включая пирротин (40-60 %), пентландит (10-20 %) и незначительное количество халькопирита (1-7 %). Однако богатые медью руды характеризуются несколько другими соотношениями количеств сульфидов (2-14 % халькопирита, 5-15 % пирротина и 1-6 % пентландита). В Цзиньчуане было выявлено более десяти различных типов МПГ. Преобладающим МПГ является идиоморфный сперрилит (PtAs₂), размеры зёрен которого не превышают 0,1 мм. Он развит либо на контактах халькопирита и пентландита, либо внутри халькопирита. Помимо него, встречаются другие МПГ: монтеит (PtTe₂), фрудит $(PdBi_2)$, меланит палладия $[(Ni, Pd, Pt)(Te, Bi)]_2$, майчнерит (PdBiTe), садбериит [(Pt, Pd)Sd], ирарсит (IrAsS) [12]. Кроме того, в богатых медью рудах встречаются мелкие зерна Bi-Te в агрегатах пирротина, пентландита и халькопирита (рис. 5г).

В верхнем мегациклическом блоке химический состав пород изменяется с глубиной. Дуниты имеют следующие содержания. вес.%: MgO=42-45. Ni=0,27-0,70 и Cu=0,065-0,320 (иногда до 0,47), а также Al₂O₃=2,5-3,8, CaO<1,0 (за исключением одного образца). В лерцолитах содержания (вес.%) MgO=36-42, Ni=0,12-0,30 и Cu<0,1 (за исключением двух образцов) постепенно уменьшаются вверх по разрезу, помимо этого в них $TiO_2=0,15-0,30$, $Al_2O_3=3,1-5,0$. Дуниты и лерцолиты обогащены легкими редкими землями, Rb и Ba и характеризуются отрицательные аномалиями Sr [8]. В сегментах I и III западной интрузии характеризуется схожим составом халькофильных элементов. Вверх по разрезам скважин ZK71 (сегмент I) и ZK59 (сегмент III) верхнего блока (рис. 3) количества Ni, Cu и ЭПГ уменьшаются в обоих сегментах (рис. 6). Мелкие вкрапленники сульфидов в верхнем блоке имеют схожее количество ЭПГ, варьирующееся от 0,706 до 0,121 г/т. Бессульфидные лерцолиты и мелкие вкрапленники сульфидов имеют низкие отношения Cu/Pd от 9200 до 15900 и от 5500 до 14900 (за исключением нескольких образцов), соответственно, а также отношение Ni/Cu от 1,1 до 9.2. В последних халькофильные элементы положительно коррелируются с серой. В этих сульфидах ЭПГ-теноры (содержания в пересчёте на 100 % сульфидную массу) обычно хорошо коррелируются друг с другом. Отмечаются умеренные Ni- и Cu- и высокие ЭПГ-теноры (0,51–1,00 г/т $Ir_{cvn\phi}$, 0,42–1,20 г/т $Ru_{cvn\phi}$, и 2,9–8,0 г/т Pd_{сулф.}).

Нижний мегациклический блок весьма разнообразен по составу. Над диопсидным скарном крупнозернистые дуниты имеют следующий состав (вес.%): MgO = 37-40, $Al_2O_3 = 4,0-4,4$, CaO = 1,6-3,2. Содержания Ni и Cu в них снижается вверх по разрезу от 0,84 до 0,51 и от 0,75 до 0,30, соответственно. Под диопсиным скарном лерцолиты характеризуются (Bec.%): MgO = 28-35, CaO = 4-7, Al₂O₃ = 5,5-6,6, $TiO_2 = 0.25-0.50$. Содержания Ni и Cu в лерцолитах возрастают вверх по разрезу от 0,58 до 1,36 (за исключением одного образца) и от 0,19 до 0,74, соответственно. Диопсидный скарн характеризуется следующим химическим составом (вес.%): CaO = 5.5-11.0. MgO = 25,5-29,5, Ni = 0,25-0,52, S = 0,2-1,0, Cu =0,085-0,550. Этот скарн, в отличие от лерцолитов, имеет более яркие отрицательные аномалии Rb и Ba и положительные аномалии Th [8].

По сравнению со слабой сульфидной вкрапленностью верхнего блока вкрапленные сульфиды рудного тела № 24 в нижнем блоке имеют более высокие отношения Cu/Pd (24200–85600) и более низкие ЭПГтеноры (например, 0,12–0,56 г/т $Ir_{\text{сулф.}}$, 0,10–0,48 г/т $Ru_{\text{сулф.}}$ и 0,43–3,60 г/т $Pd_{\text{сулф.}}$ [16]), которые имеют положительные корреляции между Ru и Ir, Pt и Pd.



 $Puc.\ 6$. Вариации содержаний основных компонентов руд (S, Ni, Cu, PGE, Ni/Cu, и Cu/(1,000*Pd)) в разрезах сегмента I, скв. ZK71 (a) и сегмента III, скв. ZK59 (б) (сопоставления с данными Кси-Ян Сонга).

Отношения Pd/Ru (и Pd/Ir) характеризуются очень узкими пределами как во вкрапленных сульфидах рудного тела № 24 (Pd/Ru = 3,5–20,9), так и в сульфидах со слабой вкрапленностью в верхнем блоке (Pd/Ru = 6,4–17,3).

Сетчатые и массивные сульфиды рудного тела № 24 имеют сильные положительные корреляции между Ni, Ir и Ru по сравнению с серой, и слабые корреляции между Cu, Pt и Pd по отношению к сере. Они отличаются от вкрапленных сульфидов, как правило, повышенными отношениями Ni/Cu (1,7-11,3). Содержания $Ir_{\text{сулф.}}$ (0,24-0,82 г/т) и $Ru_{\text{сулф.}}$ (0,17-0,63 г/т) несколько выше, но заметно ниже $Pd_{\text{сулф.}}$ (<1,00 г/т) и $Pt_{\text{сулф.}}$ (<0,30 г/т).

Сульфиды богатые Си, в отличие от сетчатых и массивных сульфидов, характеризуются несколько повышенными $Cu_{cyn\varphi}$ и $Pd_{cyn\varphi}$, низкими $Ir_{cyn\varphi}$. (0,0019–0,0160 г/т) и $Ru_{cyn\varphi}$. (0,0064–0,0210 г/т), большими вариациями $Pt_{\text{сулф.}}(0,043-11,000\ \text{г/т}),$ что отражается на низких отношениях Ni/Cu (0,3-2,8) и значительно более высоких Pd/Ru (37,3-378,0). По ранее опубликованным данным известно [17], что в придонной части залежи № 24 высокогетерогенные богатые медью разновидности руд содержат Pt=0,001,0-0,082 г/т и Pd=0,00013-0,01200 г/т, а соотношения Pt/Pd варьируют в пределах 3,4-12,0, в среднем 7,7. В наших образцах они колеблются от 0.03 до 5.00, но чаще не превышают 1.00. В целом по данным статистической отчетности управления рудника, в этих рудах содержания Рt обычно варьируют от 0,58 до 14,00 г/т (зафиксированы две пробы с Рt до 50 и 68 г/т), и отношениями Pt/Pd от 3 до 44.

В сульфидах западной и восточной интрузий установлены аналогичные теноры Ni и Cu. Однако в сульфидах западной интрузии отмечено более высокое содержание МПГ при тех же концентрациях серы в сравнении с содержаниями МПГ в восточной интрузии. Вкрапленные сульфиды рудных тел № 1 и № 2 в восточной интрузии имеют заметно более низкие концентрации ЭПГ, чем в рудном теле № 24, и более высокие отношения Cu/Pd (10000–548000, в основном >30 000 по [9]). В сравнении с телом № 24 сетчатые и массивные сульфиды рудных тел № 1 и № 2 имеют сходные содержания Pt, но с большими вариациями тугоплавких ЭПГ.

В сетчатых и массивных рудах содержания As, Те и Ві (в пересчёте на 100 % сульфида) ниже, чем в рудах, богатых Си. Платина демонстрирует сильную корреляцию с As и заметные корреляции с Те и Ві. С другой стороны, во всех образцах Pd показывает слабые корреляции с этими элементами.

На исходно метасоматические руды приходится менее 2 % запасов. Они развиты на периферии восточной части тела № 24, локально в пределах в висячей части интрузии и в её подошве на контактах между мраморами и изверженными породами, а также вмещающими мраморными ксенолитами. Сульфиды представлены прерывистыми жилами или агрегатами в карбонатных вмещающих породах.

Выводы

Авторам удалось подробно изучить месторождение Цзиньчуань при непосредственном участии, а также провести лабораторные исследования, получив независимые от китайских результаты.

Месторождение относится к гипербазитовому медно-никелевому сульфидному типу и является самым крупным в Китае объектом этого типа.

Результаты проведенных аналитических исследований медно-никелевых руд сопоставимы с выводами предыдущих исследователей.

Сложное геологическое строение месторождения обусловлено длинной историей развития региона.

Современное обобщение информации в купе с результатами исследований, проведенных авторами в России, сульфидно-платино-медно-никелевого месторождения Китая добавят значительную долю знаний и позволят по-новому подойти к металлогеническому районированию территории России.

Прочее

Дубликаты образцов руд и вмещающих их пород переданы в Геологический музей Кафедры исторической геологии и палеонтологии Воронежского государственного университета.

Компания Jinchuan JII, разрабатывающая месторождение Цзиньчуань, является градообразующим. Город разбит на два сектора: жилой и промышленный. На окраине одной и общественных плошадей города построен музей «Геологических наук и технологий», перед входом в который выложена таблица Д. И. Менделеева. Все элементы таблицы выбиты на отдельных полуметровых плитах. Каждая плита элемента таблицы, добывающегося на этом месторождении, имеет свою высоту, отражающую его значение и количество от общего объёма полезного ископаемого. При этом, у всех элементов, которые добываются на этом месторождении, находятся металлические статуи первооткрывателей этих элементов в человеческий рост. Перед всей таблицей, чуть с краю расположена металлическая статуя Д. А. Менделеева высотой, в полтора раза большей других (Рис. 7).

Анфилада в музее повествует о первых горняках с их фотографиями, затем о петрографических и минералогических особенностях месторождения с соответствующими образцами, а затем о технологиях добычи и переработки. Заканчивается экспозиция несколькими залами выпускаемой продукцией в этом городе. На огромной стене последнего зала висит яркий плакат, демонстрирующий полный передел добываемых руд и задействованных при этом смежных предприятий для полного цикла работы компании. Примечательно, что только 6 % сырья выходит за пределы провинции Ганьсю.



Рис. 7. Памятник Д. И. Менделееву в музее «Геологических наук и технологий» в районе Цзиньчан (Jinchang) провинции Ганьсю (Gansu) Китайской народной республики.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Налдретт А. Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелеоых и платинометльных руд / А. Дж. Налдретт Санкт-Петербург: СПбГУ. 2003. 487 с.
- 2. Sixth Geological Unit. Geology of the Baijiaozuizi Cu–Ni sulfide deposit. Geological Survey of Gansu Province Geological publishing House, Beijing. 1984.
- 3. Zhou, M.-F. Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China, in Cabri, L. J., ed. / M.-F. Zhou [et al.] // The geology, geochemistry, mineralogy, and mineral beneficiation of the platinum-group elements: Canadian Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum. 2002. Special V. 54. PP. 619–636.
- 4. *Li*, *X*. *H*. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with approximately 825 Ma south China mantle plume? / X. H. Li [et

al.] // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2005. – V. 6. – PP. 1104.

5. Yang, S. H. Origin of the inconsistent apparent Re-Os ages of the Jinchuan Ni-Cu sulfide ore deposit, China: Post-segregation diffusion of Os / S. H. Yang [et al.] // Chemical Geology. – 2008. – V. 247. – PP. 401–418.

6. Zhang, M. Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China / M. Zhang [et al.] // Mineralium Deposita. – 2010. – V. 45. – PP. 3–9

7. *Tang, Z. L.* Mineralization model and geology of the Jinchuan deposit bearing PGE / Z. L. Tang, W. Y. Li. – Beijing, Geological Publishing House. – 1995. – 208 р. (на китайском).

8. *Song, X. Y.* Structural, lithological, and geochemical constraints on the dynamic magma plumbing system of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China / X. Y. Song [et al.] // Mineralium Deposita. – 2012. – V. 47. – PP. 277–297.

9. *Song, X. Y.* Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China / X. Y. Song [et al.] // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2009. – V. 73. – PP. 404–424.

10. *Lehmann, J.* Field relationships and geochemical constraints on the emplacement of the Jinchuan intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China / J. Lehmann [et al.] // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – PP. 75–94.

11. *Barnes, S. J.* Chrome Spinel from the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, Gansu Province, Peoples Republic of China / S.J. Barnes, Zhong-Li Tang // Econ. Geol. – 1999. – V. 94. – PP. 343–356.

12. Chai, Gang. The Jinchuan Ultramafic Intrusion: Cumulate of a High-Mg Basaltic Magma / Gang Chai, A. J. Naldrett // J. of Petrology. – 1992. – V. 33. – PP. 277–303.

13. *De Waal, S. A.* Emplacement of viscous mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, western China / S.A. De Waal [et al.] // The Canadian Mineralogist. – 2004. – V. 42. – PP. 371–392.

14. *Li, Chusi*. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis / Chusi Li [et al.] // Mineralium Deposita. – 2004. – V.39. – PP. 159–172.

15. *Ripley, E. M.* Mineralogic and Stable Isotope Studies of Hydrothermal Alteration at the Jinchuan Ni-Cu Deposit, China / E. M. Ripley, A. Sarkar, Chusi Li // Econ. Geol. – 2005. – V. 100. – PP. 1349–1361.

16. *Chen, L.-M.* Segregation and fractionation of magmatic Ni–Cu–PGE sulfides in the Western Jinchuan intrusion, NW, China: insights from platinum-group element geochemistry / L. M. Chen [et al.] // Econ. Geol. – 2013. – V. 108. – PP. 1793–1811.

17. *Chen, L.-M.* A laser ablation ICP-MS study of platinum-group and chalcophile elements in base metal sulfide minerals of the Jinchuan Ni–Cu sulfide deposit, NW China / L.-M. Chen [et al.] // Ore Geology Reviews. – 2015. – V. 65. – PP. 955–967.

ООО «Норильскгеология», г. Санкт-Петербург

Никулин Иван Иванович, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по развитию геологоразведочных работ. E-mail: iinikulin@gmail.com

Росгеология АО «Северо-Западное ПГО», г. Санкт-Петербург

Коробков Илья Георгиевич, академик РАЕН, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный геолог Республики Саха (Якутия), ведущий геолог

E-mail: ikorobkov@gmail.com

Norilskgeology, St. Petersburg

Nikulin I. I., doctor of the Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director for Geological Exploration
E-mail: iinikulin@gmail.com

Rosgeo, Severo-Zapadnoe PGO, St. Petersburg

Korobkov I. G., academic of RANS, doctor of the Geological and Mineralogical Sciences, professor, Celebrated Geologist of Sakha Republic (Yakutia), senior Geologist E-mail: ikorobkov@gmail.com