



В. А. КОВАЛЕНКЕР

МИНЕРАЛОГИЯ  
И ГЕОХИМИЯ  
СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА ·



Академия наук СССР

Институт геологии рудных  
месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии

В. А. КОВАЛЕНКЕР

549+550.4  
+ 553.449

# МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА

(В МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯХ  
ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА)

2110



Издательство  
“Наука”  
Москва 1977





Минералогия и геохимия селена и теллура в медно-никелевых месторождениях Талнахского рудного узла. В.А. Коваленкер. М., "Наука", 1977, с. 136.

Монография состоит из двух основных частей — минералогической и геохимической, которым предшествует краткий очерк геологического строения района месторождений.

В минералогической части приведены результаты детального изучения вещественного состава руд, в результате которого впервые во всех типах руд установлены минералы селена и теллура. Из них четыре являются новыми, девять установлены в месторождениях СССР или Норильского района. Излагаются результаты парагенетического анализа, выделяется новая для медно-никелевых месторождений платино-теллуридная ассоциация. Высказываются соображения о физико-химических условиях формирования этой ассоциации.

В геохимической части работы на основании химического изучения рассмотрены закономерности распределения и формы нахождения селена и теллура в рудах. Проведено экспериментальное изучение распределения селена между существующими сульфидами при температурах 750–400°С. Показано влияние различных факторов на изоморфное вхождение селена в сульфиды.

В "Заключении" рассмотрены основные черты поведения обоих элементов в процессе формирования медно-никелевых месторождений.

Табл. 30, илл. 25, библ. 131 назв.

Ответственный редактор

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор ШАДЛУН Т.Н.

К 20805-009 208-76  
055 (02) - 77

© Издательство "Наука",  
1977 г.

## ВВЕДЕНИЕ

\*

Основные концентрации селена и теллура в природе связаны с сульфидными рудами тяжелых цветных металлов (Синдеева, 1959). Специальное изучение месторождений различных генетических типов позволило Н.Д. Синдеевой (Синдеева, Курбанова, 1958) установить, что наиболее крупными по геологическим запасам селена и теллура являются месторождения сульфидных медно-никелевых руд.

Руды указанных месторождений представляют собой пример комплексного сырья и служат источником добычи не только никеля, меди, кобальта, но и благородных металлов (платина, палладий, родий, иридий, рутений, осмий, золото, серебро), а также селена и теллура. Полное извлечение из руд всех полезных компонентов, как главных, так и сопутствующих, является основной задачей, поставленной в решениях XXIV съезда партии перед геологами, горняками, обогатителями и металлургами. В связи с этим появилась необходимость планомерного изучения геологических закономерностей распределения, минералогии и геохимических особенностей поведения всех присутствующих в рудах полезных компонентов, в том числе селена и теллура.

Медно-никелевые месторождения, связанные с основными и ультраосновными породами, образуют обособленную группу, обладающую общими минералогическими и геохимическими чертами. Наиболее яркими представителями указанного типа месторождений являются месторождения Печенги и Мончи (Кольский полуостров), Норильского района (северо-запад Сибирской платформы), Воронежского кристаллического массива, месторождения группы Садбери (Канада), Южно-Африканской Республики, Фенноскандии.

Первые сведения по содержаниям селена в медно-никелевых рудах принадлежат В. Гольдшмидту (1938). Для некоторых месторождений они до сих пор являются единственными из известных в литературе. Следует отметить, что по геохимии и минералогии селена и теллура в зарубежных месторождениях медно-никелевых руд имеется мало данных, и список литературы по интересующей нас теме ограничивается, по существу, публикациями Холи и Никола (Hawley, Nickhol, 1959; Hawley, 1962), исследовавших содержания селена в главных сульфидных минералах месторождений Садбери, а также Г. Кингстона (Kingston, 1966), Дж. Раклиджа (Rucklidge, 1969) и Л. Кабри (Cabri, 1972; Cabri et al., 1973; Cabri, Pickwick, 1974), описавших теллуровую минерализацию месторождений Рифа Меренского (ЮАР) и Садбери. Имею-

щиеся отрывочные литературные сведения по содержаниям селена и теллура в рудах других зарубежных медно-никелевых месторождений, например в работе Е. Грипа (Grip, 1961) или Яна Покорного (Pokorný, 1969), дают лишь общие представления об уровнях концентрации элементов.

Более полные сведения по геохимии, минералогии и закономерностям распределения селена и теллура в медно-никелевых рудах имеются в отечественной литературе в работах Г.Г. Зайнуллина, О.Е. Юшко-Захаровой, А.Д. Генкина, Ю.И. Яковлева, Г.И. Горбунова, М.В. Воробьевой и др.

Рассмотрение далеко не равноценных, нередко чисто статистических, литературных данных по геохимии, распределению и формам нахождения элементов в медно-никелевых месторождениях мира показывает, что селен и теллур являются характерными элементами медно-никелевых руд. Их содержания в рудах различных месторождений колеблется от 0,0002 до 0,02% Se и от 0,0001 до 0,015% Te. Наиболее высокие концентрации элементов во всех месторождениях обнаруживаются в рудах, обогащенных медью. Содержания теллура почти всегда ниже концентраций селена. В различных месторождениях и в различных типах руд одного и того же месторождения отношение селен:теллур колеблется от 4 : 1 до 28 : 1.

По мнению большинства исследователей, весь содержащийся в рудах селен и значительная часть теллура находятся в рассеянной форме, изоморфно входя в решетки сульфидных минералов. Достоверно установленные минералы селена в медно-никелевых рудах в литературе ранее не были описаны. В ряде месторождений (Мончегорск, Аллареченское, Рустенбург, Садбери) в участках, характеризующихся повышенными концентрациями селена и теллура и минимальными значениями селен-теллурового отношения, установлено присутствие теллуровой минерализации.

Первое упоминание о селене и теллуре в рудах месторождения Норильск-I приводится в работе коллектива авторов под редакцией А.Е. Воронцова и В.К. Котульского. В ней в числе элементов-спутников указываются селен и теллур и приводятся данные шести химических анализов руд, на основании которых отмечается более высокое содержание элементов в халькопиритовых рудах и делается заключение о рассеянной форме селена и теллура, связанных с халькопиритом.

Специальные работы по изучению распределения селена и теллура в рудах месторождения Норильск-I были проведены Г.Г. Зайнуллиным. Его исследованиями были установлены особенности распределения элементов в рудах и минералах, высказаны соображения о формах нахождения селена и теллура и их геохимии (Зайнуллин, 1959; 1960; 1964).

Большой вклад в изучение закономерностей распределения элементов-спутников, в том числе селена и теллура, в рудах норильских месторождений внесли работы Е.Н. Сухановой, результаты которых изложены в ряде публикаций и отчетов. На основании изучения большого фактического материала, ею были рассмотрены закономерности распределения обоих элементов в рудах месторождений Норильск-I, Норильск-II,

горы Черной, Зуб и др., исследованы статистические связи селена и теллура с другими рудообразующими элементами.

Геохимия селена и теллура в месторождении Норильск-1 изучалась также О.Е. Юшко-Захаровой (1964), которая проанализировала черты сходства и различия в поведении элементов в медно-никелевых месторождениях Норильска и Кольского полуострова.

М.С. Воробьевой и др. (1972) рассмотрены особенности распределения обоих элементов в породах и минералах юго-западной части Талнахского интрузива (рудник "Маяк"), а О.Е. Юшко-Захаровой и др. (1972) описан ряд теллурсодержащих минералов из руд этого же участка.

В монографии приведены результаты детального изучения минералогии и геохимии селена и теллура в Талнахском и Октябрьском медно-никелевых месторождениях, пространственно и генетически связанных с Талнахским интрузивом габбро-долеритов, выполненные автором в течение 1967–1973 гг.

В основу монографии положены результаты химических анализов селена и теллура в более чем 1000 валовых проб руд, выполненных в лабораториях Красноярского геологического управления, Норильского горно-металлургического комбината и ИГЕМ АН СССР.

Было также выделено и проанализировано на селен около 150 мономинеральных фракций главных рудообразующих сульфидов (аналитик В.Д. Сидельникова, ИГЕМ АН СССР). Около 80 различных сульфидных минералов, в том числе синтетических, было проанализировано на Se с помощью оригинальной методики на микрозонде MS-46 "Камека" (аналитик В.В. Ермилов).

Составы выявленных минералов селена и теллура определялись в Лаборатории рентгеноспектрального анализа ИГЕМ АН СССР на микрозонде MS-46 И.П. Лапутиной.

Изотопный состав серы в сульфидах (101 анализ) исследовался в Лаборатории изотопии серы ИГЕМ АН СССР (Л.П. Носик).

Эксперименты по изучению влияния температуры на распределение селена в существующих сульфидах были осуществлены в Лаборатории экспериментальной минералогии ИМГРЭ совместно с А.Ю. Малевским.

Работы проводились в ИГЕМ АН СССР в тесном контакте с геологами Норильской комплексной геологоразведочной экспедиции, которым автор считает своим приятным долгом выразить признательность.

Особую признательность автор выражает А.Д. Генкину, под руководством которого была выполнена настоящая работа, сотрудникам ИГЕМ АН СССР В.В. Дистлеру, А.А. Филимоновой, Т.Л. Евстигнеевой, И.П. Лапутиной, В.А. Соловьеву, Н.Н. Батыревой, Л.Н. Вяльсову, Г.В. Басовой, И.А. Зотову – за помощь и содействие в проведении исследований, а также Т.Н. Шадлун, взявшей на себя труд редактирования монографии.

## Глава I

### КРАТКИЙ ОЧЕРК ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

Сведения по геологическому строению, особенностям тектоники и магматизма, рудным месторождениям района изложены в многочисленных публикациях и отчетах Н.Н. Урванцева, Б.Н. Рожкова, В.К. Котульского, М.Н. Годлевского, Г.Б. Роговера, И.С. Зонтова, М.Ф. Смирнова, В.В. Золотухина, Е.Н. Сухановой, Г.Д. Маслова, Л.Л. Ваулина, В.Ф. Кравцова, Ю.Н. Седых, В.А. Люлько, В.С. Нестеровского, Д.А. Додина, В.А. Даценко, М.К. Иванова, А.И. Архиповой, В.В. Рябова и многих других исследователей.

Особенности геологического строения Норильского района определяются его расположением на стыке Сибирской платформы с Енисейской зоной складчатости. Вследствие этого район характеризуется тектоникой переходного типа, которая является отражением как вертикальных глубинных перемещений фундамента, так и движений в окружающих складчатых сооружениях (Годлевский, 1959).

Мощность отложений платформенного чехла в пределах района достигает 12000 м (Даценко, 1968). В его строении принимают участие морские осадочные и вулканогенные образования верхнего протерозоя, преимущественно морские осадочные породы нижнего и среднего палеозоя, континентальные и морские, осадочные, а также вулканогенные отложения верхнего палеозоя, которые перекрываются мезозойскими отложениями. В районе широко развит комплекс интрузивных пород. Пермские и триасовые интрузии долеритов, а также дифференцированные интрузии габбро-долеритов, с которыми ассоциируют медно-никелевые месторождения, залегают среди пород, возраст которых изменяется от ордовика до верхней перми–триаса.

Талнахский рудный узел, который включает Талнахское и Октябрьское месторождения, в тектоническом отношении приурочен к юго-западному центриклинальному замыканию Хараелахской мульды в зоне ее сочленения с Ханкайско-Рыбинским валообразным поднятием и пересечения Норильско-Хараелахским разломом (Егоров, Суханова, 1963; Ваулин, Суханова, 1970; Кравцов и др., 1971).

Непосредственно в районе месторождений скважинами вскрыты морские ордовикские, силурийские и девонские осадочные породы, континентально-лагунные верхнекаменноугольные и пермские угленосные отложения и туфоловые образования пермского и триасового возрастов. В пределах Талнахского рудного узла выделяются два рудоемещающих горизонта – нижний и верхний. Нижний горизонт сложен

карбонатно-ангидрито-мергелистыми отложениями девона (зубовская, курейская, разведочнинская, мантуровская, макусовская, накохозская, каларгонская свиты), а верхний — терригенными породами пермо-карбона (тунгусская серия).

Основные тектонические структуры района месторождений Талнахского рудного узла представлены крупным синклинальным прогибом (Хараэлахская мульда) и антиклинальным поднятием долины р. Норильской, а также Норильско-Хараэлахским рудоконтролирующим разломом с системой сопровождающих его дизъюнктивных нарушений (Кравцов и др., 1971).

Зона Норильско-Хараэлахского разлома делит всю площадь рудного узла на два обособленных блока — Западный и Восточный, обладающих специфическими особенностями тектоники. Западный блок охватывает площадь центриклинального замыкания Хараэлахской мульды и характеризуется интенсивной тектонической нарушенностью с широким развитием пликтативных и дизъюнктивных дислокаций. Восточный — представляет собой моноклиналь, осложненную лишь несколькими в общем параллельными разлому нормальными сбросами небольших амплитуд.

В тесной связи со структурно-тектоническими особенностями находится морфология Талнахского интрузива. Интрузив представляет собой хонолитоподобное тело, полого погружающееся к северу и разделяющееся во фронтальной части на несколько ветвей, с тремя из которых — северо-восточной, юго-западной (центральной) и северо-западной — ассоциируют промышленные залежи медно-никелевых руд. С юго-западной и северо-восточной ветвями интрузива, локализованными в пределах Восточного тектонического блока в породах верхнего рудовмещающего горизонта, связано Талнахское месторождение, а с северо-западной, располагающейся в пределах Западного тектонического блока в породах нижнего рудовмещающего горизонта, — Октябрьское (рис. I).

Характерной особенностью внутреннего строения интрузивов норильского типа, в частности Талнахского интрузива, является их расслоенность, выражаящаяся в наличии ряда горизонтов, сложенных меланократовыми породами в нижней и более лейкократовыми в верхней частях интрузии. Такое сложное строение, по мнению большинства исследователей (Годлевский, 1959; Котульский, 1948; Урванцев, 1958), является следствием внутрикамерной или глубинной дифференциации.

В строении ветвей Талнахского интрузива выделяются (сверху вниз) следующие горизонты.

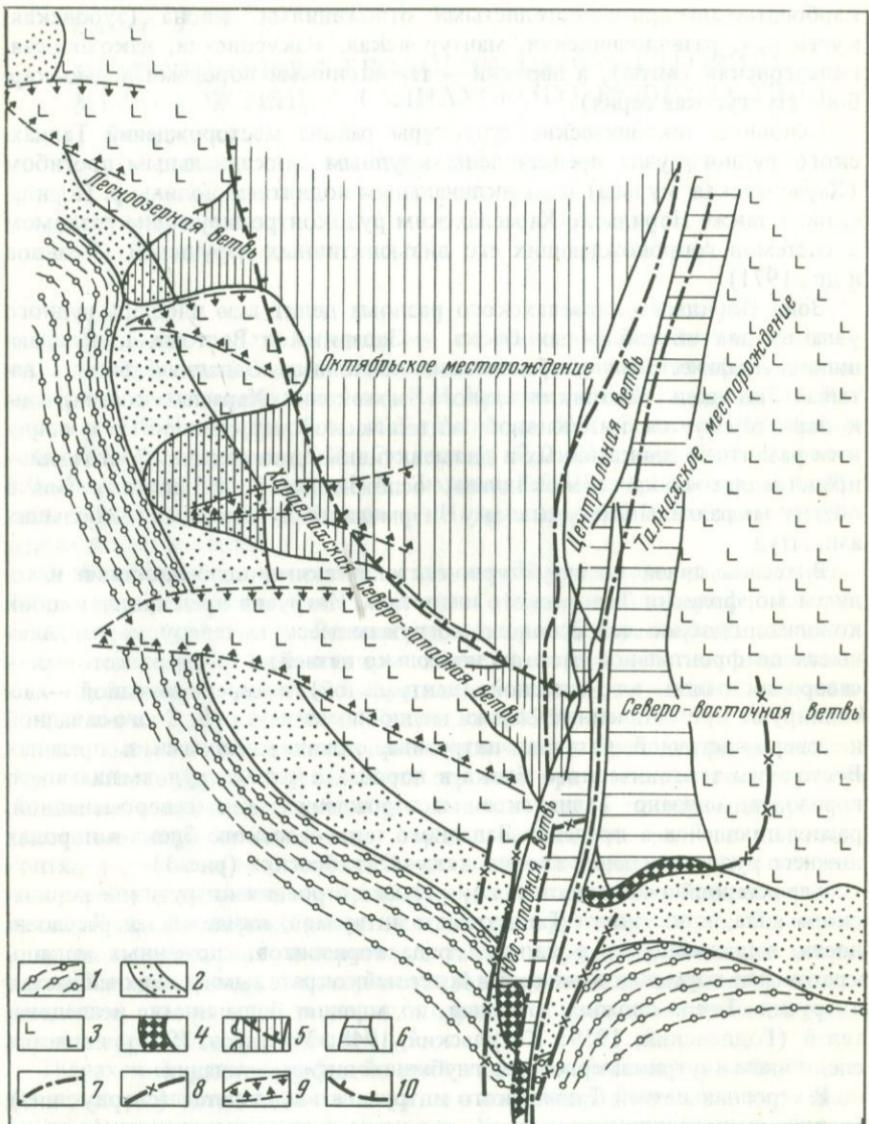
1. Верхние контаминированные породы, эруптивные брекчии с гибридным цементом, иногда верхние контактовые и такситовые габбродолериты.

2. Габбро-диориты, лейкократовые габбро, иногда кварцодержащие.

3. Безоливиновые и кварцодержащие габбродолериты.

4. Оливиновые и оливинсодержащие габбродолериты.

5. Пикритовые и троктолитовые габбродолериты, троктолиты, меланократовые троктолиты, плагиоклазовые оливиниты с сульфидным оруденением.



Р и с. 1. Схема распространения ветвей Талнахского интрузива (по В.Ф. Кравцову и др., 1971).

1 — средне- и нижнепалеозойские карбонатно-мергелистые отложения; 2 — теригенные образования тунгусской серии; 3 — вулканогенные отложения нижнего триаса; 4 — выходы дифференцированных рудоносных интрузий под четвертичные отложения; 5 — площади распространения интрузивных ветвей "нижнего" рудного этажа; 6 — площади распространения северо-восточной и центральной ветвей "верхнего" рудного этажа; 7 — Центральный грабен Норильско-Хараэлахского рудо-контролирующего разлома; 8 — тектонические смещения над кровлей интрузива; 9 — трещинно-блоковые просадочные структуры; 10 — предполагаемое положение внешней границы грабен-синклинального прогиба внутренней части мульды

6. Такситовые и равномернозернистые оливинсодержащие габбро-долериты с сульфидным оруденением.

7. Контактовые габбро-долериты с сульфидным оруденением.

В разных интрузивных ветвях строение отдельных горизонтов может отличаться, некоторые горизонты могут выпадать из разреза, но в общем приведенная схема выдерживается.

С горизонтами пикритовых, такситовых и контактовых габбро-долеритов связано вкрапленное сульфидное оруденение.

Для всех интрузивных тел устанавливается закономерное изменение формы, внутреннего строения и химизма пород не только в разрезе, но и по площади, особенно по восстанию. Е.Н. Сухановой (1968) в строении интрузива выделяется три зоны: а) прикорневая, б) центральная (внутренняя), в) фронтальная (внешняя).

Прикорневая зона изучена недостаточно (интрузив по падению прослежен до глубины 1550 м). Тело интрузива имеет трубообразную или клиновидную форму, дифференциация проявлена слабо – практически весь разрез представлен однообразными, пикритоподобными породами с тонкорассеянной вкрапленностью сульфидов (в основном пирротина), шлирами и тонкими жилками хромита.

Центральная зона характеризуется расщеплением единого "ствола" интрузива на несколько линзовидных в сечении тел – ветвей. Интрузивные ветви сближены в пространстве, их ширина невелика, мощности значительны. В центральной зоне сосредоточена основная масса вкрапленных руд, связанных с горизонтами пикритовых, такситовых и равномернозернистых оливинсодержащих габбро-долеритов, и около трети запасов сплошных руд (Суханова, 1968). Среди сульфидных минералов преобладает пирротин.

Для фронтальной зоны характерно еще большее уплощение и разветвление интрузивного тела, в связи с чем усложняется внутреннее строение, нарушается обычная последовательность смены дифференциатов. Зона отличается максимальным развитием сплошных руд, приуроченных к зоне нижнего эндо- и экзоконтактов интрузива а также прожилково-вкрапленных и брекчевидных руд, залегающих во вмещающих интрузив породах. Наблюдается отчетливое обогащение руд минералами меди.

В пределах фронтальной зоны Талнахский интрузив окружен мощным (до 250 м) ореолом измененных пород. В ореоле измененных пород залегают тела прожилково-вкрапленных и брекчевидных руд.

Таким образом, геологическая позиция месторождений Талнахского рудного узла определяется тесной пространственной связью оруденения с одноименным дифференцированным интрузивом габбро-долеритов. Приуроченность Талнахского и Октябрьского месторождений к разным тектоническим блокам и разным структурно-литологическим этапам обусловила некоторые черты различия этих месторождений.

## Глава II

### ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

Промышленные типы руд Талнахского и Октябрьского месторождений, их минеральный состав, строение рудной зоны и морфология рудных тел детально описаны в работах А.Д. Генкина, Д.А. Додина, А.А. Филимоновой, В.В. Ершова, Е.Н. Сухановой, Л.Г. Сухова, В.Ф. Кравцова, Н.Н. Шишкина, Г.А. Митенкова, В.М. Изотко и других исследователей. Поэтому в настоящей главе будут приведены только краткие сведения по строению рудной зоны и морфологии рудных тел (в основном по литературным данным), необходимые для дальнейшего изложения оригинального материала по пространственным закономерностям распределения селена и теллура. Описание руд и их минеральный состав (с привлечением наблюдений автора) проводится более детально, так как выявление особенностей минерального состава руд необходимо для понимания условий образования сeleno-теллуровой минерализации и геохимических закономерностей накопления и рассеяния селена и теллура в процессе образования медно-никелевых руд.

#### СТРОЕНИЕ РУДНОЙ ЗОНЫ И МОРФОЛОГИЯ РУДНЫХ ТЕЛ

Рудная зона имеет многоярусное строение, т.е. руды локализованы как в породах самого интрузива, так и в породах его экзоконтактов – верхнего и нижнего.

К горизонтам пикритовых, такситовых, троктолитовых и оливинсодержащих равномернозернистых габбро-долеритов, слагающих придонные части интрузива, приурочена вкрапленность сульфидов, образующая промышленные концентрации. Тела и залежи сплошных сульфидных руд располагаются ниже по разрезу. Они обычно тяготеют к зоне нижнего эндо- и экзоконтакта интрузива. Вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды локализуются в метаморфически и метасоматически измененных породах нижнего, а в пределах Октябрьского месторождения – и верхнего экзоконтактов интрузива. Брекчиивидные руды, распространенные на Октябрьском месторождении, располагаются на фронте выклинивания и разветвления интрузива, занимая промежутки между линзовидно-удлиненными интрузивными ответвлениями.

Морфология горизонтов вкрапленных руд в интрузиве определяется в основном особенностями строения горизонтов пикритовых и такситовых габбро-долеритов. Вкрапленные руды образуют пластообразные тела. Их кровлей обычно служит граница раздела оливиновых и пикри-

товых габбро-долеритов, нижней границей — подошва интрузива. Во фронтальной зоне интрузива строение горизонтов вкрапленных руд усложняется вследствие расщепления интрузивного тела и повторения разреза последнего.

Залежи сплошных руд представляют собой пластообразные тела, линзовидные в разрезе. Наиболее благоприятными участками их локализации являются зоны крутых контактов, центриклинальные перегибы интрузива, прогибы, складки, поверхности отрыва различных по физическим свойствам вмещающих пород.

Сплошные руды обычно залегают или среди пород интрузива, или на границе подошвы интрузива и вмещающих пород, или же в основном в породах экзоконтакта.

Вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды в породах экзоконтакта образуют пластообразные и линзовидные тела как в зоне нижнего, так и верхнего экзоконтакта интрузива. Контуры тел весьма прихотливы, хотя в общем близки к очертаниям залежей сплошных руд (нижний экзоконтакт) или контурам самого интрузива (верхний экзоконтакт). В последнем случае в разрезе обычно наблюдается несколько рудных тел, располагающихся одно над другим.

Морфология горизонтов брекчиевидных руд весьма сложна. Она определяется формой контролирующих эти руды интрузивных "языков" и ответвлений во фронтальной зоне интрузивной ветви. Обычно в разрезе наблюдается несколько горизонтов брекчиевидных руд, располагающихся один над другим и отделенных друг от друга прослойми интрузивных пород. Часто среди руд с брекчиевидной текстурой отмечаются прослои тонковкрапленных руд и участки, сложенные сплошными рудами.

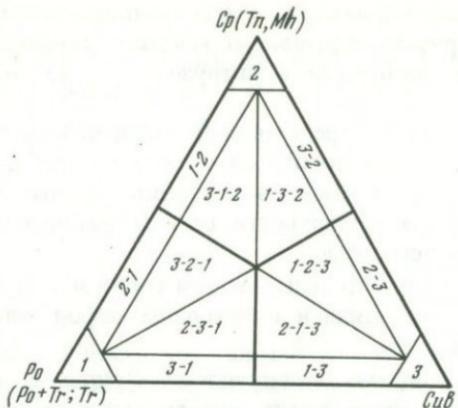
#### ХАРАКТЕРИСТИКА ГЛАВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ РУД И ИХ МИНЕРАЛЬНЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ

В основу разделения руд на промышленные типы положены, с одной стороны, количественные соотношения рудных и нерудных минералов (руды вкрапленные и сплошные) и, с другой — характер рудо-вмещающих пород (вкрапленные руды в интрузиве и во вмещающих породах).

В настоящее время на месторождениях Талнахского рудного узла выделяются три основных типа руд: 1) вкрапленные руды в интрузивных породах; 2) сплошные руды; 3) вкрапленные, прожилково-вкрапленные и брекчиевидные руды во вмещающих интрузив экзоконтактовых породах.

По минеральному составу в каждом типе может быть выделено несколько разновидностей, отражающих изменение в рудах количественных соотношений главных рудообразующих сульфидов (пирротина, троилита, кубанита, минералов группы халькопирита).

На треугольной диаграмме (рис. 2), построенной в координатах пирротин (троилит) — халькопирит (талнахит, моихукит) — кубанит, показаны все основные минеральные разновидности вкрапленных в интрузив-



Р и с. 2. Диаграмма минерального состава медно-никелевых руд и их минеральные разновидности

1 – пирротиновая (троилит-пирротиновая); 2 – халькопиритовая (талнахитовая, моихукитовая); 3 – кубанитовая; (2-1) – халькопирит-пирротиновая; (1-2) – пирротин-халькопиритовая; (3-2) – кубанит-халькопиритовая (талнахитовая, моихукитовая); (2-3) – халькопирит (талнахит, моихукит) – кубанитовая; (3-1) – кубанит-(троилит) – пирротиновая; (1-3) – (троилит) – пирротин-кубанитовая; (2-3-1) – халькопирит (талнахит, моихукит) – кубанит (троилит) – пирротиновая; (3-2-1) – кубанит-халькопирит (талнахит, моихукит) – (троилит)-пирротиновая; (3-1-2) – кубанит-(троилит) – пирротин – халькопиритовая (талнахитовая, моихукитовая); (1-3-2) – (троилит) – пирротин-кубанит-халькопиритовая (талнахитовая, моихукитовая); (1-2-3) – (троилит) – пирротин-халькопирит (талнахит, моихукит) – кубанитовая; (2-1-3) – халькопирит (талнахит, моихукит) – (троилит) – пирротин – кубанитовая

Po – пирротин; Tr – троилит; Crp – халькопирит; Tn – талнахит; Mh – моихукит; Cub – кубанит

ных породах и сплошных руд. Среди прожилково-вкрапленных и брекчевидных руд во вмещающих породах выделяются несколько иные минеральные разновидности, о чем будет сказано ниже.

### Вкрапленные руды в интрузивных породах

Вкрапленные руды – один из трех промышленных типов руд – пользуются широким распространением в пределах Талнахского рудного узла. Промышленные скопления рудной минерализации приурочены в основном к горизонтам пикритовых и такситовых габбро-долеритов и частично к троктолитовым и равномернозернистым оливинсодержащим габбро-долеритам.

Структурные особенности вмещающих сульфиды интрузивных пород во многом определяют текстурный рисунок вкрапленных руд. Среди последних выделяется несколько текстурных разновидностей. Для руд в пикритовых габбро-долеритах, отличающихся мелкозернистыми, равномернозернистыми структурами, характерна вкрапленность двух видов: мелкая ( $0,1-1 \text{ мм}$ ) ксеноморфная, располагающаяся в интерстициях окружающих силикатов (табл. I, 1) и крупная (от 3–4 до 40–50 мм) каплевидная, овощная по форме (табл. I, 2). Основные концентрации полезных компонентов связаны с вкрапленностью второго вида.

Атакситовая, участками пегматоидная структура такситовых габбродолеритов накладывает отпечаток на характер сульфидной вкрапленности, которая характеризуется сочетанием крупных (40–80 мм) и мелких (2–5 мм) ксеноморфных, с прихотливыми очертаниями выделений сульфидов (табл. II, 1), распределенных в породе весьма неравномерно).

Массивная текстура и гипидиоморфнозернистая структура троктолитовых габбро-долеритов предопределяет наличие в них обильной интерстициальной вкрапленности (вплоть до сидеронитовых структур), среди которой изредка встречаются крупные неравномернораспределенные, часто сильно уплощенные вкрапленники (табл. II, 2).

В равномернозернистых оливинсодержащих габбро-долеритах преобладает мелкая интерстициальная, часто сидеронитовая вкрапленность сульфидов.

Таким образом, среди вкрапленных руд в интрузивных породах можно выделить три основные текстурные разновидности руд: 1) оvoidновкрапленные в пикритовых габбро-долеритах; 2) ксеноморфновкрапленные в такситовых габбро-долеритах; 3) интерстициальнновкрапленные в равномернозернистых оливинсодержащих и троктолитовых габбро-долеритах.

Изучению вещественного состава вкрапленных руд в интрузивных породах месторождений Талнахского рудного узла не уделялось до настоящего времени достаточного внимания. Вследствие этого возникло мнение об относительно простом их минеральном составе с преобладающим развитием руд существенно пирротинового состава (Суханова, 1968).

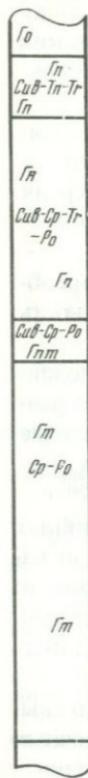
Наши исследования, при которых было просмотрено и изучено свыше 1500 полированных шлифов из кернов более чем 80 разведочных скважин, равномерно распределенных по площади, позволили выявить значительное разнообразие минерального состава руд и выделить в них ряд основных минеральных разновидностей, имеющих самостоятельное значение.

Главными рудообразующими минералами вкрапленных руд являются пирротин, пентландит, кубанит, троилит, а также минералы группы халькопирита — тетрагональная и кубическая его модификации. Все разнообразие минеральных разновидностей, отмечаемое в рудах, определяется изменением количественных соотношений указанных минералов (за исключением пентландита, содержания которого колеблются в незначительных пределах).

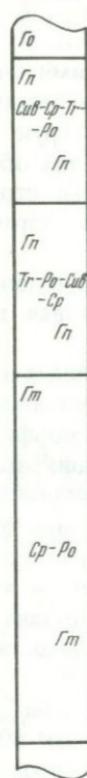
В пикритовых габбро-долеритах, помимо пирротина и халькопирита, среди сульфидов значительную роль играют кубанит и троилит, который появляется только в рудах, содержащих значительные количества мелкозернистого кубанита II генерации.

Установлены существенные различия в минеральном составе рудной вкрапленности, локализованной в пикритовых и оливинсодержащих такситовых и равномернозернистых габбро-долеритах. В последних преобладают халькопирит-пирротиновые, пирротин-халькопиритовые и пирротиновые руды с очень незначительным развитием кубанит-халькопирит-пирротиновых, кубанит-халькопирит-троилит-пирротиновых и кубанит-пирротин-халькопиритовых разновидностей руд, которые приуро-

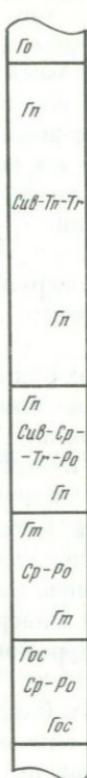
К3-1196



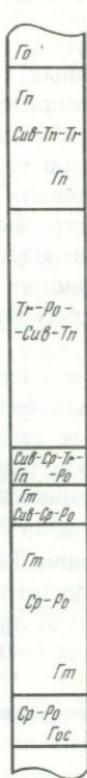
К3-1116



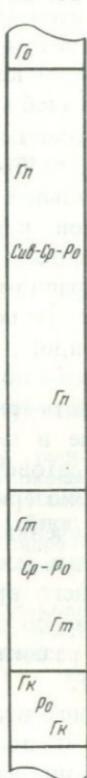
К3-1166



К3-1173



К3-758



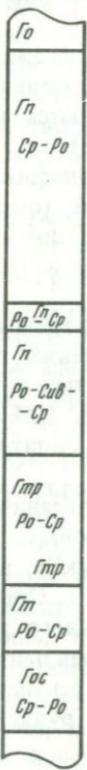
чены в основном к зоне перехода от пикритовых к такситовым габбро-долеритам.

В пикритовых габбро-долеритах наблюдаются весьма широкие вариации в количественных соотношениях рудных минералов, что приводит к развитию большого количества минеральных разновидностей. Помимо халькопирит-пирротиновых и пирротин-халькопиритовых руд здесь отмечены значительные скопления кубанит-халькопирит-пирротиновых и троилит-пирротин-кубанит-халькопиритовых руд, а также руд с троилитом (без пирротина) и сложными модификациями халькопирита (талнахитом и моихукитом).

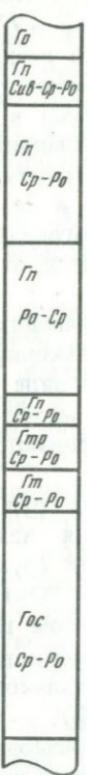
Руды с гомогенным троилитом и сложными модификациями халькопирита обычно локализованы в самых верхних горизонтах пикритовых габбро-долеритов и вниз по разрезу постепенно сменяются рудами, в которых троилит находится в срастании с тексагональным пирротином и обычным тетрагональным халькопиритом. Последние еще ниже по разрезу постепенно переходят в халькопирит-пирротиновые руды. Таким образом, в распределении минеральных разновидностей вкрапленных руд устанавливается вертикальная зональность, которая в общем виде выражается в последовательной смене (вниз по разрезу) сложных руд с троилитом, кубанитом и талнахитом (троилит-кубанит-

К3-753<sup>к</sup>

К3-744



К3-745



К3-788



Рис. 3. Зональное распределение минеральных разновидностей вкрапленных руд в интрузивных породах в вертикальном разрезе (на примере некоторых скважин)

Го — олиновые габро-долериты; Гп — пикритовые габбро-долериты; Гтр — троктолитовые габбро-долериты; Гт — такситовые габбро-долериты; Гос — оливансодержащие равномернозернистые габбро-долериты; Ро — пирротин; Тр — троилит; Сиб — кубанит; Ср — халькопирит; Тп — талнахит

халькопирит-талнахитовые, кубанит-талнахит-троилитовые) кубанит-халькопирит-троилит-пирротиновыми. При этом в вертикальном разрезе могут устанавливаться от одной-двух до пяти сменяющихся друг друга разновидностей вкрапленных руд. Примеры такого зонального распределения минеральных разновидностей приведены на рис. 3.

В количественном отношении среди вкрапленных руд в интрузивных породах преобладают такие минеральные разновидности, как халькопирит-пирротиновая, кубанит-халькопирит-троилит-пирротиновая и пирротин-халькопиритовая, составляющие в сумме более 80% от всего количества вкрапленных руд.

### Сплошные руды

Главными рудообразующими минералами сплошных руд являются пирротин, пентландит, кубанит, а также минералы группы халькопирита — тетрагональные и кубические его структурные модификации. Все разнообразие минеральных разновидностей сплошных руд определяется изменением количественных соотношений указанных минералов (за исключением пентландита, содержания которого в рудах колеблются в ограниченных пределах.).

Среди сплошных руд выделяются следующие главные минеральные разновидности: пирротиновая, кубанитовая, халькопиритовая, моихукитовая и талнахитовая (Генкин и др., 1971).

Наибольшее распространение во всех рудных залежах Талнахского и Октябрьского месторождений имеют руды пирротиновой разновидности. Главными рудными минералами в них являются пирротин (60–80%), халькопирит (10–20%) и пентландит (10–15%).

Пирротин представлен двумя структурными модификациями: гексагональной (антиферимагнитной) и моноклинной (феримагнитной). Обычно в рудах преобладает гексагональный пирротин. Количество моноклинного пирротина увеличивается от подошвы к кровле, а также от центра к периферии рудных тел.

В пирротиновых рудах, примыкающих к кубанитовым, появляются кубанит (за счет пирротина и халькопирита), а также троилит, располагающийся в зернах пирротина в виде пластинчатых и червеобразных выделений. Количество троилита может достигать 50% от пирротина. Руды подобного состава рассматриваются как троилит-кубанит-пирротиновые.

Халькопиритовая разновидность руд имеет ограниченное распространение. Наибольшие скопления халькопиритовых руд известны на юге Талнахского месторождения (рудник "Маяк"), а также на Октябрьском месторождении (рудник "Октябрьский"). Обычно руды сложены равномернозернистым агрегатом тетрагонального халькопирита с крупными (до 1,5 см) порфировидными выделениями пентландита.

В некоторых участках, кроме халькопирита и пентландита, в рудах присутствует кубанит (до 20–30%), и подобные руды выделяются в качестве кубанит-халькопиритовой разновидности.

В пределах Октябрьского месторождения чисто пентландит-халькопиритовые разновидности руд встречаются весьма редко. Обычно в них присутствует от 10 до 30% пирротина, представленного как реликтами от замещения халькопиритом, так и новообразованными шнуровидными выделениями и прожилками в халькопирите. Такие разновидности сплошных руд получили название пирротин-халькопиритовые. Между пирротиновыми и пирротин-халькопиритовыми рудами нередко наблюдаются постепенные переходы.

К моихукитовой разновидности сплошных руд относятся руды, преобладающим минералом которых является моихукит – новый минерал медно-никелевых руд (Муравьева и др., 1972; Филимонова и др., 1974). Эти руды известны в настоящее время только в пределах Октябрьского месторождения. Они слагают значительные участки рудной залежи и в количественном отношении преобладают над другими разновидностями сплошных руд, также преимущественно сложенных минералами группы халькопирита (талнахитовыми, халькопиритовыми).

Наиболее характерным второстепенным минералом является кубанит, при содержаниях которого в рудах 10–30 объемн. % выделяется кубанит-моихукитовая разновидность руд.

Текстурно-структурные особенности моихукитовых руд весьма близки к таковым в халькопиритовых рудах.

Талнахитовые руды, главным минералом которых является талнахит, значительно распространены на Талнахском месторождении. В пределах Октябрьского месторождения они имеют ограниченное распространение.

Вместе с талнахитом в рудах может встречаться и тетрагональный халькопирит, образующий весьма характерные тесные срастания с талнахитом. Количество пентландита в талнахитовых рудах возрастает до 20–25%, в то время как в халькопиритовых рудах оно составляет 10–15%.

Постоянно в рудах встречается кубанит, содержание которого может достигать 30 объемн. %, и тогда выделяется кубанит-талнахитовая разновидность сплошных руд.

По текстурно-структурным особенностям строения талнахитовые руды не отличаются от халькопиритовых и моихукитовых руд.

Наиболее сложным составом обладают разновидности руд, локализованные между пирротиновыми и существенно халькопиритовыми (моихукитовыми, талнахитовыми) рудами, и объединяемые в кубанитовую минеральную разновидность. В этой минеральной разновидности руд главным рудообразующим минералом является кубанит. В зависимости от присутствия тех или иных второстепенных минералов в кубанитовых рудах можно выделить несколько подтипов: пирротин-троилит-кубанитовый, троилит-халькопирит-кубанитовый, халькопирит-кубанитовый, троилит-талнахит-кубанитовый, талнахит-кубанитовый и т.д.

Р110  
Все эти подтипы характеризуются постепенными изменениями соотношений между основными рудообразующими минералами. Главной чертой кубанитовых руд является то, что кубанит, представленный зернистыми агрегатами, замещает ранее образованные сульфиды – пирротин, халькопирит, талнахит, пентландит. По представлениям А.Д. Генкина, А.А. Филимоновой, Д.А. Додина и др., кубанитовые руды возникают при наложении на пирротиновые, халькопиритовые, талнахитовые, моихукитовые руды более поздних процессов, приводящих к замещению пирротина и минералов группы халькопирита кубанитом.

Пространственное размещение минеральных разновидностей сплошных руд (поля рудников "Маяк" и "Октябрьский") свидетельствует о зональном строении рудных залежей. В общем виде зональность выражается в возрастании количества минералов меди в рудах, т.е. в закономерной смене пирротиновых руд более богатыми медью кубанитовыми, а затем халькопиритовыми и талнахитовыми (моихукитовыми) как по площади залежи, так и по вертикали – от подошвы к кровле.

#### ВКРАПЛЕННЫЕ, ПРОЖИЛКОВО-ВКРАПЛЕННЫЕ И БРЕКЧИЕВИДНЫЕ РУДЫ В ПОРОДАХ ЭКЗОКОНТАКТА

Минеральный состав экзоконтактовых руд отличается весьма большой сложностью и разнообразием. А.Д. Генкиным (Генкин и др., 1971) было установлено, что среди руд, залегающих в породах экзоконтакта, можно выделить руды, сложенные первичными минеральными ассоциациями, и руды, представленные вторичными, наложенными минеральными ассоциациями, связанными с проявлениями низко-

Таблица 1  
Минеральный состав промышленных типов руд месторождений Талнахского

Промышленный тип руд	Вкрашенные в интрузивных породах		Сплошные		
	Пирротиновая	Халькокопи-ритовая	Пирротин-новая	Кубанито-вая	Халькокопи-ровая
Главные минералы	Пирротин I, халькокопи-рит, пентлан-дит, троилит	Халькокопи-рит, кубанит II, пентлан-дит, пирротин	Пирротин I, халькокопи-рит, пентлан-дит	Кубанит II, пентлан-дит	Халькокопи-рит, пентлан-дит
Второстепенные минералы	Кубанит I, кубанит II, талнахит, моихукит, макинавит, пирит, пирротин II, пирротин III	Кубанит I, троилит, пирротин, моихукит, талнахит, пирит, макинавит	Пирротин II, кубанит I + II, троилит, пирит	Халько-пирит, талнахит, моихукит, троилит, пирротин	Кубанит I + II, пирротин I + II, троилит, макинавит
Редкие минералы	Валлерийит, галенит, сфalerит, серебросодержащий пентлан-дит*, никелин*, серебро самородное, ферроплатина, сперрилит	Валлерийит, галенит, галеноклусталит*, сфalerит, серебросодержащий пентлан-дит, сперрилит, паоловит, соболевский*, теллуристый соболевский*, мончейит, майченерит, алтait, гесцит, серебро самородное, золото са-мородное	Макинавит, Галенит, сфалерит, никелин, брейтгауптит, герсдорфит, серебро самородное, сперрилит, соболевский, паоловит, аргентит (?)*, пентлан-дит, соболевский, минерал $(\text{Pd}, \text{Pt})_3\text{Sn}$ , минерал Pt(Bi, Sb, Te) $_2^*$ , минерал Pd(Bi, Sb, Te)*, минерал Pd(Bi, Sb)*, алтait*	Макинавит, Пирит, сфалерит, галенит, валлерийит, медистый пентлан-дит, серебро самородное, джерфишерит, сперрилит, соболевская, ма-якит, соболевский, артит (?)*, минерал Pd $_2(\text{Sn}, \text{Sb})$ , паоловит, нигеллит*, серебро са-мородное, золото се-ребристое	Сфалерит, галенит, сфалерит, никелин, брейтгауптит, герсдорфит, серебро самородное, сперрилит, соболевский, паоловит, аргентит (?)*, пентлан-дит, серебро самородное, алтатит*, фурмандит, соболевский, ма-якит, алтатит*, ми-нерал Pd . (Pb, Te, Bi)*, ферропла-тина

рудного узла

Сплошные		Вкрашенные, прожилково-вкрашенные и брекчиевидные в породах экзоконтакта интрузива				
Талнахито-вая	Моихуки-товая	Пирроти-новая	Халькокопи-ровая	Борнит-мил-лерит-халько-пиритовая	Пирито-вая	Валлерии-товая
Талнахит, пентлан-дит	Моихукит, пентлан-дит	Пирротин, халько-пирит, пентлан-дит	Халькокопи-рит, пентлан-дит	Халькокопи-рит, мил-лерит	Пирит, халько-пирит, пентлан-дит	Валлерийит, халькокопи-рит, пентлан-дит
Кубанит I + II, халько-пирит, троилит, макинавит, валлерийит	Кубанит I + II, халькокопи-рит, троилит, макинавит, валлерийит	Пирит, пирит, валлерийит, борнит	Пирротин, Пентлан-дит, борнит	Пирротин, Пирит, валлерийит пирротин		
Сфалерит, галенит, медистый пентлан-дит, джерфишерит, шадлунит, альбандин, ренистый молибденит*, серебро самородное, алтатит*, фурмандит, соболевский, ма-якит, алтатит*, ми-нерал Pd . (Pb, Te, Bi)*, ферропла-тина	Медистый пентлан-дит, сфалерит, галенит, джерфишерит, шадлунит, альбандин, ренистый молибденит*, серебро самородное, алтатит*, фурмандит, соболевский, ма-якит, алтатит*, ми-нерал Pd . (Pb, Te, Bi)*, ферропла-тина	Пирит, марказит, пентлан-дит, сфалерит, галенит, марказит, серебро самородное, алтатит*, фурмандит, соболевский, ма-якит, алтатит*, ми-нерал Pd . (Pb, Te, Bi)*, ферропла-тина	Марказит, миллерит, полидимит, валлерийит, сфалерит, галенит, марказит, серебро самородное, алтатит*, фурмандит, соболевский, ма-якит, алтатит*, ми-нерал Pd . (Pb, Te, Bi)*, ферропла-тина	Пирит, полидимит, валлерийит, сфалерит, галенит, марказит, серебро самородное, алтатит*, фурмандит, соболевский, ма-якит, алтатит*, ми-нерал Pd . (Pb, Te, Bi)*, ферропла-тина	Миллерит, Галенит, полидимит, то-чилиният, миллерит, сфалерит, галенит	

\* Минералы, установленные в данной разновидности руды автором.

температурных гидротермальных процессов. Характерным является наложение вторичных ассоциаций на первичные, что приводит к усложнению их минерального состава и затушевыванию взаимоотношений минералов. Состав руд зависит от степени интенсивности проявления вторичных процессов, от различной устойчивости минералов первичных ассоциаций, от минерального состава первичных руд.

Главными минералами первичных руд являются пирротин, халькопирит, пентландит, миллерит, вторичных — пирит, никелистый пирит и валлериит. На основании преобладающего (40–50% в сумме рудных минералов) развития в рудах указанных минералов среди руд, залегающих в породах экзоконтакта, выделяются пять минеральных разновидностей: пирротиновая, пентландит-халькопиритовая, миллерит-халькопиритовая, относящиеся к первичным рудам, и пиритовая, валлериитовая, являющиеся вторичными.

В расположении минеральных разновидностей руд в пространстве характерна вертикальная зональность с закономерной сменой разновидностей руд по мере удаления от интрузива габбро-долеритов (т.е. вверх или вниз, в зависимости от пространственного положения руд в верхнем или нижнем контакте интрузива) (Генкин и др., 1971; Ершов, Попова, 1967). В этом направлении пирротиновые и образовавшиеся при их изменении пиритовые руды, располагающиеся вблизи от контакта интрузива, последовательно сменяются пирротин-халькопиритовыми и возникшими за их счет пирит-халькопиритовыми, затем пентландит-халькопиритовыми и далее миллерит-халькопиритовыми рудами. Периферийные, наиболее удаленные от интрузива участки рудных тел обычно сложены борнит-миллерит-халькопиритовыми разновидностями руд.

## МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

В настоящее время в рудах месторождений известно свыше 90 рудных минералов, относящихся к классам сульфидов, арсенидов, антимонидов, сульфосолей, интерметаллидов, самородных элементов, а также селенидов и теллуридов.

В табл. 1 приводятся главные, второстепенные и редкие минералы, известные в настоящее время и характерные для разных типов и минеральных разновидностей руд. Интересно, что свыше 75% всех известных в рудах минералов принадлежат к числу редких.

Более полно рассматриваются главные и второстепенные минералы руд, в которых в дальнейшем будут обсуждаться особенности распределения селена и теллура. Редкие минералы, среди которых большинство составляют минералы благородных металлов (платиноиды, серебро и золото), в настоящей работе не рассматриваются, поскольку исчерпывающая их характеристика дана в последних работах А.Д. Генкина с сотрудниками (Генкин и др., 1971, 1972, 1974). Исключение делается для тех редких минералов, которые впервые установлены в рудах месторождений автором.

Селениды и теллуриды, а также ряд минералов-концентраторов селена и теллура будут подробно рассмотрены в специальной главе.

## Главные минералы

Пиротин — наиболее распространенный минерал в рудах месторождений. Является основным минералом пирротиновой разновидности руд, где его содержание колеблется от 40—60 (вкрапленные руды в интрузиве и в породах экзоконтакта) до 60—80% (сплошные руды). В халькопиритовой и кубанитовой разновидностях руд его содержания могут составлять до 10—20%.

В полированных шлифах устанавливается две основные генерации пирротина. Пирротин I генерации обычно представлен крупными зернами (в сплошных рудах — до 3 см) с хорошо выраженной отдельностью. Параллельно отдельности в пирротине I генерации и местами по границам двойниковых индивидов обычно располагаются пластинчатые и пленевидные выделения пентландита (табл. II, 3).

Пирротин I генерации во вкрапленных рудах в интрузиве слагает обычно или мелкие выделения сульфидов, или пирротиновую часть крупных вкрапленников. В сплошных рудах пирротином I генерации сложена основная масса пирротиновых руд. В виде реликтов пирротин I генерации наблюдается в кубанитовых и пирротин-халькопиритовых рудах. Во вкрапленных экзоконтактовых рудах пирротином I генерации обычно сложены индивидуализированные вкрапленники.

Пирротин II генерации образует мелкозернистые агрегаты с размером зерен не более 0,1 мм. В пирротиновых рудах он наблюдается по периферии крупных зерен пирротина I, вдоль границ их с халькопиритом и пентландитом (табл. III, 1) или в халькопирите и пентландите в виде скоплений округлой формы или прожилков. В халькопиритовых рудах пирротин II распространен наиболее широко и встречается в виде прожилков в халькопирите, границы которых иногда подчеркиваются нерудными минералами или же в виде своеобразных идиоморфных выделений в халькопирите (табл. III, 2). В кубанитовых рудах встречаются тонкие прожилковидные выделения пирротина II генерации, секущие зернистые агрегаты кубанита.

В рудах известны две структурные модификации пирротина — гексагональная и моноклинная, а также троилит. Во вкрапленных рудах в интрузиве и в сплошных рудах преобладающим распространением пользуется гексагональный пирротин (70—80% от всего пирротина), в экзоконтактовых вкрапленных и прожилково-вкрапленных рудах развит преимущественно моноклинный пирротин. Троилит встречается в троилит-пирротин-кубанитовых разновидностях сплошных руд (табл. III, 3), во вкрапленных рудах в интрузивных породах (см. табл. I, 1). В талнахит-кубанитовых рудах он наблюдается в виде реликтовых участков размером до 1,5 см среди кубанита. В зонах перехода от талнахитовых и кубанитовых руд к пирротиновым троилит встречается лишь в виде тонких пластинчатых выделений среди гексагонального пирротина.

Пентландит является основным носителем никеля в рудах месторождений. Он встречается практически во всех типах и минеральных разновидностях руд (табл. 1). По формам выделения минерала в рудах различается несколько морфологических его разновидностей:

1) пластинчатые, линзовидные, пламенеобразные и звездчатые выделения; 2) каймы по границам зерен пирротина или пирротина и халькопирита, а также вокруг зерен магнетита; 3) крупные (от 3–5 мм до 2–3 см) порфировидные выделения; 4) прожилковидные выделения; 5) мелкие округлые и остроугольные включения.

Первые две морфологические разновидности пентландита особенно характерны для пирротинового типа руд. Пластинчатые и линзовидные его выделения обычно располагаются параллельно базальной отдельности пирротина I (см. табл. II). В случае сечения, близкого базальной плоскости пирротина I, в нем наблюдаются оригинальные звездчатые дендриты пентландита (табл. IV, 1). Для пирротиновых руд характерны также каймы пентландита, располагающиеся на границах зерен пирротина I генерации, а также на границах пирротина I и халькопирита. Во вкрашенных рудах в интрузиве такими пентландитовыми каймами разделяются халькопиритовая и пирротиновая части вкрашенников. Каймы нередко расширяются и переходят в относительно крупные (до 3–5 мм) порфировидные выделения пентландита. Наиболее типичны порфировидные выделения пентландита для руд кубанитового, халькопиритового и талнахитового состава, где их размеры достигают 2–3 см в поперечнике. В этих же рудах встречается пентландит в виде прожилков, а также длинных (до 2–3 мм) тонких пластин.

Наконец, мелкие выделения пентландита наблюдаются в полях пирротина II генерации, часто совместно с такими же выделениями халькопирита.

Количество пентландита во всех типах и минеральных разновидностях руд остается примерно на одном уровне – 10–12%, возрастая иногда до 15–25% (в основном в талнахитовых рудах).

Халькопирит – широко распространенный минерал. Он встречается во всех типах руд месторождений Талнахского рудного узла. В настоящее время в рудах достоверно установлены три минерада, относящихся к группе халькопирита: обычный тетрагональный халькопирит, талнахит и моихукит (Муравьева и др., 1972; Филимонова и др., 1974).

Тетрагональный халькопирит – наиболее распространенный минерал группы халькопирита. Он в тех или иных количествах встречается во всех типах и минеральных разновидностях руд и является "сквозным" минералом. В пирротиновых рудах количество халькопирита составляет от 10–15 (сплошные руды) до 25–30% (вкрашенные руды). Во вкрашенных рудах в интрузивных породах халькопирит образует отдельные части вкрашенников и отделяется от пирротина каймой пентландита. В сплошных пирротиновых рудах наиболее распространены выделения халькопирита в промежутках между зернами пирротина I генерации. Они имеют неправильную петлеобразную или прожилковидную форму шириной от 0,1 мм до 2–3 см.

В халькопиритовых рудах агрегаты тетрагонального халькопирита имеют крупнозернистую структуру с размером зерен до 2–3 мм. Характерна отчетливо выраженная анизотропия халькопирита, благодаря которой в скрещенных николях выявляется полисинтетическое или паркет-

тобидное двойниковое строение его зерен. Местами халькопирит содержит включения кубанита в виде серии параллельных пластинок (ширины до 0,3 мм). Нередко, так же как и в пирротиновых рудах, халькопирит пересекается прожилками мелкозернистого пирротина II генерации, а также замещается зернистыми агрегатами кубанита II генерации.

Талнахит впервые установлен в сплошных рудах месторождений Норильск-Г и Талнах И.А. Будько и Э.А. Кулаговым (1968). Указанные авторы под талнахитом подразумевали кубическую модификацию халькопирита, по размерам элементарной ячейки ( $a_0 = 5,29\text{\AA}$ ) сходную с высокотемпературным кубическим халькопиритом, впервые синтезированным Доннеем и Куллерудом (Donney, Kullerud, 1958). Однако, как показали более поздние исследования тех же образцов (Cabri, 1967), талнахит характеризуется большими размерами элементарной ячейки ( $a_0 = 10,6\text{\AA}$ ).

Талнахит является главным минералом сплошных талнахитовых руд, где его содержание достигает 60–70%, в кубанитовых рудах количества талнахита колеблются от 10 до 30%. В рудах талнахит представлен агрегатом крупных зерен. Встречаются как гомогенные разности талнахита, так и пластинчатые его срастания с тетрагональным халькопиритом (наиболее распространены).

Моихукит встречен в сплошных рудах Октябрьского месторождения (Муравьева и др., 1972), где в некоторых участках рудной залежи его количество достигает 60%. В отличие от талнахита окисляется на воздухе менее интенсивно.

Моихукит представляет собой тетрагональный сульфид меди и железа с формулой  $\text{Cu}_9\text{Fe}_9\text{S}_{16}$  и параметрами решетки  $a_0 = 10,57$  и  $c_0 = 5,36\text{\AA}$ . Впервые минерал был обнаружен в дунитовой трубке Моихук (Южная Африка) и описан Кабри и Холлом (Cabri, Hall, 1971). В шлифах моихукит светлее тетрагонального халькопирита, обладает едва заметным двутражением, анизотропен, зернистый с полисинтетическими двойниками.

Во вкрашенных рудах в интрузиве встречаются все структурные модификации халькопирита, тогда как в экзоконтактовых рудах он представлен тетрагональной своей модификацией.

Кубанит является достаточно широко распространенным минералом руд Талнахского и Октябрьского месторождений.

Под микроскопом устанавливается две генерации кубанита. Кубанит I генерации – это пластинки в халькопирите, талнахите или моихуките с четкими резкими границами, шириной от 0,01 до 0,2 мм. Концы пластинок иногда расщеплены. Судя по одновременному угасанию, они представляют собой монокристаллы. Выделения кубанита I генерации отмечаются во всех типах руд, но особенно характерны для вкрашенных в интрузивных породах и сплошных руд халькопиритового состава.

Кубанит II генерации образует прожилковидные выделения, прожилки вдоль трещин в минералах группы халькопирита и пирротине и каймы вокруг пентландита, а также слагает зернистые агрегаты, среди которых встречаются реликты пирротина (троилита) и минералов группы халькопирита. Размеры зерен кубанита колеблются от 0,5 до 1–2 мм.

Кубанит II генерации характерен для вкрапленных в интрузивных породах и сплошных руд и не встречается в экзоконтактовых рудах. Руды с кубанитом II генерации обычно располагаются на границах между пирротиновыми рудами и рудами с преобладанием минералов группы халькопирита.

### Второстепенные минералы

Борнит встречается как в сплошных, так и во вкрапленных в основном экзоконтактовых рудах. Он обычно образует маломощные оторочки и прожилки у верхнего контакта тел сплошных сульфидов в основном талнахитового состава. Борнит находится в тонких срастаниях с халькопиритом, пентландитом, хизлевудитом и халькоzinом. Иногда краевые зоны рудных тел талнахитового состава катаклазированы и обломки талнахита цементируются халькоzin-борнитовым агрегатом, причем пентландит замещается хизлевудитом.

Масштабы проявления борнитовой минерализации в сплошных рудах не велики.

Борнит является характерным минералом борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых руд. Он находится здесь или в срастаниях с халькопиритом, или слагает отдельные мономинеральные вкрапленники, располагающиеся в виде полос, чередующихся с полосками, сложенными халькопиритом. В прожилково-вкрапленных рудах выделения борнита приурочены к контактам халькопиритовых прожилков, иногда они проникают в зерна халькопирита и пересекают их. Подобные взаимоотношения указывают на более позднее относительно халькопирита образование борнита.

Халькоzin встречается в рудах реже борнита и значительные скопления образует только в описанных выше маломощных участках, примыкающих к сплошным рудам. В экзоконтактовых рудах он встречается редко.

Миллерит — один из главных рудообразующих минералов экзоконтактовых руд миллерит-халькопиритового и борнит-миллерит-халькопиритового состава (табл. IV, 2). Неправильные, порой извилистые границы срастаний миллерита и халькопирита, прожилковидная форма выделений первого и частая приуроченность его к зальбандам прожилков свидетельствуют о более позднем образовании этого минерала по сравнению с халькопиритом.

В экзоконтактовых рудах присутствуют также мелкие выделения миллерита, развивающиеся по пентландиту, в ассоциации с никелистым пиритом и полидимитом. Закономерные срастания этих минералов возникли, по-видимому, при метаморфизме пентландитовых зерен (Генкин и др., 1971).

Пирит нередко наблюдается в рудах, однако встречается в небольших количествах и только в некоторых типах экзоконтактовых руд образует значительные скопления (см. табл. 1). Обычно единичные зерна пирита присутствуют во всех типах и минеральных разновидностях руд. Во вкрапленных рудах в интрузиве наблюдаются, как правило, кристал-

лы пирита с правильными кристаллографическими очертаниями, располагающиеся среди пирротина. Среди выделений пирита имеются и достаточно ранние — известны случаи катахлаза его зерен с цементацией пирротином поздней генерации.

Наиболее характерным является замещение агрегатами мелких зерен пирита и магнетита пирротина I генерации в пирротиновых рудах. Нередки случаи пересечения прожилками пирита ранее образованных минералов (халькопирита, пирротина II генерации).

Особенно широко процессы пиритизации руд проявлены во вкрашенных рудах в породах экзоконтакта, где пирит, часто вместе с валлеритом и магнетитом, развивается по пирротину и халькопириту, а также совместно с полидимитом и миллеритом по пентландиту.

Сфалерит и галенит — минералы, не образующие больших скоплений, но встречающиеся во всех типах руд. Обычно они представлены мелкими округлыми, иногда с причудливыми границами включениями в главных рудных минералах. Сфалерит в общем встречается чаще галенита. Нередки прожилковидные выделения минералов. Характерна ассоциация сфалерита и галенита с минералами платиновой группы и серебром. Встречаются галенит и сфалерит также в поздних карбонатных прожилках в ассоциации с арсенидами никеля, кобальта и железа.

### Характеристика минералов, впервые установленных в рудах месторождений

При микроскопическом изучении руд нами был встречен ряд минералов, ранее не известных в месторождениях Талнахского рудного узла.

Молибденит ( $\text{MoS}_2$ ). Единичные находки молибденита известны в месторождениях медно-никелевых руд Кольского полуострова (Юшко-Захарова, 1964), Воронежского кристаллического массива (Чернышов, Буковшин, 1968). В рудах норильских месторождений молибденит не был известен.

Мельчайшие ( $30 \times 100 \text{ мкм}$ ) выделения молибденита встречены нами в сплошных талнахит-кубанитовых рудах северо-восточного участка Талнахского месторождения. Зерна молибденита часто приурочены к микротрешинам и микрокавернам в сульфидах, выполненных карбонатом (Коваленкер и др., 1974<sub>2</sub>).

При определении состава минерала на рентгеновском микроанализаторе MS-46 "Камека" в молибдените установлены высокие содержания рения.

Рений в зерне молибденита распределен зонально: наиболее обогащенная зона (до 3,8% Re) располагается в центре зерна, вдоль длинной его оси, затем идет зона с меньшим (до 2,8% Re) содержанием, а в периферийных частях зерна содержания рения составляют только 0,6%.

Измерение содержаний селена в том же зерне (0,009%), также произведенное с помощью микроанализатора MS-46, показывает, что селен распределяется в молибдените равномерно и его концентрации не зависят от содержаний рения.

Определенные нами содержания рения являются самыми высокими в молибденитах из известных в природе, что, по-видимому, связано с общим небольшим количеством молибденита в рудах месторождений, в котором концентрировался весь имевшийся в рудообразующем растворе рений.

Штромейерит ( $\text{AgCuS}$ ) — минерал, ранее не встречавшийся в медно-никелевых рудах. Нами диагностирован на основании оптических

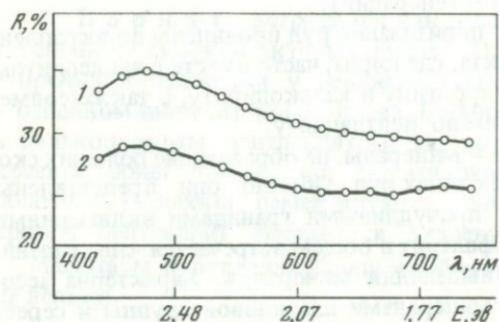


Рис. 4. Спектры отражения эталонного аргентита (1) и аргентита из Талнахского рудного узла (2)

свойств и химического состава. Минерал встречен в ассоциации с борнитом, миллеритом, халькопиритом, полидимитом, медьсодержащим галенитом и сфалеритом в прожилково-вкрашенных экзоконтактовых рудах борнит-миллерит-халькопиритового состава в виде мельчайших ( $10 \times 20 \text{ мкм}$ ) выделений на границе полидимита с борнитом, халькопиритом и миллеритом. Минерал голубовато-серый, со слабым двутрением — от серо-коричневого до сине-зеленого. Анизотропия минерала отчетливая, в темно-синих тонах. Отражение ниже, чем у борнита. Минерал мягкий, при полировке сильно царапается.

Оптические и физические свойства минерала весьма близки к низкотемпературной модификации штромейерита —  $\text{AgCuS}$  (Рамдор, 1962).

Определения состава, произведенные на микрозонде MS-46, показывают, что в талнахском штромейерите содержится (вес. %):  $\text{Ag} - 55$ ,  $\text{Cu} - 31,5$ ,  $\text{S} - 15,8$ ,  $\text{Ni} - 0,8$ , что соответствует формуле:  $\text{Ag}_{1,04}(\text{Cu}_{0,97} \cdot \text{N}_{1,0,03})_{1,0}\text{S}_{1,0}$ .

Приуроченность выделений штромейерита к полидимиту, развивающемуся по миллериту или образующего метакристаллы в борните и халькопирите, указывает на его образование после возникновения главных рудообразующих сульфидов руд. Как известно (Strunz, 1957), низкотемпературная модификация штромейерита устройчива при температурах ниже  $78^{\circ}\text{C}$ . По-видимому, штромейерит из Талнахского рудного узла является вторичным минералом, возникшим при низкотемпературном гидротермальном автометаморфизме руд.

Аргентит ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) установлен на основании изучения оптических свойств. Ранее в медно-никелевых месторождениях он не был известен. Овальные, вытянутые выделения минерала (табл. V, 1) были встречены в кубаните из сплошных кубанитовых руд Талнахского месторождения (рудник "Маяк"). Цвет минерала голубовато-серо-белый, анизотропия отчетливая. Вследствие низкой твердости аргентит полиру-

ется исключительно плохо, даже при самой тщательной полировке на поверхности минерала остаются царапины. Спектры отражения минерала и эталонного аргентина представлены на рис. 4. Наблюдается полная идентичность спектров исследуемого и эталонного аргентитов. Меньшие значения  $R$  исследуемого минерала объясняются дефектами полировки.

Сульфосоль свинца, меди, сурьмы (?) (предположительно менегинит) является очень редким минералом и ранее в медно-никелевых месторождениях не был известен.

Нами этот минерал установлен в брекчиивидных экзоконтактовых рудах Октябрьского месторождения, где он встречается в виде тонких (1–5 мкм) веретенообразных взаимоперпендикулярных пластинок в зернах галенита (табл. V, 2). Под микроскопом на фоне галенита минерал слабо, но отчетливо двуотражает — от серо-белого до темно-серо-зеленовато-голубого. В скрещенных николях анизотропен. Качественным микрорентгеноспектральным анализом на микрозонде MS-46 (аналитик Г.Н. Муравицкая) в составе минерала установлены свинец, сера, сурьма и медь. Количество меди незначительно. На основании имеющегося сходства оптических свойств и химического состава минерал может быть условно отнесен к группе менегинита.

## Глава III

### МИНЕРАЛОГИЯ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

#### КРАТКИЙ ОБЗОР МИНЕРАЛОГИИ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Большинство из известных минералов селена и теллура относится к классам селенидов, теллуридов и сульфосолей. Некоторая часть минералов принадлежит к классам окислов и солей кислородных кислот, образование которых обычно связано с гипергенными процессами, и поэтому они здесь рассматриваться не будут.

Изучение минералогии селена и теллура сопряжено со значительными трудностями в силу того, что минералы обоих элементов обычно встречаются в виде микроскопически малых выделений размером в сотые и тысячные доли миллиметра. Заметные скопления селенидов и теллуридов чрезвычайно редки. Только в последнее время, благодаря внедрению методов электронного микрозондирования в минералогию, появились широкие возможности для исследований селенидов и теллуридов. Не случайно в последние годы был открыт ряд новых минералов селена и теллура (Генкин и др., 1963; Vuorelainen et al., 1964; Johan et al., 1970, 1971; Cameron, Treadgold, 1961; Kingston, 1966; Soonpa, 1962; Harris et al., 1970, 1972; Cabri et al., 1973; и др.).

В настоящее время достоверно установлено свыше сорока минералов селена и примерно столько же минералов теллура. Учитывая, что со временем публикации последней сводки Н.Д. Синдеевой (1964) был открыт ряд новых минералов как селена, так и теллура, мы приводим список известных в настоящее время селенидов и теллуридов (табл. 2).

Первичные природные соединения селен образует с элементами, имеющими высокие порядковые номера: со свинцом, ртутью, висмутом, серебром, медью, никелем, кобальтом, железом, таллием, палладием, мышьяком. Селениды щелочных и щелочноземельных металлов в природе нам не известны. Как было установлено Н.Д. Синдеевой (1959), устойчивые природные соединения селена с наиболее прочным состоянием химической связи расположены в интервале разностей электроотрицательностей, равном 120–180 ккал/г · атом. Соединения, обладающие более низкой разностью электроотрицательностей (селенистый водород) или разностью более высокой (селениды натрия, калия), не устойчивы и в природных условиях или не встречаются, или встречаются чрезвычайно редко.

Таблица 2

## Гипогенные минералы селена и теллура\*

Минералы селена	Формула	Минералы теллура	Формула
Агвиларит	$\text{Ag}_2(\text{Se}, \text{S})$	Алтait	$\text{PbTe}$
Атабаскант	$\text{Cu}_5\text{Se}_4$	Арсенотеллурит	$\text{Ag}_2\text{Te}_2\text{S}_7$
[Ашавалит]**	$\text{FeSe}$	Бамбаллант	$\text{Cu}(\text{Te}, \text{Se})_2$
Берцелианит	$\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$	Боровскит	$\text{Pd}_3\text{SbTe}_4$
Блокит	$(\text{Ni}, \text{Cu})\text{Se}_2$	Вейссит	$\text{Cu}_{2-x}\text{Te}$
Борнхардит	$\text{Co}_3\text{Se}_4$	Верлит	$\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}$
Буковит	$\text{Cu}_3\text{Ti}_2\text{FeSe}_4$	Волынскит	$\text{AgBiTe}_2$
Вилкманит	$\text{Ni}_3\text{Se}_4$ (монокл.)	Вулканит	$\text{CuTe}$
Гуанахуатит	$\text{Bi}_2(\text{Se}, \text{S})_3$	Гессит	$\text{Ag}_2\text{Te}$
Джеромит	$\text{As}(\text{S}, \text{Se})_2$	[Голдфилдит]	$\text{CuSb}_2(\text{S}, \text{Te}_3)$
Кавацулит	$\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$	[Грюнлингит]	$\text{Bi}_4\text{TeS}_3$
Кадмоселит	$\text{CdSe}$	Жезеит А	$\text{Bi}_{4+x}\text{Te}_{1-x}\text{S}_2$
Киткаит	$\text{NiTeSe}$	[Жозеит Б]	$\text{Bi}_{4+x}\text{Te}_{2-x}\text{S}_2$
Клаусталит	$\text{PbSe}$	Калаверит	$\text{AuTe}_2$
Клокманит	$\text{CuSe}$	Колорадоит	$\text{HgTe}$
Круксит	$(\text{Cu}, \text{Ti})_2\text{Se}$	Котульскит	$\text{Pd}(\text{Te}, \text{Bi})$
Крутант	$(\text{Cu}, \text{Co}, \text{Ni})\text{Se}_2$	Костовит	$\text{CuAuTe}_4$
Куллерудит	$\text{NiSe}_2$	Креннерит	$(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$
Лайтакарийт	$\text{Bi}_4(\text{Se}, \text{S})_3$	Майченерит	$\text{PdTeBi}$
Мэкиненит	$\gamma\text{-NiSe}$	Маттагамит	$(\text{Co}, \text{Fe})\text{Te}_2$
Науманнит	$\text{Ag}_2\text{Se}$	Мелонит	$\text{NiTe}_2$
Онофрит	$\text{Hg}(\text{Se}, \text{S})$	Мелонит палладиевый	$(\text{Ni}, \text{Pd})(\text{Te}, \text{Bi})_2$
Остербошиит	$(\text{Pd}, \text{Cu})_7\text{Se}_5$	Меренскитит	$\text{Pd}(\text{Te}, \text{Bi})_2$
Парагуанахдатит	$\text{Bi}_2\text{Se}_3$	Монтбреййт	$\text{Au}_2\text{Te}_3$
[Платинит]	$\text{PbBi}_2(\text{Se}, \text{S})_3$	Мончейт	$\text{Pt}(\text{Te}, \text{Bi})_2$
Пермижкант	$\text{Cu}_3\text{SbSe}_4$	Нагиагит	$\text{Pb}_5\text{Au}(\text{Te}, \text{Sb})_4\text{S}_{5-8}$
Седерхолмит	$\beta\text{-NiSe}$	Оруэтит	$\text{Bi}_8\text{TeS}_4$
Тиманинит	$\text{HgSe}$	Петцит	$\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$
Тирреллит	$(\text{Cu}, \text{Co}, \text{Ni})_3\text{Se}_4$	Риккардит	$\text{Cu}_7\text{Te}_5$
Трогталит	$\text{CoSe}_2$	Сильванит	$\text{AuAgTe}_4$
Трогталит медно-пallадиевый	$(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Pd})\text{Se}_2$	Теларгпалит	$(\text{Pd}, \text{Ag})_4\text{Te}$
Трюстедтит	$\text{Ni}_3\text{Se}_4$ (кубич.)	Теллуроантимон	$\text{Sb}_2\text{Te}_3$
Умангит	$\text{Cu}_3\text{Se}_4$	Теллуромисмутит	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$
Ферроселит	$\text{FeSe}$	Темагамит	$\text{Pd}_3\text{HgTe}_4$
Фишессерит	$\text{Ag}_3\text{AuSe}_3$	Тетрадимит	$\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$
		Фробергит	$\text{FeTe}_2$
		Хедлейит	$\text{Bi}_7\text{Te}_3$

\*При составлении таблицы использованы ежегодные обзоры Э.М. Бонштедт-Куплетской по новым минералам в записках ВМО, а также книга Э.М. Бонштедт-Куплетской и О.А. Арбузовой "Новые минералы". М., "Наука", 1974.

\*\*В квадратные скобки заключены минералы, недостаточно изученные или сомнительные.

Таблица 2 (окончание)

Минералы селена	Формула	Минералы теллура	Формула
Фреобольдит	CoSe	[Чикловайт]	$Bi_2 TeS_2$
Хакит	$(Cu, Hg)_3 SbSe_4$	Эмпрессит	$Ag_{5-x} Te_3$
Хастит	$CoSe_2$		
Штиллент	ZnSe		
Эбкайрит	AgCuSe		
Эскеборнит	CuFeSe <sub>2</sub>		

Минералы теллура значительно более распространены, чем минералы селена и вследствие этого лучше изучены. Наряду с довольно значительными, порой даже промышленными скоплениями некоторых теллуридов, для них в общем также наиболее характерными являются микроскопические размеры выделений, что затрудняет их диагностику.

Как и селен, теллур дает устойчивые соединения с элементами высоких порядковых номеров: свинцом, ртутью, серебром, золотом, медью, железом, никелем, кобальтом, висмутом, сурьмой, мышьяком, платиной и палладием. В отличие от селена, теллур образует большое количество соединений с золотом, которые довольно часто встречаются в природных условиях и даже порой образуют промышленные месторождения. Эта исключительная особенность теллура соединяться с золотом, по мнению В.И. Лебедева (1957), обязана тому, что золото обладает чрезвычайно высокими связеобразующими свойствами, которые характерны также и для теллура, имеющего, кроме того, большие размеры ионного и атомного радиусов. Вследствие этого теллур способен образовывать с золотом наиболее выгодные в энергетическом отношении соединения.

Следует остановиться на особенностях минералогии селена и теллура в медно-никелевых месторождениях (табл. 3).

Селениды в медно-никелевых рудах до последнего времени не отмечались и впервые были установлены нами в Октябрьском медно-никелевом месторождении (Коваленкер и др., 1971).

В отличие от селенидов минералы теллура являются достаточно распространенными в медно-никелевых месторождениях. Характерной особенностью теллуридной минерализации медно-никелевых руд является преобладание среди теллуридов специфических соединений теллура с платиной и палладием, не известных в рудах месторождений других генетических типов. Эти минералы — мончейит, майченерит, котульскит, меренскит, темагамит, теларгпалит, впервые установленные в природе в последние годы (Генкин и др., 1963; Kingston, 1966; Cabri et al., 1973; Коваленкер и др., 1974<sub>3</sub>), пользуются относительно широким распространением во многих медно-никелевых месторождениях мира (Генкин и др., 1963, 1972<sub>1</sub>; Kingston, 1966; Rucklidge, 1969; Cabri et al., 1971, 1972, 1973; Коваленкер, и др., 1972, 1974<sub>3</sub>).

Таблица 3

Распространенность минералов селена и теллура в медно-никелевых месторождениях\*

Минерал	Талнах- ский руд- ный узел (Нориль- ский район)	Мончегорское (Коль- ский полу- остров)	Хауто- ваарское (Коре- лия)	Место- рожде- ния группы Садбери (Канада)	Комплекс Стиллуп- тер, Монтана (США)	Рустенбург, Риф Меренс- кого (Ю. Африка)
Алтант PbTe	+	+	+	+		
Боровскит $Pd_3 SbTe_4$				+		
Гессит $Ag_2 Te$	+	+		+		
Калаверит $AuTe_2$		+				
Клаусталит PbSe	+					
Котульскит $Pd(Te, Bi)$	+	+			+	+
Майченерит $PdTeBi$	+	+		+		
Мелонит $NiTe_2$		+				
Мелонит палладиевый $(Ni, Pd)(Te, Bi)_2$				+		
Меренскинит $Pd(Te, Bi)_2$	+				+	+
Мончеит $Pt(Te, Bi)_2$	+	+				+
Сильванит $AuAgTe_4$		+				
Тедаргпалит $(Pd, Ag)_4 Te$	+					
Темагамит $Pd_3 HgTe_4$				+		+ (?)
Тетрадимит $Bi_2 Te_2 S$		+		+		
Теллурристый винсентит	+					
$Pd_3 (As, Te)$						
Минерал	+					
$(Pd, Ag)_3 (Ag, Pb)(Te, Se)$						
Минерал $Pd(Pb, Te, Bi)$	+					
Минерал $PdPb(S, Se)$	+					
Теллуросурманистый инсизвант $Pt(Bi, Sb, Te)_2$	+					

\*При составлении таблицы использованы материалы: Талнахский рудный узел – Коваленкер и др., 1971; Генкин и др., 1972; Коваленкер и др., 1972; Коваленкер и др., 1974<sub>3</sub>; Разин, Бегизов, 1973; Мончегорское месторождение – Генкин и др., 1963; Юшко-Захарова, 1964; Хаутоварское рудопроявление – Яловой и др. 1973; Месторождения группы Садбери – Hawley, 1962; Cabri en al., 1973; комплекс Стиллуптер – Cabri, Pickwick, 1974; Рустенбург – Kingston, 1966.

Теллуриды других металлов — алтант, гессит, сильванит, калаверит, мелонит, теллуроисмутит, тетрадимит, — столь характерные для типичных гидротермальных месторождений, в медно-никелевых рудах играют подчиненную роль в сравнении с соединениями теллура с платиной и палладием. Алтант, гессит, сильванит, калаверит, мелонит, тетрадимит известны в месторождениях Кольского полуострова (Юшко-Захарова, 1964), а также в рудах месторождений Садбери (Cabri, Harris, 1973) и Талнахского рудного узла (Коваленкер и др., 1972; Разин, Бегизов, 1973).

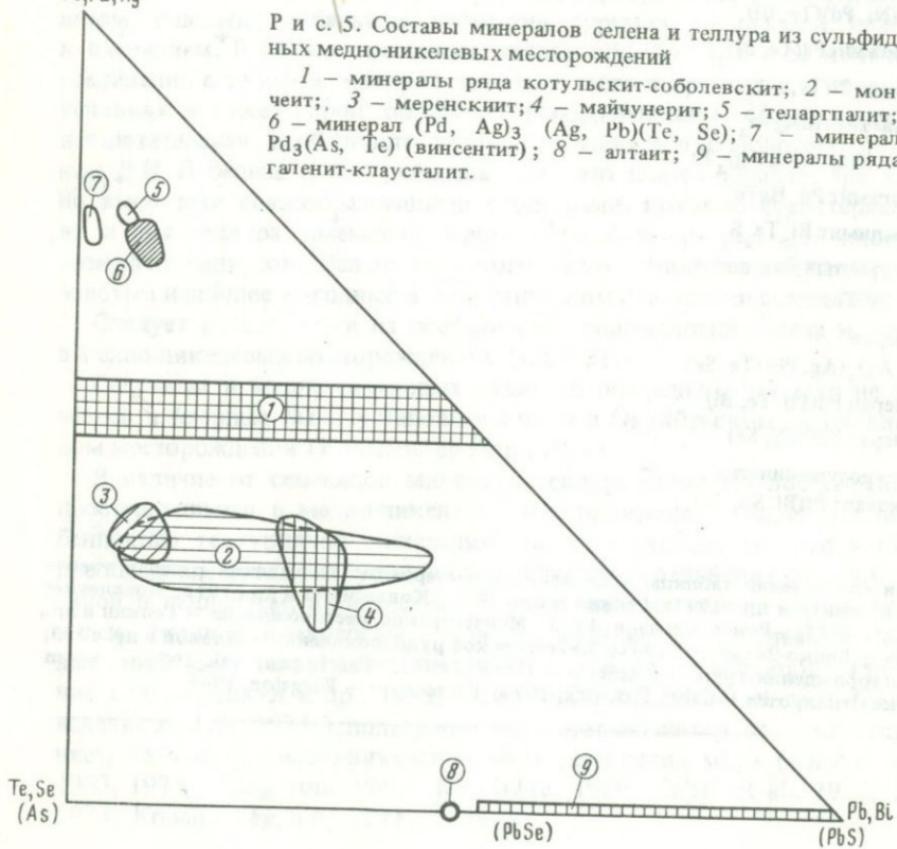
В ходе настоящих исследований нами в месторождениях Талнахского рудного узла установлено большое количество природных соединений теллура с палладием, некоторые из которых являются новыми минеральными видами. Особенности состава известных в настоящее время в медно-никелевых месторождениях природных соединений теллура с платиной и палладием хорошо видны на треугольной диаграмме составов (рис. 5), построенной в координатах (Pt, Pd, Ag) — (Te, As, Sb) — (Pb, Bi). На эту диаграмму нанесены составы минералов теллура и селена по литературным и собственным данным.

При анализе диаграммы составов выявляется несколько характерных особенностей теллуридной минерализации медно-никелевых

Pt, Pd, Ag

Рис. 5. Составы минералов селена и теллура из сульфидных медно-никелевых месторождений

1 — минералы ряда котульскит-соболевскит; 2 — мончейт; 3 — меренскинит; 4 — майчунерит; 5 — теларгплит; 6 — минерал  $(\text{Pd}, \text{Ag})_3 (\text{Ag}, \text{Pb})(\text{Te}, \text{Se})$ ; 7 — минерал  $\text{Pd}_3(\text{As}, \text{Te})$  (винсентит); 8 — алтант; 9 — минералы ряда галенит-клаусталит.



месторождений. Во-первых, среди минералов теллура преобладают соединения этого элемента с палладием — котульскит, майнерит, меренскиит, темагамит, теларгпалит,  $(\text{Pd}, \text{Ag})_3(\text{Ag}, \text{Pb})(\text{Te}, \text{Se})$ ,  $\text{Pd}_3(\text{As}, \text{Te})$  и др. Соединения теллура с платиной представлены, по сути дела, одним минералом — мончеитом. Объясняется это, по-видимому, тем, что соединения теллура с палладием, вероятно, являются энергетически более выгодными, чем соединения теллура и платины. Во-вторых, большинство из известных природных соединений платины и палладия с теллуром относятся не к собственно теллуридам, а являются висмутеллуридами. Содержания теллура и висмута в этих минералах взаимно дополняют друг друга. Особенно широко изоморфизм теллура и висмута проявлен в минералах ряда котульскит — соболевскит и мончеит (см. рис. 5). В отдельных минералах с теллуром и висмутом, по-видимому, изоморфны также свинец, сурьма и мышьяк.

Наконец, заслуживает внимания тот факт, что если в месторождениях других типов (полиметаллических, колчеданных и т.д.) минералы теллура представлены в основном теллуридами свинца, висмута, золота и серебра, то в медно-никелевых рудах, для которых характерны относительно высокие содержания и золота и серебра, теллуриды указанных металлов распространены в меньшей степени. Более того, серебро часто входит в состав сложных соединений теллура с палладием. Если с этой точки зрения рассмотреть ряд возрастающего "относительного сродства к теллуре", выведенный В.В. Щербиной (1937) :  $\text{Cu}-\text{Pb}-\text{Ni}-\text{Bi}-\text{Hg}-\text{Ag}-\text{Au}$ , то следует признать, что платина и особенно палладий обладают относительно большим сродством к теллуре, чем даже серебро и золото. Этим, по-видимому, следует объяснить и геохимическую соподчиненность теллура в медно-никелевых месторождениях не столько сере, сколько платиноидам, что выражается в совместной концентрации этих элементов в одних и тех же типах руд.

Таким образом, рассмотренные выше особенности теллуридной минерализации в медно-никелевых месторождениях показывают, что образование теллуридов проходило в специфических условиях, при которых одни элементы, такие как висмут и сурьма, в большей степени проявляют свои металлоидные свойства, чем металлические, и фигурируют в качестве анионов (котульскит, мончеит и т.д.), а другие, например свинец, могут быть как катионами (галенит, клаусталит, алтait), так и анионами (свинецсодержащий котульскит, полярит, минерал  $\text{Pd}(\text{Pb}, \text{Te}, \text{Bi})$  и т.д.).

## МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОВЫДЕЛЕНИЙ МИНЕРАЛОВ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА

Исследования микроскопически малых, редко превышающих 150–200 мкм, выделений встреченных нами минералов селена и теллура проводились с использованием локальных количественных методов диагностики. В первую очередь, к ним относится изучение химического состава минералов на микрозонде, исследование спектров отражения на спектрофотометре "ПИОР" конструкции Л.Н. Вяльсова, рентгено-

метрические исследования микроколичеств вещества по методу А.Д. Генкина и Н.В. Королева, измерение микротвердости.

Количественный анализ состава всех исследованных минералов выполнялся на микроанализаторе MS-46 с электронным зондом И.П. Лапутиной. Методика микрорентгеноспектрального анализа селенидов и теллуридов опубликована (Коваленкер, Лапутина и др., 1972).

Спектры отражения минералов исследовались на спектрофотометре "ПИОР" с автоматической регистрацией Л.Н. Вяльсовым.

Порошкограммы минералов по методу резинового шарика снимались в Лаборатории минерографии ИГЕМ АН ССР Г.В. Басовой в камере РКД-57,3, расчет и индицирование рентгенограмм производился Т.Л. Евстигнеевой.

Микротвердость минералов по вдавливанию была измерена на микротвердомере ПМТ-3.

Оптические свойства минералов — цвет, анизотропия, двутрение, цвета анизотропии — изучались как в воздухе, так и в масляной иммерсии при максимальных увеличениях микроскопа. При микроскопическом исследовании полированных шлифов большое внимание уделялось изучению структурных взаимоотношений минералов теллура между собой и с окружающими сульфидами.

В некоторых типах руд, например пирротиновых, при микроскопическом изучении полированных шлифов минералы теллура не были встречены. С целью выявления теллуридов из объединенной пробы пирротиновых руд весом 7,2 кг (поле рудника "Таймырский", скв. КЗ-1003, 1007, 1008, 1111, 1028, 1028<sup>КЛ</sup>) на концентрационном столе Н.Н. Батыревой были получены концентраты тяжелой фракции. Головки концентратов домывались в бромоформе. Полученный материал запрессовывался в шашки из сополимера с электропроводным наполнителем и исследовался по изложенной выше методике. Таким путем в пирротиновых сплошных рудах удалось установить ряд теллуридов и теллурсодержащих минералов.

## ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛОВ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА

При детальном минерографическом изучении полированных шлифов из различных типов медно-никелевых руд Тулнахского и Октябрьского месторождений были установлены разнообразные по составу теллуриды, многие из которых являются новыми минеральными видами, а также селениды, ранее не известные в месторождениях этого генетического типа (табл. 4).

### Селениды и селенсодержащие минералы

Минералы ряда галенит — клаусталит (селенистый галенит, галеноклаусталит и клаусталит) встречаются во всех трех типах медно-никелевых руд месторождений Тулнахского рудного узла. Минералы с наиболее высоким содержанием селена характерны для борнит-миллерит-халькопиритовых прожилково-вкрапленных экзоконтак-

Таблица 4

Селениды, теллуриды и минералы-концентраторы селена и теллура, установленные в рудах Талнахского и Октябрьского месторождений

Селениды	Теллуриды
Клаусталит PbSe*	Алтант PbTe*
Галено-клаусталит Pb(Se, S)*	Гесит Ag <sub>2</sub> Te
	Мончейт Pt(Te, Bi) <sub>2</sub>
	Майнерит PdTeBi
	Меренскит Pd(Te, Bi) <sub>2</sub> *
	Котульскит Pd(Te, Bi)*
	Теларгпалит (Pd, Ag) <sub>4+X</sub> Te**
	(Pd, Ag) <sub>3</sub> (Ag, Pb)(Te, Se)**
	Pd <sub>3</sub> (As, Te)**
	Теллуросурьмянистый инсивант
	Pt(Bi, Sb, Te) <sub>2</sub> *
	Теллурристый соболевский Pd(Bi, Te)*
	Pd(Pb, Te, Bi)*

#### Минералы-концентраторы

селена	Se, %	теллур	Te, %
Селенистый галенит Pb(S, Se)*	0,11–9,2	Нигглиит PtSn*	0,9
PdPb(S, Se)**	1,0–4,7	Полярит Pd(Pb, Bi)	1,1
Теларгпалит	0,1–0,6	Pd <sub>2</sub> (Sb, Sn)*	0,12
(Pd, Ag) <sub>3</sub> (Ag, Pb)(Te, Bi)	1,4–3,7	Фрудит PdBi <sub>2</sub>	0,4
		Соболевский PdBi	0,2–3,1

\* Минералы, впервые установленные автором в рудах месторождений.

\*\* Минералы, впервые установленные в природе.

товых руд, а также троилит-кубанит-халькопиритовых вкрашенных руд из такситовых габбро-долеритов. Наоборот, селенистые галениты (до 1–1,5% селена) встречаются в сплошных халькопиритовых (талнахитовых, моихукитовых) рудах, а также пирротин-халькопиритовых прожилково-вкрашенных экзоконтактовых рудах. Для остальных минеральных разновидностей руд характерен галенит с содержанием селена 0,01–0,1%.

В экзоконтактовых прожилково-вкрашенных рудах борнит-миллерит-халькопиритового состава галеноклаусталит и клаусталит находятся в ассоциации с халькопиритом, миллеритом, борнитом, самородным серебром, гематитом, минералами группы платины – куперитом, брэггитом, высоцкитом, теллуридами, а также с жильными минералами – кальцитом, баритом, ангидритом. Установлено, что наиболее тесная ассоциация селенидов наблюдается с теллуридами и очень редким минералом PdPb(S, Se), с которыми они образуют срастания или единую систему цепочек

зерен. Интересно, что клаусталит чаще встречается в непосредственной близости от зерен теллуридов или нарастает на них, а галеноклаусталит обычно находится в халькопирите, борните или среди нерудных минералов на некотором удалении от скоплений теллуридов.

Во вкрапленных в интрузивных породах троилит-кубанит-халькопиритовых рудах галеноклаусталит находится в тесных срастаниях с халькопиритом и ассоциирует с паоловитом, теллуритым соболевским, мончейтом и самородным серебром.

В сплошных существенно медиистых по составу рудах встречается селенсодержащий галенит, ассоциирующий с минералами группы платины (паоловит, полярит, сперрилит, соболевский и др.) или находится в борните в виде тонких закономерно ориентированных пластинчатых выделений. Подобные выделения напоминают структуры распада твердого раствора.

Галеноклаусталит и клаусталит встречается в виде округлых, или неправильных, ксеноморфных зерен (табл. V, 3), размеры которых обычно находятся в пределах 5–30 мкм в поперечнике и не превышают 160 мкм.

В отраженном свете галеноклаусталит и клаусталит отличить трудно — оба минерала изотропны, по сравнению с галенитом имеют ясный голубой оттенок (особенно на фоне халькопирита и борнита) и повышенную отражательную способность. Различия между минералами уверенно устанавливаются при количественном измерении их спектров отражения (Коваленкер и др., 1971). На рис. 6 показаны спектры отражения галенита, селенсодержащего галенита, галеноклаусталитов и клаусталита. Из полученных данных следует, что величина отражения по мере перехода от галенита к клаусталиту закономерно возрастает. Несколько меняется и форма спектра. Так, для галенита в диапазоне 660–740 нм намечается слабый широкий максимум. Вхождение в решетку галенита малых количеств селена приводит к сдвигу этого максимума. В галеноклаусталитах этот максимум выражен менее четко. У клаусталита же в указанном диапазоне длин волн фиксируется минимум. Меняется и крутизна спектров отражения. Если у галенита величина ( $R_{440} - R_{600}$ ) составляет 6,6% абс.%, то у клаусталита она достигает 10,5 абс.%. По этой причине галеноклаусталит и клаусталит в срастаниях с халькопиритом и борнитом кажутся ярко-голубыми.

Особенно четко различия между галенитом, галеноклаусталитом и клаусталитом устанавливаются при изучении их химического состава. К галеноклаусталитам мы относим минералы, содержащие от 33 до 66 мол.% PbSe в PbS, к клаусталитам — содержащие свыше 66 мол.% PbSe (рис. 7).

Составы минералов ряда галенит — клаусталит, встречающихся в рудах Талнахского и Октябрьского месторождений, приведены в табл. 5.

Равномерность распределения селена в исследуемых минералах проверялась измерением интенсивности селена во многих точках зерна, а также путем сканирования зерен в характеристическом излучении селена по линии  $L_{a_1}$  (рис. 18). Исследования показали, что селен в минералах

Таблица 5

Химический состав (в вес. %) минералов ряда галенит – клаусталит из месторождений Талнахского рудного узла

Номер точки на рис. 7	Pb	Cu	Ni	S	Se	Сумма	Формула
1*	86,6	–	–	12,2	0,2	99,0	$Pb_{1,09}(S_{0,99}Se_{0,01})$
2	85,0	–	–	13,1	0,55	98,65	$Pb_{0,99}(S_{0,98}Se_{0,02})$
3	85,5	–	–	12,8	0,9	99,3	$Pb_{1,0}(S_{0,97}Se_{0,03})$
4	82,1	1,9	0,7	13,6	1,2	99,5	$(Pb, Cu, Ni)_{1,0}(S_{0,97}Se_{0,03})$
5	83,0	–	–	11,4	3,7	98,1	$Pb_{0,99}(S_{0,88}Se_{0,12})$
6	80,9	–	–	9,2	8,8	98,8	$Pb_{0,98}(S_{0,72}Se_{0,28})$
7	79,9	–	–	8,8	10,1	98,2	$Pb_{0,96}(S_{0,68}Se_{0,32})$
8	79,0	–	–	7,0	12,2	98,2	$Pb_{1,01}(S_{0,58}Se_{0,42})$
9	80,0	–	–	7,0	13,7	100,7	$Pb_{0,98}(S_{0,56}Se_{0,44})$
10	79,1	–	–	6,2	14,9	100,2	$Pb_{1,01}(S_{0,51}Se_{0,49})$
11	78,5	–	–	5,5	15,5	99,5	$Pb_{1,03}(Se_{0,53}S_{0,47})$
12	76,4	–	–	5,1	16,5	98,0	$Pb_{1,00}(Se_{0,57}S_{0,43})$
13	74,6	–	–	1,4	24,9	100,9	$Pb_{1,01}(Se_{0,88}S_{0,12})$

\* № 1, 5, 9, 11 – вкрапленные руды в интрузивных породах, № 2–4, 6–8, 10, 12, 13 – вкрапленные и прожилково-вкрапленные экзоконтактовые руды.

распределен равномерно и его содержания не являются следствием микроВКЛЮЧЕНИЙ селенидов в галените.

Ряд полной изоморфной смесимости между галенитом и клаусталитом экспериментально доказан И. Ирли (Earley, 1950), Н.Д. Синдеевой и А.А. Годовиковым (1959) и Х. Райтом и др. (Wright et al., 1965). Эти исследователи показали, что по мере перехода от галенита к клаусталиту происходит закономерное (подчиняющееся закону Вегарда) изменение параметров решетки от  $a_0 = 5,936 \text{ \AA}$  для галенита до  $a_0 = 6,140 \text{ \AA}$  для клаусталита. Нами показано, что между крайними членами ряда также закономерно изменяются и оптические свойства минералов (рис. 8).

В составе селенистого галенита из миллерит-халькопирит-борнитовых с полидимитом и валлеритом вкрапленных экзоконтактовых руд Октябрьского месторождения (рудник "Комсомольский") микрорентгеноспектральным анализом, помимо свинца, серы и селена, были определены медь и никель (табл. 5, анализ 4).

Многократные измерения интенсивности Cu и Ni во многих точках зерна минерала показывают, что эти элементы распределены в галените равномерно и их содержания присущи самому галениту, а не включениям минералов меди и никеля.

Интересен парагенезис минерала – полидимит, развивающийся по миллериту и халькопириту, – штромейерит, валлерит. Медьсодержащие галениты были описаны А. Кларком (Clark, Sillitoe, 1971) в медных ру-

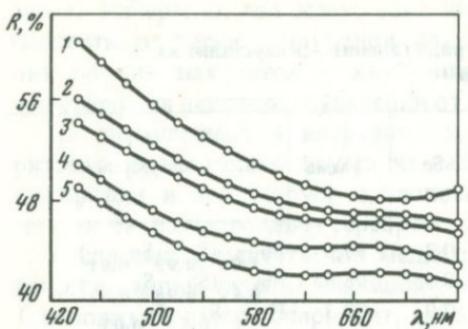


Рис. 6. Спектры отражения конечных и промежуточных членов ряда галенит-клаусталит

1 – PbSe (сингт); 2 – Pb( $Se_{0,57}S_{0,43}$ );  
3 – Pb( $Se_{0,68}Se_{0,32}$ ); 4 – Pb( $Se_{0,92}$  ·  $Se_{0,08}$ ); 5 – PbS

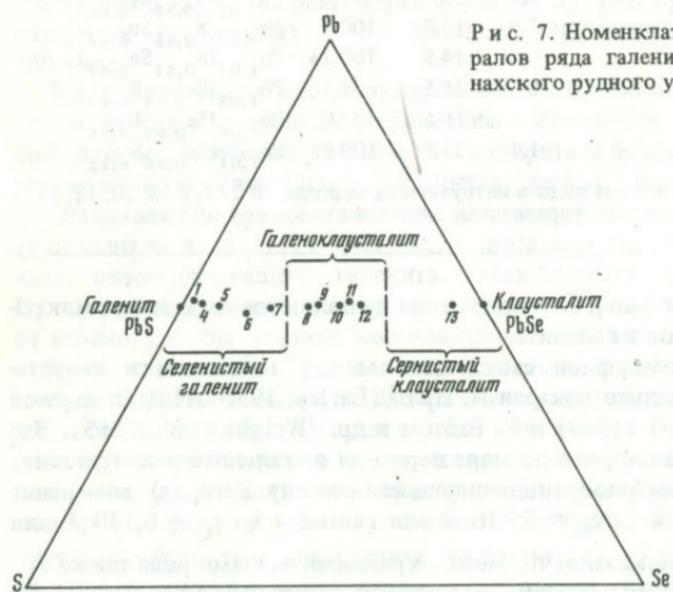


Рис. 7. Номенклатура и составы минералов ряда галенит-клаусталит из Талнахского рудного узла

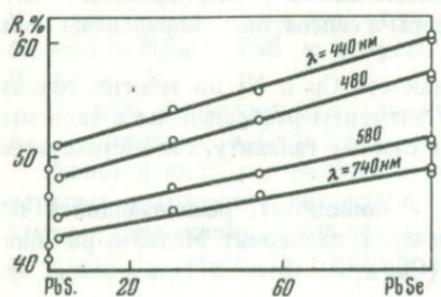


Рис. 8. Зависимость отражения от состава минералов ряда галенит-клаусталит

дах чилийских месторождений. В некоторых разностях галенита им было установлено до 17% меди. А. Кларк считает, что эти минералы являются твердыми растворами  $PbS-Cu_2S$ .

Минерал  $PdPb(S, Se)$  установлен в борнит-миллерит-халькопиритовых прожилково-вкрапленных экзоконтактовых рудах Октябрьского месторождения. Минерал образует округлые, иногда удлиненные зерна, размеры которых не превышают 25–30 мкм. Чаще всего выделения минерала располагаются в халькопирите, ассоциируя с клаусталитом, котульским, теларгпалитом и  $(Pb, Ag)_3(Ag, Pb)(Te, Se)$ , с которыми он образует единые цепочки зерен.

Под микроскопом  $PdPb(S, Se)$  бледно-голубого цвета с легким сиреневатым оттенком. Величина отражения минерала близка  $R$  галенита ( $\lambda_{nm} - 440, 460, 480, 500, 520, 540, 560, 580, 600, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 740$  соответственно  $R (\%) - 42,4; 43,7; 44,7; 45,1; 44,9; 45,2; 45,1; 44,8; 44,8; 45,4; 45,7; 46,3; 46,5; 46,9; 47,0; 47,2$ ).

Минерал ясно анизотропный, в скрещенных николях изменяет цвет от серо-голубого до коричнево-красного.

Таблица 6

Химический состав минерала  $PdPb(S, Se)$

Номер анализа	Палладий		Платина		Свинец		Висмут	
	%	атомн-клич.	%	атомн-клич.	%	атомн-клич.	%	атомн-клич.
1	32,4	0,305	1,2	0,006	42,2	0,204	9,5	0,046
2	32,4	0,305	0,4	0,002	47,7	0,230	4,6	0,022
3	32,4	0,305	0,9	0,005	40,0	0,193	9,9	0,047
4	33,3	0,313	1,2	0,006	45,3	0,221	3,6	0,017

Таблица 6 (окончание)

Номер анализа	Сера		Селен		Сумма	Формула
	%	атомн-клич.	%	атомн-клич.		
1	7,8	2,243	4,3	0,055	97,4	$(Pd_{1,02}Pt_{0,02})_{1,04}(Pb_{0,69} \cdot Bi_{0,15})_{0,84}(S_{0,81}Se_{0,19})$
2	7,8	0,243	4,7	0,059	97,6	$(Pd_{1,01}Pt_{0,01})_{1,02}(Pd_{0,76} \cdot Bi_{0,07})_{0,83}(S_{0,8}Se_{0,2})$
3	7,8	0,243	3,9	0,049	94,9	$(Pd_{1,04}Pt)_{1,06}(Pb_{0,66}Bi_{0,16})_{0,82} \cdot (S_{0,83}Se_{0,17})$
4	10,2	0,318	1,0	0,013	94,6	$(Pd_{0,94}Pt_{0,02})_{0,96}(Pb_{0,67} \cdot Bi_{0,05})_{0,72}(S_{0,96}Se_{0,04})$

В составе минерала, определенного в нескольких зернах, установлены значительные колебания в содержаниях свинца и висмута, причем с увеличением концентрации одного элемента происходит уменьшение другого и наоборот. Содержания палладия и платины, а также серы и селена, связанны обратной зависимостью, как свинец и висмут (табл. 6).

В составе некоторых зерен минерала определены небольшие количества меди и железа, которые были, вероятно, при анализе захвачены электронным зондом из окружающего минерал халькопирита, так как размеры выделений минерала весьма малы.

В упрощенном виде формулу минерала можно представить как  $\text{PdPb}(\text{S}, \text{Se})$ .

Помимо рассмотренных выше минералов, значительные количества селена (до 5%) установлены в таких минералах, как теларгпалит и  $(\text{Pb}, \text{Ag})_3(\text{Ag}, \text{Pb})(\text{Te}, \text{Se})$ , в которых селен изоморфно замещает теллур, а не серу.

### Теллуриды, висмутотеллуриды и теллурсодержащие минералы

Алтait  $\text{PbTe}$  является одним из наиболее широко распространенных в природе теллуридов. Известен он был и в некоторых медно-никелевых месторождениях — Мончегорском (Юшко-Захарова, 1964), Фруд, округа Садбери (Cabri et al., 1973). В последние годы установлен в Талнахском и Октябрьском месторождениях (Коваленко и др., 1972).

В месторождениях Талнахского рудного узла алтait встречен во вкрашенных рудах в интрузивных породах, где он в срастаниях с паоловитом находится среди выделений халькопирита и пентландита, и в основном в сплошных рудах. В сплошных рудах пирротинового состава алтait ассоциирует с теллуристым соболевским, паоловитом, самородным серебром и минералом  $\text{Pt}(\text{Bi}, \text{Sb}, \text{Te})_2$ , в которых он образует ксеноморфные включения и прожилковидные выделения. В сплошных существенно халькопиритовых (талнахитовых, моихукитовых) рудах алтait обычно нарастает на агрегаты зерен фрудита, нийглиита и паоловита (табл. VI, 1) или в виде очень мелких (2–10 мкм) ксеноморфных обособленных выделений располагается среди сульфидов. Наибольшие скопления алтата встречены в своеобразных по составу галенит-халькопиритовых отжилках от мощной залежи существенно халькопиритовых руд. Халькопирит и галенит в этих отжилках находятся в субграфических эвтектоидных срастаниях, причем наблюдения под микроскопом показывают, что галенит замещается халькопиритом. Алтait в этих образованиях представлен тремя морфологическими разновидностями: закономерно расположенные в галените разнообразными по форме выделениями (табл. VI, 2), крупными (до первых мм) обособленными зернами, тяготеющими к границам галенита и халькопирита (табл. VI, 3), и, наконец, крупными выделениями, находящимися в срастаниях минералами палладия.

Алтait имеет весьма характерные оптические свойства — очень высокое отражение (рис. 9), ярко-белый цвет с легким голубовато-зелено-

Рис. 9. Спектр отражения  $R, \%$  алтита из Талнахского рудного узла

ватым оттенком. В скрещенных николях он изотропен. Дебаеграмма алтита из Талнахского рудного узла идентична эталонной.

Химический состав алтита из различных типов руд приведен в табл. 7. Состав минерала весьма близок стехиометрическому. Из особенностей следует отметить небольшие примеси меди и сурьмы в алтите из сплошных существенно халькопиритовых руд. Структурные взаимоотношения алтита с находящимися с ним в срастании минералами группы платины свидетельствуют о близком времени образования всех ассоциирующих минералов. Возможно, алтит кристаллизовался несколько позже платиноидов, так как он весьма часто слагает периферические части срастаний, а в некоторых случаях образует извилистые выделения, проникающие внутрь срастаний по границам зерен платиновых минералов. Характерно, что многие ассоциирующие с алтитом платиновые минералы содержат небольшие количества теллура.

Гессит  $\text{Ag}_2\text{Te}$  — характерный минерал многих полиметаллических и колчеданных месторождений. В медно-никелевых месторождениях известны единичные находки гессита (Юшко-Захарова, 1964; Разин, Бегизов, 1973; Cabri et al., 1973).

Гессит встречен Л.В. Разиным и В.Д. Бегизовым (1973) во вкрашенных рудах из тацитовых габбро-долеритов Октябрьского месторождения. В составе минерала микрозондом определены (%):  $\text{Ag} - 60,1$ ;  $\text{Cu} - 0,2$ ;  $\text{Pd} - 0,4$ ;  $\text{Te} - 37,3$ ;  $\text{Ni} - 1,5$ ;  $\text{Pb} - 0,1$ ; сумма — 99,7, что соответствует формуле  $(\text{Ag}_{1,910}\text{Ni}_{0,087}\text{Pd}_{0,013}\text{Cu}_{0,11})_{2,021}(\text{Te}_{0,988}\cdot\text{Pb}_{0,002})_{1,00}$ .

Дебаеграмма гессита из Октябрьского месторождения соответствует эталонной.

Мончейт  $\text{Pt}(\text{Te},\text{Bi})_2$  является весьма редким минералом. Он был впервые описан А.Д. Генкиным (Генкин и др., 1963) в рудах Мончегорского месторождения. Найдены минерала известны также в месторождениях Рустенбург, ЮАР (Kingston, 1966), Моихук, ЮАР (Cabri, 1972<sub>1</sub>) и Октябрьском, Норильский район (Генкин и др., 1972<sub>1</sub>).

В Октябрьском месторождении мончейт встречен во вкрашенных рудах в породах интрузива, где он совместно с майченеритом развит среди сульфидов, выполняющих промежутки между зернами породообразующих силикатов в тацитовых габбро-долеритах. Оба минерала находятся в тесных срастаниях среди халькопирита (Генкин и др., 1972<sub>1</sub>). Нами минерал наблюдался во вкрашенных рудах в срастаниях с паоловитом и теллуристым соболевскитом, а также в сплошных

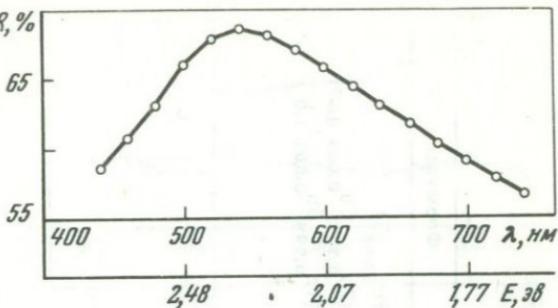


Таблица 7

Химический состав (вес.%) алтита из месторождений Талнахского рудного узла

№ п/п	Свинец	Теллур	Сера	Медь	Сурьма	Сумма	Формула
1*	59,8	36,4	—	—	—	96,2	$Pb_{0,996}Te$
2	60,0	37,3	—	0,2	0,2	97,9	$(Pb_{0,992}Cu_{0,001})_{0,993}$ $(Te_{0,999}Sb_{0,001})_{1,0}$

\* 1 – сплошные пирротиновые руды; 2 – сплошные кубанит-халькопиритовые руды.

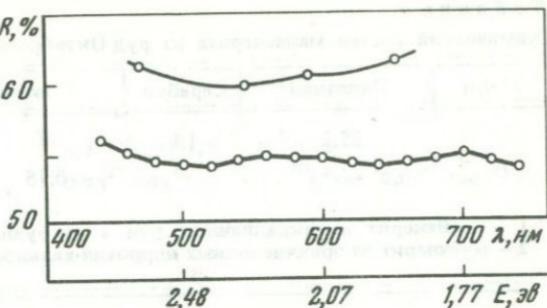
Таблица 8

Химический состав мончейта из месторождений Талнахского рудного узла (вес.%)

№ п/п	Платина	Палладий	Теллур	Висмут	Свинец	Сурьма	Сумма	Формула
1*	41,0	—	41,0	19,0	—	—	101,0	$Pt_{1,02}(Te_{1,56}Bi_{0,44})_{2,0}$
2	35,0	1,0	33,0	30,0	—	—	99,0	$(Pt_{0,89}Pd_{0,05})_{0,94}(Te_{1,29}Bi_{0,71})_{2,0}$
3	33,5	—	15,9	50,0	—	—	99,4	$Pt_{0,94}(Te_{0,69}Bi_{1,31})_{2,0}$
4	37,2	1,8	50,1	5,5	0,7	0,3	95,6	$(Pt,Pd)_{0,98}(Te_{1,86}Bi_{0,12}Pb_{0,02})_{2,0}$

\* 1 – Мончейт из вкрапленных руд в интрузивных породах (по Генкину и др., 1972); 2 – мончейт из троилит-пирротин-кубанит-халькопиритовых вкрапленных в интрузивных породах руд; 3 – мончейт из сплошных троилит-пирротин-халькопиритовых руд; 4 – мончейт из миллерит-халькопиритовых брекчииевидных руд.

Рис. 10. Спектры отражения теллуро-сурьмянистого инсизвайта (сплошная линия) и сурьмянистого инсизвайта (пунктир, по Cabri, Harris, 1972<sub>2</sub>)



троилит-пирротин-халькопиритовых рудах Октябрьского месторождения, где он в виде мельчайших (5–10 мкм) ксеноморфных выделений находится в срастании с фрудитом и паоловитом среди троилита, кубанита и халькопирита, и, кроме того, в миллерит-халькопиритовых брекчевидных рудах в срастании с котульским среди халькопирита (табл. VII, 1).

В отраженном свете мончейт серовато-белый, с высокой отражательной способностью и отчетливым двуотражением без изменения оттенков. В скрещенных николях минерал сильно анизотропен.

Химический состав мончейтов из Октябрьского месторождения приведен в табл. 8. Резкие колебания в содержаниях теллура и висмута указывают на широкий изоморфизм между этими элементами. Интересно, что мончейт с повышенным содержанием висмута находится в срастании с фрудитом – минералом, содержащим очень высокие (около 80 вес.%) количества этого элемента, тогда как мончейт из брекчевидных миллерит-халькопиритовых руд, в котором  $\text{Te} > \text{Bi}$ , находится в срастании с котульским, почти не содержащим висмут. Анализы мончейта из других медно-никелевых месторождений (Kingston, 1966; Cabri, 1972<sub>1</sub>) показывают, что соотношения  $\text{Te}:\text{Bi}$  в них близко к мончейту из вкрашенных руд Октябрьского месторождения.

Теллуро-сурьмянистый инсизвайт  $\text{Pt}(\text{Bi}, \text{Sb}, \text{Te})_2$ . Минерал сурьмянистый инсизвайт  $\text{Pt}(\text{Bi}, \text{Sb})_2$ , впервые установлен Л. Кабри (Cabri, 1972<sub>1</sub>) в медно-никелевых рудах месторождения Инсизва. Собственно инсизвайт  $\text{PtBi}_2$  – пока в природных условиях не встречен.

Минерал, состав которого ( $\text{Pt} - 32,2$ ,  $\text{Pd} - 1,9$ ,  $\text{Te} - 11,2$ ,  $\text{Sb} - 12,7$ ,  $\text{Pb} - 1,1$ ,  $\text{Bi} - 40,1$  вес.%, сумма – 99,3) отвечает формуле  $(\text{Pt}_{0,9}\text{Pd}_{0,1}) \cdot (\text{Bi}_{1,04}\text{Sb}_{0,57}\text{Te}_{0,52})_{2,13}$ , встречен нами в платиновом концентрате, полученном отмывкой тяжелой фракции из пробы сплошных пирротиновых руд Октябрьского месторождения. Минерал находится в срастании с алтайтом, соболевским и другими платиновыми минералами (табл. VII). От сурьмянистого инсизвайта из Инсизвы минерал из Октябрьского месторождения отличается присутствием в анионной части теллура и свинца и меньшим количеством висмута, который, вероятно, заместился теллуром.

Под микроскопом минерал серовато-белый, изотропный. Сравнение спектров отражения нашего минерала и инсизвайта из Инсизвы показывает полную идентичность формы спектра (рис. 10). Ввиду малых

Таблица 9

Химический состав майченерита из руд Октябрьского месторождения (вес.%)

№ п/п	Палладий	Серебро	Платина	Сурьма	Теллур
1*	25,2	1,8	—	—	32,5
2	23,4	—	0,75	0,46	33,4

\* 1 — майченерит из вкрапленных руд в интрузиве (по Генкину и др., 1972);  
 2 — майченерит из брекчииевидных пирротин-халькопиритовых руд.

размеров выделений (5–20 мкм) рентгенограмму минерала получить не удалось.

Сходство оптических свойств и состава исследуемого минерала с сурьмянистым инсизвайтом позволяет условно отождествить эти минералы. Вследствие значительных количеств теллура, входящих в состав минерала из Октябрьского месторождения, можно предположительно назвать его теллуро-сурьмянистым инсизвайтом.

Обнаружение инсизвайта в рудах Октябрьского месторождения является первой находкой минерала в месторождениях СССР.

Майченерит  $PdBiTe$ . Вначале этому минералу приписывалась формула  $PdBi_2$ , однако А.Д. Генкиным (Генкин и др., 1963) было показано, что в состав минерала в значительных количествах входит теллур.

Минерал редкий, его находки известны только в рудах медно-никелевых месторождений — Садбери (Hawley, 1962; Cabri et al., 1973), Мончегорском и Октябрьском (Генкин и др., 1963; 1972<sub>1</sub>; Коваленкер и др., 1972).

В Октябрьском месторождении майченерит встречен в срастании с мончейитом среди сульфидов в такситовом габбро-долерите.

Минерал установлен нами также в пирротин-халькопиритовых брекчииевидных рудах, где он в срастании с меренскиитом образует удлиненные прожилковидные выделения в сульфидных минералах. Наиболее часто срастания майченерита и меренскиита тяготеют к прожилкам пирротина второй генерации (табл. VII, 4), которые пересекают и замещают халькопирит и пентландит.

Под микроскопом минерал серо-белого цвета, изотропен. Отражательная способность высокая.

Химический состав майченерита (табл. 9) из вкрапленных руд в интрузиве и из брекчииевидных руд отличается только набором второстепенных элементов. В первом случае минерал содержит 1,8 вес.% серебра, замещающего палладий, во втором — среди элементов-примесей отмечаются платина, сурьма, свинец. При относительно постоянных концентрациях главных элементов минерала такое качественное изменение входящих в майченерит примесных элементов указывает на некоторое изменение состава минералообразующего раствора.

Меренскиит  $Pd(Te, Bi)_2$  — очень редкий минерал. Впервые был установлен Кингстоном (Kingston, 1966) в рудах месторождения

Рустенбург, ЮАР. Затем меренскиит был найден в месторождениях Вернер Лейк и Шрейбер округа Садбери (Rucklidge, 1969).

Участки меренскитового состава отмечались А.Д. Генкиным и др. (1972<sub>2</sub>) среди мончейт-майченеритового срастания.

Нами минерал установлен в пирротин-халькопиритовых брекчевидных рудах Октябрьского месторождения, где он находится в срастании с майченеритом (см. табл. VII, 4).

Под микроскопом меренскиит имеет бело-кремовый цвет, в скрещенных николях — сильно анизотропен. Спектр отражения минерала представлен на рис. 11.

Химический состав минерала (Pd — 27,8, Pt — 0,39, Sb — 0,29, Te — 58,2, Pb — 2,2, Bi — 15,7 вес.%) соответствует формуле  $(\text{Pd}_{0,99} \cdot \text{Pt}_{0,01})_{1,0} (\text{Te}_{1,73} \text{Bi}_{0,28} \text{Pb}_{0,04} \text{Sb}_{0,01})_{2,0}$ . Формула меренскита из Рустенбурга (Kingston, 1966) —  $(\text{Pd}_{0,96} \text{Pt}_{0,04})_{1,0} (\text{Te}_{1,76} \text{Bi}_{0,30})_{2,06}$  — близка минералу из Октябрьского месторождения. Отличительной особенностью меренскитов из Садбери является вхождение в состав минерала больших количеств никеля (5–17 вес.%), который изоморфно замещает палладий, что позволило рассматривать меренскит как минерал, образующий твердый раствор с мелонитом — NiTe<sub>2</sub> (Rucklidge, 1969).

Характерными элементами-примесями в меренските из Октябрьского месторождения являются свинец и сурьма, которые установлены также и в майченерите, ассоциирующем с меренскитом.

Котульский Pd(Te,Bi) — весьма редкий минерал. До настоящего времени был известен лишь в рудах нескольких месторождений: Мончегорского, где он впервые был установлен А.Д. Генкиным (Генкин и др., 1963), Рустенбург, Риф Меренского (Kingston, 1966), а также Стиллуотер, Монтана (Cabri, Pickwick, 1974).

Широкое развитие котульского установлено нами (Коваленкер и др., 1972) в существенно медиистых по составу прожилково-вкрашенных рудах, залегающих в породах экзоконтакта интрузива габбро-долеритов. Наиболее часто минерал встречается в борнит-миллерит-халькопиритовых рудах (табл. VII, VIII, 1), где он ассоциирует с клаусталитом, теларгпалитом,  $(\text{Pd},\text{Ag})_3 (\text{Ag},\text{Pb})(\text{Te},\text{Se})$ ,  $\text{Pd}_3 (\text{As},\text{Te})$ , брэггитом, купритом, самородными серебром и золотом. Индивидуализированные

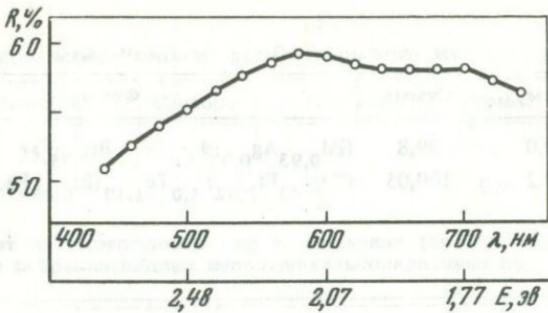


Рис. 11. Спектр отражения меренскиита из Талиахского рудного узла

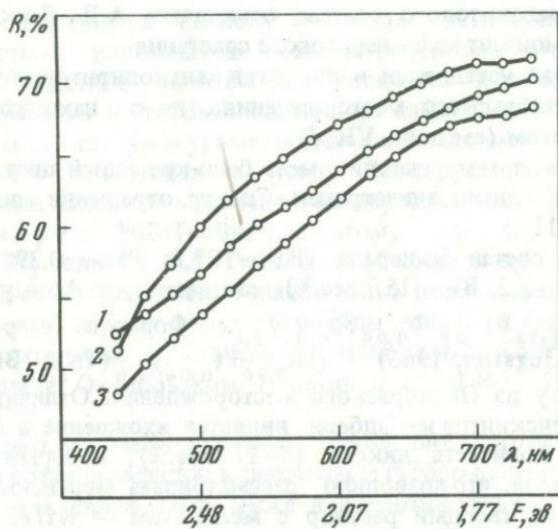


Рис. 12. Спектры отражения минералов

1 — синтетическая фаза  $Pd(Fe_{0,75}Bi_{0,25})$ ; 2 — котульскит из Талиахского рудного узла; 3 — котульскит из Мончегорского месторождения

выделения котульскита, а чаще его срастания с теларгпалитом и другими теллуридами располагаются обычно в виде цепочек округлых и удлиненных зерен среди халькопирита, борнита и миллерита (табл. VIII). Достаточно характерны и прожилковидные выделения срастаний котульскита и теларгпалита (рис. 43). Такие формы выделения минералов свидетельствуют о том, что их кристаллизация началась после отложения основных сульфидов. В то же время, структурные взаимоотношения котульскита с другими теллуридами однозначно указывают на его более раннее выделение по сравнению с теларгпалитом и минералами  $(Pd, Ag)_3 (Ag, Pb) (Te, Se)$  и теллуристым винсентитом (см. табл. VII, VIII, XI).

Очень интересны срастания котульского, встреченного в прожилково-вкрашенных и брекчевидных рудах пирротин-халькопиритового состава. Здесь котульский всегда приурочен к галениту, в котором он образует мельчайшие (доли микрона — первые микробы) округлые или пластинчатые выделения, часто располагающиеся по спайности галенита (табл. VIII, 2). Характерно, что наиболее крупные из этих выделений тяготеют к границам зерен галенита. Различные формы выделения котульского, неравномерность их распределения по площади зерен галенита, частая приуроченность к трещинкам спайности и границам зерен галенита свидетельствуют о совместной кристаллизации обоих минералов. Подобные очень мелкие выделения котульского, меренского и гессита в халькопирите были недавно изучены Л. Кабри и К. Пиквиком (Cabri, Pickwick, 1974) из сульфидов комплекса Стиллуотер, Монтана.

Под микроскопом котульский бело-кремовый, в скрещенных николях анизотропен, с цветным эффектом от серо-голубого до темно-коричневого. Отражение минерала высокое (рис. 12).

Микротвердость котульского (15 измерений при  $P = 20$  г) находится в пределах от 214 до  $405 \text{ кг}/\text{мм}^2$  (среднее —  $274 \text{ кг}/\text{мм}^2$ ). Г. Кингстон (Kingston, 1966) приводит величину микротвердости котульского из Рустенбурга, равную  $236 \text{ кг}/\text{мм}^2$  (среднее из двух значений, при  $P = 15$  г). Колебания величины микротвердости минерала, по-видимому, соответствуют вариациям состава минерала (изоморфизм Te—Bi).

Характерной особенностью состава котульского из руд Октябрьского месторождения является постоянная примесь свинца (до 3,1%), а также значительные колебания в содержаниях теллура и висмута (табл. 10).

В табл. 11 помещены результаты расчета рентгенограммы котульского, произведенного Т.Л. Евстигнеевой (Коваленкер и др., 1972) и для сравнения — межплоскостные расстояния котульских из Мончегорска и Рустенбурга, а также синтетического PdTe.

Рентгенограмма котульского из Октябрьского месторождения почти полностью идентична рентгенограмме котульского из Мончегорска.

Сравнение полученных для котульского из Октябрьского месторождения значений параметров элементарной ячейки с параметрами синтетического PdTe и котульского из Рустенбурга показывает, что параметр  $a$  закономерно увеличивается с возрастанием количества висмута в минералах, т.е. от PdTe к котульским из Октябрьского и Мончегорского месторождений ( $\text{PdTe}$ .  $a_0 = 4,127\text{\AA}$ ; котульский из Рустенбурга:  $\text{Bi} = 17\text{--}20\%$ ,  $a_0 = 4,145\text{\AA}$ , котульский из Мончегорска:  $\text{Bi} = 24\text{--}26\%$ ,  $a_0 = 4,19\text{\AA}$ ; котульский из Октябрьского месторождения:  $\text{Bi} = 22\text{--}31\%$ ,  $a_0 = 4,188\text{\AA}$ ).

Теллуристый соболевскит  $\text{Pd}(\text{Bi},\text{Te})$ . Минерал соболевскит недавно установлен в сплошных существенно халькопиритовых (моихукитовых) рудах Октябрьского месторождения (Евстигнеева и др., 1975). Нами соболевскит был встречен также в сплошных пирротиновых рудах (Коваленкер и др., 1972) и, кроме того, теллуристая его разновидность в сплошных пирротин-халькопиритовых (табл. IX, 1) и вкрашенных в интрузивных породах троилит-пирротин-кубанит-халькопиритовых рудах.

Таблица 10

Химический состав котульского из Талнахского рудного узла (вес.%)

№ п/п	Платина	Палладий	Теллур	Висмут
1*	—	41,4	33,6	22,2
2	—	39,5	36,1	21,3
3	—	39,6	29,2	27,8
4	—	39,0	26,1	30,9
5	0,2	43,5	52,5	4,8
6	0,4	41,0	42,9	14,0

\* 1–4 – котульский из прожилково-вкрапленных борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых руд; 5–6 – котульские из брекчиивидных борнит-петландинт-миллерит-халькопиритовых руд.

Таблица 11

Рентгенограммы котульских

Октябрьское месторождение			Монче-тундра		
$a_0 = 4,188 \pm 0,005 \text{ \AA}$			(Генкин и др., 1963)		
$c_0 = 5,67 \pm 0,01 \text{ \AA}$			$a_0 = 4,19 \pm 0,01 \text{ \AA}$		
$c_0 = 5,67 \pm 0,01 \text{ \AA}$					
№ лин.	J	d, Å	J	d, Å	hkl
1	—	—	3	3,65	$\bar{1}0\bar{1}0$
2	10	3,04	10	3,05	$10\bar{1}1$
3	—	—	1	2,85	0002
4	—	—	1	2,65	—
5	10	2,23	9	2,24	$10\bar{1}2$
6	9	2,08	9	2,09	$11\bar{2}0$
7	4	1,723	6	1,73	$20\bar{2}1$
8	5	1,674	6	1,68	$10\bar{1}3$
9	6	1,528	7	1,53	$20\bar{2}2$
10	—	—	1	1,44	—
11	2	1,415	2	1,42	0004
12	5	1,332	7	1,33	$10\bar{1}4$
13	1	1,312	3	1,31	$20\bar{2}3$
14	6	1,233	8	1,24	$21\bar{3}2$
15	3	1,207	7	1,21	$30\bar{3}0$
16	8	1,175	8	1,17	$11\bar{2}4$
17	4	1,109	6	1,11	$12\bar{3}3$
18	2	1,082			$10\bar{1}5$
19	5	1,046			$22\bar{4}0$
20	2ш	0,991			$13\bar{4}1$

Свинец	Сурьма	Сумма	Формула
3,0	—	100,2	$Pd_{1,01} (Te_{0,69} Bi_{0,28} Pb_{0,03})$ 1,0
3,1	—	100,0	$Pd_{0,93} (Te_{0,71} Bi_{0,25} Pb_{0,04})$ 1,0
2,3	—	98,9	$Pd_{1,0} (Te_{0,61} Bi_{0,36} Pb_{0,03})$ 1,0
2,8	—	98,8	$Pd_{1,0} (Te_{0,56} Bi_{0,40} Pb_{0,04})$ 1,0
1,5	0,3	102,9	$(Pd, Pt)_{0,92} (Te_{0,93} Bi_{0,05} Pb_{0,02})$ 1,0
0,7	0,2	99,0	$(Pd, Pt)_{0,95} (Te_{0,82} Bi_{0,16} Pb_{0,02})$ 1,0

Рустенбург		PdTe синтетический	
(Kingston, 1966)		(Thomassen, 1929)	
$a_0 = 4,145 \pm 0,005 \text{ \AA}$		$a_0 = 4,127 \pm 0,004 \text{ \AA}$	
$c_0 = 5,67 \pm 0,01 \text{ \AA}$		$c_0 = 5,663 \pm 0,005 \text{ \AA}$	
J	d, Å	J	d, Å
—	—	1	3,58
10	3,03	4	3,03
—	—	—	—
—	—	—	—
9	2,22	8	2,22
7	2,08	6	2,07
2	1,72	4	1,71
2	1,67	5	1,67
3	1,52	8	1,51
—	—	—	—
0,5	1,41	3	1,42
1	1,32	5	1,32
—	—	3	1,30
1	1,23	10	1,22
—	—	5	1,21
1	1,17	10	1,17

Таблица 12

Химический состав теллурристого соболевскита (вес.%)

№ п/п	Палладий	Платина	Висмут	Теллур	Сурьма
1*	33,7	0,82	65,1	0,24	2,0
2	33,0	0,80	61,9	3,1	1,8
3	31,0	1,4	56,4	2,5	7,3
4	33,7	1,3	54,4	2,7	7,9
5	35,8	—	54,8	10,8	—
6	35,1	—	52,7	12,8	—

Таблица 12 (окончание)

№ п/п	Свинец	Сумма	Формула
1*	—	101,3	(Pd,Pt) <sub>1,02</sub> (Bi,Sb,Te)
2	—	100,6	(Pd,Pt) <sub>0,94</sub> (Bi,Te,Sb)
3	0,66	98,2	(Pd,Pt) <sub>0,87</sub> (Bi,Sb,Te,Pb)
4	0,27	100,4	(Pd,Pt) <sub>0,94</sub> (Bi,Sb,Te,Pb)
5	—	101,4	Pd <sub>0,97</sub> (Bi <sub>0,76</sub> Te <sub>0,24</sub> )
6	—	100,6	Pd <sub>0,94</sub> (Bi <sub>0,72</sub> Te <sub>0,28</sub> )

\* 1–2 — сплошные кубанит-талнахитовые руды; 3–4 — сплошные пирротиновые руды; 5 — сплошные пирротин-халькопиритовые руды; 6 — вкрапленные в интрузивных породах троилит-пирротин-кубанит-халькопиритовые руды.

Теллурристый соболевскит под микроскопом имеет бело-кремово-розовый цвет, небольшое двуотражение, сильную анизотропию с цветным эффектом в голубовато-серых тонах. По оптическим свойствам сходен с котульским.

Рентгенограмма минерала близка к рентгенограмме котульского. Минерал кристаллизуется в гексагональной сингонии, структурный тип NiAs, с параметрами ячейки  $a_0 = 4,23\text{\AA}$ ,  $c_0 = 5,69\text{\AA}$  (Евстигнеева и др., 1975).

Состав минерала (табл. 12) характеризуется преобладанием висмута над теллуром, а также примесью сурьмы и свинца.

Минералы, являющиеся, вероятно, теллуристыми соболевскитами, были встречены также О.Е. Юшко-Захаровой (Юшко-Захарова и др., 1972) в прожилково-вкрапленных экзоконтактовых борнит-миллерит-халькопиритовых рудах.

Минерал Pd(Pb,Te,Bi) найден в сплошных кубанит-талнахитовых рудах Талнахского месторождения в виде включений в поляритах и других платиновых минералах. Размеры его выделений не превышают 30 мкм.

В состав минерала входят (%): Pd — 36,2, Pb — 31,2, Bi — 12,2, Te — 17,6, сумма — 97,2.

В отраженном свете  $\text{Pd}(\text{Pb},\text{Te},\text{Bi})$  имеет зеленый цвет, анизотропен. Спектр отражения минерала приведен на рис. 13.

Имеющиеся различия оптических свойств  $\text{Pd}(\text{Pb},\text{Te},\text{Bi})$  и котульским не позволяют относить минерал к группе последнего.

В поляритах, ассоциирующих с  $\text{Pd}(\text{Pb},\text{Te},\text{Bi})$ , установлено присутствие до 1% теллура. По-видимому,  $\text{Pd}(\text{Pb},\text{Te},\text{Bi})$  представляет собой соединение типа полярита, но с большим количеством теллура, который замещает висмут.

Теларгпалит  $(\text{Pd},\text{Ag},\text{Pb},\text{Bi})_{4+x}\text{Te}$  встречается в срастании с котульским и является одним из распространенных теллуридов в экзоконтактовых рудах (Коваленкер и др., 1972, 1974<sub>1</sub>).

Условия нахождения и парагенезис теларгпалита сходны с котульским и клаусталитом. Характерной особенностью являются тесные срастания минерала с клаусталитом, ксеноморфные выделения которого нарастают на зерна теларгпалита.

Теларгпалит всегда находится в срастаниях с котульским, проникает в него в виде прожилковидных выделений. Отчетливо видны структуры замещения котульского теларгпалитом (табл. IX, 2), причем в полях последнего всегда наблюдаются реликтовые выделения котульского. Непосредственные срастания теларгпалита с  $(\text{Pd},\text{Ag})_3 \cdot (\text{Ag},\text{Pb})(\text{Te},\text{Se})$  и  $\text{Pd}_3(\text{As},\text{Te})$  встречаются весьма редко и в этих случаях, как правило, два последних минерала располагаются во внешних зонах срастаний (рис. 14).

Размеры выделений теларгпалита достигают 0,1×0,8 мм.

В отраженном свете теларгпалит светло-серый, с чуть заметным сиреневатым оттенком. В скрещенных николях изотропен. Спектр отражения минерала приведен на рис. 38.

Минерал мягкий, его рельеф ниже рельефа котульского. Микротвердость по вдавливанию (8 замеров при  $P = 10$  г) варьирует от 46 до 84, среднее — 62 мг/мм<sup>2</sup>.

Нами были изучены составы 9 зерен минерала (табл. 13). Составы изученных зерен теларгпалита близки, концентрации теллура весьма постоянны, а содержания свинца и висмута варьируют в достаточно широких пределах.

В упрощенном виде формула теларгпалита может быть представлена как  $(\text{Pd},\text{Ag},\text{Pb},\text{Bi})_{4+x}\text{Te}$  или  $(\text{Pd},\text{Ag})_4\text{Te}$ .

Рентгеновское изучение минерала ввиду малого размера его выделений проводилось методом Дебая — Шерера (РКД-57,3), без фильтра, асимметричная закладка пленки). Полученная дебаеграмма теларгпалита содержит 16 линий (табл. 14).

Среди синтетических и природных соединений пока неизвестно ни одного, в котором бы  $\text{Pd}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Te}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Bi}$  находились одновременно в таких количествах, как в теларгпалите. Индицирование дебаеграммы минерала проводилось Т.Л. Евстигнеевой аналитическим методом. Подобрать индексы для всех отражений удалось только в примитивной кубической решетке с  $a_0 = 12,60 \pm 0,02 \text{\AA}$ . Сходимость  $d_{\text{авыч}}$  и  $d_{\text{изм}}$  в пределах ошибки измерения хорошая —  $|\sin^2 \theta_{\text{выч.}} - \sin^2 \theta_{\text{изм.}}| \leqslant 0,003$ .

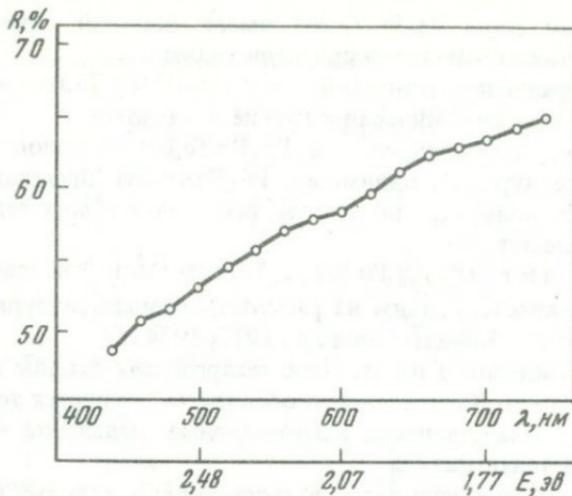


Рис. 13. Спектр отражения минерала Pd(Pb, Te, Bi)

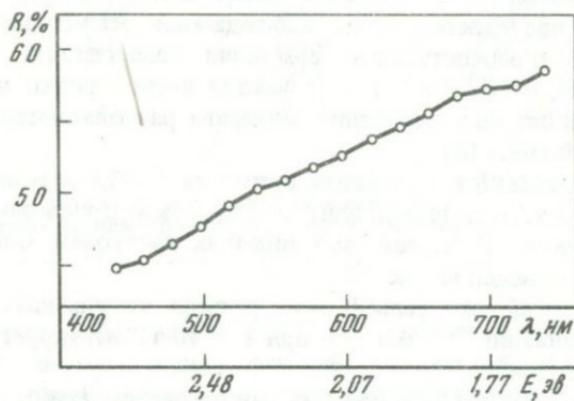


Рис. 14. Спектр отражения теларгпалита

Интересно отметить, что в системе Pd–Te Ф. Гренвольдом и Е. Ростом (Grönvold, Röst, 1956) описана фаза состава  $Pd_4Te$ . По данным этих авторов,  $Pd_4Te$  имеет примитивную кубическую решетку с  $a_0 = 12,674\text{\AA}$  (по порошкограммам), причем отмечается возможность существования сверхструктуры  $a' = 3,168\text{\AA}$ . Хотя точных данных о структуре  $Pd_4Te$  нет, близость элементарных ячеек теларгпалита и  $Pd_4Te$  может быть связана с их структурным родством.

Минерал  $(Pd,Ag)_3(Ag,Pb)(Te,Se)$  имеет близкий химический состав с теларгпалитом (табл. 13). Минерал образует очень мелкие (от 10×10 до 50×60 мкм) округлые или удлиненные выделения среди халькопирита, часто находится в срастании с котульскимитом (табл. X, 1) и теларгпалитом (см. табл. VIII, 2).

В отраженном свете  $(Pd,Ag)_3(Ag,Pb)(Te,Se)$  отчетливо двуотражает с изменением окраски от голубовато-серой до розово-силеневой. В скре-

Таблица 13

Химический состав теларгпалаита (вес. %)

№ п/п	Палладий	Серебро	Теллур	Селен	Свинец
1	39,3	29,5	20,2	0,1	3,8
2	39,4	29,0	19,6	—	3,7
3	39,0	30,8	19,8	0,6	6,7
4	40,5	28,2	21,0	0,2	2,3
5	39,9	28,4	21,0	0,3	5,2
6	40,5	28,2	21,0	0,2	4,1
7	39,6	31,2	20,2	—	7,0
8	38,9	30,5	20,1	—	8,5
9	39,4	28,6	19,6	0,5	6,7

Таблица 13 (окончание)

№ п/п	Висмут	Сумма	Формула
1	5,9	98,7	(Pd <sub>2,34</sub> Ag <sub>1,71</sub> Pb <sub>0,10</sub> Bi <sub>0,18</sub> ) <sub>4,34</sub> (Te <sub>0,99</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>
2	7,5	99,2	(Pd <sub>2,42</sub> Ag <sub>1,76</sub> Pb <sub>0,12</sub> Bi <sub>0,24</sub> ) <sub>4,5</sub> Te <sub>1,00</sub>
3	3,7	100,6	(Pd <sub>2,25</sub> Ag <sub>1,75</sub> Pb <sub>0,20</sub> Bi <sub>0,11</sub> ) <sub>4,3</sub> (Te <sub>0,95</sub> Se <sub>0,05</sub> ) <sub>1,00</sub>
4	8,3	100,5	(Pd <sub>2,28</sub> Ag <sub>1,57</sub> Pb <sub>0,06</sub> Bi <sub>0,24</sub> ) <sub>4,15</sub> (Te <sub>0,99</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>
5	7,0	101,8	(Pd <sub>2,22</sub> Ag <sub>1,65</sub> Pb <sub>0,05</sub> Bi <sub>0,24</sub> ) <sub>4,12</sub> (Te <sub>0,98</sub> Se <sub>0,02</sub> ) <sub>1,00</sub>
6	6,6	100,7	(Pd <sub>2,28</sub> Ag <sub>1,57</sub> Pb <sub>0,12</sub> Bi <sub>0,19</sub> ) <sub>4,16</sub> (Te <sub>0,99</sub> Se <sub>0,01</sub> ) <sub>1,00</sub>
7	3,4	101,4	(Pd <sub>2,34</sub> Ag <sub>1,82</sub> Pb <sub>0,20</sub> Bi <sub>0,10</sub> ) <sub>4,46</sub> Te <sub>1,00</sub>
8	2,1	100,1	(Pd <sub>2,31</sub> Ag <sub>1,79</sub> Pb <sub>0,26</sub> Bi <sub>0,06</sub> ) <sub>4,42</sub> Te <sub>1,00</sub>
9	3,7	98,5	(Pd <sub>2,33</sub> Ag <sub>1,67</sub> Pb <sub>0,20</sub> Bi <sub>0,11</sub> ) <sub>4,32</sub> (Te <sub>0,96</sub> Se <sub>0,04</sub> ) <sub>1,00</sub>

Таблица 14

Межплоскостные расстояния теларгпалаита

I	hkl	d <sub>изм</sub> , Å	d <sub>выч</sub> , Å
1	200	6,30	6,30
4	410	3,05	3,05
3	421	2,74	2,74
10	333, 511	2,42	2,43
1	521	2,30	2,30
1	440	2,24	2,23
1	530, 433	2,17	2,16
5	600, 442	2,10	2,10
1	621, 540, 443	1,972	1,970
2	440	1,823	1,822
1ш	642	1,680	1,682
3ш	330, 661	1,478	1,476
2ш	931	1,319	1,321
2ш	10. 00, 860	1,261	1,261
2ш	10. 3. 2, 944, 870	1,185	1,186
1ш	11. 2. 1, 10. 5. 1, 963	1,123	1,122

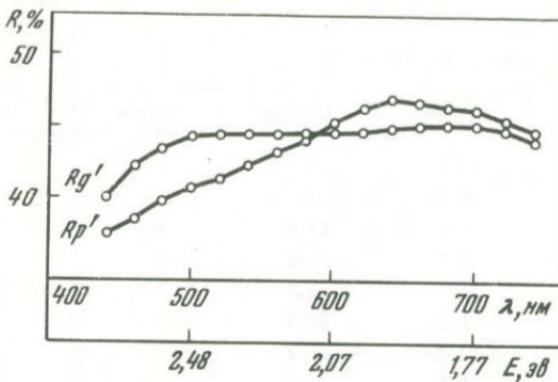


Рис. 15. Спектры отражения минерала  $(\text{Pd}, \text{Ag})_3(\text{Ag}, \text{Pb})(\text{Te}, \text{Se})$

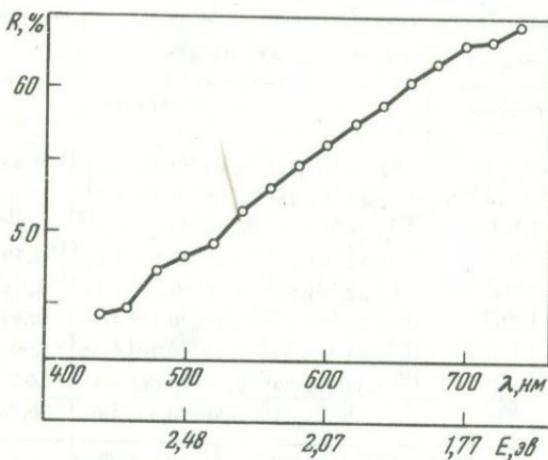


Рис. 16. Спектр отражения минерала  $\text{Pd}_3(\text{As}, \text{Te})$

щенных николях сильно анизотропен с цветным эффектом от зелено-вато-желтого до огненно-оранжевого. Для спектра отражения минерала характерен широкий максимум при 680 нм (рис. 15).

Микротвердость минерала (один замер при  $P = 10$  г) равна 151 кг/мм<sup>2</sup>.

Характерной особенностью состава минерала является почти постоянное наличие примеси селена (до 3,7%) (табл. 15).

Теллурристый винсентит  $\text{Pd}_3(\text{As}, \text{Te})$  встречается реже других теллуридов. Он не образует самостоятельных выделений и чаще всего находится в срастаниях с котульским и теларгпалитом (рис. 14). Часто в  $\text{Pd}_3(\text{As}, \text{Te})$  содержатся реликты замещенного им котульского. Размеры зерен минерала не превышают 20×30 мкм.

Оптические свойства  $\text{Pd}_3(\text{As}, \text{Te})$  своеобразны — минерал слабо анизотропен, в отраженном свете розово-коричневый, величина отражения высокая (рис. 16).

Интересно отметить, что теллур и мышьяк ведут себя комплиментарно, что позволяет предположить наличие изоморфных замещений между этими элементами (табл. 16).

Оптические свойства  $Pd_3(As,Te)$  сходны со свойствами минерала  $(Pd,Pb)_3As$ , установленного ранее в сплошных халькопиритовых рудах месторождения Норильск-I А.Д. Генкиным (1968) и сопоставляемого с арсенопалладинитом  $Pd_3As$ , который был описан Г. Клэрингбулом и М. Хэйем, а также Г. Кингстоном. Арсенопалладинит принадлежит гексагональной сингонии с параметрами решетки  $a_0 = 6,80$ ,  $c_0 = 3,48$ ,  $z = 2$ ,  $a_0:c_0 = 1:0,512$ . В системе Pd–Te известна также фаза  $Pd_3Te$  (Grönvold, Röst, 1956). Возможно, что  $Pd_3(As,Te)$  является промежуточным членом ряда  $Pd_3As$ – $Pd_3Te$ .

Нигглиит PtSn чрезвычайно редкий минерал и ранее был известен только в медно-никелевых месторождениях Инсизва (Cabri, Harris, 1972<sub>2</sub>) и Монче-Тундра (Юшко-Захарова, Черняев, 1966). В рудах норильских месторождений нигглиит был впервые установлен нами (Коваленкер и др., 1972).

Минерал встречается в кубанит-халькопиритовых сплошных рудах в виде тонких и округлых выделений размером 1–5 мкм в паоловите,

Таблица 15

Химический состав минерала  $(Pd,Ag)_3(Ag,Pb)(Te,Se)$  (вес.%)

№ п/п	Медь	Палладий	Серебро	Теллур	Селен	Свинец	Висмут	Сумма
1	—	41,2	26,6	18,5	2,6	10,0	1,1	100,3
2	—	41,0	24,6	19,6	1,7	13,5	0,6	101,0
3	—	38,7	25,5	16,8	3,7	13,7	0,8	99,2
4	2,7	39,5	22,6	18,5	1,4	15,2	0,1	100,0
5	—	38,95	23,7	17,9	3,7	13,2	0,6	96,8
6	4,4	38,2	21,1	18,7	—	14,4	0,5	97,2
7	—	37,4	28,7	18,5	3,3	14,2	1,4	103,5

Формулы минерала по данным анализов:

- $(Pd_{2,27}Ag_{0,73})_{3,0}(Ag_{0,69}Pb_{0,28}Bi_{0,03})_{1,0}(Te_{0,85}Se_{0,19})_{1,04}$ ;
- $(Pd_{2,26}Ag_{0,74})_{3,0}(Ag_{0,60}Pb_{0,38}Bi_{0,02})_{1,0}(Te_{0,83}Se_{0,10})_{0,93}$ ;
- $(Pd_{2,17}Ag_{0,83})_{3,0}(Ag_{0,58}Pb_{0,40}Bi_{0,02})_{1,0}(Te_{0,79}Se_{0,28})_{1,07}$ ;
- $(Pd_{2,13}Ag_{0,87})_{3,0}(Ag_{0,34}Pb_{0,42}Cu_{0,24})_{1,0}(Te_{0,83}Se_{0,10})_{0,93}$ ;
- $(Pd_{2,24}Ag_{0,76})_{3,0}(Ag_{0,59}Pb_{0,39}Bi_{0,02})_{1,0}(Te_{0,86}Se_{0,29})_{1,15}$ ;
- $(Pd_{2,06}Ag_{0,94})_{3,0}(Ag_{0,18}Cu_{0,41}Pb_{0,40}Bi_{0,01})_{1,0}Te_{0,84}$ ;
- $(Pd_{2,03}Ag_{0,97})_{3,0}(Ag_{0,56}Pb_{0,40}Bi_{0,04})_{1,0}(Te_{0,84}Se_{0,24})_{1,08}$ °

Таблица 16

Химический состав минерала теллуристого винсентита (вес.%)

Палладий	Мышьяк	Теллур	Свинец	Висмут	Сумма	Формула
76,2	11,0	10,5	1,5	0,6	99,8	$Pd_{3,0}(As_{0,62}Te_{0,34}Pb_{0,03}Bi_{0,01})_{1,0}$
77,1	12,9	10,6	1,7	0,7	103,0	$Pd_{2,73}(As_{0,65}Te_{0,31}Pb_{0,03}Bi_{0,01})_{1,0}$
72,0	10,3	14,0	—	2,7	99,0	$Pd_{2,60}(As_{0,53}Te_{0,42}Bi_{0,05})_{1,0}$

находящемся в срастании с алтaitом и фрудитом (см. табл. VI, 1). Оптические свойства никглиита весьма характерны — минерал обладает сильным двуотражением с отчетливым цветным эффектом от желтовато-розового до голубого. В скрещенных николях сильно анизотропен, с ярким цветным эффектом от огненно-оранжевого до серо-синего.

В составе минерала определены (%): Pt — 59,5, Pd — 0,8, Cu — 0,08, Sn — 37,0, Te — 0,9; формула минерала —  $(Pt_{0,95}Pd_{0,03})_{0,98}(Sn_{0,98}Te_{0,02})_{1,0}$ .

## О ВОЗРАСТНОМ ПОЛОЖЕНИИ И ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЯХ МИНЕРАЛОВ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУДАХ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

### Условия нахождения минералов теллура и селена в рудах и их соотношения с минералами платиновой группы

Минералы теллура встречены нами во всех основных типах и минеральных разновидностях медно-никелевых руд, селениды — только в борнит-миллерит-халькопиритовых прожилково-вкрашенных экзоконтактовых и троилит-пирротин-кубанит-халькопиритовых вкрашенных в интрузивных породах рудах.

Ввиду весьма редкой встречаемости теллуридов в полированных шлифах из вкрашенных руд в интрузивных породах очень трудно составить представление об их распределении в этих рудах. Согласно данным А.Д. Генкина (Генкин и др., 1972), зерна монченита и майченерита во вкрашенных рудах в интрузиве располагаются среди халькопирита. Нами установлено, что выделения алтaitа, срастающиеся с паоловитом, также приурочены к халькопиритовой части сульфидных вкрашенников. То же можно сказать о теллуристом соболевските и мончените.

В полированных шлифах из сплошных пирротиновых руд минералы теллура встречены не были. Их удалось обнаружить только в платиновом концентрате, полученном при специальной обработке проб пирротиновых руд. Вследствие этого трудно судить о положении теллуридов по отношению к главным рудообразующим сульфидам. Характерной чертой минералов теллура в этих рудах являются их постоянные срастания с минералами платиновой группы. Структурные взаимоотношения теллуридов с минералами платиновых металлов свидетельствуют о близком времени образования этой группы минералов, хотя некоторые из теллуридов (алтait) выделялись несколько позднее основной массы платиноидов. На это указывает секущее по отношению к платиновым минералам положение выделений алтaitа.

В рудах, где преобладающим минералом является халькопирит (талнахит, моихукит), минералы теллура встречаются гораздо чаще и поэтому легко фиксируются при просмотре полированных шлифов. В большинстве случаев они находятся в тесных срастаниях с минералами платиновых металлов, и лишь алтait изредка встречается в виде мелких обособленных извилистых включений в талнахите и кубаните, а также в галените.

А.Д. Генкиным (1959, 1968) было установлено, что число зерен минералов платины и палладия значительно увеличивается в призальбандовых частях рудных залежей. Наши наблюдения показывают, что число теллуридов в призальбандовых участках также возрастает.

Совместное нахождение теллуридов и минералов-платиноидов находит свое отражение и в возникновении корреляционных связей теллура с платиной и палладием (см. гл. IV).

Наиболее широким развитием минералы теллура пользуются в прожилково-вкрашенных и брекчевидных экзоконтактовых рудах, особенно в борнит-миллерит-халькопиритовых их разновидностях. Здесь в ассоциации с теллуридами установлены и минералы селена — галено-клаусталит и клаусталит. Интересно, что минералы теллура встречаются в этих рудах во всех без исключения сульфидных минералах — борните, халькопирите, миллерите. В значительных количествах здесь установлены и минералы платиновых металлов, в основном сульфиды платины и палладия — брэггит, куперит, высоцкит.

В противоположность сплошным рудам в прожилково-вкрашенных экзоконтактовых рудах срастания теллуридов с минералами платины и палладия редки, обычно теллуриды располагаются среди сульфидов независимо от распределения в них зерен брэггита, куперита или высоцкита. Иногда приходится наблюдать нарастание некоторых теллуридов (котульского) на зерна сульфидов платины и палладия. Такие взаимоотношения могут свидетельствовать о несколько более позднем выделении теллуридов по сравнению с сульфидами платиновых металлов.

Тесная пространственная связь теллуридной минерализации с минералами платиновой группы, наблюдалась в медно-никелевых рудах Талнахского и Октябрьского месторождений, свидетельствует о большой общности в накоплении и обособлении в виде собственных минералов теллура, платины, палладия и сопутствующих элементов — висмута, олова, сурьмы, мышьяка, свинца. Характерно, что все установленные в рудах минералы теллура являются его соединениями именно с этими элементами. Связь теллура с платиной и палладием подчеркивается не только тем, что эти элементы образуют совместные соединения. Обычно в полиминеральных сростках, где помимо теллуридов присутствуют и другие минералы платины и палладия, в состав последних входит теллур. В качестве примера можно привести наблюдавшиеся нами ассоциации, показанные в виде химических формул:

1.  $PbTe$  (36,4%Te) +  $Pt(Bi,Sb,Te)_2$  (11,2%Te) +  $Pd(Bi,Sb,Te)$  (2,7%Te),
2.  $Pd(Pb,Te,Bi)$  (17,6%Te) +  $Pd(Pb,Bi,Te)$  (1,0%Te),
3.  $PbTe$  (37,4%Te) +  $PdBi_2$  (0,4%Te) +  $Pd_2Sn$  (0,12%Te) +  $PtSn$  (0,9%Te).

Эти данные с убедительностью свидетельствуют об общности химического состава минералов рассмотренных ассоциаций.

В самих минералах теллура почти всегда присутствуют такие элементы, как висмут, свинец, сурьма, мышьяк, которые весьма характерны для минералов платиновых металлов.

Совместное пространственное нахождение, общность химического состава теллуридов и минералов платиновой группы, близость времени

их формирования позволяют нам относить их к одной минеральной ассоциации — платино-теллуридной.

Галеноклаусталит и клаусталит, встреченные нами в борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых рудах, тесно ассоциируют с рядом минералов теллура — теларгпалитом,  $(\text{Pd},\text{Ag})_3(\text{Ag},\text{Pb})(\text{Te},\text{Se})$ ,  $\text{Pd}_3(\text{As},\text{Te})$ , а также со сложным сульфидом палладия и платины —  $(\text{Pd},\text{Pt})(\text{Pb},\text{Bi})(\text{S},\text{Se})$ . Во всех этих минералах установлены повышенные концентрации селена (до 4,5%), а структурные взаимоотношения свидетельствуют о близком времени их кристаллизации. Указанные факты позволяют отнести селениды к платино-теллуридной ассоциации. На несомненную принадлежность галенита к ассоциации платиновых минералов указывал также А.Д. Генкин (1968). К ассоциации платиновых минералов он относит и такие минералы, как сфалерит, минералы группы самородного золота и серебра. Наши наблюдения также свидетельствуют о принадлежности этих минералов к платино-теллуридной ассоциации.

Таким образом, платино-теллуридная ассоциация соответствует ассоциации платиновых минералов, ранее выделенной А.Д. Генкиным (1968) в медно-никелевых рудах норильских месторождений.

### О возрастных соотношениях минералов платино-теллуридной ассоциации с главными рудообразующими сульфидами медно-никелевых руд

Соотношения минералов платиновой группы с рудообразующими сульфидами были детально изучены А.Д. Генкиным (1959, 1968). На основании многочисленных наблюдений он пришел к выводу о том, что минералы платиновых металлов возникают позже заключающих их сульфидов, но раньше появления минералов поздних, типично гидротермальных ассоциаций (магнетита поздней генерации, валлерита, нерудных жильных минералов).

Наблюдения взаимоотношений теллуридов с рудообразующими сульфидами также приводят нас к подобному выводу. Очень характерны формы выделения теллуридов в борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых рудах. Наиболее часто срастания теллуридов имеют округлую или овальную, удлиненную форму и располагаются они в виде достаточно протяженных (иногда проходящих через всю плоскость шлифа) цепочек зерен в сульфидных минералах (табл. X, 1). Чрезвычайно характерны и протяженные (отношение длины к ширине 20–50 : 1) микропроявления теллуридов в халькопирите или борните (табл. X, 2). Нередко сочетание цепочек зерен и микропроявлений. Как нами было показано выше, борнит в этих рудах является одним из наиболее поздних сульфидных минералов. Факты пересечения борнита прожилками теллуридов и характерные формы их выделений свидетельствуют о более позднем, по сравнению с сульфидами, времени образования минералов теллура.

В пирротин-халькопиритовых брекчиевидных рудах зерна теллуридов нередко приурочены к прожилкам мелкозернистого пирротина поздней генерации, пересекающим ранее образованные халькопирит и пентландит

(см. табл. VII, 4). Изучение взаимоотношений мелкозернистого пирротина с другими рудообразующими сульфидами позволило прийти к заключению о более позднем его образовании по сравнению с халькопиритом, пентландитом, пирротином I генерации, кубанитом, в которых он образует прожилки и структуры замещения.

Возможно, время кристаллизации минералов теллура в какой-то мере совпадает со временем появления прожилковидных выделений мелкозернистого позднего пирротина, что не противоречит высказанному мнению о более позднем, по сравнению с основными сульфидами, времени формирования платино-теллуридной ассоциации.

### Возрастные соотношения минералов платино-теллуридной ассоциации

Наблюдения взаимоотношений минералов платино-теллуридной ассоциации, находящихся в непосредственных срастаниях, показывают, что в большинстве случаев для минералов трудно установить какую-либо определенную возрастную последовательность. Как правило, платиновые минералы, содержащие и не содержащие заметные количества теллура, находятся в тесных срастаниях, причем в некоторых случаях теллуриды платиновых металлов располагаются в центральных частях срастания, в других — приурочены к внешним зонам срастаний. Исключением является алтант, который преимущественно располагается в периферических частях или в виде извилистых прожилков проникает внутрь полиминеральных срастаний зерен минералов платино-теллуридной ассоциации. Характерно, что сульфид свинца — галенит — ведет себя подобно теллуриду свинца — алтанту. По данным А.Д. Генкина (1968), галенит чаще всего в виде каемок окружает выделения платиновых минералов или образует ксеноморфные включения внутри их срастаний. Нами установлено, что сульфоселенид и селенид свинца — галеноклаусталит и клаусталит — по отношению к теллуридам палладия ведут себя так же, как галенит и алтант, т.е. нарастают на внешние зоны выделений теллуридов или располагаются в непосредственной близости от них (табл. VIII, 1). Галенит, алтант, клаусталит могут встречаться также и в виде обособленных выделений среди рудообразующих сульфидов. Таким образом, все три халькогенида свинца — галенит, алтант, клаусталит — по отношению к другим минералам платинотеллуридной ассоциации ведут себя весьма сходно. Характер их срастаний с другими платиновыми минералами и теллуридами свидетельствует в общем о более позднем времени их образования по сравнению с последними.

В то же время для халькопирит-пирротиновых и пирротин-халькопиритовых экзоконтактовых руд весьма характерны тесные срастания галенита и котульского (табл. VIII, 2), описанные нами в предыдущем разделе, свидетельствующие об одновременном образовании этих двух минералов. То же относится и к срастаниям галенита и алтанта, представляющих собой продукты распада твердого раствора (табл. VI, 2, 3).

Характерной особенностью минералов, находящихся в срастании с халькогенидами свинца, является общность их химического состава. Так,

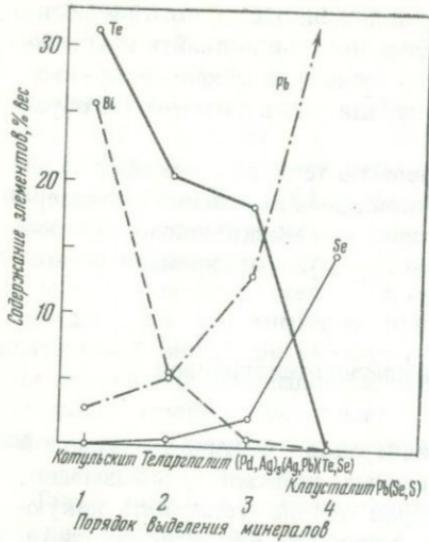


Рис. 17. Изменение соотношения минералообразующих элементов в процессе выделения минералов платино-теллуридной ассоциации борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых руд

например, теллуриды, ассоциирующие с клаусталлитом, содержат повышенные концентрации свинца и селена. По данным А.Д. Генкина (1968), платиновые минералы, срастающиеся с галенитом, содержат в своем составе свинец. Точно так же платиновые минералы, находящиеся в срастаниях с алтайтом, содержат повышенные концентрации теллура. Эти факторы убеждают нас в том, что время выделения всех минералов, принадлежащих платино-теллуридной ассоциации, было весьма близким.

Как показывают перечисленные выше фактические данные, халькогениды свинца являются одними из поздних в указанной парагенетической ассоциации.

Относительно поздними являются, по-видимому, и минералы группы золота и серебра, которые, согласно наблюдениям А.Д. Генкина (1968), всегда располагаются по периферии выделений платиновых минералов. Наши наблюдения соотношений между самородным серебром и теллуридами так же показывают, что выделения самородного серебра всегда располагаются в периферических участках срастаний теллуридов.

Очень четко возрастные соотношения между теллуридами и селенидами устанавливаются в борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых рудах. Наблюдения показывают, что наиболее ранним минералом этой ассоциации является котульскит, который замещается теларгпалитом и  $(Pd, Ag)_3 (Ag, Pb) (Te, Se)$  (табл. VIII, I; IX, 2; X, I). В совместных тананиях этих минералов  $(Pd, Ag)_3 (Ag, Pb) (Te, Se)$  неизменно располагается в периферийных частях теларгпалита, что может указывать на относительно более позднее его образование.

Что касается клаусталита, то ранее было показано, что он, вероятно, завершал процесс формирования указанной ассоциации минералов.

Таким образом, возрастная последовательность отложения минералов платино-теллуридной ассоциации борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых руд представляется следующим образом: 1 – котульскит, 2 – теларгпалит, 3 –  $(Pd, Ag)_3 (Ag, Pb) (Te, Se)$ , 4 – клаусталит.

Образование сменяющих друг друга минералов происходит при изменении количественных соотношений таких элементов, как теллур, селен, свинец и висмут, причем элементы-аналоги теллур и селен, свинец и висмут ведут себя в процессе образования минералов как антагонисты

(рис. 17). Наоборот, наблюдается прямая корреляция между содержаниями теллура и висмута, свинца и селена. Таким образом, в указанной последовательности выделения минералов рассматриваемой ассоциации происходит снижение концентраций теллура и висмута и увеличение концентраций селена и свинца. Содержание же палладия остается вплоть до появления клаусталита примерно на одном уровне (см. составы минералов, табл. 11, 14, 16). Серебро в минералообразующем растворе в заметных количествах появляется только в момент образования теларгапалита.

Возрастная последовательность выделения минералов определялась, по-видимому, первоначально высоким относительно других элементов уровнем концентрации теллура и висмута в минералообразующем растворе. Первым кристаллизовался котульскит —  $Pd$  ( $Te$ ,  $Bi$ ). После выпадения котульского относительный уровень содержаний теллура и висмута в растворе понизился, в связи с чем относительно повысились концентрации таких элементов, как свинец и селен, которые во все больших количествах входили в последовательно выделявшиеся теларгапалит,  $(Pd, Ag)_3 (Ag, Pb) (Te, Se)$  и клаусталит (см. рис. 17).

В галеноклаусталитах и клаусталитах установлены значительные вариации в содержаниях серы и селена (см. табл. 6). Как показали исследования Г. Тишендорфа (Tischendorf, Ungethüm, 1964, Tischendorf, 1966), уровень концентрации селена в минералах ряда галенит — клаусталит определяется в первую очередь окислительно-восстановительными условиями среды. Действительно, если обратиться к  $Eh$ — $pH$  диаграмме (рис. 18), на которой показаны поля устойчивости галенита, клаусталита и галеноклаусталита, то видно, что даже небольшое изменение  $Eh$  влечет за собой значительное увеличение или уменьшение концентраций селена в минерале. Величина  $pH$  раствора практически не оказывается на устойчивости сульфид- и селенид-ионов. По концентрациям селена в галеноклаусталитах и клаусталитах из платино-теллуридной ассоциации борнит-миллерит-халькопиритовых руд, таким образом, можно в какой-то мере

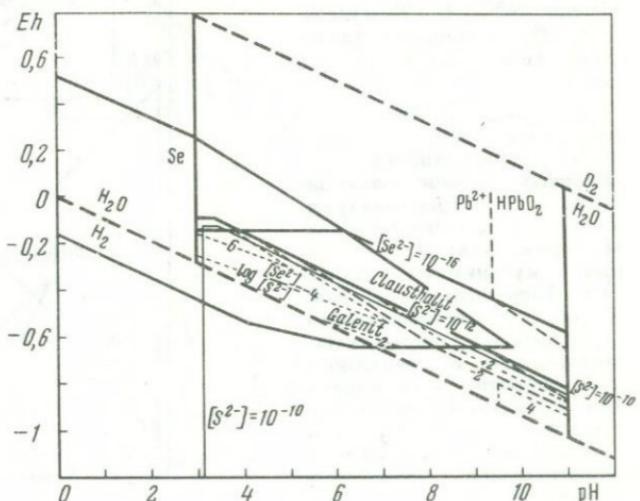


Рис. 18. Области устойчивости клаусталита и галенита на  $Eh$ - $pH$  диаграмме при  $\Sigma Se = 10^5$ ,  $\Sigma S = 10^{-1}$ ,  $[Pb^{2+}] = 10^{-7}$ ,  $200^\circ\text{C}$  и 16 атм (по Tichendorf, Ungethüm, 1964)

оценить окислительно-восстановительные условия образования минералов этой ассоциации. Как уже отмечалось ранее, клаусталиты обычно тяготеют к зернам теллуридов, а галеноклаусталиты, как правило, располагаются на некотором удалении от теллуридов. Поскольку образование клаусталита происходит в сильно окислительных условиях, то такие условия можно считать благоприятными и для образования теллуридов — котульскита, теларгпалита и др.

На окислительные условия при образовании платино-теллуридной ассоциации указывает также развитие в этих рудах гематита по магнетиту (Коваленкер и др., 1971).

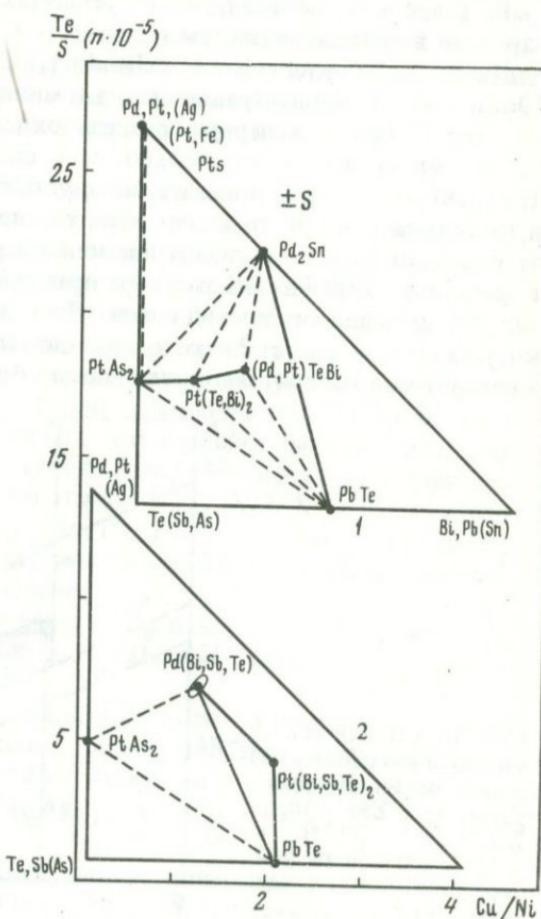
### Ассоциации минералов теллура в основных типах и минеральных разновидностях медно-никелевых руд

Минералы платино-теллуридной ассоциации установлены во всех основных типах и минеральных разновидностях руд Талнахского рудного узла, причем в каждом типе руд они имеют свои специфические особенности.

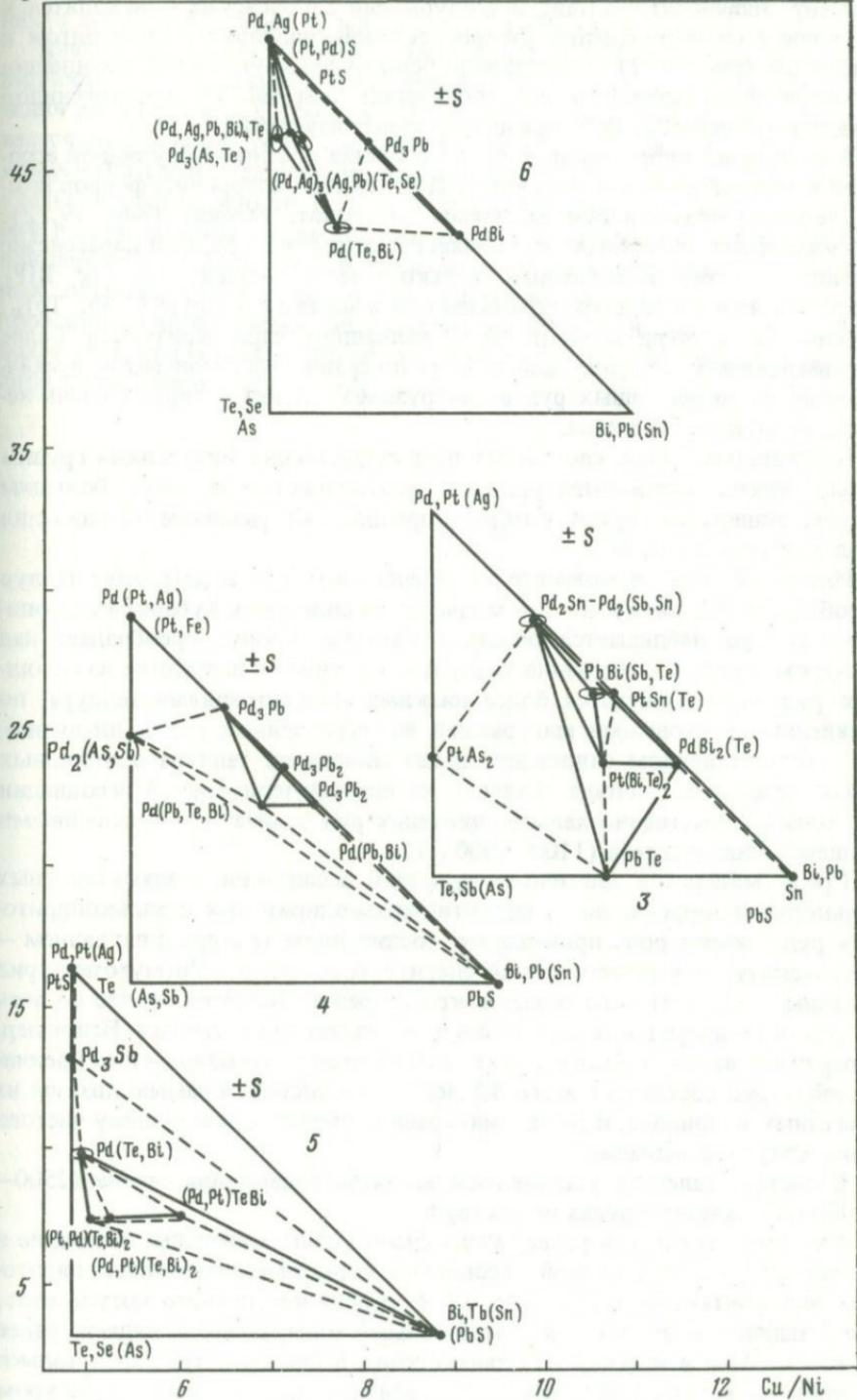
Парагенетические ассоциации минералов теллура, характерные для определенных разновидностей руд, показаны на диаграммах состав—парагенезис (рис. 19).

Рис. 19. Парагенетические ассоциации теллуридов в медно-никелевых рудах. Диаграммы состав — парагенезис расположены в соответствии с медиостью ( $Cu/Ni$ ) и удельной обогащенностью теллуром ( $Te/S$ ) разновидностей руд

1 — вкрапленные халькопирит-пирротиновые; 2 — сплошные пирротиновые; 3 — сплошные кубанит-халькопиритовые и кубанит-моиухитовые руды Октябрьского месторождения; 4 — сплошные кубанит-тальнахитовые руды Талнахского месторождения; 5 — экзоконтактовые вкрапленные, прожилково-вкрапленные и брекчевые пирротин-халькопиритовые и халькопиритовые руды; 6 — экзоконтактовые прожилково-вкрапленные борнит-миллерит-халькопиритовые руды



$\frac{T_e}{S} (\text{n} \cdot 10^{-5})$



Во вкрапленных в интрузиве пирротиновых рудах минералы теллура — мончейт, майнерит, алтант и теллурристый соболевскит — находятся в ассоциации со сперрилитом, ферропластиной, наоловитом, куперитом и галенитом (рис. 19, 1). Характерной особенностью указанной ассоциации является преобладание в ней соединений платины. Из халькогенидов свинца встречаются алтант, галенит и галеноклаусталит.

В сплошных пирротиновых рудах в состав платино-теллурридной ассоциации входят алтант, теллурристый соболевскит, сперрилит, ферроплата, теллуро-сурьмянистый инсизвант, паоловит, галенит (рис. 19, 2). Эта ассоциация во многом напоминает платино-теллурридный парагенезис вкрапленных руд в интрузиве, только вместо мончейита Pt (Te, Bi)<sub>2</sub> здесь встречается теллуросурьмянистый инсизвант — Pt(Bi, Sb, Te)<sub>2</sub>. Соединения теллура с платиной и палладием характеризуются более низким уровнем концентраций теллура по сравнению с мончейтом и майнеритом из вкрапленных руд в интрузиве. Галенит содержит очень небольшие количества селена.

В сплошных рудах, сложенных преимущественно минералами группы халькопирита, платино-теллурридная ассоциация представлена большим числом минералов, среди которых преобладают различные соединения палладия (рис. 19, 3, 4).

Интересно, что в мончейите из вкрапленных руд в интрузиве теллур преобладает над висмутом, а в мончейите из сплошных кубанит-халькопиритовых руд наблюдается обратная картина: висмут преобладает над теллуром. Вообще соединения теллура с платиной и палладием из сплошных руд характеризуются более низкими концентрациями теллура, по сравнению со сходными минералами из вкрапленных руд в интрузиве.

В количественном отношении среди минералов теллура в сплошных рудах преобладает алтант. Галенит из платино-теллурридной ассоциации сплошных существенно халькопиритовых руд отличается повышенными концентрациями селена (1100—9000 г/т).

Среди минералов платино-теллурридной ассоциации экзоконтактовых халькопирит-пирротиновых, пирротин-халькопиритовых и халькопиритовых руд главная роль принадлежит соединениям теллура с палладием — котульскиту, меренскиту и майнериту (рис. 19, 5). Висмутотеллурид платины — мончейт — встречается крайне редко. Характерно, что во всех указанных минералах теллур резко преобладает над висмутом. Например, содержание висмута в котульските из миллерит-халькопиритовых брекчевидных руд составляет всего 4,8 вес. %, т.е. является самым низким из известных в природе, и состав минерала приближается к составу чистого монотеллурода палладия.

В составе галенита установлены высокие содержания селена (2500—12000 г/т). Алтант в рудах отсутствует.

Как уже отмечалось ранее, очень своеобразны минералы, входящие в состав платино-теллурридной ассоциации борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых руд (рис. 19, 6). Среди них, помимо котульскита, все остальные теллуриды являются новыми минеральными видами, ранее не известными в природе. Из халькогенидов свинца встречаются только галеноклаусталит и клаусталит; самостоятельных соединений с теллуром

свинец в этих рудах не образует, а входит иногда в значительных количествах в состав котульскита, теларгпала и  $(\text{Pd}, \text{Ag})_3$  ( $\text{Ag}, \text{Pd}$ ) ( $\text{Te}, \text{Se}$ ).

Анализ платино-теллуридных ассоциаций из основных типов и разновидностей руд показывает эволюцию составов минералов по мере увеличения медистости руд (см. рис. 19). Так, в этом направлении устанавливается возрастание роли соединений теллура с палладием, повышается количество самих теллуридов, что находит свое отражение в увеличении удельной обогащенности  $\text{Te}/\text{S}$  этих руд теллуром. Еще большие изменения в минеральном составе платино-теллуридных ассоциаций происходят при переходе от достаточно близких ассоциаций вкрапленных в интрузивных породах и сплошных руд к платино-теллуридным парагенезисам прожилково-вкрапленных экзоконтактовых руд. В этих рудах резко возрастает количество теллуридов, особенно в борнит-миллерит-халькопиритовых разновидностях руд.

Следует и отметить, что в ассоциации с борнитом и миллеритом вкрапленные теллуриды, в которых роль теллуридов возрастает в направлении от гипогенетической к гипергенетической зонам ассоциации, не имеют химического и количественного единства в различных зонах. Так, в гипогенетических зонах теллуриды включают в себя магнезиальные теллуриды, в которых теллур имеет высокую концентрацию и низкую концентрацию золота, и золотые теллуриды, в которых теллур имеет низкую концентрацию и высокую концентрацию золота. В гипергенетических зонах теллуриды включают в себя магнезиальные теллуриды, в которых теллур имеет высокую концентрацию и низкую концентрацию золота, и золотые теллуриды, в которых теллур имеет низкую концентрацию и высокую концентрацию золота.

Распределение золота в гипогенетических зонах ассоциаций вкрапленных теллуридов в отдельных зонах ассоциации различно. Так, в гипогенетической зоне ассоциации с борнитом и миллеритом золото распределено в виде зон, в которых золото концентрируется в зонах, где теллур имеет высокую концентрацию и низкую концентрацию золота. В гипергенетической зоне ассоциации с борнитом и миллеритом золото распределено в виде зон, в которых золото концентрируется в зонах, где теллур имеет низкую концентрацию и высокую концентрацию золота. В гипогенетической зоне ассоциации с борнитом и миллеритом золото распределено в виде зон, в которых золото концентрируется в зонах, где теллур имеет высокую концентрацию и низкую концентрацию золота. В гипергенетической зоне ассоциации с борнитом и миллеритом золото распределено в виде зон, в которых золото концентрируется в зонах, где теллур имеет низкую концентрацию и высокую концентрацию золота.

## Глава IV

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В РУДАХ И МИНЕРАЛАХ

#### ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В ОСНОВНЫХ ТИПАХ И МИНЕРАЛЬНЫХ РАЗНОВИДНОСТЯХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

При изучении закономерностей распределения селена и теллура в основных типах и минеральных разновидностях руд использованы результаты 570 определений обоих элементов. Соответствующие значения содержаний никеля, меди, кобальта, серы, платиноидов, золота и серы в пробах, анализированных на селен и теллур, заимствованы из данных систематического опробования.

Сопоставление содержаний селена и теллура в одноименных рудах обоих месторождений приводит нас к выводу о близости концентраций элементов.

Проверка 0-гипотезы (о равенстве средних содержаний селена и теллура в одноименных рудах Талнахского и Октябрьского месторождений) при помощи  $t$ -критерия согласия Стьюдента показывает, что статистические средние содержания элементов в аналогичных типах и разновидностях руд Талнахского и Октябрьского месторождений не различимы и принадлежат одной генеральной статистической совокупности. В связи с этим рассмотрение закономерностей распределения элементов в рудах проводится с учетом всех данных по Талнахскому рудному узлу в целом.

#### Вкрашенные руды в интрузивных породах

Содержания селена во вкрашенных рудах варьируют от 2 до 20 г/т, теллура — от менее 1 до 23 г/т.

Селен во вкрашенных рудах распределен относительно равномерно (коэффициент вариации содержаний равен 36%), а распределение значений его содержаний находится в согласии с нормальным законом (рис. 20). Содержания теллура варьируют в значительно большей степени, что находит свое отражение в величине коэффициента вариации, достигающего 67%. Вид гистограммы свидетельствует о распределении концентраций теллура по закону, близкому к логарифмически нормальному.

Основная масса вкрашенного оруденения в интрузивных породах приурочена к горизонтам пикритовых и такситовых габбро-долеритов, количество сульфидной вкрашенности в которых может варьировать от 4 до 20 объемн. %. По соотношению главных рудообразующих минералов руды обоих горизонтов в некоторых случаях значительно различа-

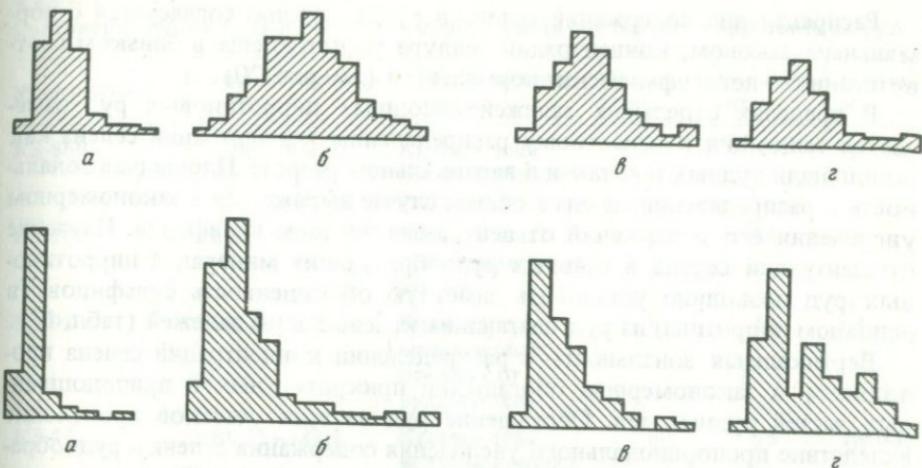


Рис. 20. Вид гистограмм распределения концентраций селена (верхний ряд) и теллура (нижний ряд) в различных типах и минеральных разновидностях медно-никелевых руд

*а* – руды, вкрапленные в интрузивных породах; *б* – сплошные пирротиновые руды; *в* – сплошные халькопиритовые руды; *г* – вкрапленные и прожилково-вкрапленные экзоконтактовые пирротиновые руды

ются между собой. Сопоставление средних величин содержаний селена и теллура одинаковых по минеральному составу в рудах из пикритовых и такситовых долеритов и оценка значимости их различий с помощью *t*-критерия показывает, что средние содержания обоих элементов в них статистически не отличаются. В случае, когда в пикритовых габбро-долеритах локализована руда сложного состава с троилитом, кубанитом и преобладающим халькопиритом (талнахитом, моиухукитом), а в такситовых – обычные существенно пирротиновые руды, первые содержат значительно более высокие концентрации обоих элементов.

Распределение селена и теллура по площади горизонтов вкрапленных руд характеризуется отчетливо выраженной тенденцией увеличения содержаний в участках, располагающихся в прифронтальных частях интрузива габбро-долеритов, что объясняется усложнением состава и повышением медистости локализованных здесь руд. В остальных участках концентрации обоих элементов относительно постоянны.

### Сплошные руды

**Пирротиновые руды.** Пирротиновые руды всех залежей месторождений Талнахского рудного узла характеризуются относительно постоянными содержаниями селена (от 14 до 90 г/т) и более изменчивыми – теллура (от 1 до 31 г/т). Большая степень изменчивости концентраций теллура по сравнению с селеном подчеркивается и величинами коэффициентов вариации, которые соответственно равны 70 и 31%.

Распределение содержаний селена в рудах хорошо согласуется с нормальным законом, концентрации теллура распределены в близком соответствии с логарифмически нормальным (см. рис. 20).

В пределах отдельных залежей сплошных пирротиновых руд намечается тенденция к зональному распределению концентраций селена как по площади рудных тел, так и в вертикальном разрезе. Площадная зональность в распределении селена в общем случае выражается в закономерном увеличении его содержаний от центра залежи к ее периферии. Изучение концентраций селена в главных рудообразующих минералах пирротиновых руд позволило установить заметную обогащенность сульфидов (в основном пирротина) из руд, слагающих краевые зоны залежей (табл. 17).

Вертикальная зональность в распределении концентраций селена проявляется в закономерном обогащении прикровельных и приподошвенных частей рудных тел. Обогащение руд из этих участков происходит вследствие пропорционального увеличения содержания селена в рудообразующих минералах, главным образом в пирротине (табл. 17).

В рудных залежах сложного зонального строения наблюдается закономерное обогащение селеном участков пирротиновых руд, примыкающих к контуру развития высокомедистых разновидностей сплошных руд. Возрастает содержание селена и в минералах, слагающих эти руды (см. табл. 17).

Теллур, как показали наши исследования, распределен в рудах не столь закономерно, как селен. В пределах рудных тел повышенные его концентрации встречаются спорадически на фоне обычно распространенных содержаний 3–7 г/т. Наиболее часто участки руд, характеризующиеся повышенными концентрациями теллура, тяготеют к зоне верхнего контакта рудных залежей. Увеличиваются содержания элемента и в участках пирротиновых руд, примыкающих к кубанитовым и халькопиритовым рудам.

Пирротин-халькопиритовые и троилит-пирротин-халькопиритовые руды связаны постепенными переходами (за счет возрастания количества халькопирита) с пирротиновыми и троилит-пирротиновыми рудами. Содержания селена (48–100 г/т) и теллура (10–47 г/т) в них повышены по сравнению с пирротиновыми. Селен в рудах распределен значительно более равномерно, чем теллур (коэффициенты вариации содержаний элементов соответственно равны 28 и 59%).

В пределах площади развития троилит-пирротин-халькопиритовых руд намечается тенденция к обогащению селеном и теллуром участков, прилегающих к контуру распространения кубанитовых руд. Некоторое обогащение элементами, особенно теллуром, наблюдается и в зоне висячего зальбанда рудных тел.

В моихукитовых рудах установлены высокие содержания как селена (56–109 г/т), так и теллура (12–88 г/т). Чаще всего руды с повышенными содержаниями селена и теллура располагаются или вблизи контакта моихукитовых руд с кубанитовыми, или у верхнего зальбанда рудной залежи.

Галнахитовые руды содержат наиболее высокие концентрации селена (72–186 г/т) и теллура (7–110 г/т). Распределение содержаний

Таблица 17

Содержание селена (г/т) в главных рудообразующих сульфидах пирротиновых руд

№ скважины	Глубина залегания, м	Место взятия пробы	Пирротин	Халькопирит	Пентландит
КЗ-869	860–861,0	Краевая зона, верхний контакт рудной залежи	110	56	Не опр.
КЗ-1028	1248,5–1251,8	Краевая зона, центральная часть залежи	86	68	76
КЗ-95	542,3–543,1	Краевая зона, маломощный отжилок от рудного тела	80	51	61
КЗ-421	586,35–587,7	Краевая зона, верхний контакт рудной залежи	80	78	Не опр.
КЗ-838	789–792,3	Зона перехода к участку развития высокометристых разновидностей сплошных руд	120	78	95

селена близко к нормальному, теллура — согласуется с логарифмически нормальным законом распределения (см. рис. 20).

Теллур распределен в талнахитовых рудах значительно более неравномерно, чем селен, что подчеркивается величиной коэффициента вариации содержаний элементов (73 и 25% соответственно).

Закономерности пространственного распределения селена в пределах контура развития талнахитовых руд сводятся к тому, что максимальные концентрации селена соответствуют рудам, занимающим центральные, внутренние части контура распространения талнахитовых руд, и закономерно снижаются в направлении к верхнему и нижнему kontaktам рудного тела, а также по мере приближения к границе, отделяющей талнахитовые руды от других минеральных разновидностей сплошных руд.

Участки руд с повышенными концентрациями теллура незакономерно чередуются с рудами, в которых содержания элемента малы. Наиболее часто руды с высокими концентрациями теллура тяготеют к верхнему залыванду рудной залежи. В некоторых случаях максимальные содержания селена также приурочены к прикровельной части рудного тела.

Халькопиритовые руды. Содержания селена (144–172 г/т) и теллура (12–210 г/т) в халькопиритовых рудах являются самыми высокими в сплошных рудах Талнахского рудного узла. Но если концентрации селена не подвержены резким колебаниям ( $V = 5\%$ ), то содержания теллура в них сильно изменчивы ( $V = 89\%$ ).

Г а б л и ц а 18

Содержание селена и теллура (г/т) в халькопиритовых рудах

№ пробы	Расстояние от верхнего контакта (м)	Селен	Теллур
3312	2,2	82	.80
3307	0,3	154	200
3309	0,15	172	210
3320	0,0	154	180

Распределение селена в пределах контура развития халькопиритовых руд достаточно равномерно, с тенденцией к постепенному повышению концентраций в направлении к верхнему зольбанду и снижению их при приближении к участкам развития других минеральных разновидностей сплошных руд.

Распределение содержаний теллура в халькопиритовых рудах имеет сходный характер с его распределением в пределах контура талнахитовых руд. Наиболее высокие содержания элемента соответствуют халькопиритовым рудам из верхнего зольбанда рудной залежи, причем концентрации теллура здесь нередко выше содержаний селена (табл. 18).

Кубанитовые руды. Кубанитовые руды характеризуются большим размахом колебаний содержаний как селена (от 20 до 160 г/т), так и теллура (от менее 1 до 190 г/т). Коэффициент вариации концентраций селена равен 40, теллура – 97%, что свидетельствует о значительно большей неравномерности распределения содержаний последнего.

Т а б л и ц а 19

Пределы колебаний концентраций селена и теллура и величин отношений наиболее часто встречаемых их содержаний в различных минеральных разновидностях сплошных руд

Минеральная разновидность сплошных руд	Пределы содержаний элементов, г/т		Пределы колебаний отношений содержаний с наибольшей частотой встречаемости	
	селен	теллур	селен	теллур
Пирротиновая	14–90	1–31	0,85–0,97	0,77–1,05
Троилит-пирротин-кубанитовая	30–70	Не обн. – 60		
Халькопиритовая	144–172	12–210		
Халькопирит-кубанитовая	75–160	30–190	1,01–1,09	0,94–1,03
Талнахитовая	51–186	7–110	0,98–1,07	1,02–1,14
Талнахит-кубанитовая	66–130	10–86		
Моихукитовая	56–109	12–88	0,96–1,1	0,8–0,97
Монхукит-кубанитовая	48–100	10–42		

Выявляется отчетливая зависимость содержаний обоих элементов от вариаций в минеральном составе кубанитовых руд. Разновидности кубанитовых руд с пирротином содержат, как правило, не выше 70 г/т селена и 60 г/т теллура (табл. 19).

В кубанитовых рудах с талнахитом, моихукитом и халькопиритом концентрации обоих элементов значительно выше (см. табл. 19). В пирротин-кубанитовых рудах содержания селена и теллура близки к пирротиновым, в халькопирит-кубанитовых — к халькопиритовым, что также подтверждается величиной отношений наиболее часто встречаемых содержаний селена и теллура в первичных и развивающихся по ним кубанитовых рудах. Эта величина близка к единице (см. табл. 19).

В соответствии с этим находятся пространственные закономерности распределения селена и теллура в кубанитовых рудах. В залежах со сложным зональным строением в участках развития кубанитовых руд концентрации обоих элементов закономерно возрастают в направлении от частей, примыкающих к пирротиновым рудам, к контакту кубанитовых руд с высокомедистыми разновидностями.

Приведенные данные свидетельствуют о явной зависимости содержаний селена и теллура в кубанитовых рудах от их концентраций в первичных разновидностях руд, по которым развивается кубанит, что позволяет рассматривать содержания селена и теллура в кубанитовых рудах как унаследованные.

### Вкрашенные, прожилково-вкрашенные и брекчиевидные руды в породах экзоконтакта

Пирротиновые руды. В пирротиновых рудах концентрации селена варьируют от 3 до 37, теллура — от 1 до 10 г/т. Значительные колебания сульфидной и силикатной составляющих этих руд (количество сульфидов изменяется от 10 до 60 объемн. %) не позволяют с достаточной точностью судить об истинных качественных изменениях в содержаниях селена и теллура. Поэтому при рассмотрении особенностей распределения элементов в экзоконтактовых рудах удобнее пользоваться приведенными, т.е. пересчитанными на 100% сульфидной массы, их концентрациями.

Приведенные концентрации селена и теллура в пирротиновых рудах колеблются в пределах от 20 до 108 и от 2 до 32 г/т соответственно.

Эти данные, а также рассчитанные средние значения содержаний элементов в пирротиновых экзоконтактовых рудах свидетельствуют о более высоком уровне концентрации в них селена и теллура по сравнению с одноименными сплошными рудами.

Селен в пирротиновых экзоконтактовых рудах распределен более равномерно, чем теллур (коэффициенты вариации соответственно равны 37 и 58%). Кривые распределения содержаний элементов (рис. 20), по виду близки к кривым нормального распределения, однако имеют некоторую правую асимметрию (особенно кривая распределения теллура).

Пространственное распределение элементов в пределах горизонтов прожилково-вкрапленных экзоконтактовых руд подчиняется одной общей закономерности. Наиболее обогащенными селеном и теллуром чаще всего оказываются руды, локализованные в породах верхнего экзоконтакта интрузива. Особенно четко эта тенденция проявляется в пирротиновых рудах горизонтов "МК" Октябрьского месторождения (поле рудника "Комсомольский"), где приведенные концентрации селена колеблются от 59 до 108, а теллура — от 9 до 32 г/т.

Пентландит-халькопиритовые руды. Содержания селена в пентландит-халькопиритовых рудах варьируют от 5 до 50, теллура — от 1 до 35 г/т, количество сульфидов при этом изменяется от 6 до 50–60 объемн. %. Приведенные концентрации элементов лежат в пределах от 44 до 159 г/т селена и от 6 до 162 г/т теллура, т.е. в общем соответствуют содержаниям в однотипных сплошных рудах.

Характер распределения селена и теллура в пентландит-халькопиритовых рудах близок к распределению в пирротиновых разновидностях — коэффициент вариации содержаний селена равен 31, теллура — 83%.

Наиболее часто повышенные содержания селена и теллура встречаются в пентландит-халькопиритовых рудах из горизонта "МК" (рудник "Комсомольский"), залегающего в породах верхнего экзоконтакта интрузива. Обычно здесь концентрации селена (в пересчете на 100% сульфидов) лежат в пределах от 83 до 159, теллура — от 23 до 162 г/т.

Миллерит-халькопиритовые руды характеризуются очень высокими концентрациями как селена, так и особенно теллура. При общем количестве сульфидов в рудах 10–30 объемн. % содержания селена в них варьируют от 11 до 63, теллура — от 12 до 75 г/т. Значения приведенных концентраций селена и теллура лежат в пределах от 90 до 630 и от 50 до 1200 г/т соответственно. Характерно, что в большинстве анализированных проб миллерит-халькопиритовых руд теллур преобладает над селеном.

Наиболее высокими содержаниями элементов (200–630 г/т селена и 300–1200 г/т теллура) характеризуются борнит-миллерит-халькопиритовые разновидности этих руд, слагающие самую верхнюю, внешнюю зону горизонта прожилково-вкрапленных экзоконтактовых руд (горизонт "МК"), залегающего в породах верхнего экзоконтакта интрузива габбро-долеритов.

Установленные в борнит-миллерит-халькопиритовых рудах содержания селена и теллура являются самыми высокими из известных в медно-никелевых месторождениях.

Пиритовые и валлеритовые руды. Участки руд, нацело сложенные пиритом или валлеритом, встречаются весьма редко. Обычно эти минералы в различных количествах присутствуют среди минералов первичных ассоциаций.

Данные единичных анализов руд с пиритом и валлеритом свидетельствуют о том, что уровень концентрации селена и теллура в них не отличается от уровня содержаний в первичных рудах. Пирит наследует селен из первичных руд. То же самое можно сказать и о валлерите.

## О СТАТИСТИЧЕСКИХ СВЯЗЯХ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА С ОСНОВНЫМИ РУДООБРАЗУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

Для выяснения особенностей геохимического поведения селена и теллура важное значение имеет рассмотрение связей концентраций обоих элементов с другими компонентами руд (Ni, Cu, Co, Pt, Pd, Rh, Au, S). Парные и частные коэффициенты корреляции (Ван дер Варден, 1960; Груза, 1964) рассчитывались для элементов главных минеральных разновидностей всех типов руд. Для качественной оценки статистических связей концентраций элементов приняты следующие подразделения величин значимых коэффициентов корреляции: 1,0–0,7 – сильная связь; 0,7–0,5 – устойчивая связь; 0,5–0,3 – слабая связь.

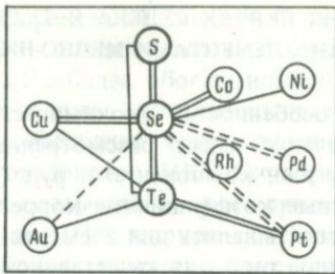
Проведенный анализ позволил установить, что наиболее часто селен и теллур образуют с остальными рудными элементами слабые связи, реже – устойчивые.

Во вкрашенных рудах в интрузивных породах селен коррелируется с никелем, медью, кобальтом, теллуром и серой (положительная связь), а также с платиной, палладием и золотом (отрицательная связь). Положительная связь селена с главными рудообразующими элементами может интерпретироваться как результат рассеяния элемента в рудообразующих сульфидах.

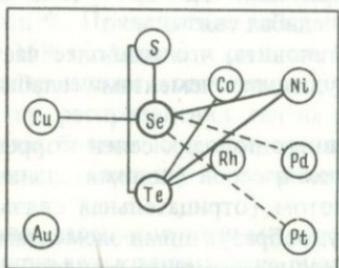
Для теллура во вкрашенных рудах в интрузивных породах характерны положительные связи как с рудообразующими элементами, так и с платиноидами (рис. 21), что свидетельствует о двойственном поведении элемента при образовании данного типа руд. С одной стороны, он рассеивается в сульфидах (корреляция с Cu, Au, S), с другой – накапливается вместе с благородными металлами. Последнее подтверждено находками во вкрашенных рудах висмут-теллуридов платины и палладия – мончесита и майченерита.

В сплошных рудах корреляционные связи элементов весьма близки рассмотренным выше (см. рис. 21). Из особенностей следует отметить отсутствие корреляции между селеном и теллуром, а также теллура с Au и появление в сплошных пирротиновых рудах связи теллура с кобальтом и родием.

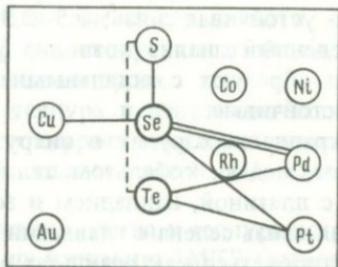
Прожилково-вкрашенные экзоконтактовые руды характеризуются некоторым изменением корреляционных связей селена и теллура по сравнению с таковыми в сплошных и вкрашенных в интрузиве пирротиновых рудах (см. рис. 21). Здесь отсутствует связь селена с никелем, но появляется положительная корреляция этого элемента с платиной и палладием. Указанное обстоятельство может свидетельствовать о совместном накоплении рассматриваемых элементов. Подтверждением сказанного является нахождение в экзоконтактовых рудах галеноклаусталита и клаусталита, время образования которых близко ко времени выделения минералов платиновых металлов. Характерно для экзоконтактовых руд и отсутствие значимых корреляционных связей теллура с никелем и медью, а также отрицательная корреляция между теллуром и серой. Эти признаки могут служить убедительным доказательством отсутствия в указанных рудах заметных количеств рассеянного теллура.



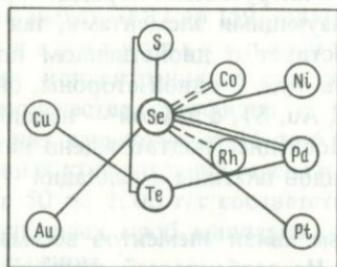
1



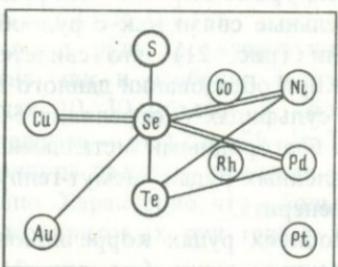
2



3



4



5

Рис. 21. Диаграмма корреляционных связей селена и теллура в основных типах медно-никелевых руд.

1 — вкрапленные в интрузивных породах; 2 — сплошные пирротиновые; 3 — сплошные тальхахитовые; 4 — экзоконтактовые пирротиновые; 5 — экзоконтактовые халькопиритовые.

Двойными линиями показаны устойчивые связи ( $r = 0,5-0,7$ ), одинарными — слабые связи ( $r = 0,3-0,5$ ), пунктиром — отрицательные корреляционные связи.

В то же время положительная связь элемента с платиноидами говорит о сонакоплении теллура, платины и палладия.

Таким образом, рассмотренный материал показывает, что наиболее устойчивые корреляционные связи, которые прослеживаются во всех типах руд, селен образует с главными рудообразующими элементами — серой, никелем и медью. Связи селена с платиноидами своеобразны: во вкрапленных рудах в интрузиве и в сплошных пирротиновых элементы ведут себя как антигонисты, во всех остальных — ассоциируют. Теллур

в противоположность селену образует наиболее устойчивые связи с палладием. Корреляционные связи теллура с главными рудообразующими элементами не характерны и проявлены только в пирротиновых сплошных и вкрапленных в интрузиве рудах.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В ГЛАВНЫХ РУДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛАХ И ФОРМЫ ИХ НАХОЖДЕНИЯ В РУДАХ

Для выявления закономерностей распределения селена и теллура в главных рудообразующих минералах было проведено свыше 200 определений в них селена, в том числе более 35 анализов выполнено на рентгеновском микроанализаторе MS-46 "Камека" (аналитик В.В. Ермилов).

В главных рудообразующих минералах вкрапленных в интрузивных породах руд наиболее высокие концентрации селена связаны с пентландитом (в среднем 94 г/т). В халькопирите в среднем содержится 90, в кубаните – 88, а в пирротине – 86 г/т селена.

В сплошных пирротиновых рудах самые высокие содержания элемента также связаны с пентландитом (в среднем 70 г/т), а средние концентрации селена в пирротине и халькопирите статистически значимо не различимы (64 и 63 г/т соответственно).

Концентрации селена в минералах из сплошных пирротин-халькопиритовых руд близки к содержаниям элемента в сульфидах из вкрапленных руд в интрузивных породах. Однако наибольших значений они достигают не в пентландите, а в халькопирите (табл. 20).

В высокомедистых сплошных рудах (моихукитовые, талнахитовые, халькопиритовые) содержания селена в главных рудообразующих минералах высокие. Средние содержания элемента в минералах группы халькопирита повышаются от моихукита (107 г/т) к талнахиту (138 г/т) и халькопириту (167 г/т). Уровень концентраций селена в пентландите и кубаните закономерно возрастает от моихукитовых к халькопиритовым рудам (табл. 21).

Содержания селена в минералах сплошных кубанитовых руд занимают промежуточное положение между сплошными пирротиновыми и пирротин-халькопиритовыми рудами.

В пирротиновых экзоконтактовых рудах наибольшие концентрации селена связаны с пирротином (в среднем 90 г/т), наименьшие – с халькопиритом (51 г/т), т.е. наблюдается противоположная тенденция в распределении элемента по сравнению с минералами пирротиновых вкрапленных в интрузивных породах и сплошных руд.

В пентландит-халькопиритовых экзоконтактовых рудах содержания селена в пентландите и халькопирите в общем ниже, чем в одноименных минералах сплошных халькопиритовых руд, причем концентрация элемента в халькопирите (в среднем 136 г/т) выше, чем в пентландите (110 г/т).

Самые высокие концентрации селена установлены в миллерите (в среднем 629 г/т), халькопирите (365 г/т) и борните (307 г/т) из борнит-миллерит-халькопиритовых прожилково-вкрапленных экзоконтактовых руд.

Таблица 20

Содержание селена (г/т) в главных рудообразующих минералах медно-никелевых руд Талнахского рудного узла.

Тип и минеральная разновидность руды	№ скважины и интервал опробования (м)	Пирротин	Петландинит	Халькопирит	Талнахит	Моихукит	Кубанит	Борнит	Миллерит	Вид анализа
Вкрапленные в породах интрузива, халькопирит-пирротиновые	КЗ-713; 710,0–172,0	105	110	126						Химический
	КЗ-1111; 1357,5–1361,5	88	78	66						"
	КЗ-1111; 1393,8–1397,6	82	70	100						"
	КЗ-1111; 1402,7–1404,4	86	135	100						"
	КЗ-646; 1172,1–1175,2	106	85	102						"
	КЗ-571; 700,3–707,4	78	88	102						"
	КЗ-922; 1202,0–1203,4	75	97	112						"
	КЗ-814; 683,1	64	88	44			77			Микрозонд
	КЗ-918; 1109,7	—*	94	80			79			"
	КЗ-918; 1114,2	—	—	63			109			"
Среднее		86	94	90			88			
Сплошные пирротиновые	КЗ-733; 630,2–630,6	74	—	69						Химический
	КЗ-750; 758,0–759,0	36	—	87						"
	КЗ-176; объединенная проба	60	60	48						"
	КЗ-393; 520,4–526,5	59	65	48						"
	КЗ-173; 636,0–636,5	47	67	40						"
	КЗ-429; 533,6–534,0	81	70	86						"
	КЗ-429; 548,8–549,4	75	—	—						"
	КЗ-404; 510,2–512,6	68	65	68						"
	КЗ-174; 633,0–633,8	—	—	60						"
	КЗ-177; 582,7–583,0	73	—	55						"
	КЗ-606; 546,6–547,0	53	75	73						"

Таблица 20 (продолжение)

Тип и минеральная разновидность руды	№ скважины и интервал опробования (м)	Пирротин	Петлан-дит	Халько-пирит	Тална-хит	Моиху-кит	Кубан-нит	Борнит	Миллерит	Вид анализа
Сплошные пирротиновые	K3-95; 542; 3-543,1	80	61	51						Химический
	K3-411 бис.; 514,3-516,8	69	—	—						"
	K3-411; 505,3-508,25	68	88	68						"
	K3-411; 509,8-513,515	59	63	55						"
	K3-421; 586,35-587,7	80	—	78						"
	K3-436; 516,6-517,9	—	—	84						"
	K3-448; 489,4-490,8	70	—	50						"
	K3-105; 516,0-518,0	68	84	65						"
	K3-606; 523,9-524,5	46	55	52						"
	K3-813 кл.; 716,5-716,6	42	—	—						"
	K3-253; 216,5-217,5	—	—	82						"
	K3-249; 215,0-216,0	76	—	78						"
	K3-93; 290,5-291,0	75	—	—						"
	K3-586 кл.; 975,4-975,8	55	—	—						"
	K3-593; 712,5-714,7	66	—	—						"
	K3-840; 862,0-862,5	—	—	72						"
	K3-588 кл.; 799,0-802,0	63	—	43						"
	K3-587; 881,0-883,0	—	—	75						"
	K3-823; 735,5-738,1	73	—	59						"
	K3-1001; 1350,0-1354,4	65	76	—						"
	K3-1006; 1098,3-1102,3	45	—	44						"
	K3-1006; 1106,3-1110,3	54	—	50						"
	K3-835; 722,1-725,6	65	74	50						"
	K3-818; 864,2-866,4	—	62	45						"
	K3-100; 1382,7-1385,2	—	90	84						"
	K3-852; 1010,4-1013,3	—	74	—						"

Таблица 20 (продолжение)

Тип и минеральная разновидность руды	№ скважины и интервал опробования (м)	Пирротин	Петландинит	Халькокопирит	Талнажхит	Моихукит	Кубанит	Борнит	Миллерит	Вид анализа
Сплошные пирротиновые	K3-892; 1199,0–1201,0 K3-1028; 1248,1–1251,8 K3-916; 885,7–888,4	54 86 59	— 76 59	64 68 58						Химический " "
	Среднее	64	70	63						
Сплошные пирротин-халькокопиритовые	K3-862; 910,0–911,0 K3-850; 908,8–912,4 K3-851 кл.; 1192,0–1192,2 K3-851; 1193,4–1193,6	75 87 95 84	84 76 88 78	90 84 84 100						Химический " " "
	Среднее	85	82	90						
Сплошные моихукитовые	K3-817; 808,4–812,4 K3-585; 900,0–900,3 K3-817; 807,5–807,7		106 106 120		114 100 —	100 110 —				Химический " "
	Среднее		110		107	105				
Сплошные талнажхитовые	K3-258; 254,0–254,5 K3-203; 220,5–221,0 K3-276; 223,0–225,0 K3-169; 602,4–602,6 K3-169; 609,0 K3-276; 228,5 K3-806; 649,4–649,7 Рудник "Маяк", К-71; 55,6–56,7		141 139 138 160 110 230 — 100	115 — — 170 130 120 105 190		157 181 — 170 120 200 — 160				Химический " " " " Микрозонд " Химический "
	Среднее		158	138		165				

Таблица 20 (продолжение)

Тип и минеральная разновидность руды	№ скважины и интервал опробования (м)	Пирротин	Петлан-дит	Халько-пирит	Талнахит	Моиху-кит	Кубанит	Борнит	Миллерит	Вид анализа
Сплошные халько-пиритовые	КЗ-85; 235,0–236,0 КЗ-267; 227,0–228,0 КЗ-238; 60,0–64,5 Рудник "Маяк", пан. штр. 1бис, КЗ-204; 259,0	— 194 — 180	152 — 168 198			124	—			Химический "
	Среднее	185	167			220	172			Микрозонд
Сплошные кубани- товые	КЗ-258; 225,0–225,5 КЗ-268; 235,5–236,0 КЗ-282 б-1; 201,5–202,0 КЗ-840; 846,0–846,5 КЗ-815; 763,7–766,7 КЗ-815; 782,8–785,4 КЗ-826; 878,0–882,0 КЗ-852; 1025,8–1026,5	61 — — 80 62 64 70 68	— — — 87 — — — 66	— — — — 69 — 66 66	66 85 111 80 71 66 92 70					Химический "
	Среднее	64	68	73	—	80				
Прожилково-вкрап- ленные экзоконтактовые пирроти-новые	КЗ-813; 645,0–645,5 КЗ-815; 662,1–661,4 Рудник "Комсомольский", гор. 471 м КЗ-429 кл; 436,5	81 98 90 90	41 62 — 50	— 73 — 70						Химический "
	Среднее	90	51	72						Микрозонд

Таблица 20 (окончание)

Тип и минеральная разновидность руды	№ скважины и интервал опробования (м)	Пирротин	Петландинт	Халькопирит	Талнанхит	Моихукит	Кубанит	Борнит	Миллерит	Вид анализа
Эзоконтактовые пентландит-халькопиритовые	КЗ-812; 628,0–629,0 КЗ-802; 496,0–496,9 Рудник "Комсомольский", гор. 417 м КЗ-386; 659,5 КЗ-340; 658,0 КЗ-409; 417,6	90 — — 110 110 130	140 114 148 130 — 150							Химический "
	Среднее	110	136							"
Эзоконтактовые борнит-миллерит-халькопиритовые	КЗ-429 кл; 426,0 Рудник "Комсомольский", зап. закл. ствол, гор. 471 м То же То же		640 280 325 213				340 330 250 —	660 810 550 496	Микрозонд " " Химический	
	Среднее		365				307	629		

\*Прочерк означает, что селен в минерале не определялся.

Таким образом, основными носителями селена в медно-никелевых рудах Талнахского рудного узла являются главные рудообразующие минералы: пирротин, пентландит, халькопирит, моихукит, талнахит, миллерит, борнит.

Помимо перечисленных сульфидов, очень высокие концентрации селена связаны с минералами ряда галенит–клаусталит. Галениты из вкрашенных руд в интрузиве и сплошных пирротиновых руд характеризуются содержаниями от менее 50 до 1000 г/т. Галениты из сплошных высокомедистых руд содержат, по данным микрорентгеноспектральных анализов, от 1000 до 1500 г/т, из экзоконтактовых пирротиновых руд – от 2000 до 2500 г/т, из пентландит–халькопиритовых экзоконтактовых руд – от 2500 до 9000 г/т.

В борнит–миллерит–халькопиритовых экзоконтактовых и вкрашенных в интрузивных породах троилит–пирротин–кубанит–халькопиритовых рудах установлены собственные минералы селена: галеноклаусталит и клаусталит. Кроме того, селен в количествах от 1000 до 50000 г/т накапливается в некоторых теллуридах и сульфидах платиновых металлов.

Следовательно, помимо минералов–носителей, в некоторых разновидностях руд часть селена связана с минералами–концентраторами. В сплошных высокомедистых, экзоконтактовых пирротиновых и пентландит–халькопиритовых рудах минералом–концентратором является галенит, в борнит–миллерит–халькопиритовых экзоконтактовых – теллуриды и сульфиды платиновых металлов. Кроме того, в последних достаточно широко развиты собственные минералы селена – галеноклаусталит и клаусталит, имеющие ограниченное распространение во вкрашенных в интрузивных породах руд.

Для выяснения закономерностей распределения селена в минералах была проведена статистическая обработка результатов анализов элемента. Весьма низкие значения коэффициентов вариации содержаний элементов в минералах, а также отклонения от среднего, не превышающие аналитическую ошибку, свидетельствуют о равномерном распределении селена (табл. 21).

Прямое доказательство равномерного распределения селена в отдельных минералах удалось получить, используя микрорентгено–спектральный анализ на микрозонде. Для этой цели был выбран минерал с максимально высоким содержанием селена (0,081%) – миллерит из борнит–миллерит–халькопиритовых экзоконтактовых руд.

Измерение интенсивности рентгеновского излучения  $Se_{K_{A_1}}$  на образце проводилось при следующих условиях: диаметр зонда 10 мк, время измерения в одной точке – 100 сек, ускоряющее напряжение – 37 кВ, ток зонда – 100 нА. Плюсовой и минусовой фон измерялись в тех же точках минерала, где проводилась оценка характеристического излучения селена.

Точки, в которых проводилось определение содержаний селена, равномерно распределены по площади зерна минерала, на расстоянии 20–40 мк одна от другой.

Результаты измерения интенсивностей рентгеновского излучения, а также плюсовой и минусовой фон в каждой точке приведены в табл. 22. Здесь же показаны абсолютные значения интенсивностей излучения селена,

Таблица 21

Статистические характеристики распределения селена в главных рудообразующих

Статистические параметры распределения среднего	Вкрапленные в интрузиве			Сплошные пирротиновые		
	Пирротин	Пентландит	Халькопирит	Пирротин	Пентландит	Халькопирит
Среднее арифметическое	86±5	94±6	90±8	64±2	70±2	63±2
Дисперсия	201,43	365,37	643,2	152,45	102,82	190,3
Среднее квадратичное отклонение	14,19	19,12	25,35	12,35	10,14	13,8
Коэффициент вариации	16,5	20,3	28,1	19,3	14,5	21,9
Число проб	8	9	10	32	18	32

$I_{\text{обр.}} - I_{\text{фон.ср.}}$  в каждой точке. Рассчитанные статистические параметры ( $\bar{x} = 141$ ;  $S^2 = 177,0$ ;  $S = 13,3$ ;  $S\bar{x} = \pm 3$  имп;  $v = 9,4\%$ ) распределения интенсивности рентгеновского излучения селена указывают на весьма равномерное распределение элемента в минерале.

Равномерное распределение селена в сульфидных минералах свидетельствует о том, что элемент находится в рассеянной форме.

Возможность широких изоморфных замещений серы селеном в сульфидах показана многими исследователями (Гольдшмидт, 1938; Синдеева, 1959; Tischendorf, 1966; Бадалов, Поваренных, 1967; и др.). Существование изоморфизма между этими элементами было доказано экспериментально (Earley, 1950; Синдеева, Годовиков, 1959; Малевский,

Таблица 22

Оценка равномерности распределения содержаний селена в миллерите (борнит-миллерит-халькопиритовые экзоконтактовые руды, рудник "Комсомольский", гор. 471 м)

№ точки	$I_{\text{обр.}}$	$+I_{\text{фон}}$	$-I_{\text{фон}}$	$I_{\text{ср.фон}}$	$I_{\text{обр.}} - I_{\text{фон}}$ ( $x$ )	$(X - \bar{X})$	$(X - \bar{X})^2$
1	1160	1002	1073	1038	122	-19	361
2	1159	1009	1058	1034	125	-16	256
3	1187	993	1053	1023	164	23	529
4	1172	999	1048	1024	148	7	49
5	1175	1002	1055	1029	146	5	25
6	1164	1000	1051	1026	138	-3	9
7	1180	992	1054	1023	157	-16	256
8	1171	997	1059	1028	143	2	4
9	1156	1007	1048	1028	128	-13	169
10	1182	994	1063	1029	153	12	144
11	1167	997	1064	1031	136	-5	25
12	1159	1004	1053	1029	130	-11	121

минералах основных типов и минеральных разновидностей руд

Сплошные пирротин-халькопиритовые			Сплошные талнахитовые			Эзоконтактовые пентландит-халькопиритовые	
Пирротин	Пентландит	Халькопирит	Пентландит	Талнахит	Кубанит	Пентландит	Халькопирит
85±5 68,3	82±3 30,66	90±4 57,3	158±15 1594,3	138±14 1146,8	165±11 724,0	110±8 226,66	136±9 292,0
8,25	5,54	7,58	39,93	33,86	26,91	16,33	17,08
9,7 4	6,8 4	8,4 4	25,3 7	24,5 6	16,3 6	14,8 4	12,6 5

1963) Поэтому содержания селена, равномерно рассеянного в сульфидных минералах медно-никелевых руд, не могут быть вызваны ничем иным, как изоморфным вхождением элемента в решетку минерала.

Таким образом, основной формой нахождения селена в медноникелевых рудах Талнахского рудного узла является рассеянно-изоморфная. Повышение концентраций селена в рудах, по мере увеличения в них роли минералов меди происходит в основном за счет пропорционального увеличения содержания элемента в главных рудообразующих сульфидах. Значительную роль (10–50% от всего количества) минеральная форма играет только в прожилково-вкрапленных эзоконтактовых рудах.

О формах нахождения теллура в рудах судить значительно труднее. Различия свойств теллура и серы затрудняют изоморфные замещения между этими элементами (Шербина, 1937; Синдеева, 1959).

Как показали экспериментальные исследования в системе (Синдеева, Годовиков, 1959), изоморфизм между серой и теллуром возможен только в высокотемпературных условиях при значительных количествах реагирующих веществ. При снижении температуры теллур обособляется в виде собственных минералов.

Нашиими исследованиями установлено присутствие теллуридов во всех типах и минеральных разновидностях медно-никелевых руд месторождений Талнахского рудного узла. Следовательно, по крайней мере часть теллура находится в минеральной форме.

Трудности в оценке соотношений рассеянной и минеральной форм нахождения элемента в рудах заключаются главным образом в том, что расчет баланса теллура в рудах произвести невозможно. По нашим наблюдениям, размеры индивидуализированных выделений минералов теллура весьма малы – от 1–2 до 40–80 мкм и в редких случаях достигают 100–200 мкм в поперечнике. Это приводит к тому, что при выделении мономинеральных фракций главных рудообразующих сульфидов (класс крупности  $-0,25+0,1$ ) избавиться от вростков теллуридов практически не

Таблица 23

Содержание теллура (г/т) в главных рудообразующих минералах медно-никелевых руд Талнахского рудного узла (по данным химических анализов монофракций сульфидов)

Тип и минеральная разновидность руды	№ скважины и интервал опробования	Пирротин	Петландит	Халькопирит	Моихукит	Талнанхит	Кубанит	Борнит	Халькозин
Сплошные пирротиновые	K3-813 кл.; 716,5–716,6	12	*	—					
	K3-1006 кл.; 1098,3–1102,3	24	—	19					
	K3-835; 722,1–725,6	31	—	24					
Сплошные пирротин-халькопиритовые	K3-850; 908,8–912,4	26	—	25					
	K3-583; 778,4–778,5	—	—	15					
Сплошные моихукитовые	K3-585; 900,0–900,3		334		58		48		
Сплошные талнанхитовые	K3-806; 649,5–649,7		—			15	—		
Сплошные халькопиритовые	Рудник "Маяк", пан. штрек № 5	—	—	—				14	
	" № 1бис	—	110					120	
Сплошные кубаниловые	K3-840; 862,0–862,5	98	24				22		
Халькозин-борнитовые жилки	Рудник "Маяк", гор. 176 м То же							—	20
Экзоконтактовые пирротиновые	K3-813; 645,0–645,5	15	—	—				Не обн.	Не обн.

\* Прочерк означает, что теллур в минерале не определялся.

представляется возможным. Результаты химического определения теллура в главных минералах руд (табл. 23) также свидетельствуют об этом. Незакономерный разброс значений концентраций теллура от необнаруженных до 334 г/т может быть объяснен только вростками теллуридов в сульфидах.

В борните и халькозине теллур не установлен даже химическим анализом (чувствительность 1 г/т), что убеждает в отсутствии изоморфизма между теллуром и серой при температурных условиях образования этих минералов.

Отсутствие корреляционных связей теллура с медью, никелем и серой в относительно низкотемпературных экзоконтактовых рудах также может свидетельствовать об отсутствии изоморфного рассеяния теллура в слагающих эти руды сульфидных минералах. Характерно, что наиболее часто собственные минералы теллура встречаются именно в прожилково-вкрашенных экзоконтактовых рудах.

Рассмотренные данные позволяют нам с достаточной вероятностью утверждать о преобладающей роли минеральной формы теллура в экзоконтактовых рудах.

В то же время достаточно высокотемпературные условия формирования вкрашенных руд в интрузиве, а также сплошных руд, позволили, по-видимому, части теллура изоморфно войти в сульфидные минералы. Свидетельствуют об этом и корреляционные связи теллура с никелем, медью, серой и селеном, установленные в указанных рудах. Однако в сплошных рудах количество рассеянного теллура невелико и оно закономерно снижается по мере перехода от пирротиновых разновидностей к рудам, сложенным минералами группы халькопирита, т.е. по мере снижения температуры формирования руд. Увеличение роли минеральной формы теллура подчеркивается и возрастание количества теллуридов, обнаруживаемых в полированных шлифах из талнахитовых, халькопиритовых и кубанитовых руд.

Таким образом, рост содержаний теллура обусловлен в основном увеличением количества теллуридов, причем параллельно происходит снижение доли рассеянного теллура.

## Глава V

# ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОХИМИИ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

## ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В ПРИРОДЕ

В периодической системе элементов селен и теллур находятся в VI группе, в подгруппе кислорода, располагаясь в ряду сера – селен – теллур. Поведение селена и теллура в земной коре в большой степени зависит от поведения серы (Гольдшмидт, 1938), поэтому, основываясь на работах М.П. Славинского (1952), Б.Н. Некрасова (1960), Н.Д. Синдеевой (1959), кратко рассмотрим свойства элементов в связи со свойствами серы.

Все три элемента характеризуются сходным строением электронных оболочек: сера  $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^4$ , селен  $1s^2 2s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^4$ , теллур  $1s^2 2s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^4$ .

Металлоидные свойства элементов обусловливаются тем, что последняя электронная группа у них имеет по 6 электронов. В р-подгруппе серы, селена и теллура находится по 2 неспаренных электрона, что определяет четную и одинаковую валентность этих элементов. Появление новых электронных групп влечет закономерное изменение свойств рассматриваемых элементов (табл. 24). В ряду сера – селен – теллур уменьшается сродство элемента с электроном, понижается активность нейтральных атомов, повышаются восстановительные свойства отрицательно заряженных ионов. Металлоидные свойства элементов ослабляются и теллур обладает более металлическими (основными) свойствами по сравнению с серой и селеном.

В соединениях с металлами и водородом все три элемента являются отрицательно заряженными двухвалентными ионами, а в соединениях с кислородом они проявляют положительную валентность.

Селен и теллур, подобно сере, образуют двукиси и трехокиси, соединяются с различными металлами, давая соединения – селениды и теллуриды, подобные сульфидам.

Наряду со значительным сходством химических свойств элементов, наблюдаются и довольно существенные различия. Так, однотипные соединения серы, селена и теллура обладают различной устойчивостью. Например, галлоидные соединения селена и особенно теллура, устойчивее подобных соединений серы. Селен реагирует с газообразным водородом, а теллур с ним непосредственно не соединяется. Известны аналогичные серо-водороду ( $H_2S$ ) селеноводород ( $H_2Se$ ) и теллувородород ( $H_2Te$ ). Эти

соединения имеют примерно одинаковую растворимость, и их растворы дают кислую реакцию. Однако  $H_2Se$  и  $H_2Te$  менее устойчивы по сравнению с  $H_2S$ , т.е. водородные соединения селена и теллура легко разлагаются даже при незначительном повышении температуры. В ряду  $H_2S$ ,  $H_2Se$ ,  $H_2Te$  восстановительные свойства повышаются от сероводорода к теллурводороду.

Молекулы  $Se_2$  и  $Te_2$  подвергаются термической диссоциации гораздо интенсивнее, чем  $S_2$ . В то же время некоторые галлоидные соединения теллура не разлагаются даже при температурах кипения, чем отличаются от подобных соединений серы и селена.

В природных эндогенных процессах селен и теллур, с одной стороны, рассеиваются в сульфидах, а с другой — концентрируются, образуя собственные минералы. Эта двойственность поведения, обусловливающая промежуточное положение их между обычными и рассеянными элементами, является одним из основных геохимических свойств селена и теллура.

Содержания селена и теллура, по данным И.Д. Синдеевой (1959), в космических телах охарактеризованы небольшим количеством определений в метеоритах (от  $n \cdot 10^{-4}$  до  $n \cdot 10^{-1} \text{ % Se}$ ), содержание теллура в железных метеоритах равно  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ %}$ . На основании халькофильных свойств элементов предполагается, что они связаны с троилитовой частью метеоритов. Основываясь на данных И. и В. Ноддак, А.Е. Ферсман установил кларк селена для метеоритов равным  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ %}$ , а теллура —  $1 \cdot 10^{-5} \text{ %}$ .

По последним данным, полученным при изучении лунного грунта по программе "Аполлон" (1972), содержания селена в кристаллических породах Луны составляют  $4-8 \cdot 10^{-4} \text{ %}$  при среднем отношении  $S/Se$ , равном 2100 (отношение  $S/Se$  в углистых хондритах равно 2300).

Имеющиеся материалы по кларкам селена и теллура сильно разнятся вследствие того, что в основу их вычислений положено недостаточное количество определений селена в конкретных природных объектах. Специальная работа, проведенная Н.Д. Синдеевой и И.З. Курбановой (1958), позволила им выяснить закономерности распространения селена и теллура в горных породах СССР. По их данным, средние содержания селена в горных породах различной основности заметно не отличаются, а концентрации теллура в горных породах, по-видимому, ниже принятых кларковых по крайней мере на один порядок и скорее всего наиболее близки к цифре  $1 \cdot 10^{-7} \text{ %}$ , приводимой А.П. Виноградовым (1956).

Таким образом, по своей распространенности в земной коре селен и теллур — редкие элементы. Близость их кристаллохимических свойств, особенно селена, с серой, предопределяет совместное накопление всех трех элементов.

Кларки серы, селена и теллура в земной коре, а также средние содержания элементов в породах различной основности, приведены в табл. 25. Здесь же показаны средние содержания этих элементов в интрузиях Норильск-1 (Годлевский, 1959), а также в Талнахской интрузии (Борбьев и др., 1972). Судя по приведенным данным, интрузии габбродолеритов, с которыми пространственно и генетически связаны медно-

Таблица 24

Некоторые физические константы серы, селена и теллура

Элемент	Порядковый номер	Атомный вес	Атомный радиус, Å	Ионный радиус (Бокий, 1953), Å
Сера	16	32,066	1,04	1,82(-2) 0,29(+6) 1,93(-2)
Селен	34	78,96	1,16	0,69(+8) 0,35(+6) 2,11(-2)
Теллур	52	127,61	1,33	0,89(+2) 0,56(+6)

никелевые месторождения, резко обогащены селеном (в 40 раз) и особенно теллуром (в 620 раз) по сравнению с концентрациями этих элементов в земной коре. Содержания же серы в этих интрузивах всего в 9 раз выше кларковых. Еще большее обогащение селеном и теллуром (в сотни и тысячи раз) происходит в сульфидных медно-никелевых рудах. Приведенные данные показывают, что селен и теллур являются характерными элементами руд и их накопление связано с процессами образования медно-никелевых месторождений.

Таблица 25

Кларки в земной коре и средние содержания серы, селена и теллура в горных породах различной основности, а также в интрузивах Норильского района (%)

Объект	Сера	Селен	Теллур	Автор
Кларк для земной коры	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5} *$ $1,4 \cdot 10^{-5} *$	$1 \cdot 10^{-7}$	А.П. Виноградов, 1962 А.П. Виноградов, 1956
Ультраосновные породы	$3 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$		А.П. Виноградов, 1956 (серы); Н.Д. Синдеева, 1958 (селен)
Основные породы	$2 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	—	А.П. Виноградов, 1956 (серы); Н.Д. Синдеева, 1958 (селен)
Средние породы	$1 \cdot 10^{-1}$	—	—	А.П. Виноградов, 1956
Кислые породы	$4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	—	А.П. Виноградов, 1956 (серы); Н.Д. Синдеева, 1958 (селен)
Интрузия Норильск-I	0,96	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	М.Н. Годлевский, 1959
Интрузия Талнахская	2,78	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	М.С. Воробьева и др. 1972

\* Для изверженных пород.

Ковалентный радиус (Паулинг, 1947), Å	Ионно-атомный радиус (Лебедев, 1967) Å	Электроотрицательность		Потенциал ионизации 6-го электрона (Кей, Леви, 1949)
		Поваренных, 1955	Файф, 1951	
1,05	0,850 1,00	385	2,5	87,5
1,14	0,919 1,150	355	2,4	81,9
1,36	1,111 1,350	315	2,1	71,9

## О ФАКТОРАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ КОНЦЕНТРАЦИЮ СЕЛЕНА В СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛАХ

Как было показано в предыдущей главе, содержания селена в основных сульфидных минералах руд подвержены значительным колебаниям. Было также доказано, что примесь селена в рудообразующих сульфидах обусловлена изоморфным рассеянием элемента в минералах.

Причины, определяющие уровень концентрации селена в сульфидах, рассматривались многими исследователями (Синдеева, 1959, 1964; Юшко-Захарова, 1964; Tischendorf, 1966; Bethke, Barton, 1971). Среди рассмотренных ими факторов можно выделить две основные группы: кристаллохимические и физико-химические.

В первой группе факторов обсуждается влияние кристаллохимических свойств минерала-хозяина на степень изоморфного замещения серы селеном. Здесь учитывается сродство селена к катиону минерала-хозяина, наличие у серы и селена однотипных изоструктурных соединений (Синдеева, 1964), влияние изменения координационного числа серы в минерале-хозяине (Юшко-Захарова, 1964).

Вторая группа охватывает влияние физико-химических условий минералообразования: исходную концентрацию селена в рудообразующем растворе (Синдеева, 1964; Tischendorf, 1966), окислительно-восстановительный потенциал и pH раствора (Tischendorf, 1966; Юшко-Захарова, 1964), температуру и давление (Bethke, Barton, 1971; Tischendorf, 1966).

Некоторые исследователи допускают возможность предпочтительного замещения селеном тяжелых изотопов серы сульфидов (Зайнуллин, 1960).

Наконец, важную роль в накоплении изоморфного селена играет время выделения минерала-хозяина в ходе процесса минералообразования. Прогрессивная концентрация элемента в более поздних минералах и генерациях одного и того же минерала установлена многими исследователями (Синдеева, 1964; Юшко-Захарова, 1964; Зайнуллин, 1960; Нечелюстов и др., 1961; и др.).

Таким образом, многие причины могут влиять на уровень концентрации селена в сульфидах. Направление и объем действия этих факторов не эквивалентны.

Специфическое влияние той или иной из причин на распределение селена в сульфидных минералах можно качественно оценить, приняв в первом приближении остальные за постоянные.

### Зависимость изоморфизма сера — селен от кристаллохимических свойств минерала-хозяина

Согласно Н.Д. Синдеевой (1964), предпочтительное изоморфное замещение серы селеном происходит в минерале в случае изоструктурности однотипных соединений серы и селена. В качестве примера приводятся пары изоструктурных минералов: галенит ( $PbS$ ) — клаусталит ( $PbSe$ ), метациннабарит ( $HgS$ ) — тиманнит ( $HgSe$ ), между которыми существуют ряды природных твердых растворов (Coleman, 1959). Среди сульфидов многих месторождений часто наиболее высокие содержания селена связаны именно с галенитом (Синдеева, 1959; Гармаш, 1960; и др.).

В медно-никелевых рудах Талнахского рудного узла нами установлены минералы, принадлежащие ряду галенит — клаусталит, в которых содержится от 0,1 до 25 вес.% селена. Наряду с этим некоторые галениты из того же месторождения характеризуются концентрациями селена, соизмеримыми с таковыми в главных рудообразующих сульфидах, т.е. в тысячные — сотые доли процента.

Точно также, несмотря на изоструктурность сфалерита ( $ZnS$ ) и штиллеита ( $ZnSe$ ), между которыми экспериментально доказано существование непрерывного ряда твердых растворов (Earley, 1950), в природных сфалеритах из различных месторождений концентрации селена обычно одни из самых низких (Синдеева, 1959; Tischendorf, 1966).

В сфалеритах из Октябрьского месторождения фиксируется всего от 0,0001 до 0,0002% селена, в то время как в существующих с ними галенитах концентрации селена более чем на порядок выше — 0,006—0,001%.

По данным Чжун — Цзя-жун (1962), в ртутных месторождениях Средней Азии наиболее высокими содержаниями селена характеризуется не изоструктурный с тиманнитом метациннабарит, а киноварь.

Приведенные примеры показывают, что при прочих равных условиях изоструктурность однотипных соединений серы и селена не оказывает решающего влияния на количество селена, присутствующего в сульфиде-хозяине.

Г. Тишендорф (Tischendorf, 1966) специально рассмотрел вопрос о влиянии кристаллохимических свойств минерала-хозяина на концентрацию в нем селена. Он пришел к выводу, что содержания селена от 0,0005 до 0,05% являются обычными для всех сульфидов и не зависят от кристаллической структуры минерала-хозяина. Наблюдаемые же на некоторых месторождениях ряды сульфидов с повышающимися содержаниями селена Г. Тишендорф объясняет результатом влияния физико-химических условий минералообразования.

Мы также склонны рассматривать условия образования минерала-хозяина в качестве основных факторов, определяющих его сelenоносность. Однако достаточно часто в существующих сульфидах содержания селена различны. Например, в галените селена всегда больше, чем в сфалерите или халькопирите и т.д. (Bethke, Barton, 1971). Подобные факты показывают, что при прочих равных условиях в данном случае определенную роль играет сродство селена к катиону минерала-хозяина.

На основании анализа природных парагенетических ассоциаций минералов селена Н.Д. Синдеева (1959) вывела ряд возрастающего сродства селена и катиону: Fe, Zn, Co, Ni, Cu, Hg, Bi, Ag, Pb, в котором наименьшим сродством с селеном обладают железо и цинк, а наибольшим — висмут, серебро и свинец.

Ряд преимущественной связи селена с металлом вывел и Г. Тишендорф (Tischendorf, 1966) на основании изучения распределения содержаний селена более чем в 3000 природных минералах. Характерно, что ряд Г. Тишендорфа: As, Zn, Fe, Cu, Mo, Pb, Bi, выведенный другим способом, в общих чертах совпадает с рядом Н.Д. Синдеевой.

В соответствии с приведенными рядами содержание селена в халькопирите должно было быть всегда больше, чем в пирротине. Однако, как нами было показано выше, в месторождениях Талнахского рудного узла во вкрашенных рудах в интрузиве обогащенность селеном халькопирита выше, чем пирротина, в сплошных пирротиновых рудах концентрации элемента в обоих минералах близки, а в прожилково-вкрашенных экзоконтактовых рудах пирротин более богат селеном, чем халькопирит (см. табл. 20). Эти данные свидетельствуют о том, что распределение селена в минералах в большей степени определяется другими факторами, чем сродством к катиону.

### Влияние физико-химических условий минералообразования на степень концентрации селена в сульфидах

Среди физико-химических факторов главными являются исходная концентрация элемента в рудообразующем растворе (расплаве), окислительно-восстановительные условия и pH среды, температура и давление.

Объем и направленность действия таких физико-химических параметров, как соотношения суммарных активностей (содержаний в минералообразующем растворе) серы и селена, окислительно-восстановительного потенциала и pH, подробно рассмотрены Г. Тишендорфом (Tischendorf, 1966). Он показал, что на распределение селена между сульфидами основное влияние оказывает окислительно-восстановительный потенциал системы.

Первичная концентрация селена в рудообразующем растворе (расплаве) оказывается на общем уровне содержаний элемента в рудах и минералах того или иного месторождения. Так, сульфиды медно-никелевых месторождений Норильского района характеризуются более высоким содержанием селена по сравнению с сульфидами других месторождений этого типа (Синдеева, 1964). В пределах же одного месторождения рас-

пределение селена между минералами в значительно большей степени зависит от других параметров минералообразования.

Большое значение влияния повышения окислительного потенциала на уровень концентрации селена в сульфидах отмечали Н.Д. Синдеева (1959), О.Е. Юшко-Захарова (1964), А.А. Гармаш (1960), В.И. Найбордин и А.А. Сидоров (1971). Нами установлено, что самые высокие содержания селена в сульфидах Талнахского рудного узла соответствуют минералам борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых руд, в ассоциации с которыми находятся гематит, развивающийся по магнетиту, а также барит.

Рассмотренные данные позволяют согласиться с мнением Г. Тишендорфа об увеличении концентраций селена в сульфидах при повышении окислительного потенциала системы.

В то же время многочисленные литературные сведения о распределении селена в минералах одного парагенезиса свидетельствуют о том, что уровни концентрации элемента в них различны (Синдеева, 1959; Зайнуллин, 1960; Юшко-Захарова, 1964; Нечелюстов и др., 1961; и др.). В существующих сульфидах Талнахского рудного узла также проявлена различная обогащенность селеном. Установлено, что в высокотемпературных вкрапленных в интрузивных породах рудах в порядке возрастания концентраций селена существующие минералы располагаются в ряд пирротин — халькопирит — пентландит. В относительно более низкотемпературных прожилково-вкрапленных экзоконтактовых рудах ряд увеличения содержаний селена в минералах выглядит по иному: пентландит — халькопирит — пирротин. Соответственно меняются и коэффициенты распределения селена между парами существующих минералов.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЛЕНА МЕЖДУ СОСУЩЕСТВУЮЩИМИ СУЛЬФИДАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Влияние температуры на распределение малых элементов между существующими сульфидными минералами рассматривалось многими исследователями (Mc Intair, 1963; Tischendorf, 1966; Usdowski, 1967; Bethke, Barton, 1971; Barns, Fyle, 1967; Halbig, Wright, 1969; и др.). П. Бетке и П. Бартон (Bethke, Barton, 1971) экспериментально изучили распределение селена между существующими галенитом и сфалеритом (в интервале температур 600–890°C) и галенитом и халькопиритом (в интервале температур 300–595°C). Они установили, что в обоих случаях при снижении температуры происходит увеличение значения коэффициента распределения, т.е. преимущественная концентрация селена в галенитах. Было также показано, что величина коэффициентов распределения селена между этими минералами не зависит от составов последних, а также от давления, роль которого оказалась ничтожно малой.

Главными рудообразующими минералами всех типов медно-никелевых руд являются пирротин, халькопирит и пентландит.

Для экспериментального изучения распределения селена между этими сульфидами в зависимости от температуры их кристаллизации были выб-

раны три пары минералов: пирротин — халькопирит, пирротин — пентландит, халькопирит — пентландит.

Эксперименты проводились совместно с А.Ю. Малевским в Лаборатории экспериментальной минералогии ИМГРЭ.

Относительно высокотемпературные условия моделировались путем пиросинтеза существующих сульфидов, низкотемпературные — с помощью гидротермального переотложения ранее синтезированных минералов.

### Экспериментальное изучение распределения селена в существующих сульфидах

Высокотемпературный пиросинтез пирротина, халькопирита и пентландита осуществлялся путем сплавления в эвакуированных кварцевых ампулах чистых металлов — железа, меди, никеля, а также элементарных серы и селена с содержанием компонентов более 99,5%. Температура сплавления соответствовала 1150°С.

Было проведено три опыта (1, 2, 9, табл. 26).

Опыты 1 и 2 осуществлялись в одинаковых условиях и отличались только количеством исходной концентрации селена. В опыте 1 в систему было введено 0,6 вес. % селена, в опыте 2 — 0,8 вес. %.

После сплавления ампулы медленно охлаждались до температуры 800°С, отжигались в течение 10 час., а затем охлаждались в остывающей печи до температуры 600°С и закаливались в воде.

Изучение полированных шлифов показало, что они состоят из оптически диагностируемых пирротина, халькопирита и пентландита. Два первых минерала образуют агрегат аллотриоморфных зерен поперечником до 180—220 мкм. Пентландит в виде мельчайших (2—10 мкм) равномерно распределенных включений наблюдается и в пирротине и в халькопирите. Червеобразные и пластинчатые выделения пентландита в пирротине ориентированы преимущественно вдоль базальной отдельности зерен. В халькопирите, кроме пластинчатых и червеобразных включений, пентландит образует тонкие прожилковидные выделения. Количественные соотношения между халькопиритом, пирротином и пентландитом равны 50 : 40 : 10. Судя по форме срастаний, пентландит образовался в результате распада пирротинового и халькопиритового твердых растворов.

В отличие от первых двух опытов в опыте № 9 были синтезированы два минерала — пирротин и пентландит. Количество селена, введенного в систему, составляло 1 вес. %. После сплавления ампула медленно охлаждалась до 550°С, при которой осуществлялся длительный отжиг (100 час.), после чего производилась закалка в воде.

Под микроскопом установлено, что пирротин представлен округлыми, иногда овальными зернами (500—700 мкм в поперечнике), между которыми располагаются каймы пентландита шириной до 100—150 мкм. В самом пирротине параллельно базальной плоскости располагаются пластинчатые выделения пентландита. Размеры пластинок колеблются от 1 x 5 до 10 x 80 мкм. Количество пирротина составляет 70, пентландита — 30%.

Таблица 26

## Коэффициенты распределения селена между существующими сульфидами (по

"Сухой" пиросинтез ( $t_{сплав.} = 1150^\circ\text{C}$ ,  $t_{отж.} = 800^\circ\text{C}$ ,  $t_{зак.} = 600^\circ\text{C}$ )

№ опыта	номер пары на рис. 22	Минерал	S, %	Se, %	Se/S, n · 10 <sup>-5</sup>	K <sub>p</sub> <sup>Se</sup>
1	1	Пирротин Халькопирит	35,3 31,3	0,32 0,74	910 2360	0,39
2	2	Пирротин Халькопирит	35,5 31,3	0,41 0,87	1150 2780	0,41
1	3	Пирротин Пентлан- дит	35,3 32,8	0,32 0,88	910 2680	0,34
2	4	Пирротин Пентлан- дит	35,5 32,5	0,41 1,03	1150 3170	0,36
1	5	Халькопирит Пентлан- дит	31,3 32,8	0,74 0,88	2360 2680	0,88
2	6	Халькопи- рит Пентландит	31,3 32,5	0,87 1,03	2780 3170	0,88
9	13	Пирротин Пентлан- дит I	35,5 32,5	0,5 1,1	1410 2770	0,51
	14	Пирротин Пентлан- дит II	35,5 33,2	0,6 0,6	1410 1510	0,93

Полученные в результате пиросинтеза структуры срастаний пирротина и пентландита весьма напоминают природные. Каймы пентландита аналогичны пентландиту I генерации, а пластинчатые выделения вдоль базальной отдельности — пентландиту II генерации.

Изучение химического состава синтетических фаз проводилось с помощью микрорентгеноспектрального анализа на микрозонде MS-46 "Камека" (аналитики В.В. Ермилов, И.П. Лапутина и Г.Н. Муравицкая). Определение состава минералов подтвердило их диагностику.

Из особенностей состава минералов, синтезированных при высоких температурах, следует отметить некоторое отклонение отношений металло-ион в сторону избытка металла, а также относительную железистость пентландитов.

Гидротермальному переотложению методом транспортных реакций подвергались синтезированные описанным выше методом пирротин, халькопирит и пентландит. Минералы попарно закладывались в автоклав, на 75% заполненный водным раствором хлористого аммония. Опыты продолжались 96 часов при температуре 400°C. Один из минералов пары содержал определенное количество селена, другой был

экспериментальным данным)

Гидротермальное переотложение, $t = 400^\circ\text{C}$							
№ опыта	номер пары на рис. 22	Минерал	S, %	Se, %	Se/S, n · 10 <sup>-5</sup>	K <sub>p</sub> <sup>Se</sup>	
3	7	Пирротин Халькопи- рит	36,69 35,11	0,41 0,29	1117 826	1,35	
4	8	Пирротин Халькопи- рит	36,1 34,9	1,30 1,01	3597 2895	1,24	
5	9	Пирротин Халькопи- рит	36,14 35,52	1,05 0,90	2905 2534	1,15	
6	10	Пирротин Халькопи- рит	36,1 34,9	1,09 0,85	3016 2436	1,24	
7	11	Пирротин Пентлан- дит	36,81 33,67	0,15 0,11	407 327	1,25	
8	12	Халькопи- рит Пентландит	31,1 31,9	1,08 0,85	3478 2667	1,31	

без селена. Было проведено 4 опыта (№ 3–6) с парой пирротин — халькопирит и по одному с парами пирротин — пентландит (№ 7) и халькопирит — пентландит (№ 8). В опытах № 4–6 использовались одни и те же исходные минералы, однако количественные соотношения их при закладке были различны.

В результате переотложения в верхней, более холодной части автоклава были получены тесные срастания вновь образованных пар минералов.

В срастаниях пирротина и халькопирита (опыты № 3–6) халькопирит обычно располагается в промежутках зерен пирротина или обрастаёт последний. Выделения минералов крупные (до первых миллиметров в поперечнике).

Пентландит образует каймы вокруг зерен пирротина (опыт № 7) или округлые порфировидные выделения в халькопирите (опыт № 8). Изредка наблюдаются прожилковидные формы выделения пентландита в халькопирите.

Состав минералов определялся на микрорентгеновском анализаторе MS-46 "Камека" (аналитик В.В. Ермилов). Пентландит, образованный в условиях относительно низкой температуры, в отличие от высокотем-

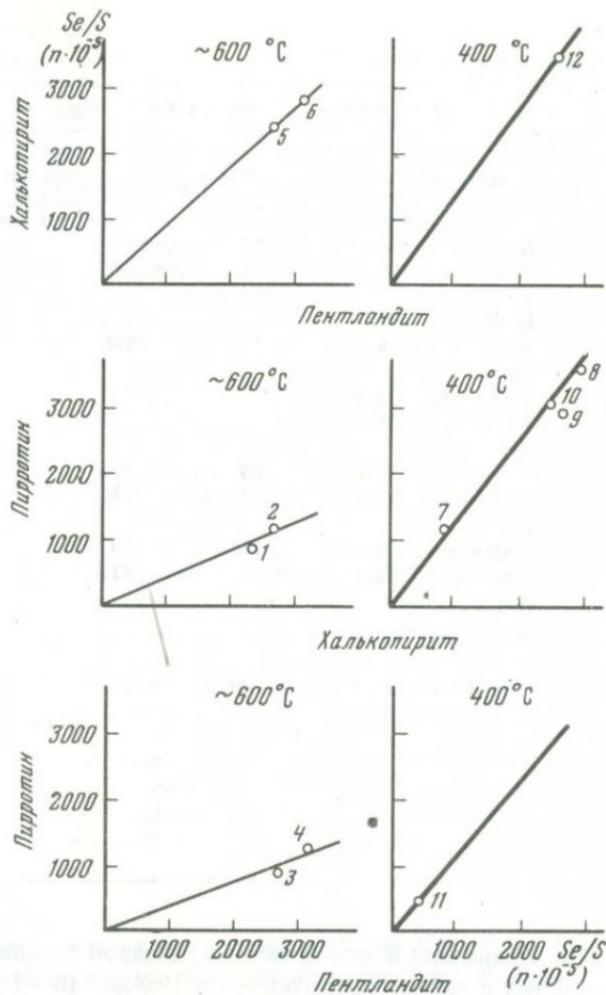


Рис. 22. Зависимость коэффициента распределения селена между существующими сульфидами от температуры (по экспериментальным данным). Отношение  $Se/S$  выражено в  $n \cdot 10^{-5}$ .

пературного характеризуется значительным преобладанием никеля над железом, особенно в случае его ассоциации с халькопиритом (опыт № 8).

Следует отметить, что природные пентландиты из медно-никелевых руд Талнахского месторождения также закономерно изменяют свой состав – в более низкотемпературных рудах содержание никеля в них заметно возрастает (Генкин и др., 1972<sub>2</sub>).

#### Обсуждение результатов экспериментов

На основании данных по содержаниям селена в однотипных парах сульфидов, образованных при температурах 800, 600, 550 и 400°C, были вычислены коэффициенты распределения селена (см. табл. 26).

Коэффициенты распределения вычислялись по формуле

$$K_{\text{Se}}^{\text{мин. А-мин. Б}} = \frac{Se(\text{вес. \%})}{S(\text{вес. \%})} \text{мин. А} : \frac{Se(\text{вес. \%})}{S(\text{вес. \%})} \text{мин. Б},$$

которая в конечном счете является преобразованным выражением формулы П. Бетке и П. Бартона (Betke, Barton, 1971). Величина Se/S (удельная обогащенность селеном на единицу серы) выражает то же, что и мольная доля селенида в сульфиде.

Рассмотрение коэффициентов распределения селена между существующими минералами (см. табл. 26, рис. 22) показывает, что для пар одних и тех же сульфидов, образованных в относительно высокотемпературных условиях, они во всех опытах меньше единицы. Для пар тех же минералов, переотложенных в относительно низкотемпературных гидротермальных условиях, — большие единицы.

Наиболее контрастные изменения  $K_p^{\text{Se}}$  характерны для пар: пирротин — халькопирит и пирротин — пентландит.

П. Бетке и П. Бартон (Betke, Barton, 1971) показали ничтожно малое влияние давления на коэффициент распределения селена между сульфидами. Это позволяет допустить, что и в нашем случае давление не оказывает существенного влияния на эту константу. В таком случае коэффициент распределения селена является в общем функцией температуры, и его можно использовать для геотермометрии, что ранее предлагалось целым рядом исследователей (Betke, Barton, 1971; Usdowski, 1967; Tischendorf, 1966; и др.). Полученные с помощью коэффициентов распределения селена температуры являются температурами равновесного распределения селена между существующими минералами, а не абсолютной температурой кристаллизации сульфидных минералов.

Специальные эксперименты по выяснению вопросов, достигается ли равновесие в существующих минералах, не проводились. Однако, суждя по тому, что точки  $K_p^{\text{Se}}$  в одноименных парах сульфидов, образованных в одинаковых условиях, но имеющих различную концентрацию селена, лежат на прямых, проходящих через центр координат (см. рис. 22), равновесие по селену между ними установлено.

Ввиду ограниченности наших экспериментальных данных вывести универсальные уравнения зависимости  $K_p^{\text{Se}}$  от температуры для количественной оценки температуры образования этих минеральных пар не представляется возможным. Однако наши данные можно использовать для чисто качественной характеристики температурных условий образования руд. Что касается отработки надежного геотермометра, то рассмотренный выше материал позволяет ожидать успешного решения этого вопроса при дальнейшем расширении экспериментальных исследований. На наш взгляд, наиболее подходящей для этой цели является минеральная пара пирротин — пентландит.

## Распределение селена между существующими сульфидами медно-никелевых руд

По данным табл. 20 были рассчитаны коэффициенты распределения селена между существующими пирротином и халькопиритом, пирротином и пентландитом, халькопиритом и пентландитом из основных типов медно-никелевых руд.

Коэффициенты распределения селена испытывают значительные вариации даже в пределах одного типа руд, что может быть объяснено влиянием целого ряда причин (относительно разная чистота монофракций сульфидов, аналитическая ошибка, использование усредненных, а не конкретных значений количеств серы в каждом минерале и др.). В то же время, значения  $K_p^{\text{Se}}$  в каждой рассматриваемой паре минералов образуют закономерные сообщества, характеризующие определенный тип руд (табл. 27). Минимальные значения  $K_p^{\text{Se}}$  соответствуют вкрапленным в интрузивных породах рудам, максимальные – экзоконтактовым рудам. Коэффициенты распределения сплошных руд занимают промежуточное положение. По возрастанию коэффициента распределения селена минеральные разновидности сплошных руд располагаются в ряд пирротиновая – талнахитовая – халькопиритовая.

Сопоставление коэффициентов распределения селена в минералах из различных типов и разновидностей медно-никелевых руд (табл. 27) с коэффициентом распределения в тех же парах сульфидов, синтезированных при различных температурах (рис. 22, табл. 26), показывает, что происходит закономерное увеличение  $K_p^{\text{Se}}$  по мере снижения температуры равновесного обмена селена между существующими минералами. В соответствии с этим температурная последовательность формирования основных типов медно-никелевых руд Талнахского рудного узла представляется в следующем виде (в порядке снижения температур): руды, вкрапленные в интрузиве  $\rightarrow$  сплошные пирротиновые  $\rightarrow$  сплошные халькопиритовые  $\rightarrow$  прожилково-вкрапленные экзоконтактовые.

Температуры образования вкрапленных в интрузиве и сплошных пирротиновых руд были достаточно близки и определенно выше 600°C, что еще раз может свидетельствовать в пользу их кристаллизации из сульфидного отликовавшего расплава.

Из других сульфидов мы располагаем данными по содержаниям селена в существующих галените и халькопирите из сплошных халькопиритовых и прожилково-вкрапленных борнит-миллерит-халькопиритовых экзоконтактовых руд. Применив формулу, отражающую зависимость  $K_{\text{Гал-Хп}}^{\text{Se}}$  от температуры (Betke, Barton, 1971), можно оценить температуры установления равновесия по селену между галенитом и халькопиритом в этих типах руд.

По П. Бетке и П. Бартону, зависимость коэффициента распределения селена между галенитом и халькопиритом от температуры описывается формулой

$$\log K_{\text{Se}}^{\text{Гал-Хп}} = \frac{3410}{T \text{ в } \text{К}} - 3,10.$$

Таблица 27

Усредненные значения  $K_p^{Se}$  в сосуществующих сульфидах из разных типов и минеральных разновидностей руд Талнахского и Октябрьского месторождений

$K_p^{Se}$ в парах минералов	Пирротиновые			Халькопиритовые		Tалнахитовые
	вкрапленные в интрузиве	сплошные	прожилково-вкрапленные экзоконтактовые	сплошные	прожилково-вкрапленные экзоконтактовые	сплошные
Пирр – Хп*	$0,64-1,30^{**}$ 0,84	$0,64-1,14$ 0,92	$1,15-1,20$ 1,18	–	–	–
Пирр – Пнт	$0,47-0,98$ 0,67	$0,60-0,95$ 0,76	$1,31-1,49$ 1,40	–	–	–
Хп – Пнт	$0,26-1,11$ 0,64	$0,70-1,17$ 0,85	$1,09-1,29$ 1,19	$1,04-1,34$ 1,15	1,40	$0,81-1,32$ 1,04

\* Пирр – пирротин, Хп – халькопирит, Пнт – пентландит.

\*\* В числителе – пределы колебаний  $K_p^{Se}$ , в знаменателе – средние значения.

Содержания селена в галените и халькопирите (в единичных пробах) сплошных халькопиритовых руд соответственно равны 0,11 и 0,015%, в экзоконтактовых борнит-миллерит-халькопиритовых рудах – 16,5 и 0,137%. Несложные расчеты показывают, что температура установления равновесия по селену между галенитом и халькопиритом равна 507°, т.е. ~500°C в сплошных халькопиритовых рудах, и 292° или ~290°C в экзоконтактовых борнит-миллерит-халькопиритовых рудах.

Галенит принадлежит платино-теллуридной ассоциации, образование которой происходило после завершения кристаллизации главных рудообразующих сульфидов. Полученные нами температуры, таким образом, свидетельствуют о том, что формирование сплошных руд закончилось при температуре, по крайней мере, не ниже 500°C, тогда как кристаллизация сульфидов экзоконтактовых прожилково-вкрапленных руд проходила при гораздо более низких температурах – вплоть до 300°C и даже ниже. Эти же температуры можно использовать и для суждения о температурных условиях образования платино-теллуридной ассоциации в сплошных и экзоконтактовых рудах.

Рассмотренный выше материал по экспериментальному изучению распределения селена в зависимости от температуры и сопоставление его с коэффициентами распределения между природными минералами различных типов и минеральных разновидностей медно-никелевых руд Талнахского и Октябрьского месторождений позволили нам прийти к некоторым представлениям о температурном режиме формирования руд.

Наиболее ранними и высокотемпературными являются руды, вкрапленные в породах интрузива. По данным М.Н. Годлевского (1968), их кристаллизация началась при температуре около 900°C. Коэффициенты распределения селена между существующими сульфидами этих руд также свидетельствуют о температурах, превышающих 600°C.

Формирование залежей сплошных сульфидов происходило также при высоких температурах (не ниже 600°C), о чем свидетельствует образование кокса на контакте с сульфидной жилой (Суханова, 1959). Распределение селена между сульфидами различных минеральных видов руд указывает на то, что наиболее высокотемпературными из сплошных являются пирротиновые руды, а относительно низкотемпературными – халькопиритовые. Судя по распределению селена между галенитом и халькопиритом, кристаллизация основных сульфидных минералов сплошных руд закончилась при температуре около 500°C.

Образование основной массы прожилково-вкрапленных руд в породах экзоконтакта интрузива происходило в постмагматическом этапе при участии гидротермальных растворов (Годлевский, 1968). Данные по распределению селена между минералами этих руд свидетельствуют об относительно высокотемпературном характере растворов (до 400°C). Закончилось их формирование, согласно распределению селена между галенитом и халькопиритом, при температурах несколько ниже 300°C.

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ СУЛЬФИДОВ В СВЯЗИ С ИХ СЕЛЕНОНОСНОСТЬЮ

Медно-никелевые месторождения и рудопроявления северо-запада Сибирской платформы (Норильский район) по изотопному составу серы весьма значительно отличаются от остальных медно-никелевых месторождений мира тем, что состав серы их сульфидов далеко отклоняется в сторону обогащения тяжелым изотопом, от метеоритного стандарта (Годлевский, Гриненко, 1963; Гриненко, 1966). При этом сохраняется достаточно узкий диапазон вариаций отношения  $S^{32}/S^{34}$  и нормальный закон распределения этих величин, т.е. степень гомогенности изотопного состава серы в них не ниже, чем в других медно-никелевых месторождениях.

Причину необычного обогащения серы норильских месторождений тяжелым изотопом большинство исследователей видят в контаминации первоначальной магмы при подъеме и асимиляции его тяжелой коровой серы.

Г.Г. Зайнуллин (1960), изучавший сelenоносность месторождения Норильск-I, указывал на возможность избирательного замещения тяжелого изотопа  $S^{34}$  селеном. Он обратил внимание на то, что в более поздних и низкотемпературных минералах накапливается тяжелый изотоп  $S^{34}$  и увеличивается содержание селена. Однако, по данным О.Е. Юшко-Захаровой (1964), в месторождениях Печенегского района наблюдается обратная картина — увеличение содержания селена в минералах сопровождается уменьшением в них количества тяжелого изотопа серы.

Для решения этого спорного вопроса нами было предпринято изучение изотопного состава серы в сульфидах месторождений Талнахского рудного узла (101 пробы), причем в 46 образцах минералов наряду с отношением  $S^{32}/S^{34}$  определялись концентрации селена (Коваленкер и др., 1974<sub>2</sub>).

Результаты анализов изотопного состава серы из основных типов и минеральных разновидностей руд свидетельствуют о том, что сера в сульфидах Талнахского месторождения в среднем обогащена по сравнению с метеоритной на 9,3<sup>0</sup>/oo, а в Октябрьском — на 11,7<sup>0</sup>/oo.

Средние значения  $\delta S^{34}$  для отдельных типов и минеральных разновидностей руд обоих месторождений и средние значения для каждого месторождения приведены в табл. 28. Результаты по Талнахскому месторождению находятся в соответствии с данными Л.Н. Гриненко (1966). Что же касается изотопного состава сульфидов Октябрьского месторождения, то они обогащены тяжелым изотопом  $S^{34}$  по сравнению с одноименными из Талнахского месторождения в среднем более чем на 2,3<sup>0</sup>/oo.

В этой связи интересно проследить, как меняется  $\delta S^{34}$  в одноименных сульфидах из руд обоих месторождений. Сопоставление изотопного состава серы в главных рудообразующих минералах Талнахского и Октябрьского месторождений показывает, что по величине  $\delta S^{34}$  сульфиды Октябрьского месторождения как бы сдвинуты в сторону обогащения тяжелым изотопом (в среднем на величину 2–3<sup>0</sup>/oo по сравнению с мине-

ралами Талнахского месторождения). Привлекает внимание факт неоднократной обогащенности тяжелым изотопом серы сульфидов различных минеральных видов, причем, как на Талнахском, так и на Октябрьском месторождениях, эти минералы по степени увеличения содержания тяжелого изотопа  $\delta S^{34}$  располагаются в закономерный ряд пирротин  $\rightarrow$  (пентландит, халькопирит)  $\rightarrow$  кубанит  $\rightarrow$  талнахит  $\rightarrow$  (халькоzin). Этот ряд в какой-то мере отвечает общей последовательности кристаллизации минералов в медно-никелевых рудах исследуемых месторождений.

Рассмотренные факты указывают на несомненное, хотя и небольшое по абсолютной величине, обогащение тяжелым изотопом серы более поздних продуктов кристаллизации. Как уже отмечалось выше, такое закономерное обогащение более поздних сульфидных минералов тяжелым изотопом серы, нередко совпадающее с тенденцией селена концентрироваться в более поздних продуктах кристаллизации, по-видимому, послужило поводом Г.Г. Зайнуллину (1960) высказать предположение о возможности предпочтительного замещения тяжелого изотопа серы селеном. Как показали наши исследования, такое предположение является ошибочным. Коэффициент корреляции ( $r_{\delta S^{34}-Se} = -0,43$ ), рассчитанный по

Таблица 28

Средние значения  $\delta S^{34}$  в различных типах и минеральных разновидностях руд Талнахского и Октябрьского месторождений

Тип и минеральная разновидность руд	Талнахское месторождение		Октябрьское месторождение	
	Число проб	$\delta S^{34}$	Число проб	$\delta S^{34}$
Сплошные пирротиновые	7	+9,36	16	+11,33
" кубанитовые	2	+9,40	6	+11,87
" халькопиритовые	11	+9,14	3	+11,60
" талнахитовые	10	+9,24	-	-
" моихукитовые	-	-	3	+11,67
Среднее по сплошным рудам	30	+9,24	28	+11,62
Вкрашенные в пикритовых габбро-долеритах, халькопирит-пирротиновые	1	+9,42	9	+11,13
Вкрашенные в такситовых габбро-долеритах, халькопирит-пирротиновые	-	-	12	+12,11
Вкрашенные в оливинсодержащих габбро-долеритах ("ликвационно-метасоматические")	-	-	4	+11,71
Среднее по вкрашенным рудам в породах интрузива	1	+9,42	19	+11,65
Брекчиевидные руды	-	-	10	+11,82
Прожилково-вкрашенные руды во вмещающих породах	-	-	4	+10,44
Среднее по месторождению	31	+9,25	67	+11,53

Рис. 23. Зависимость изотопного состава серы сульфидов от глубины их залегания. В скобках — число анализов для каждой точки. Тонкие горизонтальные линии — пределы колебания  $\delta S^{34}$  в каждой точке

46 параллельно анализированным на селен и изотопный состав сульфидам, отрицательный, значимый при доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы ( $n-1$ ) = 45. Таким образом, закономерности накопления селена и  $S^{34}$  в сульфидах медно-никелевых руд являются противоположными.

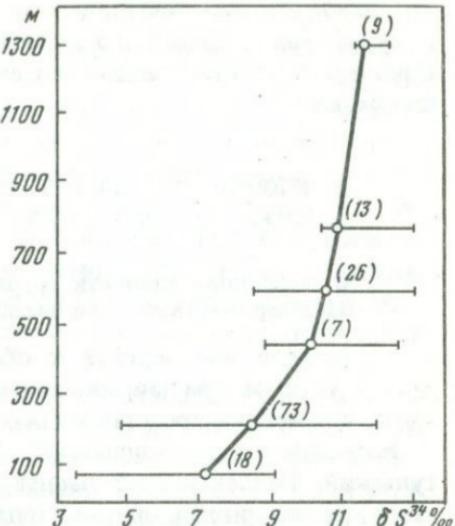
Общей закономерностью распределения селена в рудах по площади месторождений Талнахского рудного узла является обогащение им фронтальных частей, а также руд, расположенных в верхнем экзоконтакте интрузива. Что касается распределения изотопа  $S^{34}$ , то оно подчиняется другим закономерностям.

Нами было обращено внимание на тот факт, что сульфиды, относительно обогащенные  $S^{34}$ , залегают на больших глубинах, чем сульфиды, относительно бедные тяжелым изотопом серы.

Чтобы убедиться в правильности нашего предположения, мы сгруппировали все имеющиеся у нас анализы изотопного состава, а также данные Л.Н. Гриненко (1966) по глубинам залегания анализированных сульфидов. На рис. 23, показан график зависимости изотопного состава сульфидов от глубины их залегания. График имеет вид экспоненциальной кривой, которая свидетельствует о том, что после достижения определенной глубины рост количества изотопа  $S^{34}$  практически должен прекратиться.

Как было нами показано (Коваленкер и др., 1974), в пределах площади рудного узла наблюдается отчетливое, последовательное снижение количества изотопа  $S^{34}$  в сульфидах в направлении по восстанию ветвей интрузива от прикорневых к фронтальным их частям. Наиболее четко эта зональность проявлена в пределах Северо-Восточной и Центральной ветвей, с которыми связано Талнахское месторождение, однако и на Октябрьском месторождении (Северо-Западная ветвь) во фронтальной части интрузива сульфиды относительно обеднены тяжелым изотопом. Поскольку фронтальные части интрузива располагаются всегда выше по разрезу по сравнению с прикорневыми, становится понятным и обогащение сульфидов тяжелым изотопом с ростом глубины их залегания. Сульфиды из фронтальных частей месторождений всегда, при прочих равных условиях, обогащены селеном, вследствие чего наблюдается отрицательная корреляция между содержаниями селена и тяжелого изотопа  $S^{34}$  в минералах.

Таким образом, полученный нами материал по закономерностям распределения в сульфидах тяжелого изотопа  $S^{34}$  и селена показывает,



что никакого предпочтительного замещения тяжелого изотопа селеном в сульфидах Талнахского рудного узла не наблюдается. Напротив, закономерности накопления селена и тяжелой серы являются противоположными.

## ПОВЕДЕНИЕ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

### О последовательности формирования основных парагенетических ассоциаций медно-никелевых руд

Прежде чем перейти к обсуждению особенностей поведения селена и теллура при формировании медно-никелевых руд, кратко изложим современные представления о процессе рудообразования.

Большинство исследователей (Фогт, Шнейдерхен, Шольц, Холи, Котульский, Годлевский, Урванцев и др.) считают медно-никелевые месторождения ликвационно-магматическими. Наиболее полно ликвационно-магматическая гипотеза на примере Норильских месторождений была разработана В.К. Котульским и М.Н. Годлевским.

По представлениям М.Н. Годлевского, процесс формирования руд был многостадийным и продолжался в течение всего периода развития интрузива. Сульфидные руды являются продуктами дифференциации однородного в своем начальном состоянии сульфидного расплава, обособившегося от силикатной магмы в результате ее ликвации. В ходе кристаллизации сульфидный расплав изменяет свое физическое состояние вследствие концентрации в остаточной жидкости летучих компонентов. Формирование из сульфидного расплава остаточного флюида идет двумя путями в зависимости от наличия в нем щелочей – путем ретроградного кипения или путем постепенного превращения в водный щелочно-сульфидный раствор.

В формировании медно-никелевых месторождений выделяется три этапа: магматический, постмагматический и метаморфический (Годлевский, 1968). Основная масса руд – вкрапленные в интрузиве и сплошные – сформировалась в течение магматического этапа из отливавшего сульфидного расплава. В постмагматическом этапе при участии растворов образовалось существенно халькопиритовое по составу прожилково-вкрапленное оруденение в породах экзоконтакта интрузива. В самые конечные стадии этого этапа из относительно низкотемпературных растворов отлагались имеющие ограниченное распространение карбонатные жилы и прожилки с полиметаллически арсенидной минерализацией. В метаморфическом этапе под воздействием низкотемпературных водных растворов происходил автометаморфизм руд, в результате которого сульфиды первичных руд замещались минералами вторичных ассоциаций – пиритом, валлеритом, поздним магнетитом, макинавитом и др.

Наиболее ранние и высокотемпературные вкрапленные руды в породах интрузива габбро-долеритов сложены минералами в основном одной парагенетической ассоциации: пентландит-халькопирит-пирротиновой.

Сплошные руды имеют гораздо более сложный минеральный состав. Среди них выделяется несколько минеральных разновидностей, закономерно располагающихся в пределах рудных залежей. Каждая минеральная разновидность сплошных руд сложена своей парагенетической ассоциацией главных рудообразующих сульфидов: пентландит-халькопирит-пирротиновой, пентландит-пирротин-халькопиритовой, пентландит-моихукитовой, пентландит-талнахитовой и пентландит-халькопиритовой. При метасоматическом замещении минералов указанных ассоциаций кубанитом второй генерации появляется ряд минеральных ассоциаций сплошных руд с кубанитом II: пентландит-троилит-пирротин-кубанитовая, пентландит-халькопирит-кубанитовая, пентландит-моихукит-кубанитовая, пентландит-талнахит-кубанитовая и др.

Для выяснения особенностей кристаллизации сплошных руд и взаимоотношений различных минеральных парагенезисов необходимо учитывать результаты экспериментальных исследований в системах Fe—Ni—S, Cu—Fe—Ni—S (Naldrett et al., 1967; Годлевский, Лихачев, 1971; и др.). Согласно этим исследованиям, в сульфидных системах, близких по валовому составу к медно-никелевым рудам, кристаллизация начинается с выделения четверного моносульфидного твердого раствора Cu—Fe—Ni—S, при этом происходит изменение состава остаточной жидкости в сторону увеличения содержаний меди. При температурах выше 850°C происходит фракционирование обогащенной медью сульфидной жидкости.

При охлаждении моносульфидного пирротинового твердого раствора ниже 600°C происходит его распад и образование пентландит-халькопирит-пирротиновой ассоциации. Взаимодействие моносульфидного твердого раствора с существенно медистой остаточной сульфидной жидкостью приводит к образованию парагенезиса пентландит-пирротин-халькопирит. Соотношение сульфидов в пирротин-халькопиритовых рудах, сложенных этой минеральной ассоциацией, петельчатые образования халькопирита, располагающиеся между зернами пирротина, явления замещения пирротина халькопиритом свидетельствуют в пользу более позднего образования халькопирита.

Кристаллизация обогащенной медью сульфидной жидкости приводит к возникновению халькопиритового твердого раствора. При понижении температуры в субсолидусе происходят процессы высокотемпературного упорядочивания халькопиритового твердого раствора с образованием моихукита, талнахита и халькопирита. Согласно экспериментальным данным, наиболее высокотемпературным является моихукит (Hiller, Probstain, 1956). Талнахит представляет собой более низкотемпературную фазу превращения халькопиритового твердого раствора (Hiller, Probstain, 1956; Donney, Kullerud, 1958; Лихачев, 1971).

Таким образом, на основании геологических наблюдений и экспериментальных данных последовательность образования основных парагенезисов сплошных руд можно представить следующим образом: пентландит + халькопирит + пирротин → пентландит + пирротин + халькопирит → пентландит + моихукит → пентландит + талнахит → пентландит + халькопирит.

Формирование прожилково-вкрапленных руд в породах экзоконтактов интрузива начинается в конце магматического и происходит в основном в постмагматическом этапе. Нередкие случаи наложения прожилково-вкрапленных экзоконтактовых руд на постмагматические монтичеллитовые и форстеритовые скарны свидетельствуют о более позднем времени их образования.

Эзоконтактовые руды, по данным А.Д. Генкина, сложены следующими первичными парагенезисами минералов: пентландит + халькопирит + пирротин → пентландит + пирротин + халькопирит → пентландит + халькопирит' → борнит + миллерит + халькопирит. Эти ассоциации слагают одноименные разновидности руд, закономерно сменяющие друг друга в пространстве.

В заключительные стадии формирования каждого типа руд (вкрапленных в интрузиве, сплошных и экзоконтактовых) происходило выделение минералов платино-теллуридной ассоциации.

#### Основные закономерности поведения селена и теллура в ходе формирования главных парагенетических ассоциаций руд

В табл. 29 показана удельная обогащенность селеном и теллуром основных минеральных ассоциаций медно-никелевых руд Талнахского рудного узла. Удельная обогащенность ассоциаций вычислялась с учетом распространенности и обогащенности селеном и теллуром главных минералов парагенезисов.

Удельная обогащенность селеном и теллуром пентландит-халькопирит-пирротиновой ассоциации вкрапленных руд в интрузиве значительно выше, чем в одноименных парагенезисах сплошных и прожилково-

Таблица 29

Усредненные значения удельной обогащенности селеном ( $Se/S$ ) и теллуром ( $Te/S$ ) основных минеральных ассоциаций медно-никелевых руд ( $n \cdot 10^{-5}$ )

Типы руд	Минеральные ассоциации	$Se/S$	$Te/S$	$Se/Te$	Число проб
Вкрапленные в интрузиве	Пнт + Хп + Пирр	19,8	14,1	1,4	83
Сплошные	Пнт + Хп + Пирр	12,8	2,2	5,8	178
	Пнт + Пирр + Хп	22,3	4,9	4,6	43
	Пнт + Моих ( $\pm$ куб)	26,6	9,5	2,8	9
	Пнт + Тал ( $\pm$ куб)	41,8	17,1	2,4	45
	Пнт + Хп ( $\pm$ куб)	46,2	30,8	1,5	14
Прожилково-вкрапленные в породах экзоконтакта	Пнт + Хп + Пирр	13,0	3,5	3,7	37
	Пнт + Пирр + Хп	21,8	6,9	3,2	33
	Пнт + Хп ( $\pm$ мил)	38,4	30,2	1,3	47
	Бор + Мил + Хп	60,0	86,6	0,7	7

вкрапленных экзоконтактовых руд (см. табл. 29, рис. 24). Уровень концентрации обоих элементов во вкрапленных рудах в интрузиве близок к первичной их концентрации в рудообразующем сульфидном расплаве: специфические особенности формирования этих руд (кристаллизация сульфидов в "каплях" расплава, т.е. в замкнутой системе малого объема) способствовали "консервации" рудообразующих элементов.

По возрастанию удельной обогащенности селеном главные минералы рассматриваемой ассоциации образуют ряд пирротин — пентландит — халькопирит (табл. 30, рис. 25). Такое распределение селена между существующими минералами согласуется с нашими экспериментальными данными, согласно которым при температурах выше 550°C селен предпочтительно накапливается в халькопирите и пентландите, а не в пирротине.

Ограниченный изоморфизм теллура и серы (Синдеева, Годовиков, 1959; Щербина, 1972), несмотря на высокие температуры кристаллизации вкрапленных руд, позволил только части теллура рассеяться в сульфидных минералах. Значительное же его количество вместе с платиной, палладием, золотом, серебром, свинцом, цинком, висмутом и др. накапливалось в более позднем остатке кристаллизующегося расплава, из которого выделились минералы платино-теллуридной ассоциации.

Селен также накапливается в платино-теллуридной ассоциации вкрапленных руд в интрузиве. Об этом свидетельствуют высокие (3–15%) концентрации элемента в минералах ряда галенит—каусталит.

В сплошных рудах наблюдается последовательное обогащение как селеном, так и теллуром от более ранних к более поздним минеральным ассоциациям (см. табл. 29, рис. 24).

Удельная обогащенность селеном наиболее поздней пентландит-халькопиритовой ассоциации сплошных руд превышает более чем в 3 раза удельную обогащенность наиболее ранней пентландит-халькопирит-пирротиновой, теллуром — в 14 раз. Такое значительное перераспределение селена и теллура между продуктами начальных и конечных стадий формирования сплошных руд является следствием фракционирования богатой медью сульфидной жидкости, в которой наряду с другими редкими элементами концентрировались также селен и теллур. Как известно, при кристаллизации любой сложной по химическому составу системы большая часть элементов, присутствующих в малых количествах, накапливается в соединениях, выпадающих из последней порции расплава (Киркинский, 1964).

В соответствии с этим происходит распределение селена в минералах основных парагенетических ассоциаций сплошных руд (табл. 30, рис. 25). В более поздних генерациях одного и того же сульфида закономерно возрастает удельная обогащенность селеном.

В пентландите из поздней пентландит-халькопиритовой ассоциации концентрация селена более чем в 2,5 раза выше, чем в пентландите из наиболее раннего пентландит-халькопирит-пирротинового парагенезиса. Такая же тенденция в накоплении элемента отмечается и в других минералах.

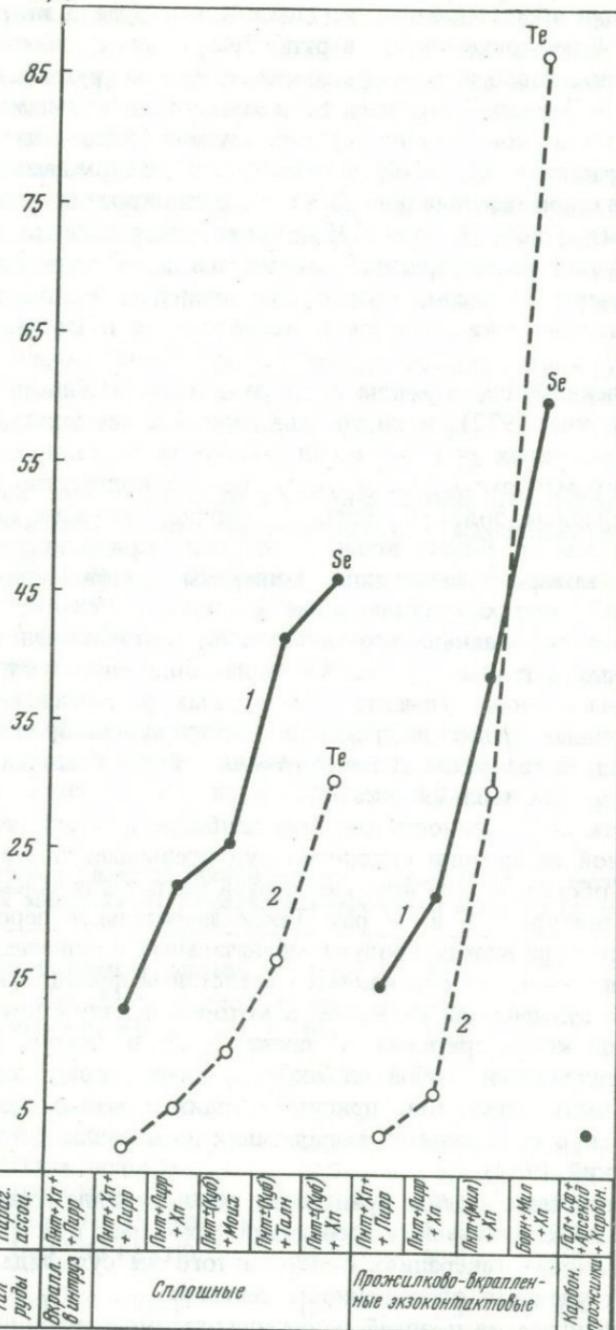
$Se/S \cdot 10^{-5}$ 

Рис. 24. Диаграмма накопления селена (1) и теллура (2) в главных парагенетических минеральных ассоциациях медно-никелевых руд

Характер распределения селена между главными минералами основных парагенезисов руд в соответствии с нашими экспериментальными данными свидетельствует о более низких по сравнению с вкрапленными в интрузивных породах рудах температурах равновесного распределения селена.

Как нами было показано ранее (см. гл. IV), доля рассеянного теллура в сульфидах из минеральных ассоциаций сплошных руд мала. Основные концентрации теллура связаны с минералами платино-теллуридной ассоциации сплошных руд, в которых (галените) накапливаются и значительные концентрации селена — от 0,1 до 0,9 вес. %.

Таким образом, при формировании минеральных парагенезисов сплошных руд наблюдается разное поведение селена и теллура. Первый закономерно накапливается в сульфидах от ранних к более поздним ассоциациям, второй — преимущественно концентрируется в наиболее позднем платиносодержащем флюиде, кристаллизация минералов из которого происходит после окончания формирования основных сульфидных минералов (Генкин, 1968). Характерно, что, помимо собственных минералов теллура (алтант, мончеит и др.), многие минералы платино-теллуридной ассоциации также содержат повышенные концентрации теллура (полярит, фрудит, нигглиит и др.). При метасоматическом замещении минералов основных парагенетических ассоциаций сплошных руд кубанитом второй генерации, согласно нашим данным, не происходит существенного привноса или выноса селена. Кубанит в основном наследует содержания селена, характерные для минерала, который он замещает. Поэтому минеральные ассоциации с кубанитом по уровню концентрации селена не отличаются от первичных минеральных ассоциаций сплошных руд, по которым они развиваются.

Поведение селена и теллура при формировании минеральных ассоциаций прожилково-вкрапленных руд в породах экзоконтакта во многом напоминает рассмотренное выше. Уровень концентраций селена в рудах, сложенных пентландит-халькопирит-пирротиновой и пентландит-пирротин-халькопиритовой минеральными ассоциациями, не отличается от уровня удельной обогащенности в одноименных парагенезисах сплошных руд (см. табл. 29, рис. 24). Характер же распределения элемента между главными минералами ассоциаций иной: максимальные концентрации селена присутствуют в пирротине, минимальные — в пентландите (см. табл. 30, рис. 25). Такое распределение селена между существующими минералами, как показали наши эксперименты, характерно для температур образования, не превышающих 400°С.

В одной из наиболее поздних борнит-миллерит-халькопиритовой ассоциации уровень накопления селена намного превосходит концентрацию элемента в поздних продуктах кристаллизации сплошных руд. Степень фракционирования селена при отложении минеральных ассоциаций экзоконтактовых руд выше, чем при формировании сплошных руд, что свидетельствует о более полной дифференциации рудообразующего флюида.

Сульфидные минералы основных парагенезисов прожилково-вкрапленных руд практически лишены изоморфной примеси теллура. Весь теллур сконцентрировался в минералах платино-теллуридной ассоциации.

Таблица 30

Усредненные значения удельной обогащенности селеном (Se/S) главных минералов (п. 10<sup>-5</sup>)

Типы руд	Минеральные ассоциации	Пирротин	Халькопирит
Вкрапленные в интрузиве	Пнт + Хп + Пирр	22,6 (8)*	30,4 (7)
	Пнт + Хп + Пирр	16,6 (37)	18,7 (38)
	Пнт + Пирр + Хп	20,8 (5)	23,7 (7)
Сплошные	Пнт + Моих	—	—
	Пнт + Тал	—	—
	Пнт + Хп	— —	48,8 (4)
Карбонатные жилы с полиметаллической арсенидной минерализацией	Пнт + Хп + Пирр	17,7 (2)	14,2 (2)
	Пнт + Пирр + Хп	23,8 (2)	20,7 (2)
	Пнт + (Мил) + Хп	— —	37,0 (3)
Карбонатные жилы с полиметаллической арсенидной минерализацией	Бор + Мил + Хп	— —	78,2 (6)
	Гал + Сф + арсениды	— —	— —

\* Число проб

Помимо изоморфного рассеяния, в основных сульфидах часть селена, также как и теллура, накапливалась в позднем остатке, из которого кристаллизовались минералы платино-теллуридной ассоциации. Это привело к образованию минералов ряда галенит–клаусталит, а также к вхождению значительных количеств селена в некоторые теллуриды. Относительная доля селена, приходящегося на платино-теллуридную ассоциацию, составляет всего 10–15% от общего количества селена в экзоконтактовых рудах. Однако, если сопоставить масштабы проявления платино-теллуридной ассоциации и основных парагенезисов сульфидных минералов, то следует признать, что концентрация селена в растворах, отложивших минералы этой ассоциации, была чрезвычайно велика. Взаимодействие флюидов с ранее закристаллизовавшимися сульфидами привело к перераспределению селена в изменившихся условиях в результате равновесного обмена. С помощью микрорентгеноспектральных определений на микрозонде было установлено, что содержание селена в халькопирите из борнит-миллерит-халькопиритовых руд в среднем равно 0,029%. В халькопирите же, на который на-

основных минеральных ассоциаций руд месторождений Талнахского рудного узла

Пентландит	Моихукит	Талнахит	Миллерит	Борнит	Галенит	Сфалерит
29,9 (7)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
22,4 (20)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
25,8 (7)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
33,8 (3)	33,0 (2)	— —	— —	— —	— —	— —
45,7 (7)	— (5)	41,1 —	— —	— —	— —	— —
56,6 (3)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
13,8 (2)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
19,0 (2)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
34,1 (2)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
— —	— —	— —	134,1 (6)	76,6 (4)	— —	— —
— —	— —	— —	— —	— —	50,7 (1)	0,6 (1)

растает галеноклаусталит (16,5% Se), принадлежащий к платино-теллуридной ассоциации, концентрации селена сильно возрастают и равна 0,137%. Это свидетельствует о том, что между вновь образованным галеноклаусталитом и бывшим уже в твердом состоянии халькопиритом установилось новое равновесие по селену.

Сопоставление закономерностей поведения селена и теллура при образовании сплошных и прожилково-вкрапленных руд в экзоконтактовых породах приводит нас к выводу, что специфические условия формирования последних (относительно низкие температуры, большая степень дифференциации рудоносного флюида) определили значительно большую роль платино-теллуридной ассоциации по сравнению со сплошными рудами. Интересно, что наибольшим развитием минералы платино-теллуридной ассоциации пользуются в борнит-миллерит-халькопиритовых разновидностях экзоконтактовых руд, что может быть, по-видимому, объяснено достаточно близким временем образования обеих ассоциаций. Об этом свидетельствует тот факт, что наиболее крупные скопления теллуридов, селенидов, самородного серебра, обычно ассоциируют

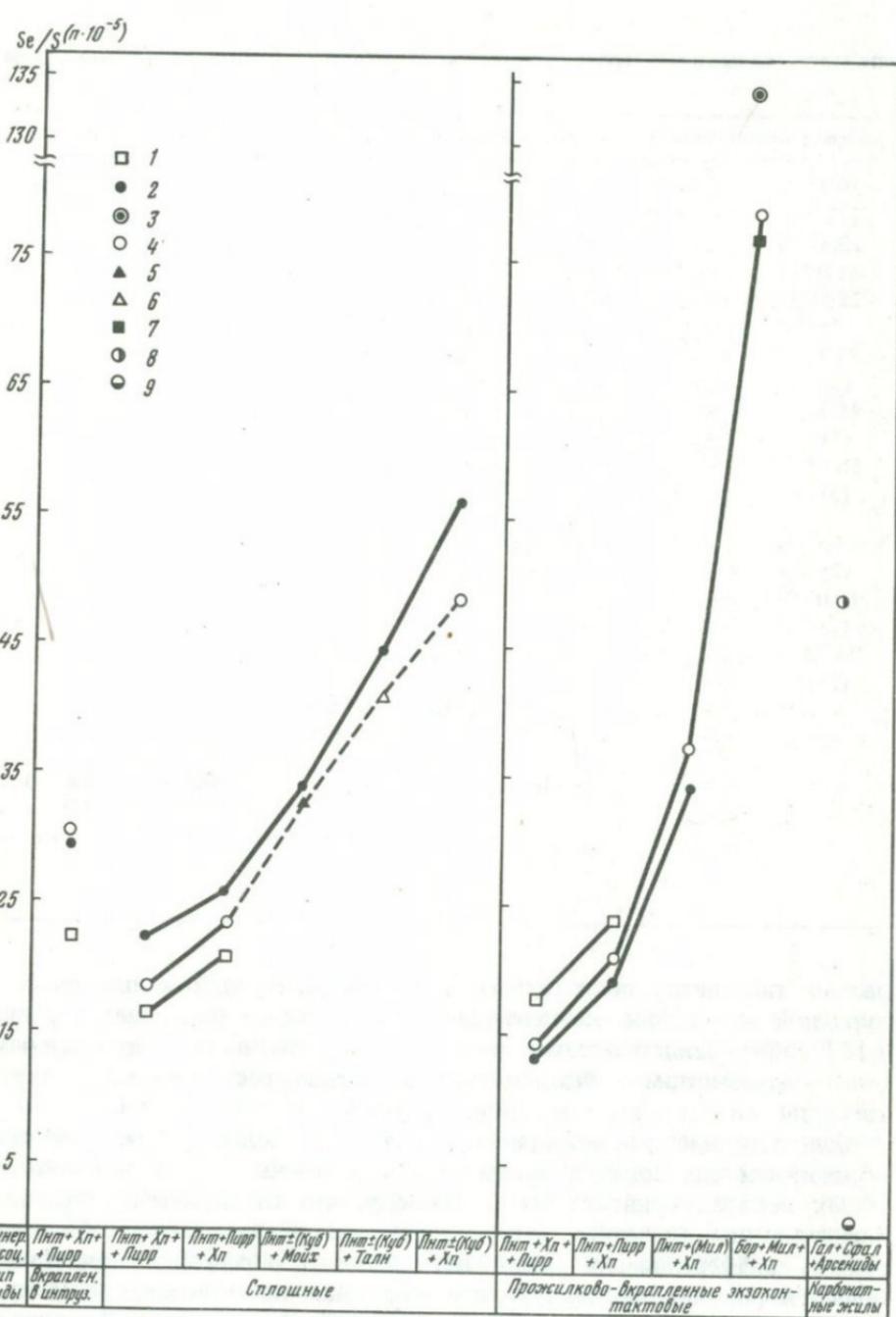


Рис. 25. Диаграмма распределения селена между главными минералами основных парагенезисов медно-никелевых руд

1 – пирротин; 2 – пентландит; 3 – миллерит; 4 – халькопирит; 5 – моухукит; 6 – талнахит; 7 – борнит; 8 – галенит; 9 – сфалерит

с борнитом — самым поздним минералом борнит-миллерит-халькопиритовой ассоциации. С другой стороны, именно в зоне развития этих руд (обычно это самая внешняя оторочка рудной залежи в верхнем экзоконтакте интрузива) были, по-видимому, наиболее благоприятные окислиительно-восстановительные условия для образования селенидов и теллуридов. О высоком потенциале кислорода в системе свидетельствует развитие гематита по магнетиту, а также присутствие в прожилках совместно с кальцитом барита.

В минералах низкотемпературных карбонатных жил — галените, сфалерите, никелине, маухерите, герсдорфите, брейтгауптите — селен и теллур практически не накапливаются. Селен в очень небольших количествах установлен только в галените (0,005–0,007%) и сфалерите (0,0001–0,0002%). Теллур не установлен ни в сульфидах, ни в арсенидах.

Выявленные нами закономерности поведения селена и теллура в процессе формирования медно-никелевых руд Талнахского рудного узла показывают, что каждый из рассмотренных элементов занимает в этом процессе определенное место. В магматическом этапе в поведении селена и теллура можно выделить две линии. Первая соответствует стадии формирования вкрапленных руд в породах интрузива. В данном случае дифференциация сульфидного расплава проявилась только в обособлении на пирротиновую и халькопиритовую части отдельных вкрапленников сульфидов, в которых "законсервировались" имеющиеся в исходном расплаве селен и теллур. Элементы частично рассеялись в сульфидах, частично обособились в виде собственных минералов.

Вторая линия — это стадия формирования сплошных руд, характеризующаяся широким проявлением дифференциации сульфидного расплава. В результате кристаллизационной дифференциации при формировании сплошных руд произошло фракционирование селена — относительное обеднение продуктов ранней кристаллизации и значительное обогащение производных заключительных этапов кристаллизации сульфидного расплава.

Поведение теллура при этом в еще большей степени характеризуется тенденцией к накоплению в наиболее поздних продуктах кристаллизации. Максимальные содержания элемента установлены в минералах платино-теллуридной ассоциации сплошных руд, причем по приближенным подсчетам с этой ассоциацией связано около 60–70% всего имевшегося в исходном рудообразующем расплаве теллура.

В постмагматическом этапе, неразрывно связанным с магматическим и являющимся его непосредственным продолжением, фракционирование селена и теллура между начальными и конечными продуктами кристаллизации происходит в еще большем масштабе. Интересно, что концентрация селена идет двумя параллельными путями — за счет его изоморфного вхождения в сульфидные минералы и вследствие значительного накопления в более поздних минералах платино-теллуридной ассоциации. Относительно низкие температуры формирования руд в постмагматическом этапе явились следствием того, что теллур в основном концентрируется в виде собственных минералов, принадлежащих к платино-теллуридной ассоциации.

Поведение селена и теллура при формировании месторождений Талнахского рудного узла имеет очень много общего с образованием других медно-никелевых месторождений, для которых также типично накопление элементов в наиболее поздних минеральных ассоциациях руд (Юшко-Захарова, 1964).

В заключении следует отметить, что, несмотря на то что селен и теллур являются химически очень близкими элементами, поведение их в процессе образования медно-никелевых руд имеет существенные отличия. Теллур значительно более, чем селен, склонен к накоплению в поздних парагенезисах, где он охотно связывается с катионом и образует индивидуализированные минералы. Накопление селена также происходит от начала до конца рудообразующего процесса, однако он в основном пропорционально рассеивается в сульфидах минеральных ассоциаций, последовательно сменяющих друг друга во времени. Только при достижении значительного уровня концентрации — в платино-теллуридной ассоциации, которая сформировалась в условиях относительного повышенного парциального давления кислорода, — образуются селениды.

Эти различия в поведении селена и теллура обусловлены значительно меньшим сходством в строении атомов серы и теллура по сравнению с серой и селеном. Следует учитывать также и высокие связебразующие свойства атомов теллура (Лебедев, 1957). Все это приводит к тому, что поведение селена во многом зависит от поведения серы, тогда как теллур проявляет черты большой индивидуальности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В образовании эндогенного оруденения микроэлементам принаследует большая роль. Следуя в процессе рудообразования за макрокомпонентами, их геохимическими аналогами, они в целом ряде случаев более чувствительно реагируют на изменение внешних условий минералообразования и контрастно подчеркивают отдельные фазы процесса, которые не столь резко выражаются в особенностях поведения макрокомпонентов.

В медно-никелевых месторождениях Норильского района одними из наиболее интересных микроэлементов являются селен и теллур, связанных общностью поведения с серой — одним из основных макрокомпонентов руд. Геохимическая общность поведения всех трех элементов обуславливает накопление селена и теллура в сульфидной части руд. Однако в процессах дифференциации сульфидного вещества поведение обоих элементов обнаруживает значительную самостоятельность и своеобразие, определяемые особенностями свойства элементов.

Детальное изучение минералогии, геохимии и закономерностей распределения селена и теллура в медно-никелевых месторождениях Талнахского рудного узла позволило сделать следующие основные выводы.

1. Руды месторождений Талнахского рудного узла характеризуются наиболее высокими содержаниями селена и теллура среди всех медно-никелевых месторождений.

2. Главными типами руд месторождений Талнахского рудного узла, в которых концентрируется основная масса селена и теллура являются вкрапленные в интрузивных породах и сплошные, сформировавшиеся в магматическом этапе, а также прожилково-вкрапленные экзоконтактовые, образование которых происходило в основном в постмагматическом этапе.

Образование минеральных разновидностей руд представляет собой сложный процесс, в котором степень дифференциации рудного вещества возрастает от вкрапленных в интрузивных породах к сплошным и особенно прожилково-вкрапленным экзоконтактовым рудам. В результате этого процесса образуются залежи и рудные тела сложного зонального строения, в которых представлены разнообразные ассоциации минералов.

Геохимическое сродство селена и теллура с серой определяет накопление обоих элементов в сульфидной части всех рудных образований.

3. Закономерности распределения и обогащенность селеном и теллуром различных парагенетических ассоциаций рудных минералов находится в прямой зависимости от характера дифференциации минералообразующего вещества в процессе рудообразования.

Во вкрапленных рудах в интрузивных породах содержания селена и теллура являются относительно постоянными и, по-видимому, отра-

жают первичную концентрацию селена и теллура в сульфидной фракции исходного расплава. Фракционирование селена и теллура наиболее значительно проявляется в сплошных рудах и особенно в прожилково-вкрашенных экзоконтактовых рудах.

В ранних минеральных ассоциациях каждого типа руд концентрации селена и теллура обычно ниже, чем в исходном расплаве, и оба элемента резко обогащают продукты поздних стадий кристаллизации.

4. Основная закономерность поведения селена в процессе образования медно-никелевых руд заключается в рассеянии элемента в рудообразующих минералах. Изучение распределения селена в минералах, выполненное химическими методами и микрорентгеноспектральным анализом на микрозонде, доказало изоморфную природу рассеяния селена в сульфидах.

Общая закономерность возрастания концентраций селена в рудообразующих сульфидах выражена в существенном обогащении минералов поздних парагенезисов по сравнению с ранними генерациями минералов. Экспериментально доказана зависимость распределения селена в существующих минералах от температуры. Показана возможность использования распределения селена как геотермометра.

5. Собственные минералы селена образуются на заключительных этапах рудообразования при общем возрастании его концентраций в минералообразующем растворе и повышении потенциала  $O_2$  в системе. Впервые в медно-никелевых месторождениях найдены селениды: клаусталит и галеноклаусталит. Установлено, что наряду с образованием селенидов резко возрастают концентрации селена в рудообразующих сульфидах и парагенных с селенидами теллуридах.

6. При общности закономерностей поведения селена и теллура в процессе рудообразования формы нахождения элементов в рудах различны, что обусловлено большим различием свойств теллура и серы, чем селена и серы. Рассеяние теллура в сульфидах происходит в ранних, наиболее высокотемпературных парагенезисах и крайне незначительно в минералах относительно низкотемпературных ассоциаций, образующихся при общем возрастании концентрации теллура на поздних стадиях рудообразования.

7. Впервые для норильских месторождений выявлено широкое развитие минералов теллура. Выделена новая платино-теллуридная ассоциация минералов, формирующаяся на поздних стадиях минералообразования, после кристаллизации главных рудообразующих минералов. В составе ассоциации впервые в природе установлены новые минералы — телартгаплит,  $(Pd, Ag)_3(Ag, Pb)(Te, Se)$ ,  $Pd_3(As, Te)$ ,  $Pd(Pb, Te, Bi)$ ,  $Pd Pb(S, Se)$ , теллуросурьмянитовая разновидность инсиванита  $Pt(Bi, Sb, Te)_2$ , а также ряд минералов, ранее не известных в медно-никелевых месторождениях СССР или в норильских месторождениях — меренскиит  $Pd(Te, Bi)_2$ , алтант  $PbTe$ , котульскийт  $Pd(Te, Bi)$ , ниггиит  $PtSn$ , argentит  $Ag_2S$ , штромейерит  $AgCuS$ .

Главная особенность теллуровой минерализации Талнахского рудного узла по сравнению с другими медно-никелевыми месторождениями заключается в преобладании среди минералов теллура соединений с палладием и платиной.

## ЛИТЕРАТУРА

Бадалов С.Т., Поваренных А.С. О формах вхождения элементов-примесей в сульфиды. — Мин. сб., № 21, вып. 1. Львов, 1967.

Бокий Г.В. Введение в кристаллохимию. Изд-во МГУ, 1953.

Бонштедт-Кунцетская Э.М., Арзубова О.А. Новые минералы (1934—1972) "Наука", 1974.

Будько И.А., Кулагов Э.А. Новый минерал талнахит — кубическая разновидность халькопирита. — Зап. Все-созюз. мин. о-ва, 1968, 97, № 1.

Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. ИЛ, 1960.

Ваулин Л.П., Суханова Е.Н. Октябрьское медно-никелевое месторождение. — Разведка и охрана недр, 1970, № 4.

Виноградов А.П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре. — Геохимия, 1956, № 1.

Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах горных пород. — Геохимия, 1962, № 7.

Виноградов А.П., Гриненко Л.Н. Изотопный состав серы медно-никелевых месторождений и рудопроявлений Норильского района в связи с вопросами их генезиса. — Геохимия, 1966, № 1.

Воробьева М.С., Иванов В.В., Юшко-Захарова О.Б., Исаева К.Г., Суханова Е.Н. Минералого-геохимические особенности селена и теллура в Талнахской интрузии. — Труды ИМГРЭ, 1972, вып. 7.

Гармаш А.А. Особенности распространения редких элементов в полиметаллических месторождениях Змеиногорского района Рудного Алтая. — Труды ИМГРЭ, 1960, вып. 4.

Генкин А.Д. Условия нахождения и особенности состава минералов платино-

вой группы в рудах Норильского месторождения. — Геол. рудн. месторожд., 1959, № 6.

Генкин А.Д. Минералы платиновых металлов и их ассоциации в медно-никелевых рудах Норильского месторождения. "Наука", 1968.

Генкин А.Д., Журавлев Н.Н., Смирнова Е.М. Новые минералы — монченит и котульскит и состав майнерита. — Зап. Всесоюз. мин. об-ва, 1963, 2 серия, ч. 92, вып. 1.

Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н. О кубическом кубаните и кубическом халькопирите. — Геол. рудн. месторожд., 1966, № 1.

Генкин А.Д., Гладышев Г.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А., Хитров В.Г. Закономерности распределения и формы нахождения элементов группы платины в рудах Норильских месторождений. Автореф. работ сотрудников ИГЕМ АН СССР за 1970 г. М., 1971.

Генкин А.Д., Вяльсов Л.Н., Евстигнеева Т.Л., Марчукова И.Д. О мончените и майнерите из медно-никелевых руд Октябрьского месторождения. — Зап. Всесоюз. мин. о-ва, 1972<sub>1</sub>, 2 серия, ч. 101, вып. 1.

Генкин А.Д., Филимонова А.А., Дистлер В.В. О составе пентландита из медно-никелевых руд норильских месторождений. Автореф. работ сотрудников ИГЕМ АН СССР за 1971 г. М., 1972<sub>2</sub>.

Генкин А.Д., Евстигнеева Т.Л., Вяльсов Л.Н., Лапутина И.П., Тронева Н.В. Паоловит  $Pd_2Sn$  — новый минерал из медно-никелевых сульфидных руд. — Геол. рудн. месторожд., 1974, № 1.

Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М., Госгеолтехиздат, 1959.

- Годлевский М.Н.* Источники оруденения, связанного с траппами Сибирской платформы. – В кн.: Петрология траппов Сибирской платформы. Л., „Недра”, 1967.
- Годлевский М.Н.* О дифференциальной подвижности компонентов при формировании сульфидных медно-никелевых руд. – Геол. рудн. месторожд., 1967, № 2.
- Годлевский М.Н.* Магматические месторождения. – В кн.: Генезис эндогенных рудных месторождений. „Недра”, 1968.
- Годлевский М.Н., Гриненко М.Н.* Некоторые данные об изотопном составе серы сульфидов Норильского месторождения. – Геохимия, 1963, № 1.
- Годлевский М.Н., Лихачев А.П.* Физико-химические условия образования сульфидных руд Норильских месторождений. – В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района. Норильск, 1971.
- Гольдшмидт В.М.* К геохимии селена. – В кн.: Геохимия редких элементов. М.-Л., ОНТИ, 1938.
- Гриненко Л.Н.* Изотопный состав серы сульфидов Талнахского медно-никелевого месторождения в связи с вопросами его генезиса. – Геол. рудн. месторожд., 1966, № 4.
- Груза В.В.* Линейные парагенезисы главных породообразующих элементов девонских кислых эфузивов Алтай-Саянской складчатой области и опыт их генетической интерпретации. – Сов. геол., 1964, № 12.
- Даценко В.А.* Геологическое строение и минеральные ресурсы северо-запада Сибирской платформы. – В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района. Норильск, 1968.
- Додин Д.А.* Геология и петрология Талнахских дифференцированных интрузий. – В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района. Норильск, 1968.
- Додин Д.А., Изютико В.М., Батуев Б.Н., Митенков Г.А.* Атлас магматических и метаморфических пород и медно-никелевых руд Норильского района. Л., „Недра”, 1970.
- Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д., Коваленкер В.А.* Новый висмутид палладия – соболовскит и номенклатура минералов системы PdBi – PdTc. – Зап. Всесоюзн. мин. о-ва, 1975, вып. 5.
- Егоров В.Н., Суханова Е.Н.* Талнахский рудоносный интрузив на северо-западе Сибирской платформы. – Разведка и охрана недр., 1963, № 1.
- Ермилов В.В., Коваленкер В.А.* Определение микроколичеств селена на рентгеновском микроанализаторе MS-46. – В кн.: Материалы Моск. гор. конф. молодых науч. работников по геологии, минералогии, геохимии и обогащ. цветн. благор. металлов и алмазов. М., 1972.
- Ершов В.В.* Минералого-генетические типы руд Талнахского месторождения (Норильский район). – Труды ЦНИГРИ, 1964, вып. 62.
- Ершов В.В., Попова Г.Б.* Первичная зональность экзоконтактовых сульфидных медно-никелевых руд Талнахского месторождения. – Докл. АН СССР, 1967, 173, № 6.
- Зайнуллин Г.Г.* О некоторых закономерностях распределения селена и теллура в медно-никелевых рудах месторождений Норильского района. – Труды ИМГРЭ, 1959, вып. 2.
- Зайнуллин Г.Г.* Некоторые вопросы геохимии селена и теллура в медно-никелевых рудах Норильского района. – Геохимия, 1960, № 3.
- Зайнуллин Г.Г., Королев Н.В., Марчуко-ва И.Д.* Новые данные о форме нахождения селена и теллура в медно-никелевых рудах Норильского района. – Геохимия, 1964, № 9.
- Золотухин В.В.* Основные закономерности прототектоники и вопросы формирования рудоносных трапповых интрузий. „Наука”, 1964.
- Киркинский А.В.* Некоторые закономерности распределения редких элементов в процессе кристаллизационной дифференциации. – Геохимия, 1964, № 8.
- Коваленкер В.А.* О формах нахождения селена и теллура в сульфидных медно-никелевых рудах месторождений Талнахского рудного узла. – В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района. Норильск, 1971.
- Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Вяльсов Л.Н.* О первой находке минералов ряда галенит–калаустит в сульфидных медно-никелевых рудах. – Геол. рудн. месторожд., 1971, № 2.
- Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Вяльсов Л.Н., Генкин А.Д., Евстигнеева Т.Л.* Минералы теллура в сульфид-

ных медно-никелевых рудах Талнахского и Октябрьского месторождений (Норильский район). — Изв. АН СССР, 1972, № 11.

Коваленкер В.А., Гладышев Г.Д., Носик Л.П. Изотопный состав серы сульфидов из месторождений Талнахского рудного узла в связи с их сelenоносностью. — Изв. АН СССР, 1974<sub>1</sub>, № 2.

Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Вяльсов Л.Н. Высокоренистый молибденит из медно-никелевых руд Талнахского месторождения. — Докл. АН СССР, 1974<sub>2</sub>, 217, № 2.

Коваленкер В.А., Генкин А.Д., Евстигнеева Т.Л., Лапутина И.П. Теларгпалит — новый минерал палладия, серебра и теллура из медно-никелевых руд Октябрьского месторождения. — Зап. Всесоюз. мин. о-ва, 1974<sub>3</sub>, вып. 5.

Котульский В.К. Современное состояние вопроса о генезисе медно-никелевых сульфидных месторождений. — Сов. геол., 1948, № 29.

Кравцов В.Ф., Седых Ю.Н., Гор Ю.Г. Геолого-структурные особенности Талнахского рудного узла. — В кн.: Петрология и рудоносность Талнахских и Норильских дифференцированных интрузий. Л., "Недра", 1971.

Лебедев В.И. Основы энергетического анализа геохимических процессов. Изд-во ЛГУ, 1957.

Лебедев В.И. Энергетические и размерные закономерности изоморфизма в минералах. — В кн.: Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного рудообразования. Л., "Наука", 1967.

Лихачев А.П. О природе талнахита. — В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района. Норильск, 1971<sub>1</sub>.

Лихачев А.П. Условия образования пентландита. — В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района". Норильск, 1971<sub>2</sub>.

Малевский А.Ю. О влиянии селена на изоморфные замещения серы теллуром. — Докл. АН СССР, 1963, 152, № 1.

Малевский А.Ю. Зависимость состава сульфидов от температуры минералообразования (по экспериментальным данным). — В кн.: Типоморфизм минералов и его практическое значение. "Недра", 1972.

Муравьева И.В., Евстигнеева Т.Л., Филимонова А.А., Малов В.С. Первая находка моихукита в медно-никелевых рудах Октябрьского месторождения (Норильский район). — Геол. рудн. месторожд., 1972, № 3.

Найгородин В.И., Сидоров А.А. О вулканогенно-плутоническом ряде золоторудных формаций в Охотско-Чукотском вулканогенном поясе. — Геол. и геофиз., 1971, № 9.

Некрасов Б.Н. Курс общей химии. М., Госхимиздат, 1960.

Нечелюстов Н.В., Попова Н.Н., Минцер Э.Ф. Распределение элементов-примесей в процессе гипогенного рудообразования в свинцово-цинковых и медно-молибденовых месторождениях Карамазара. — Труды ИМГРЭ, 1961, вып. 5.

Паулинг Л. Природа химической связи. М., Госхимиздат, 1947.

Поваренных А.С. О некоторых основных вопросах кристаллохимии и их понимании в минералогии. — Зап. Всесоюз. мин. о-ва, 1955, ч. 84, № 4.

Разин Л.В., Бегизов В.Д. Золото-серебряная минерализация Талнахского и Октябрьского месторождений. — Геол. рудн. месторожд., 1973, № 6.

Рамдор П. Рудные минералы и их срастания. ИЛ, 1962.

Синдеева Н.Д. Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура. М., Изд-во АН СССР, 1959.

Синдеева Н.Д. Селен и теллур. — В кн.: Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. "Наука", 1964, т. 2.

Синдеева Н.Д., Годовиков А.А. Об изоморфизме между серой и теллуром в галените. — Докл. АН СССР, 1959, 127, № 2.

Синдеева Н.Д., Курбанова Н.З. О klarke селена в некоторых горных породах. — Докл. АН СССР, 1958, 120, № 2.

Славинский М.Н. Физико-химические свойства элементов. М., Металлургиздат, 1952.

Суханова Е.Н. Случай образования кокса под влиянием сульфидной жилы. — Геол. рудн. месторожд., 1959, № 6.

Суханова Е.Н. Особенности строения заложений сплошных сульфидов в медно-никелевом месторождении. — Разведка и охрана недр, 1964, № 4.

- Суханова Е.Н.** Зональность рудных тел, интрузий и тектономагматических узлов и ее прикладное значение. — В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского горно-промышленного района. Норильск, 1968.
- Суханова Е.Н., Коваленкер В.А.** Элементы-примеси в рудах норильских месторождений. — В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района. Норильск, 1971.
- Урванцев Н.Н.** Тектоника северо-западной части Сибирской платформы и связь ее с оруденением. — Труды НИИГА, Л., 1958, 80, вып. 5.
- Филимонова А.А., Басова Г.В., Ермилов В.В., Муравицкая Г.Н.** Пирротины из сплошных медно-никелевых руд Комсомольского рудника (Норильский район). Автореф. сотрудников ИГЕМ АН СССР за 1971 г. М., 1972.
- Филимонова А.А., Муравьева И.В., Евстигнеева Т.Л.** Минералы группы халькопирита в медно-никелевых рудах Норильских месторождений. — Геол. рудн. месторожд., 1974, № 5.
- Чернышов И.М., Буковшин В.В.** Молибденит из сульфидных медно-никелевых руд и рудопроявлений Воронежского кристаллического массива. — Труды Воронежск. ун-та, 1968, вып. 66.
- Чжун Цзя-жун.** О селенсодержащей сурьмяно-рутгутной формации. — Геохимия, 1962, № 8.
- Шарапов И.П.** Применение математической статистики в геологии. "Недра", 1965.
- Шишкин Н.Н., Митенков Г.А., Михайлов В.А.** Пирротины сплошных руд Талнахского с Октябрьского месторождений (Норильский район). — Геол. рудн. месторожд., 1972, № 2.
- Шербина В.В.** Основные черты геохимии теллура. — Изв. АН СССР, серия геол., 1937, № 5.
- Шербина В.В.** Основы геохимии. "Недра", 1972.
- Юдина В.В.** К вопросу о контактовом метаморфизме и метасоматозе в связи с дифференцированными траппово-ими интрузиями (на примере Талнахской никеленосной интрузии). — В кн.: Петрология траппов Сибирской платформы. Л., "Недра", 1967.
- Юшко-Захарова О.Е.** Геохимия и минералогия селена и теллура в медно-никелевых месторождениях. "Наука", 1964.
- Юшко-Захарова О.Е., Авдонин А.С., Быков В.П., Кулагов Э.А., Лебедева С.И., Черняев Л.А., Юркина К.В.** О составе платиновых минералов в медно-никелевых рудах Талнахского и Норильского месторождений. — Труды ИМГРЭ, 1972, вып. 2.
- Юшко-Захарова О.Е., Черняев Л.А.** О составе и свойствах нигглиита из медно-никелевых руд Мончегорского месторождения. — Докл. АН СССР, 1966, 170, № 5.
- Яковлев Ю.Н., Астафьев В.В., Астафьев Ю.А.** О распределении селена в медно-никелевых рудах Печенгского и Аллареченского районов. — В кн.: Материалы по минералогии Кольского полуострова. Л., 1968, № 6.
- Яловой А.А., Сидоров А.Ф., Рудашевский Н.С., Будько И.А.** Боровският  $Pd_3SbTe_4$  — новый минерал. — Зап. Всеес. мин. об-ва, 1973, ч.102, вып. 4.
- Barns R.G., Fyle W.S.** Trace element distribution rules and their significance. — Chemical Geol., 1967, 2, N 2.
- Bethke P.M., Barton P.B.** Distribution of Some minor elements between coexisting sulfide minerals. — Econ. Geol., 1971, 66, N 1.
- Cabri L.J.** A new copper-iron sulfide. — Econ. Geol., 1967, 62, N 7.
- Cabri L.J., Hall S.R.** Mooioekite and haycockite, two new copper — iron sulfides and their relationship to chalcopyrite and talnakhite. — Amer. Mineral., 1971, 57.
- Cabri L.J.** The mineralogy of the platinum-group elements. — Miner. Sci. Eng. 1972, 1, N 3.
- Cabri L.J., Harris D.C.** The new mineral insizwaite and new data on niggliite. — Miner. Mag., 1972, 38, N 9.
- Cabri L.J., Harris D.C., Gait R.J.** Michenerite redefined and froodite confirmed from Sudbury area. — Can. Miner., 1973, 11, part 5.
- Cabri L.J., Laflamme J.H.G., Stewart J.M.** Temagamite, a new palladium-mercury telluride from the Temagami copper deposite, Ontario, Canada. — Can. Miner., 1973, 12, part 3.
- Cabri L.J., Pikwick K.M.** A complex bis-muthian telluride inter — growth from the Stillwater complex, Montana. — Econ. Geol., 1974, 69, N 2.
- Cameron E.N., Threadgold J.M.** Vulkanaite, a new copper telluride from Colorado,

- with notes on certain associated minerals. — Amer. Miner., 1961, 46, N 3–4.
- Claringbul G.F., Hey M.N.* Miner. Abstr., 1957, 13, N 5.
- Clark A., Sillitoe R.H.* Cuprion Galena solid solution, Zibillir mining district, Abacama. — Amer. Miner., 1971, 56, N 11–12.
- Coleman R.G.* The natural occurrence of galena-clausthalite solid solution series. — Amer. Miner., 1959, 44, N 1–2.
- Donney G., Kullerud G.* High-temperature chalcopyrite. — Carn. Inst. Wash., Yb., 1958, 57.
- Earley I.W.* Description and synthesis of selenide minerals. — Amer. Miner., 1950, 35, N 5–6.
- Grip E.* Geology of the nikel deposit at Lainjaur in northern Sweden. Stockholm, 1961.
- Grönvold F., Röst E.* On the sulfides, selenides and tellurides of palladium. — Acta Chem. Scand., 1956, 10, N 10.
- Halbig J.B., Wright J.D.* Distribution of selen between hydrothermally synthesised sphalerite and galena at trace-level concentrations (Abstr.). — Trans. Amer. Geophys. Union., 1969, 50, N 4.
- Harris D.C., Cabri L.J., Kaiman S.* Athabascaite: a new copper selenide mineral from Martin Lake, Saskatchewan. — Can. Miner., 1970, 10, part 2.
- Harris D.C., Naffield E.W.* Bamballite, a new copper telluroselenide. — Can. Miner., 1972, 11, part 4.
- Hawley J.E.* The Sudbury ores: their mineralogist and origin. — Can. Miner., 1962, 7, part 1.
- Hawley J.E., Nickol J.* Selenium in some Canadian sulfides. — Econ. Geol., 1959, 54, N 4.
- Hiller J.E., Probstain K.* Thermische und röntgenographische Untersuchungen am Kupferkies. — Zeitsch. F. Krist., 1956, Bd. 108, H. 1–2.
- Johan Z., Picot P., Pierrot R., Verbeek T.* L'osterboshite, une nouvelle minérale et la trogline cupropalladifère de Musonoi (Katanga). — Bull. Soc. Franc. Miner. et Crist., 1970, 93, N 4.
- Johan Z., Picot P., Pierrot R., Kvacek M.* La permingleatite, un nouveau minéral du groupe de la luzonite. — Bull. Soc. Franc. Miner. et Crist., 1971, 94, N 2.
- Johan Z., Picot P., Pierrot R., Kvacek M.* La fischesserite, premier seleniure d'or isotrope de la petzit. — Bull. Soc. Franc. Miner. et Crist., 1971<sub>2</sub>, 94, N 4.
- Kingston G.A.* The occurrence of platinoid bismuthotellurides in the Merensky Reef at Rustenburg platinum mine in the Western Bushweld. — Miner. Mag., 1966, 35.
- Kullerud G., Jund P., Moh G.* The fase relation in systems Cu–Ni–S, Cu–Fe–S and Fe–Ni–S on magmatic ore deposits. A Simposium. — Econ. Geol. Monograph, 1969, 4.
- McIntaire W.L.* Trace elements partition coefficient — a review of theory and application to geology. — Geochim. Cosmochim. Acta, 1963, 27.
- Naldrett A.J., Craig J.R., Kullerud G.* The central portion of the Ni–Fe–S system and its bearing on pentlandite exsolution in iron-nickel sulfide ores. — Econ. Geol., 1967, 62.
- Pokorny J.* Sulphide ore deposits in Ransko basic massiv. — Sb. Geol. Veb. Iozis. Geol. rada LG. 1969, sv. 10.
- Rucklidge J.* Electron microprobe investigations of platinum metall minerals from Ontario. — Can. Miner., 1969, 9, part 5.
- Sasaki A.* Sulfur isotope study of the Muscox intrusion, district of Mackenzie. — Geol. Sur. Can., 1969.
- Simpson D.R.* The binary system PbS–PbSe. — Econ. Geol., 1964, 59.
- Schneiderhöhn H.* Bildungsgesetze eruptiver Erzlagerstätten und Zusammenhänge zwischen den Eruptiv gesteinsprovinzen und den Metallprovinzen der Erde. — Metall. u. Erz., 1925, N 25.
- Strunz H.* Mineralogische tabellen. Leipzig, 1957.
- Thomassen L.* Über Kristallstrukturen einiger binären Verbindungen der Platinmetalle. — Z. Physical. Chem. Abt., 1929, Bd 2, H. 5/6.
- Tischendorf G.* Zur Verteilung des Selens in Sulfiden. Leipzig, 1966.
- Tischendorf G., Ungethüm H.* Über die Bildungsbedingungen von Claustalit–Galenit und Bemerkungen zur Selenverteilung im Galenit in Abhängigkeit vom Redoxpotenzial und vom pH-Wert. — Chem. Erde, 1964, Bd 23, N 4.
- Usdowsky H.E.* Erzminerale als geologische Thermometr. — Naturwissenschaften, 1967, Bd 54, N 18.
- Vuorelainen J., Huhma A., Häkli A.* Sederholmite, wilkmanite, kullerudite, mäkinenite and trüstelite, five new selenide minerals. — Bull. Com. Geol. Finlande, 1964, N 215.
- Wright H.D., Barnard W.M., Halbig J.B.* Solid solution in the systems ZnS–ZnSe and PbS–PbSe at 300°C and above. — Amer. Miner., 1965, 50, N 10.

## ПОЯСНЕНИЯ К ТАБЛИЦАМ

### Таблица I

#### Вкрапленные руды в интрузивных породах

1 — интерстициальная вкрапленность сульфидов среди серпентинизированных зерен оливина в пикритовом габбро-долерите. Светло-серое — троилит, белое — пентландит. Полир. шлиф. Увел. 40

2 — овощная и интерстициальная сульфидная вкрапленность в пикритовом габбро-долерите. Полир. штуф. Увел. 2

### Таблица II

#### Вкрапленные руды в интрузивных породах

1 — ксеноморфная вкрапленность сульфидов в такситовом габбро-долерите. Полир. штуф. Увел 2

2 — сочетание крупной и мелкой интерстициальной вкрапленности сульфидов в троктолитовом габбро-долерите. Полир. штуф. Натур. вел.

### Таблица III

#### Сплошные медно-никелевые руды

1 — пластинчатые и пламеневидные выделения пентландита в крупнозернистом пирротине I генерации в пирротиновых рудах. Полир. шлиф. Увел. 90

2 — мелкозернистый пирротин II генерации на границе пентландита (белое) и пирротина I генерации (темно-серое), серое — халькопирит в пирротиновых рудах. Полир. шлиф. Увел. 165

3 — идиоморфный метакристалл пирротина II генерации (темно-серое) в халькопирите (светло-серое). Черное — нерудные. Халькопиритовые руды. Полир. шлиф. Увел. 40

4 — решетчатые срастания троилита (серое) и гексагонального пирротина (темно-серое) среди мелкозернистого кубанита II генерации (светло-серое) в троилит-пирротин-кубанитовых рудах. Полир. шлиф. Увел. 90

### Таблица IV

#### Морфология выделений пентландита и миллерита

1 — звездчатые дендриты пентландита в крупнозернистом пирротине I генерации. Сечение, близкое базальному. Сплошные пирротиновые руды. Полир. шлиф. Увел. 90

2 — миллерит-халькопиритовая жила в гранат-пироксеновых роговиках. Пластинчатые выделения миллерита (белое) в халькопирите располагаются перпендикулярно контакту. Полир. штуф. Натур вел.

### Таблица V

#### Редкие минералы медно-никелевых руд

1 – зерно аргентита (?) среди мелкозернистого кубанита (светло-серое). Сплошные кубанитовые руды. Полир. шлиф. Увел. 160

2 – пластинчатые взаимноперпендикулярные выделения сульфосоли свинца, меди и сурьмы в галените. Брекчиевидные руды. Полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 560

3 – микрофотография выделения клаусталита (белое) в борните (темно-серое) среди нерудных минералов и сканинг (справа) тех же зерен клаусталита в характеристическом рентгеновском излучении  $\text{Se}_{\text{Ka}_1}$

### Таблица VI

#### Морфология выделений алтита из медно-никелевых руд

1 – срастание алтита (1), фрудита (2), паоловита (3) и нигтлиита (4) в халькопирите. Сплошные кубанит-халькопиритовые руды. Полир. шлиф. Увел. 160

2 – пластинчатые выделения алтита (белое) в галените (серое). Темно-серое – халькопирит, черное – треугольники выкрашивания в галените. Полир. шлиф. Увел. 90

3 – различные по морфологии и размерам выделения алтита (белое) и галенита (серое). Полир. шлиф. Увел. 120

### Таблица VII

#### Полиминеральные срастания теллуридов

1 – включения мончешита (светло-серое) в котульските (белое) среди халькопирита (темно-серое). Черное – дефекты полировки. Миллерит-пентландит-халькопиритовые брекчиевидные руды. Полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 1000

2 – срастание теллуросурьмянинистого инсизвайта (1), алтита (2), самородного серебра (3), соболевскита (4) и паоловита (5). Платиновый концентрат из сплошных пирротиновых руд. Искусств. полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 560

3 – срастание майченерита (светло-серое) и меренскита (белое), приуроченное к прожилку мелкозернистого пирротина II генерации (темно-серое) в халькопирите (серое). Пирротин-халькопиритовые брекчиевидные руды. Полир. шлиф. Увел. 320

4 – срастание котульскита (белое) и теларгпалита (серое) в халькопирите (темно-серое) и борните (черное). Борнит-миллерит-халькопиритовые прожилково-вкрашенные экзоконтактовые руды. Полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 560

### Таблица VIII

#### Морфология выделений теллуридов

1 – срастание котульскита (а), теларгпалита (б), минерала  $\text{Pd}_3(\text{As},\text{Te})$  (в), минерала  $(\text{Pd},\text{Ag})_3(\text{Ag},\text{Pb})(\text{Te},\text{Se})$  (г) и клаусталита (д); 1 – микрофотография; 2 – то же, в поглощенных электронах; 3 – в характеристическом рентгеновском излучении  $\text{Pd}_{\text{La}_1}$ ; 4 –  $\text{Ag}_{\text{L}\beta_1}$ ; 5 –  $\text{Pb}_{\text{La}_1}$ ; 6 –  $\text{Bi}_{\text{La}_1}$ ; 7 –  $\text{As}_{\text{L}\beta_1}$ ; 8 –  $\text{Se}_{\text{Ka}_1}$

9 –  $\text{Te}_{\text{La}_1}$

2 – округлые и пластинчатые выделения котульскита (белое) в селенодержащем галените (0,9% Se). Прожилково-вкрашенные экзоконтактовые руды. Полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 1000

### Таблица IX

#### Структурные взаимоотношения теллуридов

1 – срастание паоловита (*a*) и теллуростого соболевского (*b*). Черное – жильные минералы, светло-серое – пентландит, серое – халькопирит. Сплошные пирротин-халькопиритовые руды. Полир. шлиф. Увел. 165

2 – замещение котульского (белое) теларгпалитом (серое). Темно-серое (основная масса) – халькопирит, светло-серое, рельефное – миллерит. Борнит-миллерит-халькопиритовые прожилково-вкрашенные экзоконтактовые руды. Полир. шлиф. Увел. 320

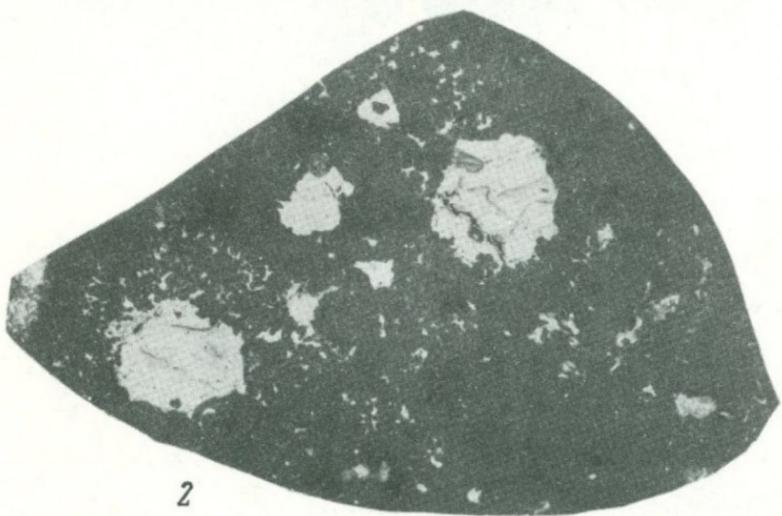
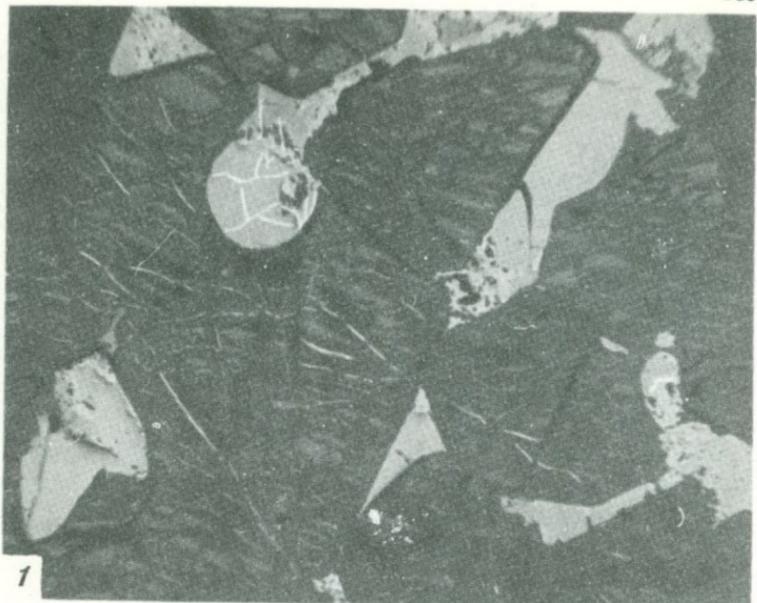
### Таблица X

#### Соотношения теллуридов с главными рудообразующими сульфидами

1 – срастание минерала  $(\text{Pd},\text{Ag})_3(\text{Ag},\text{Pb})(\text{Te},\text{Se})$  – (серое) с котульским (белое) среди халькопирита (светло-серое) и борнита (черное). Борнит-миллерит-халькопиритовые прожилково-вкрашенные экзоконтактовые руды. Полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 1000

2 – цепочка мелких удлиненных зерен котульского (белое) среди халькопирита (серое). Черное – дефекты полировки. Миллерит-халькопиритовые брекчиивидные руды. Полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 560

3 – микропрожилок теларгпалита (светло-серое) и котульского (белое) в борните (черное). Серое – халькопирит. Борнит-миллерит-халькопиритовые прожилково-вкрашенные экзоконтактовые руды. Полир. шлиф. Масл. иммерс. Увел. 560





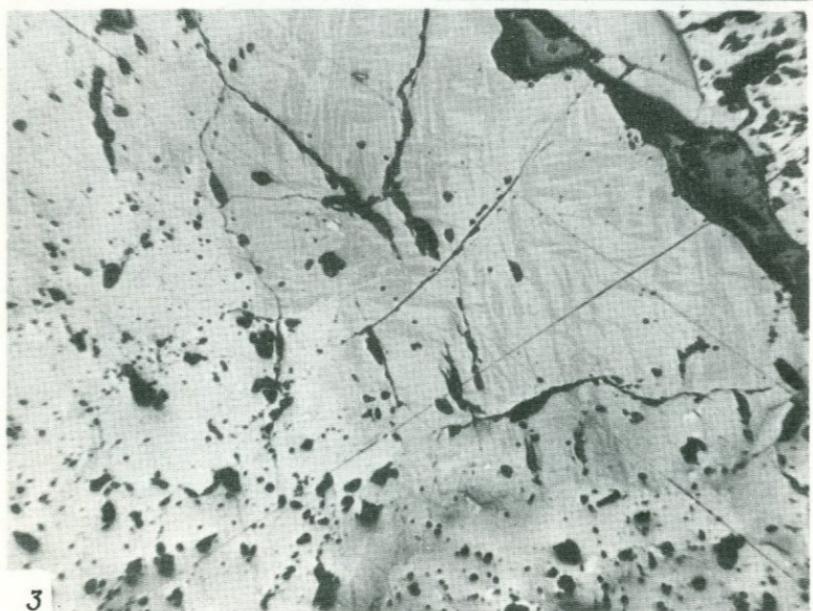
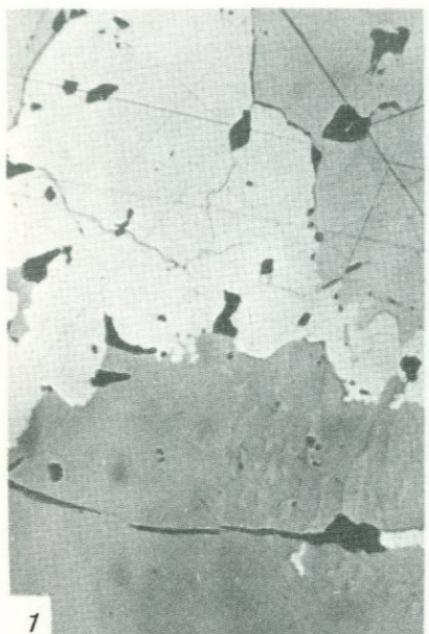
1

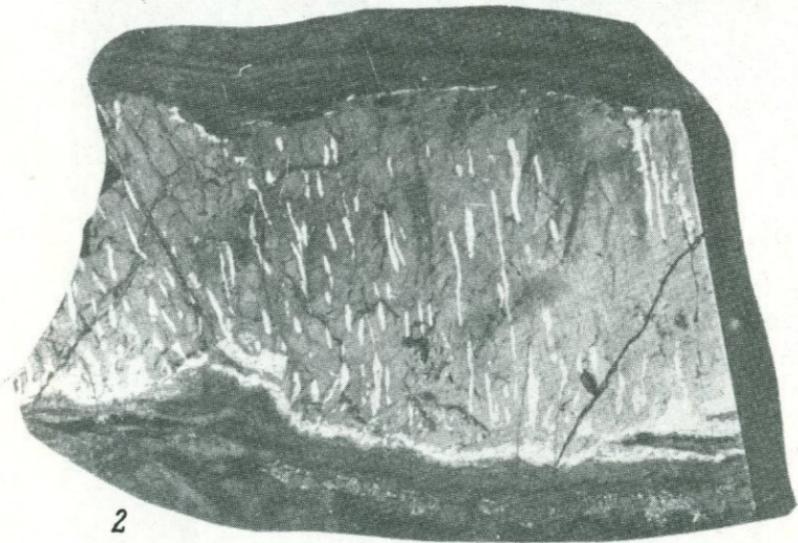


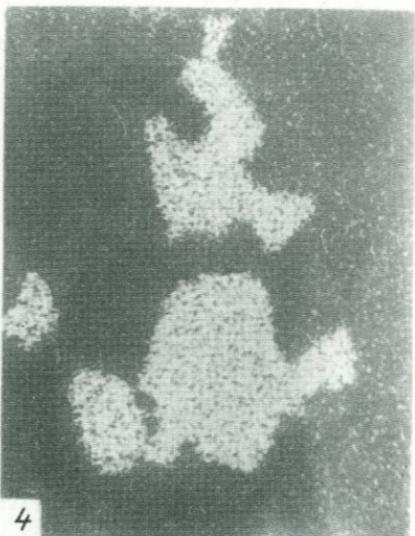
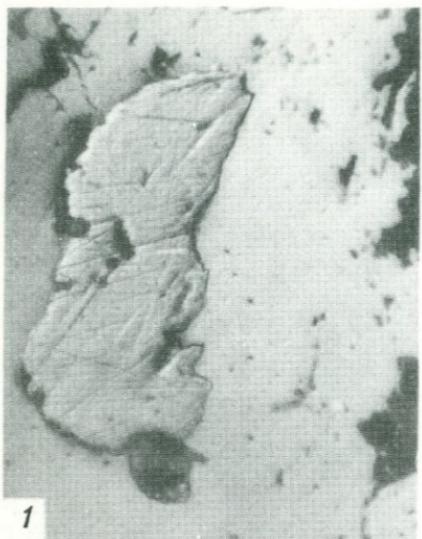
2

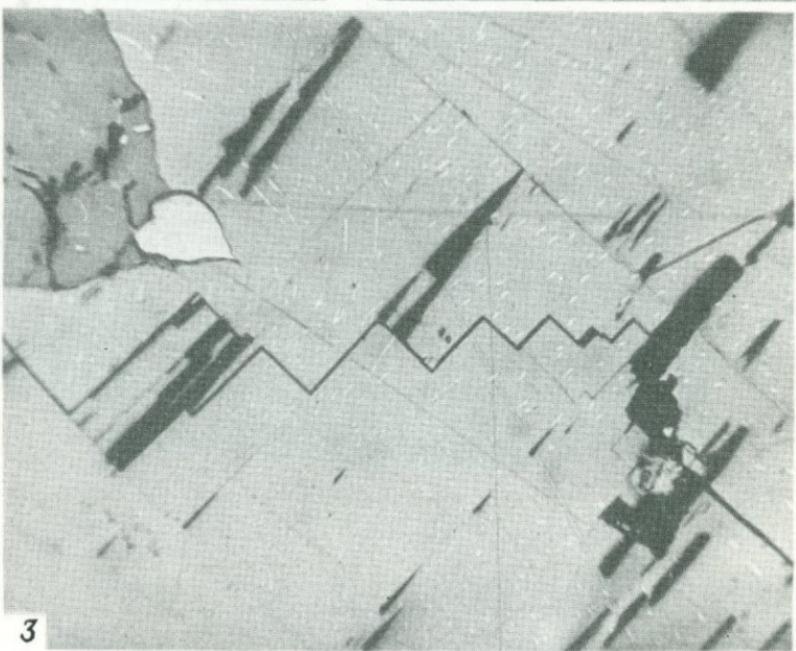
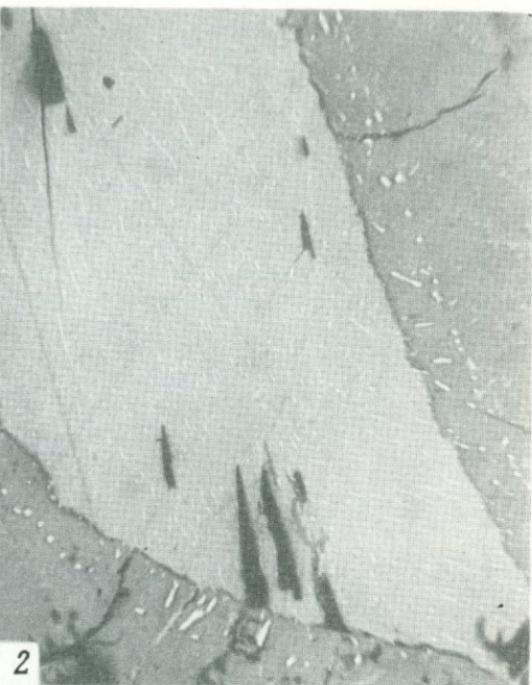
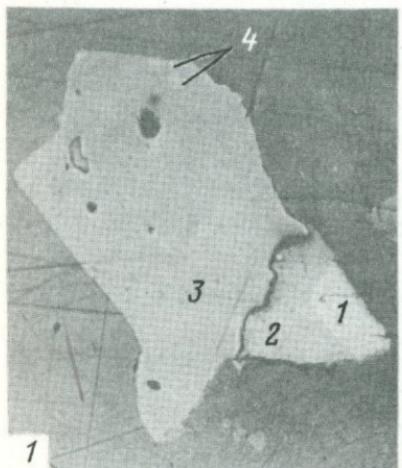


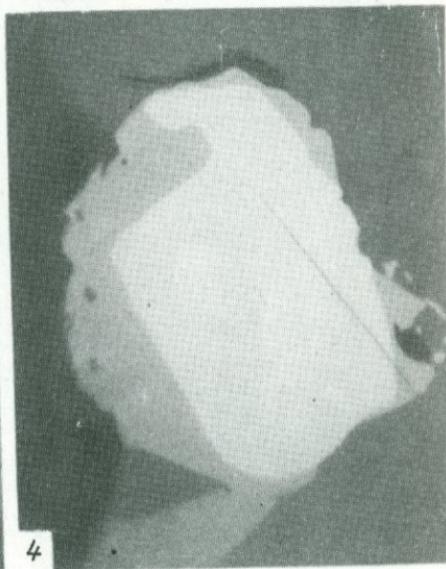
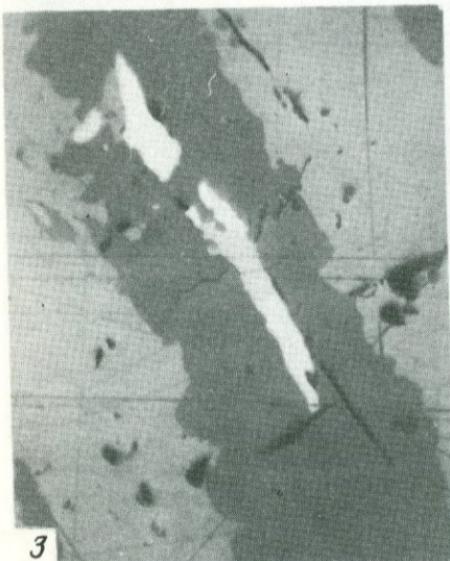
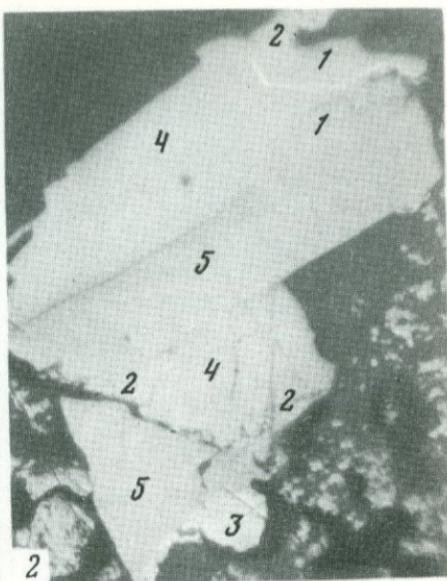
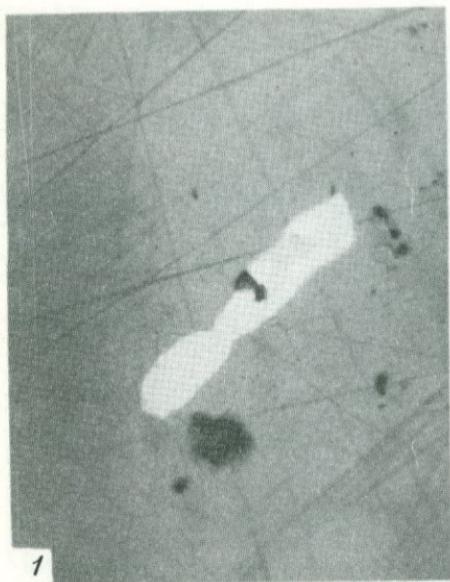
3

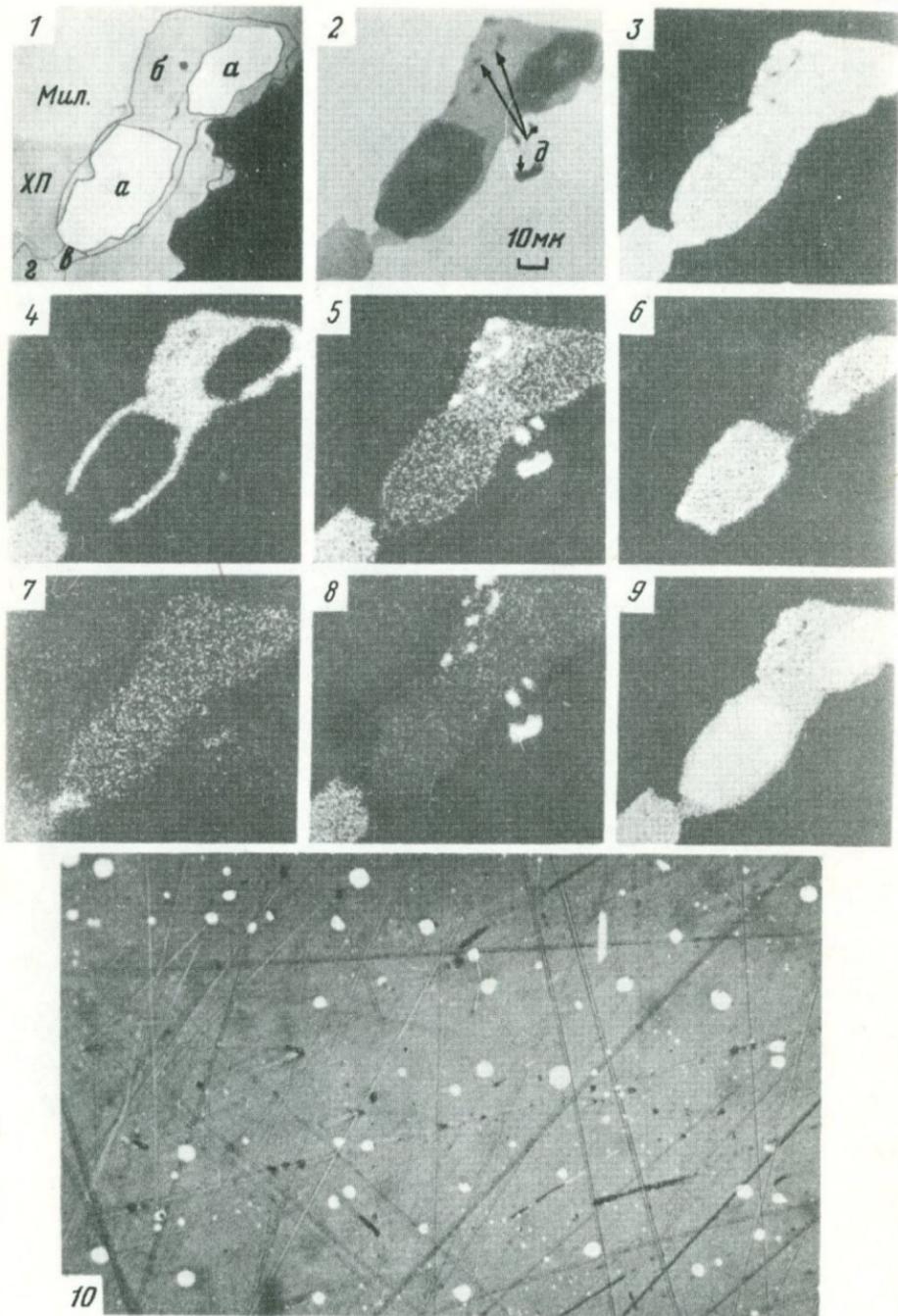


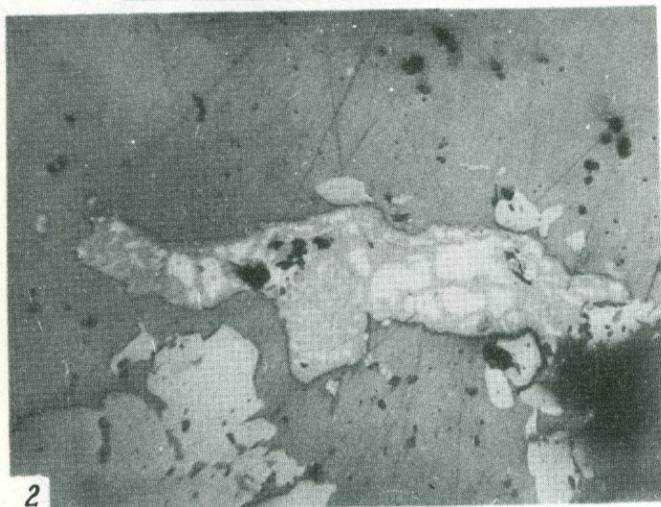
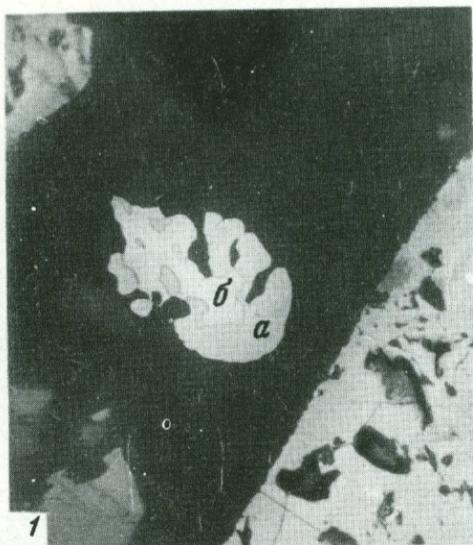


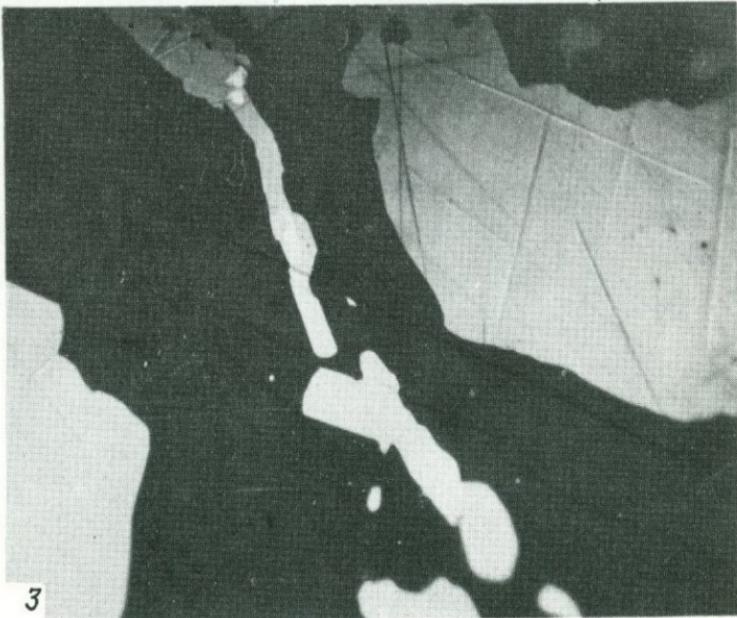
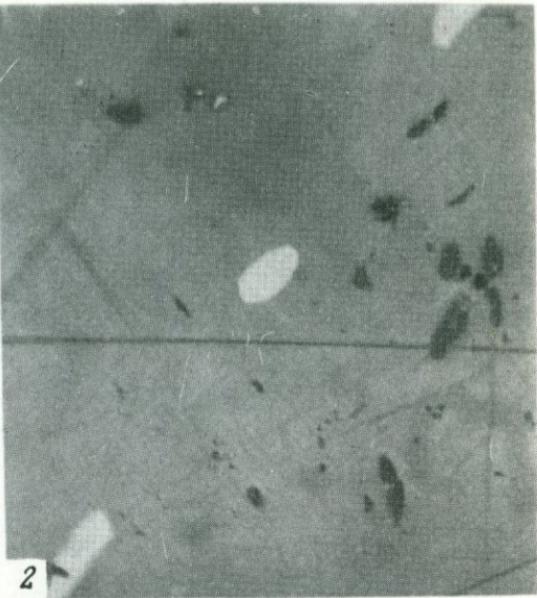












# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	3
<b>Глава I. КРАТКИЙ ОЧЕРК ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА</b>	6
<b>Глава II. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА</b>	10
<i>Строение рудной зоны и морфология рудных тел</i>	—
<i>Характеристика главных промышленных типов руд и их минеральных разновидностей</i>	11
Вкрапленные руды в интрузивных породах	12
Сплошные руды	15
Вкрапленные, прожилково-вкрапленные и брекчииевидные руды в породах экзоконтакта	17
<i>Минеральный состав руд</i>	20
Главные минералы	21
Второстепенные минералы	24
<i>Характеристика минералов, впервые установленных в рудах месторождений</i>	25
<b>Глава III. МИНЕРАЛОГИЯ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА</b>	28
<i>Краткий обзор минералогии селена и теллура в эндогенных месторождениях</i>	—
<i>Методы изучения микровыделений минералов селена и теллура</i>	33
<i>Описание минералов селена и теллура</i>	34
Селениды и селенсодержащие минералы	—
Теллуриды, висмутотеллуриды и теллурсодержащие минералы	40
<i>О возрастном положении и парагенетических ассоциациях минералов селена и теллура в медноникелевых рудах Талнахского рудного узла</i>	56
Условия нахождения минералов селена и теллура в рудах и их соотношение с минералами платиновой группы	—
<i>О возрастных соотношениях минералов платино-теллуридной ассоциации с главными рудообразующими сульфидами медно-никелевых руд</i>	58
<i>Возрастные соотношения минералов платино-теллуридной ассоциации</i>	59
<i>Ассоциации минералов теллура в основных типах и минеральных разновидностях медно-никелевых руд</i>	62
<b>Глава IV. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В РУДАХ И МИНЕРАЛАХ</b>	66
<i>Закономерности распределения селена и теллура в основных типах и минеральных разновидностях медно-никелевых руд</i>	—
<i>Вкрапленные руды в интрузивных породах</i>	—

Сплошные руды . . . . .	67
Вкрашенные, прожилково-вкрашенные и брекчиевидные руды в породах экзоконтакта . . . . .	71
<i>О статистических связях селена и теллура с основными рудообразующими элементами медно-никелевых руд . . . . .</i>	73
<i>Распределение селена и теллура в главных рудообразующих минералах и формы их нахождения в рудах . . . . .</i>	75
<b>Глава V.</b>	
<b>ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОХИМИИ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА . . . . .</b>	86
<i>Химические свойства и распространенность селена и теллура в природе . . . . .</i>	
<i>О факторах, определяющих концентрацию селена в сульфидных минералах . . . . .</i>	89
Зависимость изоморфизма сера – селен от кристаллохимических свойств минерала-хозяина.	90
Влияние физико-химических условий минералообразования на степень концентрации селена в сульфидах . . . . .	91
<i>Распределение селена между существующими сульфидами в зависимости от температуры . . . . .</i>	92
Экспериментальное изучение распределение селена в существующих сульфидах . . . . .	93
Обсуждение результатов экспериментов . . . . .	96
Распределение селена между существующими сульфидами медно-никелевых руд . . . . .	98
<i>Изотопный состав серы сульфидов в связи с их селеносностью . . . . .</i>	101
<i>Поведение селена и теллура в процессе формирования медно-никелевых руд Талнахского рудного узла . . . . .</i>	104
О последовательности формирования основных парагенетических ассоциаций медно-никелевых руд . . . . .	–
Основные закономерности поведения селена и теллура в ходе формирования главных парагенетических ассоциаций руд . . . . .	106
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .</b>	115
<b>ЛИТЕРАТУРА . . . . .</b>	117
<b>ПОЯСНЕНИЯ К ТАБЛИЦАМ . . . . .</b>	122

**Владимир Александрович Коваленкер**

**МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ СЕЛЕНА И ТЕЛЛУРА**

(в медно-никелевых месторождениях Талнахского рудного узла)

Утверждено к печати Институтом геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии

Редактор издательства Н.В. Знаменская. Художественный редактор С.А. Литvak  
Технический редактор Г.В. Лазарева

Подписано к печати 29/XII-76 г. Т-18666. Усл.печл. 8,5. Уч.-изд.л. 9,5.  
Формат 60 x 90 1/16. Бумага офс. № 1. Тираж 500 экз. Тип. зак 1554 Цена 95 коп.

Книга издана офсетным способом

Издательство "Наука", 103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21  
1-я типография издательства "Наука", 199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

2  
95 коп.

2110

76