

Зональность талнахских медно-никелевых руд (эксперимент и физико-химическая интерпретация)

В. И. Косяков¹, Е. Ф. Синякова², В. В. Дистлер³

¹ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск
kosyakov@niic.nsc.ru, факс: (383) 330 94 89, тел.: 8 (383) 330 92 59

² Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск
efsin@igm.nsc.ru, факс: 8 (383) 333 27 90, тел.: 8 (383) 333 30 26

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Москва
distler@igem.ru, факс: 8 (495) 230 21 79, тел.: 8 (495) 230 82 26

Ключевые слова: система Cu-Fe-Ni-S, фракционирование, направленная кристаллизация, зональность, медно-никелевые руды

Ссылка: Косяков В. И., Е. Ф. Синякова, В. В. Дистлер (2011), Зональность талнахских медно-никелевых руд (эксперимент и физико-химическая интерпретация), *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6046, doi:10.2205/2011NZ000176.

Введение.

Гипотеза о фракционной кристаллизации. К настоящему времени хорошо изучено геологическое строение наиболее крупных магматогенных месторождений медно-никелевых руд, таких как Норильск-Талнах и Седбери [Налдретт, 2004; Дистлер и др., 1988; Дистлер, 1994]. Исследование химического и минерального состава массивных рудных тел показало, что они разделены на зоны, состоящие из разных парагенетических ассоциаций. Их минеральный состав охватывает практически все разнообразие известных кристаллических фаз системы Cu-Fe-Ni-S. Размеры переходных слоев между зонами настолько меньше характерных размеров зон, что можно говорить о практически скачкообразном переходе от одной зоны к соседней. Кроме того, зоны неоднородны по химическому составу слагающих их руд, причем наблюдаются определенные закономерности плавного изменения распределения компонентов в объеме рудного тела. Эти особенности обычно связывают с фракционной кристаллизацией сульфидных расплавов [Налдретт, 2004; Дистлер и др., 1988]. Предполагают, что процесс кристаллизации осуществляется в режиме, близком к квазиравновесному, поэтому поведение компонентов магм в этом процессе определяется строением фазовой диаграммы рудно-магматической системы Fe-Cu-Ni-S и ограничивающих ее тройных систем. Установлено, например, что средний состав сульфидной магмы норильских месторождений находится в области первичной кристаллизации mss – моносульфидного твердого раствора (пирротин, легированный никелем и, в меньшем количестве, медью). В процессе кристаллизации происходит изменение состава расплава, которое приводит к его постепенному обогащению медью. В конце кристаллизация mss прекращается и из расплава выделяется промежуточный твердый раствор – iss [Налдретт, 2004; Дистлер и др., 1988].

Первичная и вторичная зональность. Последовательное выделение основных минералов при кристаллизации сульфидного расплава приводит к образованию первичных зон в рудных телах. Ее можно установить по распределению основных рудообразующих компонентов в объеме рудного тела: при переходе от одной зоны к другой должен скачкообразно изменяться средний химический состав руд, внутри зоны концентрации компонентов должны постепенно изменяться от одной границы зоны до другой. Такую химическую неоднородность внутри зон часто называют скрытой зональностью [Дистлер, 1994]. Однако большинство первичных минералов при охлаждении претерпевают те или иные трансформации, в соответствии с субсолидусным строением фазовой диаграммы Cu-Fe-Ni-S. Например, при изучении фазовой диаграммы Fe-Ni-S обнаружено, что при понижении температуры моносульфидного твердого раствора, обогащенного железом, уменьшается растворимость в нем серы и никеля и избыток этих элементов выделяется в виде включений пентландита [Косяков и Синякова, 2005]. Еще одним примером субсолидусной трансформации является распад промежуточного твердого раствора на ряд минералов группы халькопирита [Воган и Крейг, 1981]. Характер распада

первичных твердых растворов обычно зависит от их состава. Это приводит к образованию в рудных телах вторичных (минеральных) зон, которые и наблюдаются при минералогических исследованиях рудных тел [Косяков и Синякова, 2010].

Особенности зонального строения Талнахских руд. Талнахское рудное поле представляет собой систему из ~ 25 рудных тел, соединенных между собой жильными каналами и окруженных ореолами прожилково-вкрапленных и брекчиевидных руд, локализованных главным образом в осадочно-метаморфических породах экзоконтакта расслоенных интрузий (рис. 1а) [Налдретт, 2004]. По своему строению их можно разделить на две группы. Большинство рудных тел, относящихся к первой группе, состоят из пирротиновой и халькопиритовой зон. Вторая группа рудных тел имеет ярко выраженную минеральную зональность (рис. 1б). Такое строение позволяет предполагать единый механизм формирования рудного массива в целом и рассматривать распределение минеральных ассоциаций и химических элементов в нем как следствие этого общего механизма.

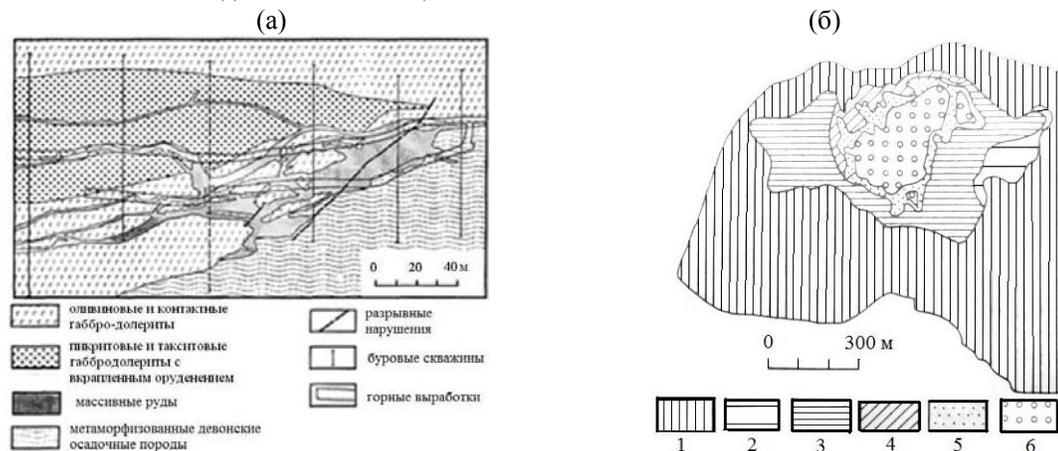


Рис. 1. (а) Геологический разрез, показывающий соотношение массивных руд с породами рудоносной интрузии в южной части Октябрьского месторождения [Налдретт, 2004]. (б) Зональное строение рудного тела Октябрьского месторождения [Дистлер, 1994]. 1 – 6 минеральные типы (1 – пирротиновые и пирротин-халькопиритовые, 2 – кубанит-троилит-пирротин-халькопиритовые, 3 – халькопирит-кубанитовые, 4 – троилит-кубанит-халькопиритовые, 5 – кубанит-моихукитовые, 6 – моихукитовые).

Постановка задачи. Для понимания причин зональности рудных тел обычно проводят эксперименты по изучению образцов заданного состава, полученных длительным отжигом при постоянной температуре с последующей закалкой. Множество таких экспериментов позволяет строить изотермические сечения фрагментов фазовой диаграммы системы Cu-Fe-Ni-S. Совокупность таких сечений позволяет, в принципе, понять основные особенности фракционной кристаллизации. Однако, для количественного описания этого процесса необходимо провести очень большой объем экспериментов и построить математическую модель фазовой диаграммы в широкой области составов и температур. Именно такие данные необходимы для расчета изменения фазового и химического состава закристиализованных образцов [Косяков, 1998; Арискин и Бармина, 2000]. Более эффективным способом моделирования процессов формирования зонального строения рудных тел является непосредственное проведение экспериментов по направленной кристаллизации сульфидных расплавов, состав которых имитирует составы природных сульфидных магм [Синякова и Косяков, 2009].

Экспериментальная часть.

Выбор объекта, состав образцов. В настоящей работе проведено исследование поведения основных рудообразующих компонентов при направленной кристаллизации расплавов, имитирующих составы природных сульфидных медно-никелевых магм. Состав образца А (Fe 32.90, Cu 10.70, Ni 5.40, S 51.00 ат.%) близок к составу расплава, из которого формируются пирротин-халькопиритовые медно-никелевые сульфидные руды. Состав образца В (Fe 33.76, Cu 15.98, Ni 1.50, S 48.76 ат.%) богаче медью и беднее никелем и серой. Подобная последовательность составов наблюдается при переходе от пирротиновых к моихукитовым рудам.

Методика. Направленную кристаллизацию предварительно синтезированных из расплава образцов осуществляли методом Бриджмена. Ампулу с гомогенным расплавом опускали из горячей зоны в холодную со скоростью $2.3 \cdot 10^{-8}$ м/с. Эти условия обеспечивали протекание процесса в квазиравновесном режиме [Косяков и Синякова, 2005]. Полученные образцы А и В длиной 70 и 90 мм и диаметром 7 и 8 мм разрезали соответственно на 24 и 30 пластинки перпендикулярно продольной оси, каждая из которых была взвешена. Затем часть из них была использована для приготовления аншлифов и их изучения методами микроскопического, микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализа. По результатам измерения состава твердого слитка по уравнениям материального баланса компонентов рассчитывали состав расплава и коэффициенты распределения компонентов между кристаллом и расплавом.

Результаты.

Первичная зональность. В начале кристаллизации образцов А и В из расплава выделялся моносльфидный твердый раствор (mss), а затем промежуточный твердый раствор (iss) (рис. 2).

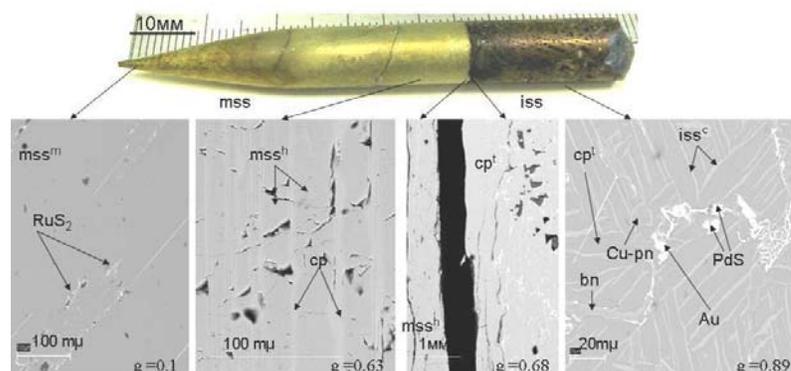


Рис. 2. Образец А, полученный направленной кристаллизацией (вверху) и его микроструктура (внизу). Левая часть слитка соответствует подзонам Ia и Ib, правая часть - зоне II. Трещина соответствует границе между зонами I и II.

Изменение концентрации Fe и Cu в и расплаве в процессе кристаллизации образца А показаны на рис. 3. Переход от зоны выделения mss к зоне iss можно интерпретировать как протекание фазовой реакции: $L + mss \rightarrow iss$. Значения коэффициентов распределения компонентов между mss и расплавом, определенные для обоих образцов, лежат в интервалах: $k(Ni) = 0.94$ ч 1.6 , $k(Fe) = 1.2$ ч 1.4 , $k(Cu) = 0.19$ ч 0.28 , $k(S) = 1.04$ ч 1.08 . Медь преимущественно переходит в расплав. В процессе кристаллизации iss в образце А Cu и Fe концентрируются в этой фазе, а расплав обогащается Ni, в то время как $k(S)$ близок к 1. При кристаллизации iss в образце В коэффициенты распределения Fe, Cu и S между iss и расплавом близки 1, а $k(Ni) \sim 0.6-0.7$, что приводит к его накоплению в расплаве в процессе кристаллизации iss. Закономерное распределение компонентов в образцах моделирует первичную минеральную и химическую зональность рудных тел.

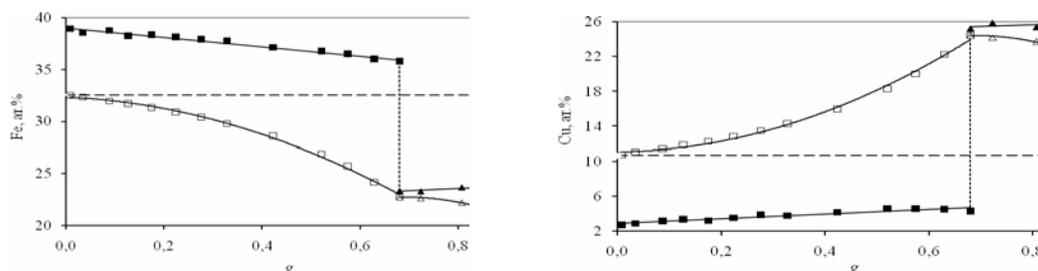


Рис. 3. Кривые распределения Fe и Cu в направленно закристаллизованном образце I (темные точки) и в расплаве (светлые точки). Штриховой горизонталью показана концентрация компонентов в исходном расплаве.

Вторичная зональность. При охлаждении первичные зоны из mss и iss разделяются на подзоны, в соответствии с механизмами твердофазного распада [Косяков и Синякова, 2010]. Зона первичного mss с гексагональной структурой при охлаждении трансформируется в две подзоны. В первой подзоне образца А ($0 < g < \sim 0.03$) гексагональный mss (mss^h) переходит в моноклинную форму (mss^m). Во второй подзоне ($\sim 0.03 < g < \sim 0.68$) такой переход не происходит, но избыток меди выделяется в виде включений тетрагонального халькопирита (cp^t) (рис. 2). Первая подзона образца В ($0 < g < \sim 0.13$) состоит из гексагонального mss с включениями изокубанита, а во второй подзоне ($\sim 0.13 < g < \sim 0.4$) к этой ассоциации добавляется пентландит. При охлаждении iss полностью распадается на другие фазы. В образце А это смесь тетрагонального (cp^t) и кубического халькопирита (iss^c) с небольшой примесью борнита (bn) и медистого пентландита (Cu-pn). В образце В образуются две подзоны: ($\sim 0.4 < g < \sim 0.7$) – из хейкокита и пентландита и ($g > \sim 0.7$) – из мойхукита, пентландита и борнита.

Обсуждение результатов.

Исследованные образцы принадлежат к богатой железом области средней части четырехкомпонентной системы Cu-Ni-Fe-S, с областями первичной кристаллизации mss и iss [Craig and Kullerud, 1969], что согласуется с описанными выше данными и результатами проведенных нами ранее экспериментов [Синякова и Косяков, 2007]. Исходные составы образцов принадлежат области первичной кристаллизации mss, но первый из них обогащен серой и никелем и обеднен медью по сравнению со вторым образцом. В процессе кристаллизации составы образцов изменяются симбатно, что свидетельствует о подобии процессов фракционирования рудных компонентов и об отсутствии особенностей строения поля первичной кристаллизации mss в исследованной области составов расплава. Интересно, что при кристаллизации iss концентрация серы в расплаве растет, а в твердом растворе уменьшается. Аналогичное поведение отмечено при кристаллизации тройных Cu-Fe-S расплавов [Синякова и Косяков, 2009]. Измеренные значения коэффициентов распределения компонентов между mss и расплавом согласуются с опубликованными данными [Naldrett, 2010].

Торцевая часть обоих образцов представляет собой смесь мелкодисперсных фаз, которые нами не исследовались. Тем не менее, можно сделать вывод, что *найденная зональность образцов является лишь фрагментом более общей последовательности выделения фаз при направленной кристаллизации*. Действительно, из теоретического анализа следует, что процесс кристаллизации в рассматриваемой части фазовой диаграммы системы Cu-Fe-Ni-S должен заканчиваться выделением четырехфазной эвтектической смеси.

Информация о коэффициентах распределения компонентов между iss и расплавом в литературе, по-видимому, отсутствует. По нашим данным эти коэффициенты изменяются в пределах: $k(Fe) = 0.88 \text{ ч } 1.03$, $k(Ni) = 0.59 \text{ ч } 0.64$, $k(Cu) = 0.96 \text{ ч } 1.15$, $k(S) = 0.99 \text{ ч } 1.02$. Значения $k(iss/L)$ для Fe, Cu и S близки к 1, а для Ni < 1 . Поэтому при кристаллизации iss расплав обогащается Ni, а перераспределения остальных элементов практически не происходит.

Полученные закономерности можно использовать для эскизной реконструкции истории образования Талнахского рудного поля. После заполнения системы пустот сульфидной магмой в первую очередь она затвердевает в полостях первой группы. Это приводит к образованию массивных пирротиновых и халькопиритовых руд. В соответствии с фазовой диаграммой направленная кристаллизация расплава обязательно должна приводить к более сложной зональности и заканчиваться выделением четверной эвтектики. Это означает, что кристаллизация должна продолжаться в каналах и затем в полостях второй группы, образуя рудные тела, включающие мойхукитовые или талнахитовые руды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-05-00357.

Литература

- Арискин, А. А., Г. С. Бармина (2000), Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм, М., Наука, Интерпериодика, МАИК, 363 с.
 Воган, Д., Дж. Крейг (1981), Химия сульфидных минералов, М., Мир, 573 с.
 Дистлер, В. В. (1994), Платиновая минерализация Норильских месторождений, Геология и генезис месторождений платиновых металлов, М., Наука, сс. 7-35.

АЛЕХИН И ДР.: ТАЛНАХСКИЕ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ РУДЫ

Дистлер, В. В. и др. (1988), *Петрология сульфидного магматического рудообразования*, М., Наука, 230 с.

Косяков, В. И. (1998), Возможности использования направленной кристаллизации для решения задач петрологии, *Геология и геофизика*, Том 39, №9, сс. 1242–1253.

Косяков, В. И., Е. Ф. Синякова (2005), Направленная кристаллизация железо-никелевых сульфидных расплавов в области образования моносульфидного твердого раствора *Геохимия*, №4, сс. 415-428.

Косяков, В. И., Е.Ф. Синякова (2010), Первичная, вторичная и примесная зональность медно-никелевых руд при фракционной кристаллизации сульфидных расплавов, *ДАН*, Том 432, № 6, сс. 805-810.

Налдретт, А. Дж. (2004), *Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых платинометаллических руд*, Санкт-Петербург, СПбГУ, 438 с.

Синякова, Е. Ф., В. И. Косяков (2007), Экспериментальное моделирование зональности сульфидных медно-никелевых руд, *ДАН*, Том 417, № 4, сс. 522-527.

Синякова, Е. Ф., В. И. Косяков (2009), Экспериментальное моделирование зональности богатых медью сульфидных руд медно-никелевых месторождений, *Докл. РАН*, Том 426, №5, сс. 668–673.

Craig, J. R., G. Kullerud (1969), Phase relations in the Cu-Fe-Ni-S system and their application to magmatic ore deposits, *Econ. Geol. Monograph*, Vol. 4. pp. 344-358.

Naldrett, A. J. (2010), From the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, *South African Journal of Geology*, Vol. 113.1. pp. 1-32.