

УДК 550.4

РАССЛОЕНИЕ СУЛЬФИДНЫХ РАСПЛАВОВ Fe–Ni–Cu: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

© 2004 г. Н. С. Горбачев, А. Н. Некрасов

Представлено академиком А.А. Маракушевым 16.03.2004 г.

Поступило 12.07.2004 г.

Первично-магматическая сульфидная минерализация встречается в горных породах различных фаций глубинности – от алмазсодержащих ксенолитов мантийных пород до лав. Микровключения сульфидов в минералах-вкрапленниках магматических пород – алмазе, оливине, гранате, пироксенах, ильмените, цирконе – зачастую имеют “каплевидную” форму и характеризуются контрастно-расслоенным строением. Центральная часть включений сложена никельсодержащим пирротинном с включениями пентландита, валовый состав ее отвечает Cu-содержащему моносульфидному твердому раствору Fe и Ni (Mss). На периферии пирротин-пентландитового ядра развивается кайма, обогащенная Cu, халькопиритового (Cp) или борнитового (Bn) состава [1]. Сходное Mss–Cp расслоение характерно также для сульфидных “капель” в пикритовых габбро-долеритах интрузивов норильского типа (рис. 1).

Контрастный состав сульфидных “капель” можно объяснить расслоением сульфидного расплава на несмешивающиеся Cu–Fe (Cp, Bn) и Fe–Ni (Mss) сульфидные жидкости с последующей их кристаллизацией. О возможности такого расслоения свидетельствуют результаты экспериментального изучения системы перидотит–сульфид–H₂O при $T = 1400–1250^{\circ}\text{C}$, $P = 3.5$ ГПа. Опыты проводили в ИЭМ РАН на аппарате типа накопитель с лункой большого диаметра с использованием многоампульной буферной методики [2, 3]. Во внутреннюю Pt-ампулу помещали перидотитовую ампулу, заполненную тонким порошком водосодержащих базальтовых стекол с синтетическим сульфидом Fe–Ni–Cu. Расплавы, образующиеся при плавлении исходного силикатного стекла и сульфида, взаимодействовали с минералами перидотитовой ампулы до установления равновесного состава. Перидотитовая ампула на-

дежно защищала Pt-ампулу от воздействия агрессивного сульфидного расплава. Герметически заваренную ампулу помещали в наружную Pt-ампулу с Ni–NiO–H₂O буфером, которая также заваривалась. Летучесть серы отвечала Pt–PtS буферу. Температуру измеряли Pt30Rh/Pt6/Rh термпарой, давление при высоких температурах калибровали по кривой равновесия кварц–коэзит. Точность определения температуры и давления в опытах оценивается в $\pm 5^{\circ}\text{C}$ и ± 1 кбар [4]. Продукты экспериментов изучали на электронном сканирующем микроскопе CamScan MV2300 (VEGA TS 5130MM), оснащенном YAG-детектором вторичных и отраженных электронов и энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором с полупроводниковым Si(Li) детектором Link INCA Energy.

Закалочные образцы состояли из оливина, орто- и клинопироксена, силикатного стекла и рас-

Таблица 1. Представительный состав (мас. %) магматических сульфидов

№ п/п	Fe	Ni	Cu	Pt	S
1	48.10	6.79	4.78	н.о.	40.32
2	13.90	0.22	56.44	н.о.	27.45
3	3.01	0.42	3.51	77.64	15.45
4	35.12	0.37	32.30	н.о.	32.15
5	59.26	0.65	0.12	н.о.	39.59
6	51.31	2.99	3.34	2.4	32.86
7	33.35	8.38	30.50	35.4	31.90
8	41.90	19.2	0.2	н.о.	38.10
9	33.35	8.38	15.70	н.о.	32.99
10	31.22	12.22	22.19	н.о.	34.31
11	36.08	22.32	5.34	н.о.	35.46

Примечание. Экспериментальный образец: 1 – центр, 2 – кайма, 3 – сульфид платины; Cu–Ni-месторождения Норильского района: пикритовый габбро-долерит, 4 – центр, 5 – кайма; массивные руды: 6 – пирротиновые, 7 – халькопиритовые; расслоенные включения в гранате из кимберлитов: 8 – центр, 9 – кайма; мантийные ксенолиты: 10 – перидотиты, 11 – эклогиты.

Институт экспериментальной минералогии
Российской Академии наук,
Черноголовка Московской обл.

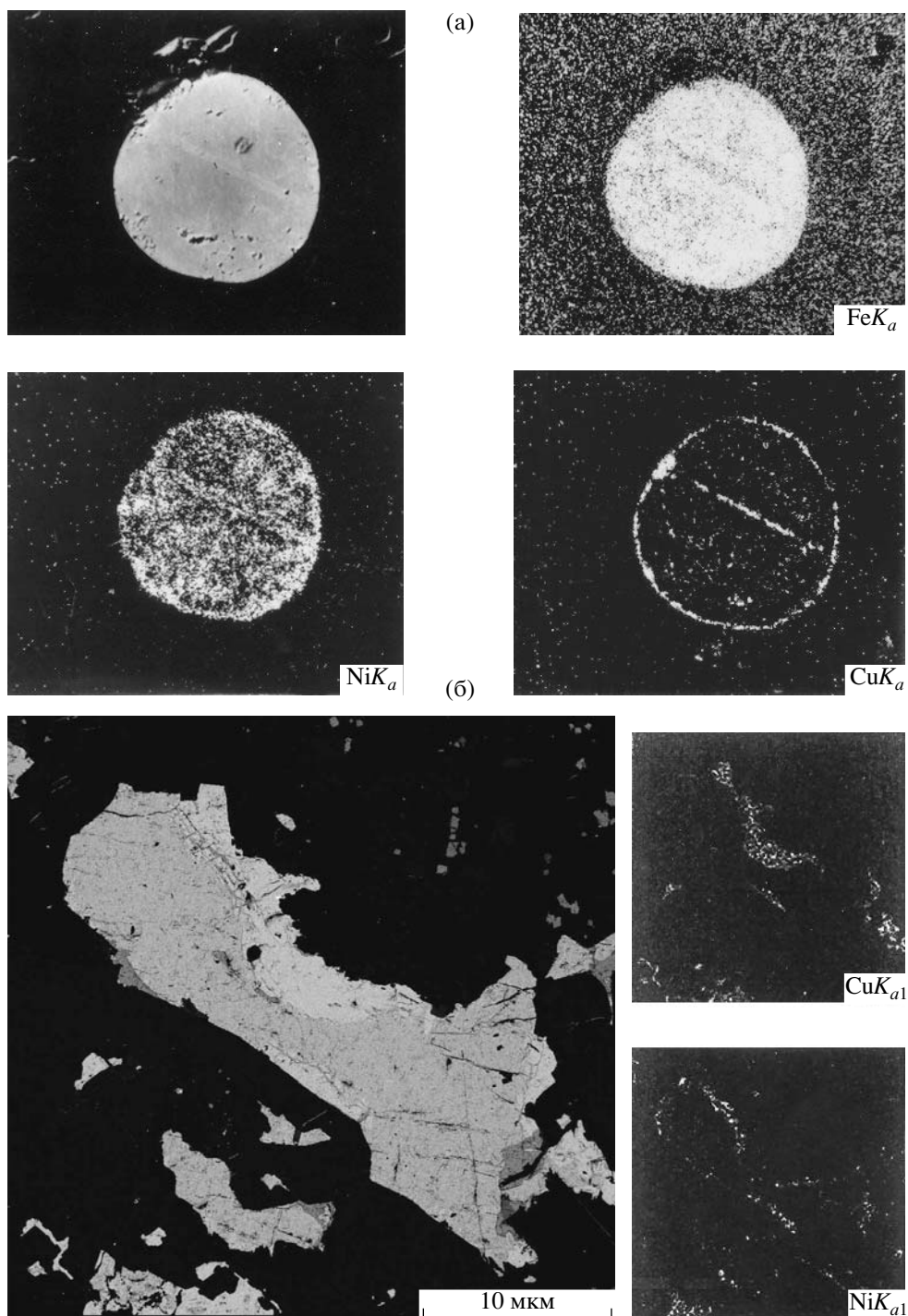


Рис. 1. Изображение магматических сульфидов в отраженных электронах и характеристических рентгеновских лучах: а – включения контрастно расслоенных “капель” в гранате из кимберлитов [1]; б – халькопирит-пирротиновая вкрапленность в пикритовом габбро-долерите Талнахского интрузива.

слоенных каплевидных выделений сульфидов. Структура “капля в капле” свидетельствует о расслоении сульфидного расплава на две сульфидные жидкости. На рис. 2 приведена микрофотография расслоенной сульфидной “капли” и распределение в ней главных рудных элементов: Fe,

Cu, Ni, S, Pt, в табл. 1 – представительные составы сосуществующих фаз. Из распределения элементов видно, что внутренняя часть сульфидной “капли” обогащена Fe, Ni, S. Ее состав отвечает Mss-медьсодержащему моносульфидному твердому раствору Fe и Ni. Внешняя часть “капли”

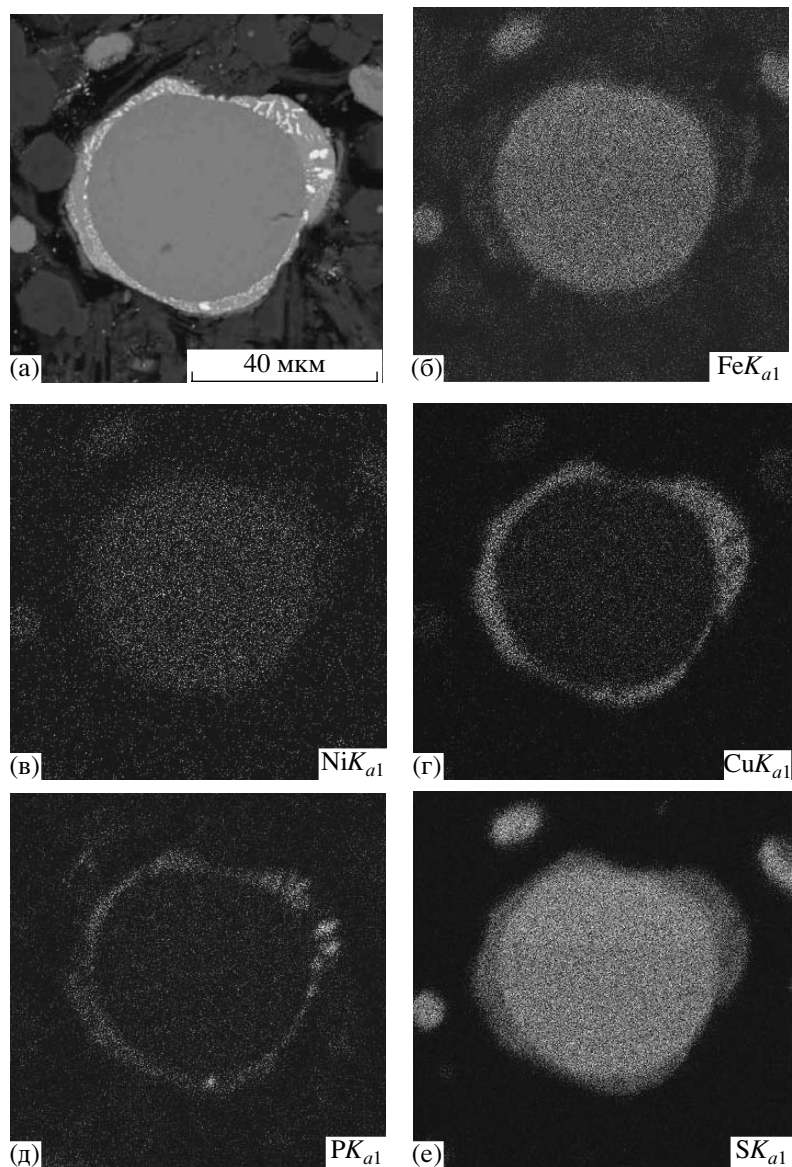


Рис. 2. Изображение расслоенной сульфидной “капли” в отраженных электронах и характеристических рентгеновских лучах. Включения белого цвета на верхнем левом снимке – сульфид платины. $T = 1400\text{--}1250^\circ\text{C}$, $P = 3.5$ ГПа.

обеднена Fe, Ni, S, обогащена Cu и Pt. Состав ее отвечает никельсодержащему твердому раствору Cu и Fe борнитового типа. Этот расплав пересыщен Pt, о чем свидетельствуют включения в нем PtS. Количественно фракционирование элементов при сульфид-сульфидном расслоении характеризуют коэффициенты распределения элементов D , выраженные как отношение концентрации i элемента в Fe–Ni сульфидном расплаве к его концентрации в Fe–Cu расплаве. Элементы с $D > 1$ – никель, железо, сера – концентрируются в Fe–Ni сульфидном расплаве ($D_{\text{Ni}} = 25$, $D_{\text{Fe}} = 3$, $D_{\text{S}} = 1.3$), а элементы с $D < 1$ (медь, платина) концентрируются в Fe–Cu жидкости ($D_{\text{Cu}} = 0.08$, $D_{\text{Pt}} < 0.01$).

Таким образом, полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что во флюидсодержащих силикатно-сульфидных системах в определенных условиях наблюдается расслоение сульфидного расплава на высокосернистую, обогащенную Fe и Ni жидкость Mss-состава и низкосернистую, обогащенную Cu и Pt жидкость Ср- или Vn-состава, что подтверждает предположение о формировании расслоенных пирротин-халькопиритовых “капель” во включениях в минералах и стеклах магматических пород в результате расслоения сульфидного расплава. Представляется, что в процессах магматического петро- и рудо-генезиса этот механизм имеет и более широкое развитие. В частности, в интрузивах норильского ти-

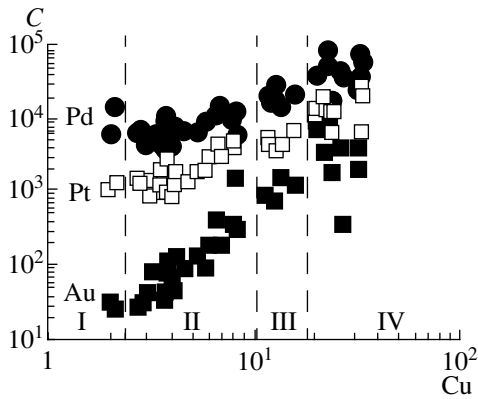


Рис. 3. Распределение Cu, Au, ЭПГ в главных минеральных типах руд Хараулахской сульфидной залежи Октябрьского месторождения: I – пирротиновые, II – пирротин-халькопиритовые, III – кубанитовые, IV – халькопиритовые руды. Концентрации: Cu – мас. %, Au, ЭПГ – 10^{-7} мас. %.

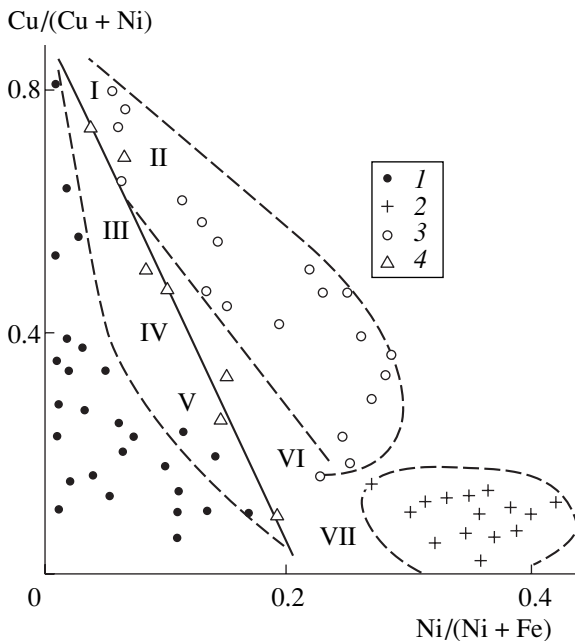


Рис. 4. Состав магматических сульфидов во включениях в кимберлитах – эклогитовых (I), перидотитовых (2), в базальтах (3), медно-никелевых месторождениях (4): I – Дулут, II – Норильск, III – Стиллуотер, IV – Садбери, V – Печенга, VI – Абитибиды, VII – Камбалда [2].

па примечательны минералогическая и геохимическая зональности сплошных сульфидных руд мощностью до 50 м, в которых пирротиновые и халькопиритовые типы разобцены. Ранее, учи-

тывая постепенные переходы между ними через промежуточные разновидности (пирротин-халькопиритовые, кубанитовые, кубанит-халькопиритовые), наблюдаемую зональность мы связывали с кристаллизационной дифференциацией сульфидного расплава [5]. Рассмотренные выше экспериментальные данные, а также дискретный характер распределения концентраций Cu в рудах (рис. 3) не исключают возможности формирования зональности за счет сульфидно-сульфидного расслоения сульфидного расплава с последующей кристаллизационной дифференциацией Fe–Ni и Fe–Cu сульфидных жидкостей. Сходным контрастным составом характеризуются также сульфиды перидотитового и эклогитового парагенезисов верхней мантии. Первые обогащены никелем и обеднены медью, вторые обогащены медью и обеднены никелем (рис. 4). На диаграмме Cu/Cu + Ni – Ni/Ni + Fe сульфиды перидотитового парагенезиса занимают ограниченное поле с высоким (>0.3) Ni/Ni + Fe и низким (<0.2) Cu/Cu + Ni отношениями. Их состав отвечает медьсодержащему моносульфидному твердому раствору Fe и Ni. Поле составов сульфидов эклогитового парагенезиса, не перекрывающееся с полем сульфидов перидотитовой мантии, характеризуется низким (<0.15) отношением Ni/Ni + Fe и переменным, но более высоким (0.15–0.6) отношением Cu/Cu + Ni. Их состав отвечает никельсодержащему твердому раствору Fe и Cu халькопиритового или борнитового типов. Не исключено, что контрастные составы сульфидов из перидотитовых и эклогитовых ксенолитов обусловлены расслоением сульфидного расплава на несмешивающиеся сульфидные жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 03–05–64531, 03–05–64549), ОНЗ РАН (приоритетные направления № 2 и № 10).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин В.К., Крот А.Н., Кудрявцева Г.П. Сульфидные включения в минералах из кимберлитов. М.: Изд-во МГУ, 1998. Ч. 2. С. 175.
2. Gorbachev N.S. // Intern. Geol. Rev. 1990. V. 32. № 8. P. 749–831.
3. Горбачев Н.С., Каширцева Г.А. В кн.: Эксперимент в решении актуальных задач геологии. М.: Наука, 1986. С. 98–119.
4. Литвин Ю.А. В кн.: Физико-химические исследования плавления глубинного вещества Земли. М.: Наука, 1991. С. 310.
5. Горбачев Н.С., Налдретт А.Д., Кунилов В.Е., Азиф М. // ДАН. 2000. Т. 371. № 3. С. 362–365.