



Электронная версия доступна на сайте
[www.fmm.ru/Новые данные о минералах](http://www.fmm.ru/Новые_данные_о_минералах)

Минералогический музей
 имени А.Е. Ферсмана РАН

Новые данные о минералах, том 56, вып. 4 (2022), 91–97

НДМ

Условия образования норильских медно-никелевых руд по данным исследования продуктов кристаллизации расплавов в системе Cu–Fe–S

Кравченко Т.А.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, takravch@mail.ru

На основе исследования продуктов кристаллизации расплавов в центральной части системы Cu–Fe–S получены новые данные о возможности образования норильских медно-никелевых руд из расплава 53 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 0.25–1, при 1100–820 °C и падении давления от 5 ГПа. Показано, что первичная кристаллизация пирротина $Fe_{1-x}S$, кубанита $CuFe_2S_3$ и халькопирита $CuFeS_2$ обуславливает расщепление исходного расплава на никелевую: 50 ат.% S, $0.5 > Ni/Fe \geq 0.25$, и медно-никелевую: 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 0.5–1, составляющие. Из обогащенного никелем расплава в ассоциации с пирротинном и кубанитом кристаллизуется обогащенный железом пентландит $(Ni,Fe)_9S_8$. Пентландит с близкими содержаниями железа и никеля, моихукит $Cu_9Fe_9S_{16}$ и борнит Cu_5FeS_4 кристаллизуются из расплава 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 0.5, а обогащенный никелем пентландит, талнахит $Cu_9Fe_8S_{16}$ и борнит – из расплава 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 1. Расплав 50 ат.% S, $1 > (Cu,Ni)/Fe > 0.5$, изолируется от кристаллизующегося рудного тела с последующей кристаллизацией халькопиритового, изокубанитового и моносльфидного (Fe,Ni)S твердых растворов, для формирования которых необходима выдержка при температуре, близкой к нижней температуре кристаллизации расплава.

Ключевые слова: система Cu–Fe–S, кристаллизация Cu–Ni–Fe–S-расплава, норильские медно-никелевые месторождения.

Введение

Состав центральной части системы Cu–Fe–S соответствует составам руд норильских медно-никелевых месторождений с пирротинном $Fe_{1-x}S$, халькопиритом $CuFeS_2$, кубанитом $CuFe_2S_3$, талнахитом $Cu_9Fe_8S_{16}$ и моихукитом $Cu_9Fe_9S_{16}$. Это позволяет использовать экспериментальные данные о параметрах образования устойчивых ассоциаций рудообразующих Cu–Fe-сульфидов для понимания возможных условий образования соответствующих минеральных ассоциаций. Результаты исследования продуктов кристаллизации расплавов в центральной части системы Cu–Fe–S (Кравченко, 2011; Кравченко и др., 2012) и данные об одновременной кристаллизации пентландита и халькопирита в рудах норильских

медно-никелевых месторождений (Кравченко, Ненашева, 2015) свидетельствуют об одновременной кристаллизации основных рудообразующих минералов: пирротина $Fe_{1-x}S$, халькопирита $CuFeS_2$, кубанита $CuFe_2S_3$ и пентландита $(Fe,Ni)_9S_8$. При этом впервые (Кравченко, Ненашева, 2017) установлена возможность кристаллизации характерной для норильских месторождений ассоциации халькопирит + кубанит + пирротин из расплава Fe_4CuS_{5+x} , закаленного от 1100 °C и 5 ГПа, и сделан вывод о кристаллизации пентландита вместо промежуточного твердого раствора, в отличие от продуктов кристаллизации расплава 50 ат.% S, Cu/Fe = 0.25–1, синтезированных при давлении 0.13 Па. Полученные результаты согласуются с данными о

полиморфных модификациях соединения CuFe_2S_3 (Ненашева, Кравченко, 2015), свидетельствующими об образовании кубанита при высоком давлении 0.7–4.2 ГПа, по данным Чандра и др. (Chandra et al., 2010), и данными о составе рассчитанных исходных расплавов для соответствующих ассоциаций Cu–Ni–Fe-сульфидов в минералах из климберлитовых трубок (Ефимова и др., 1983; Гаранин и др., 1988). Вместе с тем исключение расплава, соответствующего составам промежуточного твердого раствора $(\text{Cu,Fe})\text{S}$ как исходного для норильских месторождений, оставляет актуальным решение вопросов об условиях образования халькопиритового и изокубанитового твердых растворов месторождения Норильск 1, которые вместе с моносulfидным твердым раствором являются возможным примером закаленного исходного расплава (Дистлер и др., 1996), и норильских руд с талнахитом $\text{Cu}_9\text{Fe}_8\text{S}_{16}$ и моихукитом $\text{Cu}_9\text{Fe}_9\text{S}_{16}$, которые считаются продуктами твердофазных превращений промежуточного твердого раствора.

Настоящая работа является обобщением и продолжением исследований продуктов кристаллизации расплавов системы Cu–Fe–S, синтезированных автором в указанных выше работах, с целью определения состава и параметров кристаллизации исходных расплавов для ассоциаций сульфидов, соответствующих составам норильских медно-никелевых руд.

Методы исследования

Продукты кристаллизации расплавов центральной части системы Cu–Fe–S были синтезированы методом охлаждения расплава от 1100 °C до комнатной температуры при низком давлении в кварцевых ампулах, вакуумированных до $1 \cdot 10^{-3}$ рт.ст., что соответствует давлению 0.13 Па, и от давления 5 ГПа на многопуансонном аппарате высокого давления типа «Разрезная сфера» (БАРС) с использованием твердофазной ячейки, изготовленной из спрессованного порошка MgO. Синтезированные образцы были изучены методами оптической микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа на микроанализаторах Camebax-Micro и JXA 8100. Стандартами служили FeS и CuFeS_2 . Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток поглощенных электронов 40 нА, угол отбора 40°, время счета 10 сек. на каждой аналитической линии, диаметр зонда 2–3 мкм. Погрешность определения всех компонентов находится в пределах 2 ат.%. Предел обнаружения элементов C_{\min} рассчитан по 2 δ -критерию при уровне значимости 99%. C_{\min} в мас.‰: Cu 0.04, Fe 0.03, S 0.01. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре ДРОН-4.

При изложении результатов для синтетических фаз использованы общепринятые условные

обозначения и названия природных минералов соответствующего состава. Общее условное обозначение cb использовано для кубанита CuFe_2S_3 и изокубанитового твердого раствора, а bn – для борнита Cu_3FeS_4 и борнитового твердого раствора. В качестве показателя состава фаз и изменения фазового состава в процессе кристаллизации расплавов использованы отношения Cu/Fe, Ni/Fe и (Cu,Ni)/Fe, а для природного пентландита, содержащего примеси кобальта, – отношение Cu,Ni/Fe,Co.

Результаты

На рис. 1 представлена схема фазовых соотношений продуктов кристаллизации расплавов с исходными составами: 50 ат.% S, Cu/Fe = 1.22–0.25; 47 ат.% S, Cu/Fe = 1.30–0.63, и 45 ат.% S, Cu/Fe = 1.44–0.69, охлажденных от 1100 °C до комнатной температуры при давлении 0.13 Па (Кравченко, 2011; Кравченко и др., 2012). Штриховыми линиями показана область промежуточного твердого раствора (iss), установленного Кабри (Cabrú, 1973) в ассоциациях с борнитовым и пирротинным твердыми растворами (рис. 1). Серым цветом выделена область кристаллизации талнахита $\text{Cu}_9\text{Fe}_8\text{S}_{16}$, моихукита $\text{Cu}_9\text{Fe}_9\text{S}_{16}$ и хейкокита $\text{Cu}_4\text{Fe}_5\text{S}_8$. В табл. 1 представлены составы Cu–Fe-сульфидов, синтезированных в области промежуточного твердого раствора в ассоциациях с пирротинном Fe_{1-x}S , $x = 1-2$ ат.%, и борнитом. Состав борнита в ассоциациях с талнахитом и моихукитом близок стехиометрическому Cu_3FeS_4 . Составы борнита, установленного (Кравченко, 2011) в ассоциации с хейкокитом и пирротинном, не представлены, так как эта ассоциация не характерна для норильских руд. Ассоциация халькопирит CuFeS_2 + кубанит CuFe_2S_3 + пирротин Fe_{1-x}S с халькопиритом и кубанитом, составы которых близки соответствующим стехиометрическим составам, и максимально обогащенным серой пирротинном (ср + cb + ро, рис. 1) не была синтезирована. Возможные условия ее образования были установлены исходя из данных о полиморфных модификациях соединения CuFe_2S_3 (Ненашева, Кравченко, 2015), свидетельствующих об образовании кубанита при высоком давлении 0.7–4.2 ГПа, по данным Чандра и др. (Chandra et al., 2010), и представленных ниже результатов исследования продуктов кристаллизации расплавов, синтезированных при давлении 0.13 Па.

Из расплава 50 ат.% S, Cu/Fe = 1.22, были синтезированы халькопирит, талнахит и борнит, из расплавов 50 ат.% S, Cu/Fe = 1–0.5, – халькопиритовый и изокубанитовый твердые растворы, а из расплавов 50 ат.% S, $0.5 > \text{Cu/Fe} \geq 25$, – обогащенный железом ($0.5 > \text{Cu/Fe} \geq 0.39$) изокубанит и пирротин (рис. 1). При этом для образования халькопиритового и изокубанитового твердых растворов, Cu/

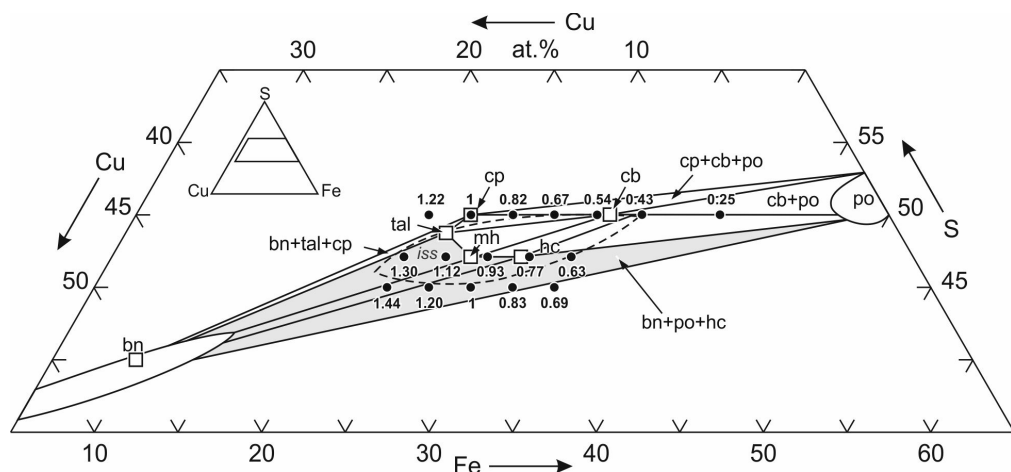


Рис. 1. Схема фазовых соотношений продуктов кристаллизации расплавов центральной части системы Cu-Fe-S, синтезированных при давлении 0.13 Па.
 • – исходные составы синтезированных образцов: 50 ат.% S, Cu/Fe 1.22–0.25; 47 ат.% S, Cu/Fe 1.12–0.63; 45 ат.% S, Cu/Fe 1.44–0.69;
 □ – стехиометрические составы: халькопирита CuFeS₂; 50 ат.% S, Cu/Fe = 1 (cp), кубанита CuFe₂S₃; 50 ат.% S, Cu/Fe = 0.5 (cb), талнахита Cu₃Fe₈S₁₆; 49 ат.% S, Cu/Fe = 1.12 (tal), моихукита Cu₉Fe₉S₁₆; 47 ат.% S, Cu/Fe = 1 (mh), и борнита Cu₅FeS₄ (bn);
 iss (штриховые линии), bnss и ро – области промежуточного борнитового и пирротинового твердых растворов по данным Кабри (Cabri, 1973). Серым цветом выделена область кристаллизации талнахита, моихукита и хейкокита из расплавов 50 ат.% S, Cu/Fe = 0.25–1.

Таблица 1. Состав Cu-Fe-сульфидов, синтезированных при давлении 0.13 Па

Фазовая ассоциация	Фазы	Состав фаз, ат.% мас.%			Cu/Fe, ат.%
		Cu	Fe	S	
cp + tal+ bn, tal+ bn	cp	24.22–25.43	24.71–26.42	49.36–49.86	1.03–0.92
		33.40–34.86	29.76–32.02	34.34–34.48	
	tal	26.92–27.92	24.12–24.60	47.75–48.84	1.16–1.09
		36.64–37.68	28.75–29.13	32.74–33.42	
cp + cb	cp	20.31–25.54	25.81–30.47	48.65–49.81	0.99–0.67
		28.03–34.97	31.07–36.96	34.37–34.48	
	cb	17.34–19.32	31.75–33.13	48.93–49.53	0.61–0.52
		23.92–26.78	38.70–40.17	34.22–34.46	
cb + po	cb	14.04–16.80	28.17–31.05	45.97–47.94	0.49–0.39
		19.59–23.34	41.57–44.03	34.42–35.25	
mh + bn	mh	25.64–27.38	26.37–27.52	46.25–47.15	1.04–0.93
		34.74–37.18	31.46–32.83	31.68–32.25	
po + hc + bn	hc	21.61–25.75	27.91–31.98	46.41–47.25	0.92–0.68
		29.46–34.71	33.06–38.32	31.93–32.74	

Примечание. cb – изокубанит CuFe₂S₃, cp – халькопирит CuFeS₂, tal – талнахит Cu₃Fe₈S₁₆, mh – моихукит Cu₉Fe₉S₁₆, hc – хейкокит Cu₄Fe₃S₈, bn – борнит Cu₅FeS₄, ро – пирротин Fe_{1-x}S, x = 1–2 ат.%.

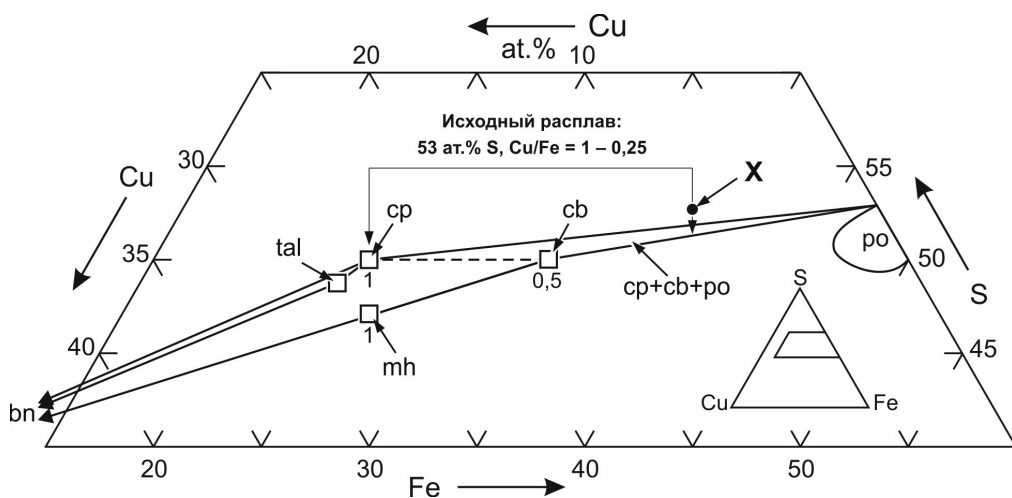


Рис. 2. Схема фазовых соотношений продуктов кристаллизации расплава 53 ат.% S, Cu/Fe = 1–0,25, охлажденного от 1100 °С и 5 ГПа.

□ – стехиометрические составы: халькопирита CuFeS_2 : 50 ат.% S, Cu/Fe = 1 (cp), кубанита CuFe_2S_3 : 50 ат.% S, Cu/Fe = 0,5 (cb), талнахита $\text{Cu}_9\text{Fe}_8\text{S}_{16}$: 49 ат.% S, Cu/Fe = 1,12 (tal) и моихукита $\text{Cu}_9\text{Fe}_9\text{S}_{16}$: 47 ат.% S, Cu/Fe = 1 (mh); bn – борнит Cu_5FeS_4 , po – пирротин Fe_{1-x}S , X – неназванная фаза $\text{Fe}_4\text{CuS}_{5+x}$: 53 ат.% S, Cu/Fe = 0,25, синтезированная в ассоциации с борнитом из расплавов халькопиритового и моихукитового состава, закаленных от 1100 °С и 5 ГПа. Штриховыми линиями показан состав остаточного расплава (50 ат.% S, Cu/Fe = 1–0,5) после кристаллизации халькопирита кубанита и пирротина (cp + cb + po).

Fe = 1,03–0,67 и Cu/Fe = 0,61–0,39 соответственно (табл. 1), требуется выдержка ~ 10 суток при температуре, близкой к нижней температуре кристаллизации расплава (820 °С). При уменьшении времени выдержки составы халькопиритового и изокубанитового твердых растворов становятся ближе к стехиометрическим составам халькопирита CuFeS_2 : 50 ат.% S, Cu/Fe = 1, и кубанита CuFe_2S_3 : 50 ат.% S, Cu/Fe = 0,5. При кристаллизации без указанной выдержки из расплава халькопиритового состава кристаллизуются талнахит и борнит, из расплава кубанитового состава – моихукит и борнит, а из расплавов 50 ат.% S, $0,5 > \text{Cu/Fe} \geq 0,25$, – хейкокит $\text{Cu}_4\text{Fe}_5\text{S}_8$ с борнитом и пирротин (рис. 1). Это свидетельствует о возможности кристаллизации фазовых ассоциаций с талнахитом и моихукитом при давлении, необходимым для кристаллизации кубанита.

Полученные результаты подтверждаются данными о халькопиритовом и моихукитовом составе образцов: 50 ат.% S, Cu/Fe = 1, и 47 ат.% S, Cu/Fe = 1, соответственно (рис. 2), закаленных от 1100 °С и 5 ГПа (Кравченко, Ненашева, 2017). В этих образцах в ассоциации с борнитом Cu_5FeS_4 была установлена новая неназванная фаза $\text{X Fe}_4\text{CuS}_{5+x}$: 53 ат.% S, Cu/Fe = 0,25 (рис. 2). Ее состав равен сумме составов халькопирита, кубанита и пирротина: $2\text{Fe}_4\text{CuS}_{5+x} = \text{CuFeS}_2 + \text{CuFe}_2\text{S}_3 + 5\text{Fe}_{1-x}\text{S}$. Из этого следует, что кристаллизацией этих сульфидов за-

канчивается кристаллизация исходного расплава 53 ат.% S, Cu/Fe = 1–0,25, в кубанит-пирротиновой части системы и состав продуктов кристаллизации остаточного расплава 50 ат.% S, Cu/Fe = 1–0,5, (штриховая линия, рис. 2) определяется равновесиями халькопирит–борнит и кубанит–борнит. Таким образом, первичная кристаллизация халькопирита, кубанита и пирротина обуславливает образование талнахита с борнитом и моихукита с борнитом из остаточных расплавов соответственно халькопиритового и кубанитового состава. При этом, как видно на рис. 2, промежуточная между халькопиритом и кубанитом часть остаточного расплава 50 ат.% S, $1 > \text{Cu/Fe} > 0,5$, оказывается изолированной от закристаллизовавшихся сульфидов. Это согласуется с изложенными выше данными о необходимости более длительного охлаждения расплава для образования халькопиритового и изокубанитового твердых растворов. Составы синтезированных халькопиритового и изокубанитового твердых растворов близки к составам соответствующих твердых растворов, которые вместе с моносульфидным твердым раствором были обнаружены в вертикальных жилах, локализованных в нижнем экзоконтакте дифференцированного массива Норильск 1 (Дистлер и др., 1996). Это свидетельствует об их формировании в условиях длительного охлаждения изолированного расплава.

Данные об одновременной кристаллизации пентландита $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ с халькопиритом, кубанитом и пирротином из расплавов 50 ат.% S, $(\text{Cu,Ni})/\text{Fe} = 1-0.25$, в рудах норильских месторождений (Кравченко, Ненашева, 2015) и данные Куллеруда (Kullerud et al, 1966) о полной смесимости меди и никеля в соответствующей области расплавов системы Cu–Ni–S позволяют использовать результаты об условиях кристаллизации расплавов системы Cu–Fe–S для понимания условий образования норильских медно-никелевых руд, в том числе с пентландитом. Норильские пентландиты по составу: 47 ат.% S, $(\text{Ni,Cu})/(\text{Fe,Co}) = 0.59-1.34$ (табл. 2), являются никелистыми аналогами Cu–Fe-фаз из области промежуточного твердого раствора с содержанием серы 47 ат.%, в том числе моихукита и хейкокита (табл. 1), которые при давлении 0.13 Па кристаллизуются из расплавов 50 ат.% S, $\text{Cu}/\text{Fe} = 1-0.25$, охлажденных без дополнительной выдержки в процессе охлаждения (область серого цвета, рис. 1). Таким образом, после кристаллизации халькопирита, кубанита и пирротина из расплава 53 ат.% S, $(\text{Cu,Ni})/\text{Fe} = 1-0.25$ (рис. 3), состав максимально обогащенного никелем пентландита $(\text{Ni,Cu})/(\text{Fe,Co}) = 1.34$, как и состав талнахита, соответствует линии равновесия халькопирит–борнит. Составы пентландитов с близкими содержаниями никеля и железа близки к точке состава

моихукита на линии равновесия кубанит–борнит. Обогащенные железом пентландиты, $(\text{Ni,Cu})/(\text{Fe,Co}) = 0.59-0.92$ (табл. 2), являются никелистыми аналогами хейкокита ($\text{Cu}/\text{Fe} = 0.63-0.92$, табл. 1), который при давлении 0.13 Па кристаллизуется из расплавов 50 ат.% S, $0.5 > \text{Cu}/\text{Fe} \geq 0.25$ в ассоциации с борнитом и пирротином (рис. 1). Согласно результатам, изложенным выше, после кристаллизации халькопирита, кубанита и пирротина из расплава 53 ат.% S, $\text{Cu}/\text{Fe} = 1-0.25$, заканчивается кристаллизация Cu–Fe-фаз в кубанит-пирротиновой части системы (рис. 2). Таким образом, после кристаллизации халькопирита, кубанита и пирротина из соответствующего расплава с никелем: 53 ат.% S, $(\text{Cu,Ni})/\text{Fe} = 1-0.25$, из остаточного расплава 50 ат.% S, $0.5 > (\text{Cu,Ni})/\text{Fe} \geq 0.25$ (штриховая линия, рис. 3), в ассоциации с кубанитом и пирротином кристаллизуется пентландит. Таким образом, первичная кристаллизация халькопирита, кубанита и пирротина из расплава 53 ат.% S, $(\text{Cu,Ni})/\text{Fe} = 1-0.25$, определяет состав и условия образования не только ассоциаций изученных Cu–Fe-сульфидов, но и входящего в их состав пентландита. Полученные результаты согласуются с данными Китакадзе и Коматусу об устойчивости пентландита при 870 °C в соответствующей области системы Ni–Fe–S (Kitakaze, Komatsu, <https://reseachgate.net/publication/343021914/>).

Таблица 2. Состав пентландита из руд норильских медно-никелевых месторождений

№	Мас.%						Ат.%					Ni,Cu/ Fe,Co
	Fe	Co	S	Cu	Ni	Σ	Fe	Co	S	Cu	Ni	
1	40.70	0.90	31.50	0.10	25.80	99.00	33.65	0.71	45.29	0.06	20.29	0.59
2	37.66	0.03	32.90	0.09	28.30	98.98	30.88	0.00	47.00	0.06	22.06	0.72
3	36.78	0.36	33.14	1.92	27.66	99.86	29.94	0.29	47.01	1.35	21.41	0.75
4	36.49	0.33	33.21	1.32	28.40	99.75	29.71	0.25	47.09	0.95	22.00	0.77
5	35.89	0.00	33.27	0.08	29.95	99.19	29.29	0.00	47.36	0.06	23.29	0.80
6	35.54	0.50	33.50	0.85	29.43	99.82	28.87	0.39	47.40	0.61	22.74	0.80
7	33.11	1.07	32.34	0.03	31.48	98.03	27.49	0.84	46.78	0.02	24.87	0.88
8	31.60	1.00	32.5	0.00	34.6	99.90	25.88	0.76	46.36	0.00	27.00	1.01
9	30.60	1.40	32.00	0.00	35.10	99.10	25.12	1.71	45.76	0.00	27.41	1.02
10	31.03	0.59	33.30	0.08	35.10	100.10	25.22	0.45	47.14	0.60	27.13	1.06
11	29.70	1.70	33.00	0.00	35.5	99.70	24.24	1.29	46.88	0.00	27.59	1.08
12	30.19	0.50	32.88	0.04	35.37	98.98	24.82	0.39	47.09	0.03	27.67	1.10
13	29.76	0.51	33.08	0.07	35.63	99.05	24.43	0.39	47.30	0.05	27.83	1.12
14	30.00	0.60	32.40	0.00	37.60	100.60	24.47	0.47	45.94	0.00	29.12	1.16
15	27.86	0.36	32.46	0.29	37.05	98.02	23.18	0.29	47.00	0.24	29.29	1.25
16	27.12	0.35	32.75	0.13	38.70	99.05	22.35	0.29	0.47	0.11	30.29	1.34

Примечание. Анализы 4, 6, 7, 10, 12, 13 выполнены в работе (Кравченко, Ненашева, 2015), табл. 1; 2, 3, 5, 15, 16 – (Спиридонов, Гриценко, 2009), 1, 8, 9, 11, 14 – (Генкин и др., 1981).

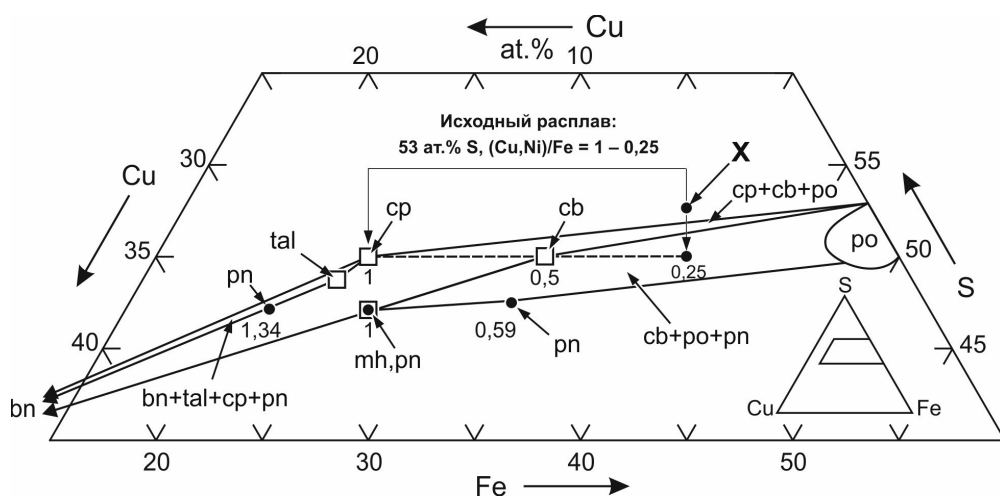


Рис. 3. Схема фазовых соотношений продуктов кристаллизации расплава 53 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 1–0.25, охлажденного от 1100 °C и 5 ГПа.

□ – стехиометрические составы: халькопирита CuFeS_2 : 50 ат.% S, Cu/Fe = 1 (cp), кубанита CuFe_2S_3 : 50 ат.% S, Cu/Fe = 0.5 (cb), талнахита $\text{Cu}_9\text{Fe}_8\text{S}_{16}$ (tal) и моихукита $\text{Cu}_3\text{Fe}_9\text{S}_{16}$: 47 ат.% S, Cu/Fe = 1 (mh); bn – борнит Cu_5FeS_4 , po – пирротин Fe_{1-x}S , X – названная фаза $\text{Fe}_4\text{CuS}_{5+x}$: 53 ат.% S, Cu/Fe = 0.25, синтезированная в ассоциации с борнитом из расплавов халькопиритового и моихукитового состава, закаленных от 1100 °C и 5 ГПа, pn – пентландит $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$: 47 ат.% S, Ni/Fe = 1.34–0.59.

Штриховыми линиями показаны составы остаточных расплавов: 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 1–0.5 и 50 ат.% S, 0.5 > Ni/Fe \geq 0.25, после кристаллизации халькопирита, кубанита и пирротина (cp + cb + po).

Согласно полученным результатам, ассоциации Cu–Ni–Fe-сульфидов, соответствующие составам норильских руд с пирротинном, кубанитом, халькопиритом, пентландитом, талнахитом и моихукитом, кристаллизуются из расплава 53 ат.% S, Cu,Ni/Fe = 1–0.25, при температуре 1100–820 °C и падении давления от 5 ГПа. Это согласуется с данными о составах рассчитанных исходных расплавов для соответствующих ассоциаций Cu–Ni–Fe-сульфидов из включений в алмазе, оливинах и гранатах (Ефимова и др., 1983; Гаранин и др., 1988). Состав фазы X Fe_4CuS_5 , синтезированной из расплава, закаленного от 1100 °C и 5 ГПа, близок к составу Cu-фазы из включений в алмазе (табл. 3, Кравченко, Ненашева, 2017).

Установленные особенности кристаллизации расплавов в центральной части системы Cu–Fe–S согласуются с данными (Лихачев, 2019) о формировании рудоносных интрузий Норильского района в температурном интервале от 1150 до 850 °C и «предкристаллизационном разделении исходного сульфидного расплава на богатую железом («пирротинную») и богатую медью («халькопиритовую») жидкости».

Закключение

Результаты исследования продуктов кристаллизации расплавов в центральной части систе-

мы Cu–Fe–S свидетельствуют о возможности образования норильских медно-никелевых руд из расплава 53 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 0.25–1, при 1100–820 °C и падении давления от 5 ГПа. Первичная кристаллизация пирротина Fe_{1-x}S , кубанита CuFe_2S_3 и халькопирита CuFeS_2 обуславливает расхождение кристаллизующегося расплава 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 0.25–1, на никелевую: 50 ат.% S, 0.5 > Ni/Fe \geq 0.25, и медно-никелевую: 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 0.5–1, составляющие. Из обогащенного никелем расплава в ассоциации с пирротинном и кубанитом кристаллизуется обогащенный железом пентландит $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$. Пентландит с близкими содержаниями железа и никеля, моихукит $\text{Cu}_3\text{Fe}_9\text{S}_{16}$ и борнит Cu_5FeS_4 кристаллизуются из расплава 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 0.5, а обогащенный никелем пентландит, талнахит $\text{Cu}_9\text{Fe}_8\text{S}_{16}$ и борнит – из расплава 50 ат.% S, (Cu,Ni)/Fe = 1. Расплав 50 ат.% S, 1 > (Cu,Ni)/Fe > 0.5, изолируется от кристаллизующегося рудного тела с последующей кристаллизацией халькопиритового, изокубанитового и моносulfидного $(\text{Ni,Fe})\text{S}$ твердых растворов, для формирования которых необходима выдержка при температуре, близкой к нижней температуре кристаллизации расплава.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы:

Гаранин В.К., Крот А.Н., Кудрявцева Г.П. Сульфидные включения в минералах из кимберлитов. 1988. М: Издательство МГУ. Часть 1. 47 с. Часть 2. 175 с.

Дистлер В.В., Кулагов Э.А., Служеникин С.Ф., Лапутина И.П. Закаленные сульфидные твердые растворы в рудах Норильского месторождения // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 41–53.

Ефимова Э.С., Соболев Н.В., Поспелов Л.Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // ЗВМО. 1983. Вып. 3. С. 300–310.

Кравченко Т.А. Экспериментальное исследование продуктов кристаллизации халькопиритового твердого раствора // Новые данные о минералах. 2011. Вып. 46. С. 86–92.

Кравченко Т.А., Ненашева С.Н., Нигматулина Е.Н. Новые данные о составе фаз в центральной части системы Cu-Fe-S // Новые данные о минералах. 2012. Вып. 47. С. 83–89.

Кравченко Т.А., Ненашева С.Н. Новые фазы в Cu-Ni рудах Норильских месторождений // Новые данные о минералах. 2015. Вып. 50. С. 82–89.

Кравченко Т.А., Ненашева С.Н. Особенности кристаллизации норильских медно-никелевых руд по данным экспериментального исследования системы Cu-Fe-S // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2017. № 4. С. 5–11.

Лихачев А.П. Специфические особенности норильских рудоносных интрузий, их природа и определяющее значение в открытии Pt-Cu-Ni месторождений // Отечественная геология. 2019. № 5. С. 36–52.

Ненашева С.Н., Кравченко Т.А. Особенности состава изокубанита и полиморфные модификации соединения CuFe_2S_3 // ЗВМО. 2014. № 5. С. 84–97 (Nenasheva S.N. Kravchenko T.A. Composition features of isocubanite and polymorphous modifications of CuFe_2S_3 compound // Geology of Ore Deposits. 2015. V. 57. No 7. P. 1–8).

Спиридонов Э.М., Гриценко Ю.Д. Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. 2009. М.: Научный мир. 216 с.

Cabri L.J. New data on phase relations in the Cu-Fe-S System // Economic Geology. 1973. V. 68. P. 443–454.

Chandra U., Parthasarathy G., Sharma P. Synthetic cubanite CuFe_2S_3 : Pressure-induced transformation to isocubanite // Canadian Minerals. 2010. V. 48. No 5. P. 1137–1147.

Kitakaze A., Komatsu R. Phase relation of some sulfide systems-(5) Especially Fe-Ni-S system // <https://researchgate.net/publication/343021914/>.

Kullerud G., Yund R. A., Moh G.H. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S, and Fe-Ni-S systems // Economic Geology. Monograph. 1969. V. 4. P. 323–343.