

1. Магнетит характеризуется разнообразной морфологией (зерна от ультрамикроскопических до размера в первые миллиметры; вроски и «цемент» в силикатной матрице рудовмещающих скарнов) и неравномерно распределен в скарнах, что обуславливает контрастность руды и возможность применения методов крупнокускового обогащения и сухой магнитной сепарации;

2. Сложные сростания магнетита (пойкилитовые, мирмекитоподобные) как с рудными, так и нерудными минералами предопределяют необходимость применения тонкого измельчения до 0,044 мм для получения высококачественных железных концентратов, при этом теоретически максимально возможно извлечь из руды не менее 89,4% магнетита;

3. Присутствие сростаний магнетита с пиритом типа замещения определяют практическую невозможность их полного разделения при процессах измельчения, что обуславливает неизбежное засорение железного концентрата серой пирита;

4. Состав магнетита (содержание в нем железа 70,9%) определяет предельно возможное извлечение магнетитового железа в концентрат.

## МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Ni-Cu-Co РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ (КАМЧАТКА)

*Левченко Е.Н., Максимюк И.Е.*

ФГУП «ИМГРЭ», Москва

### *Минералогическая характеристика исходной руды*

Минеральный состав пробы месторождения Шануч типичен для медно-никелевых месторождений и представлен, главным образом, пентландитом, пирротинном, виоларитом и халькопиритом. Кроме того, в руде присутствуют более 40 минералов второстепенных и редко встречающихся. Минералогические исследования руды проводились, главным образом, под микроскопом в полированных шлифах.

Результаты исследований минерального состава руд, вошедших в технологическую пробу ТХ-1, сведены в прилагающейся таблице 1.

Таблица 1

Минеральный состав Ni -Cu- Co руд, вошедших в технологическую пробу ТХ-1  
(по наблюдениям в полированных и прозрачных шлифах)

Минеральный состав	Шлифы ТХ-1/1		Шлифы ТХ-1/6	
	Гранитоид с умеренно-сульфидным Cu-Ni оруденением. 3-7% сульфидов		Массивные сульфидные Cu-Ni руды в гнейсах. 60-85% сульфидов	
	Содержания минералов, %	Размеры зерен, мм	Содержания минералов, %	Размеры зерен, мм
Пирротин	1-2	0,п	До 45-65	До п и более
Пентландит	Около1	0,п	2-25	0,0п-5
Халькопирит	3-4	До 5	2-10	0,0п-4
Виоларит	0,1	Очень мелкий	До первых%%	Очень мелкий
Валлерит	Акцессорный*)	Очень мелкий	Акцессорный	0,0п-5
Пирит	Акцессорный*)	-«-	-	-
Марказит	Ед. зн.	-«-	-	-
«Шпинелиды»**)	Акцессорный	-«-	Акцессорный	0,00п-0,00п
Герсдорфит	Ед. зн.	0,03x0,04	Ед. зн.	0,00п-0,00п
Платина самор.(?)	-	-	Ед. зн.	0,002-0,003
Миллерит	-	-	То же	0,1x0,003
Сфалерит	-	-	-«-	0,075
Плагиоклаз	55-60	До 0,8-1,5	5-15	До 1,5-2
КПШ	(вместе с КПШ)	До 0,8-1,5	-	-
Кварц	35-40	0,0п-1,5	5-15	до 0,8-1
Амфибол	-	-	5-15	До 1,5-2
Флогопит	0,5-1	До 0,5	5-15	0,1-2
Хлорит	Акцессорный	0,1-0,2	Акцессорный	Мелкий
Сидерит	1-2	0,1-0,5	До 1-2	Микропрожилки
Апатит	Акцессорный	0,05-0,1	Акцессорный	До 0,2-0,6
Рутил	Акцессорный	До 0,05-0,2	Акцессорный	Очень мелкий
Серицит	До 0,5-1	Очень мелкий	До 0,5-1	Микропрожилки
Турмалин	-	-	Ед. зн.	Ед. зн.

*Примечание:* \*) Акцессорные минералы встречаются в содержаниях 0,0п-0,3%; ед. зн. – находки одиночных зёрен. \*\*) «Шпинелиды» – условно объединённые в одну группу изотропные минералы, имеющие в отраженном свете относительно повышенный рельеф, низкое отражение, серый цвет. Все они часто образуют хорошо оформленные кристаллы или изометричные зерна.

**Пирротин** образует сплошные массивные выделения (рис. 1а). В отраженном свете он светло-коричневый, сильно анизотропен. При изучении под микроскопом минерал покрывается магнитной эмульсией, что подтверждает его гексагональную модификацию. Минерал сильно магнитен. Пирротин образует сростания с пентландитом и халькопиритом. Иногда в нем отчетливо диагностируются кубические кристаллы белого с розоватым оттенком герсдорфита (рис. 1а). Часто пирротин в виде незначительных вкраплений наблюдается в халькопирите.

**Пентландит** наблюдается в виде сростаний с пирротинном и халькопиритом (рис. 1а). Кроме того, он встречается в виде прожилков в массивном пирротине (рис. 1б) и пламенивидных вростков (рис. 1в,г). Пентландит под микроскопом светло-кремовый, характеризуется более высокой отражательной способностью, чем пирротин. Как правило, пентландит замещается виоларитом, иногда практически целиком.

**Виоларит** под микроскопом серовато-белый с розовато-фиолетовым оттенком, имеет отражательную способность немного больше, чем пирротин, изотропен. В шлифах виоларит практически всегда ассоциирует с пентландитом, замещая его по периферии и по трещинкам. Иногда остаются только незначительные участки незамещенного пентландита.

**Халькопирит** в шлифах хорошо диагностируется. Как правило, он образует сростания с пирротинном и пентландитом (рис. 1а). Иногда в нем наблюдаются выделения пирротина. Кроме того, наблюдается выделение халькопирита по спайности в слюдах и амфиболах.

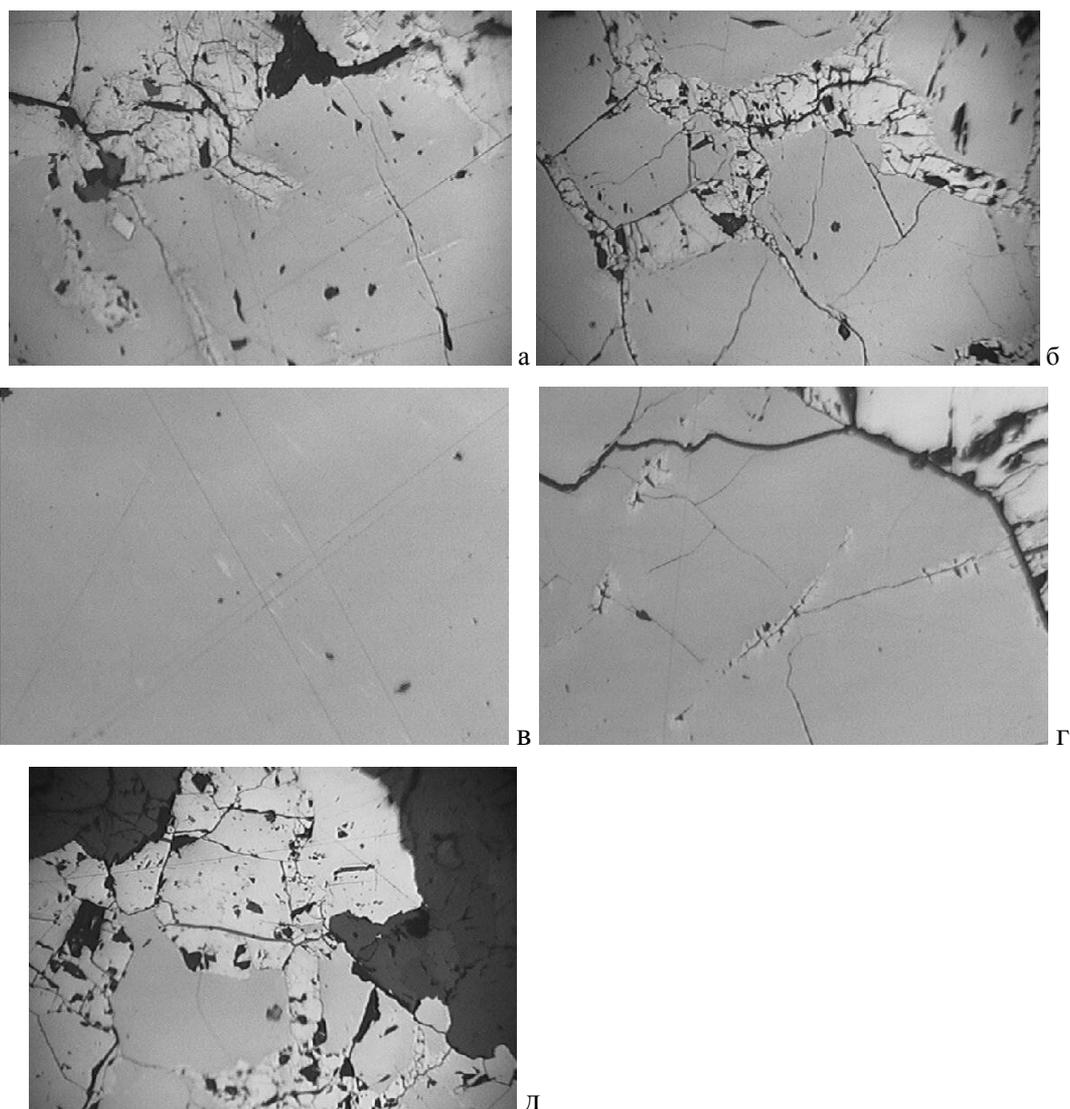


Рис. 1. Исходная руда: а – сростание пирротина, пентландита и халькопирита по трещинкам, перистые выделения пентландита. Выделение герсдорфита в виде ромба (ник. II, увел. 100х, ширина поля съемки 0,9 мм, диаметр поля съемки 1,35 мм); б – прожилки пентландита в массивном пирротине (ник. II, увел. 100х, ширина поля съемки 1,1 мм, диаметр поля съемки 1,35 мм); в – пламенивидные вростки пентландита в массивном пирротине (ник. II, увел. 200х, ширина поля съемки 0,55 мм, диаметр поля съемки 1,35 мм); г – перистые выделения пентландита по трещинкам в массивном пирротине (ник. II, увел. 200х, ширина поля съемки 0,55 мм, диаметр поля съемки 1,35 мм); д – массивная руда, состоящая из пирротина, пентландита и халькопирита (ник. II, увел. 100х, ширина поля съемки 0,9 мм, диаметр поля съемки 1,35 мм)

**Подготовка пробы исходной руды к исследованиям и минералогический анализ продуктов магнитного фракционирования классов ситового анализа исходной руды после измельчения**

Отквартированные 4 навески исходной пробы были раздроблены до крупности – 2,5 мм и – 1 мм и измельчены до крупности –0,0315 мм и –0,16 мм. Куммулятивные характеристики ситового анализа по всем операциям дробления и измельчения даны в табл.2, рис. 2. Характеристика шламов при различной рудоподготовке исходной руды дана в табл. 3, рис. 3. Все продукты ситового анализа проанализированы на содержание Ni -Cu -Co.

Таблица 2

Результаты ситового анализа исходной пробы, дробленной в различных режимах

Класс крупности, мм	дробл. -2,5 мм		дробл. - 1 мм		изм. - 0,315 мм		изм. - 0,16 мм	
	%	кум.	%	кум.	%	кум.	%	кум.
-2,5 + 1,5	36.55	36.55						
-1,5 +1,0	18.04	54.59						
-1,0 +0,56	13.42	68.01	35.57	35.6				
-0,56 +0,316	10.25	78.26	20.05	55.6				
-0,315 +0,16	8.20	86.46	16.84	72.5	45.07	45.07		
-0,16 +0,074	9.34	95.80	17.38	89.8	25.33	70.40	73.67	73.67
-0,074 +0,044	0.90	96.70	2.83	92.7	16.60	87.00	10.67	84.34
-0,044	3.30	100.00	7.34	100.0	13.00	100.00	15.66	100.00
итого	100.00		100.00		100.00		100.00	

Таблица 3

Характеристика шламов при различной рудоподготовке исходной руды

	Выход кл.-0,044 мм, %	Содержание, %		Распределение, %	
		Ni	Cu	Ni	Cu
дробл. до –2,5 мм	3.3	11.23	1.48	4.9	4.9
дробл. до – 1 мм	7.34	10.53	1.5	10.13	11.1
изм. до – 0,315 мм	13	11.19	1.45	18.79	18.93
изм. до – 0,16 мм	13	11.04	1.47	22.7	23.29

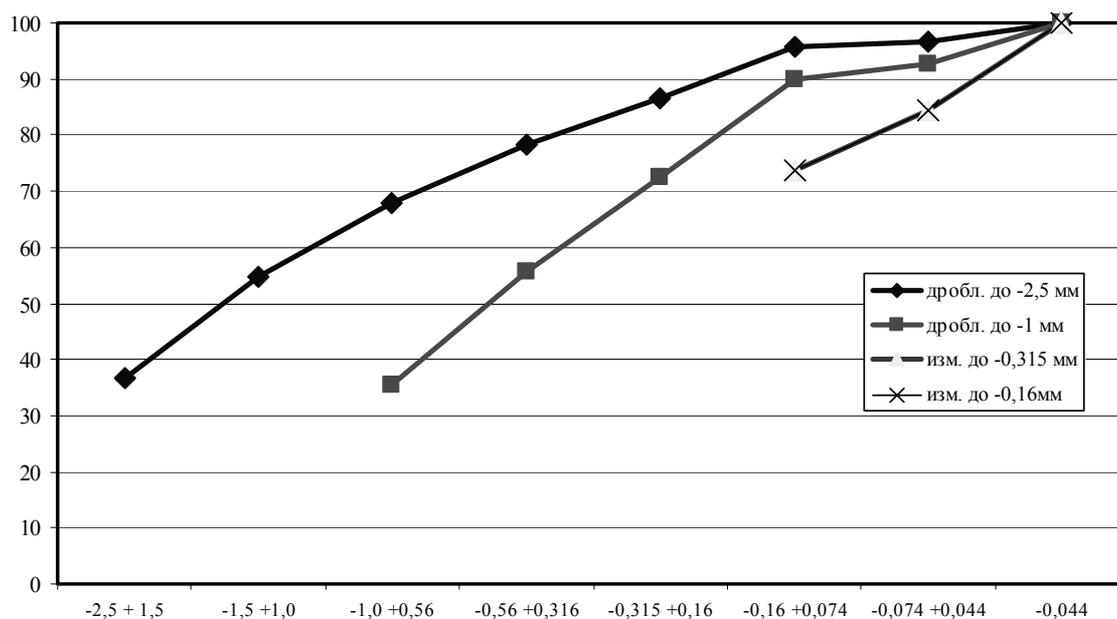


Рис. 2. Куммулятивные характеристики выхода классов крупности руды при различных условиях дробления (измельчения)

Минералогический просмотр продуктов ситового анализа, полученных при дроблении исходной руды до -2,5 мм и -1 мм, показал, что свободные сульфидные минералы в продуктах фракционирования отсутствуют, поэтому, для контроля качества, все продукты фракционирования проанализированы на содержание Ni -Cu -Co.

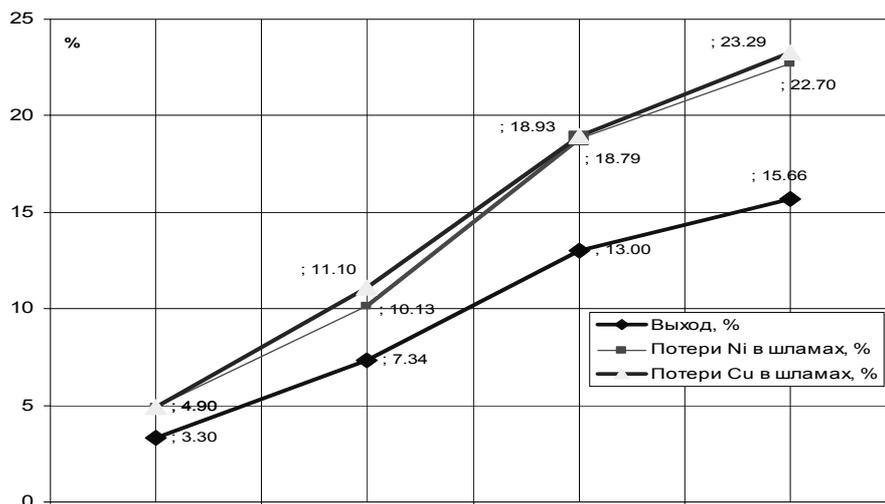


Рис. 3. Характеристика шламов при различной рудоподготовке исходной руды месторождения Шануч

В результате ситового анализа исходной руды, измельченной до  $-0,315$  мм, получены классы крупности:  $-0,315+0,16$  мм,  $-0,16+0,074$  мм,  $-0,074+0,044$  мм,  $-0,044$  мм. Проведено магнитное фракционирование классов:  $-0,315+0,16$  мм,  $-0,16+0,074$  мм,  $-0,074+0,044$  мм. Результаты минералогического анализа продуктов фракционирования класса  $-0,315+0,16$  мм ситового анализа исходной руды, измельченной до  $-0,315$  мм, показали, что в обломках массивного пирротина присутствуют прожилки пентландита (рис. 4а). В некоторых обломках пирротин ассоциирует с халькопиритом (рис. 4б). В нерудных минералах в виде включений присутствуют пирротин, пентландит и халькопирит, определенные в отраженном свете под микроскопом. Размеры включений: халькопирита-от  $\leq 0,0125$  до  $0,025*0,075$  мм, пирротина-от  $\leq 0,0125*0,025$  до  $0,1*0,14$  мм, сростки пирротин+пентландит-от  $0,0125*0,0375$  до  $0,05*0,0875$  мм), 1 сросток пирротин+ пентландит + халькопирит  $0,025*0,0375$  мм. Некоторые сульфиды образуют сростки с нерудными минералами, их примерно 12-14% на продукт. Пентландит замещен виоларитом (рис. 4в,г).

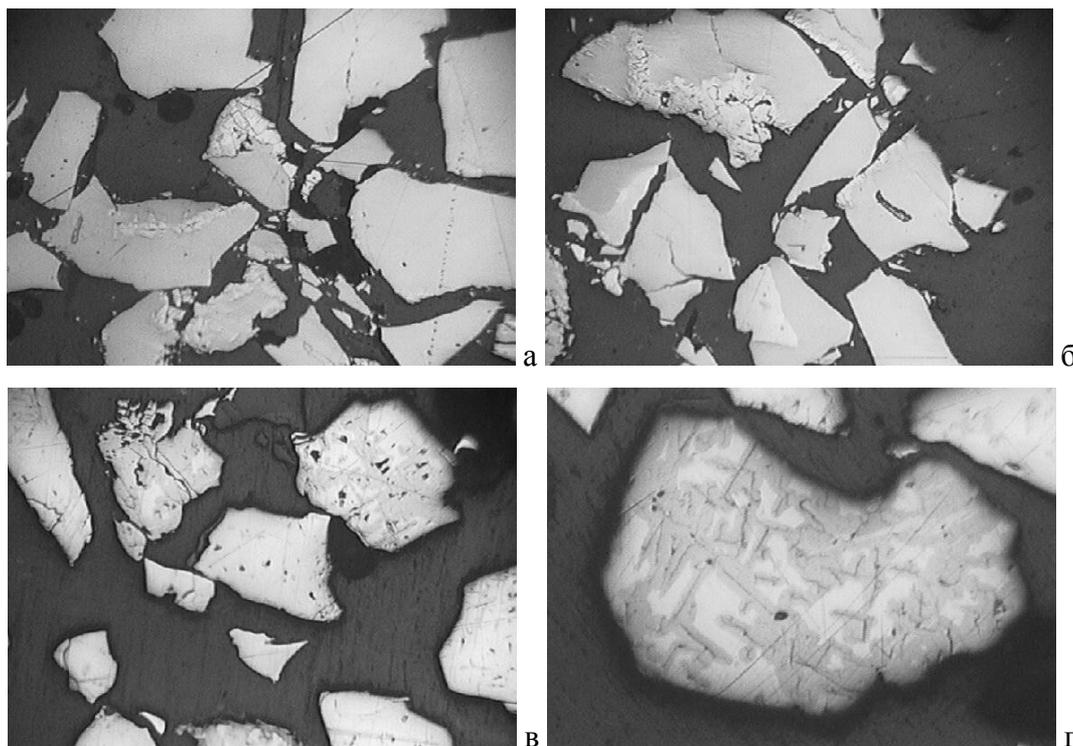
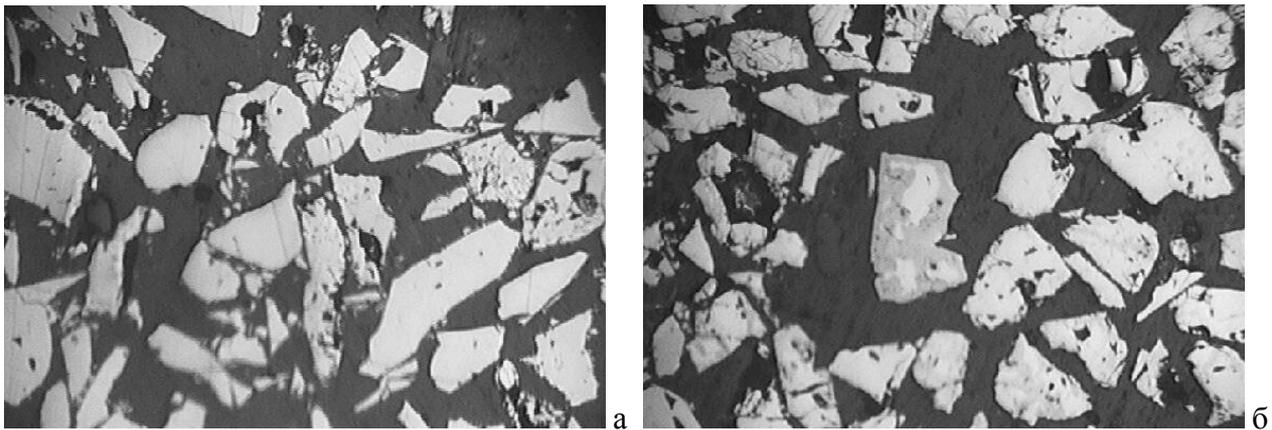
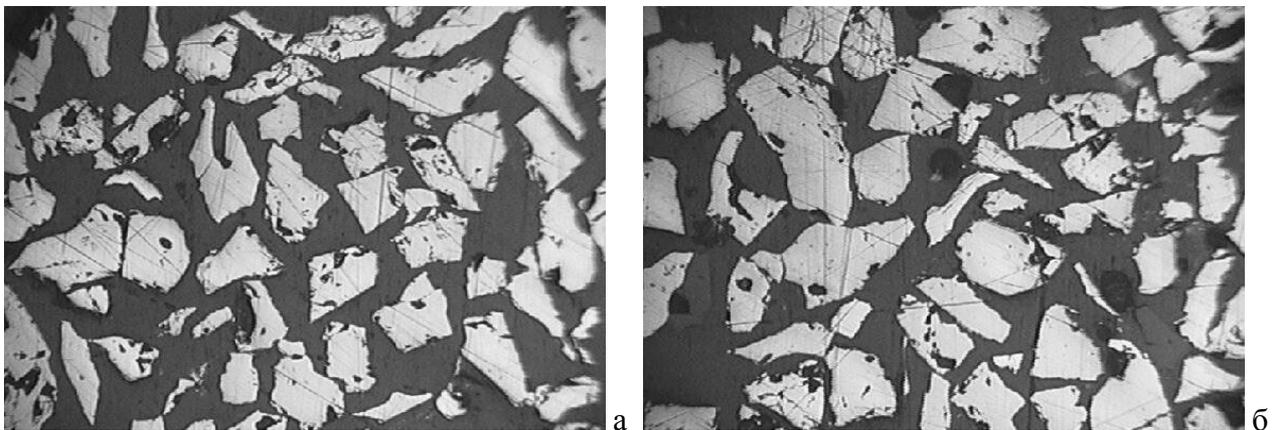


Рис. 4. Магнитная фракция, класс  $-0,315+0,16$  мм; Mgt, вес = 30,81: а - в обломках массивного пирротина прожилки пентландита; б - обломки пирротина с прожилками пентландита, в некоторых обломках пирротин ассоциирует с халькопиритом; Г магнитная фракция  $i=1A$  основ., вес = 1,97: в - пентландит замещается виоларитом; г - виоларит в пентландите (ник. П, увел. 100х, ширина поля съемки 0,9 мм, диаметр поля съемки 1,35 мм)

В результате ситового анализа исходной руды, измельченной до  $-0,16$  мм, получены классы крупности:  $-0,16+0,074$  мм,  $-0,074+0,044$  мм. Проведено магнитное фракционирование классов:  $-0,16+0,074$  мм,  $-0,074+0,044$  мм. Результаты минералогического анализа продуктов фракционирования класса  $-0,16+0,074$  мм ситового анализа исходной руды, измельченной до  $-0,315$  мм, показали, что пентландит в сростках с пирротинном тяготеет к периферии пирротинных зерен, образуя каймы (рис. 5а) и составляет до 10–15% площади сростаний. Замещение пентландита виоларитом составляет от  $n\%$  до 75–90% (рис. 5б). Большая часть зерен пентландита замещена виоларитом, доля которых составляет от 1 до 50–70%. В целом, доля виоларита в сростках составляет 30%. В нерудных минералах в виде включений, в основной массе, присутствует халькопирит, реже – пирротин и пентландит, определенные в отраженном свете под микроскопом. В халькопиритовых зернах встречены 3 зерна-метакристалла (до 0,04–0,06 мм) герсдорфита, одно из которых, в свою очередь, имело каплевидное включение пирротина. Фракция в основном состоит из халькопирита (рис. 6а,б). Сульфиды представлены, главным образом, халькопиритом. Размер сростков и включений халькопирита с кварцем размером от  $<0,0125$  мм до 0,0875 мм. В сростках халькопирит часто корродирует замещаемый нерудный минерал. Встречено изометричное зерно (0,006 мм в поперечнике), в отраженном свете минерал рельефный, высокоотражающий  $\sim 75\%$ , ярко белого цвета, изотропный. *Предположительно отнесен к самородной платине* (рис. 7).



**Рис. 5.** Магнитная фракция, класс  $-0,16+0,074$  мм. а - Mgt. фракция, вес 15,8 гр. Каймы пентландита вокруг пирротина, иногда наблюдается свободный пирротин и пентландит; б - 1 магн. Фр. 1А, осн., вес 0,6 гр. Виоларит в пентландите. Иногда пентландит почти полностью замещается виоларитом (ник. II, увел. 100х, ширина поля съемки 0,9 мм, диаметр поля съемки = 1,35 мм)



**Рис. 6.** Немагнитная фракция, класс  $-0,16+0,074$  мм. Немагн. фр. 10А осн., Вес 0,83 г:  
а - неравномерное соотношение пентландита и халькопирита в искусственном шлифе (брикете);  
б - халькопирит - основной минерал фракции (64%)  
(ник. II, Увел 100х, ширина поля съемки 0,9 мм, диаметр поля съемки = 1,35 мм)

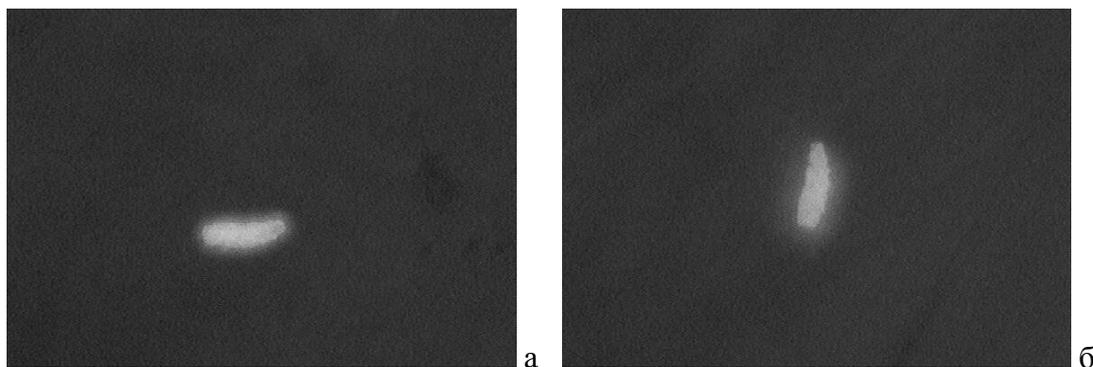


Рис. 7 (а,б). Класс  $-0,16+0,074$ , не электромагнитная фракция. Зерно платины (?) в цементирующем материале. Размер зерна по длинной оси  $0,015$  мм (никколи полускрещенные. Увел.  $520\times$ , ширина поля  $0,09$  мм)

Результаты минералогического анализа продуктов фракционирования класса  $-0,074 +0,044$  мм и ситового анализа исходной руды, измельченной до  $-0,315$  мм, показали характерную остроугольную форму пирротина и их разновеликость. С периферии зерен пирротина часто развиты пламевидные выделения (до  $0,00n \times 0,0n$  мм) пентландита. Включения такого же размера встречаются и в самом пирротине (до 30–35% от общего количества зерен). В кварцевых зернах часто отмечаются многочисленные включения (до  $0,00n \times 0,0n$  мм) преимущественно халькопирита, реже – пирротина и пентландита и их сростков. В сростках с нерудными минералами отмечается чаще халькопирит, реже – пентландит с виоларитом, иногда – пирротин.

Результаты минералогического анализа продуктов фракционирования классов  $-0,16+0,074$  мм и  $-0,074+0,044$  мм и ситового анализа исходной руды, измельченной до  $-0,16$  мм, показали, что пентландит является преобладающим минералом магнитной фракции, практически не замещен виоларитом, раскрыт почти полностью (рис. 8). В неэлектромагнитной фракции наблюдается примерно равное соотношение пентландита и халькопирита (рис. 9). В сростках пирротина и пентландита, частично замещенного виоларитом, пентландит составляет от  $n$  до 10–15%, тяготеет к периферии пирротинных зерен, образуя мельчайшие вроски в пирротине. По некоторым зернам пентландита в виде прерывистой оторочки и мельчайших прожилков развивается ковеллин. В отдельных зернах кварца встречаются вроски пентландита (до  $0,00n - 0,03$  мм) и халькопирита (до  $0,00n - 0,02$  мм). Замещение пентландита виоларитом составляет от 5–30% и более. Аксессуары представлены редкими зернами хромшпинелида с включениями пирротина. В сростках сульфидов с нерудными минералами явно преобладает пентландит с виоларитом, в меньшей мере – пирротин и халькопирит. В сростках халькопирит часто корродирует замещаемый нерудный минерал. В таблице 4 приведены сводные данные по результатам минералогического анализа.

Таблица 4

Минеральный состав исходной пробы и классов крупности руды, %

Минерал	Классы крупности, мм					Исходная руда
	$-0,315$ $+0,16$	$-0,16$ $+0,074$	$-0,074$ $+0,044$	$-0,044$	Зернис-тая часть	
<i>Измельчение до <math>-0,315</math> мм</i>						
Пентландит	5,91	1,73	3,85	48,78	4,3	9,42
Пирротин	32,24	32,48	36,27	15,43	32,99	30,97
Халькопирит	1,61	3,9	8,71	4,18	3,49	3,58
<i>Пентландит в сростках с сульфидами</i>	<i>32,41</i>	<i>28,19</i>	<i>27,24</i>	<i>0,76</i>	<i>30,27</i>	<i>26,77</i>
<i>Пентландит в сростках с нерудными</i>	<i>0,17</i>	<i>0,53</i>	<i>0,58</i>		<i>0,35</i>	<i>0,31</i>
Халькопирит в сростках с нерудными	1,34	5,26	2,95		2,79	2,47
Итого сростков	33,92	33,98	30,77		33,41	29,65
Амфибол	8,14	8,29	14,64		9,28	8,21
Слюды	8,71	8,53	3,49		7,78	6,88
Кварц+п/шпат	8,25	3,8	0,91		5,67	5,02
г/о железа	0,42	0,45	0,81		0,49	0,44
прочие минералы	0,8	6,84	0,56	30,85	2,58	5,83
итого нерудных	26,32	27,91	20,4		25,81	26,38
Всего	100	100	100	100	100	100
<i>Измельчение до <math>-0,16</math> мм</i>						
Пентландит		3,34	9,25	48,11	5,41	11,19
Пирротин		36,03	42,17	15,58	38,18	35,12
Халькопирит		3,59	4,31	4,39	3,84	3,92
<i>Пентландит в сростках с сульфидами</i>		<i>30,86</i>	<i>24,09</i>	<i>0,76</i>	<i>28,5</i>	<i>24,74</i>
<i>Пентландит в сростках с нерудными</i>		<i>0,88</i>	<i>0,39</i>		<i>0,71</i>	<i>0,61</i>
Халькопирит в сростках с нерудными		1,31	0,25		0,94	0,81
Итого сростков		33,05	24,74		30,14	26,16
Амфибол		6,57	7,36		6,85	5,92
Слюды		9,25	5,71		8,01	6,93
Кварц+п/шпат		7,75	4,59		6,64	5,74
Гидроокислы железа		0,15	0,63		0,32	0,27
прочие минералы		0,27	1,24	31,16	0,61	4,75
Итого нерудных		23,99	19,53		22,43	23,61

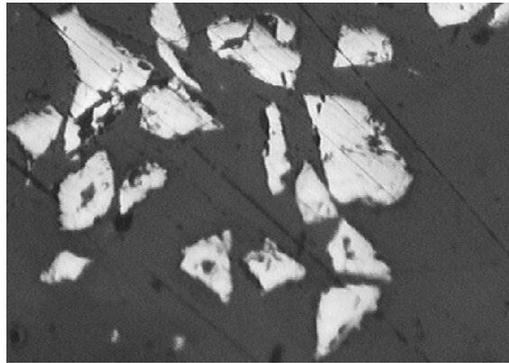


Рис. 8. Класс -0,074+0,044. II электромагнитная фракция, основная. Фракция практически целиком состоит из пентландита. Очень редко наблюдается халькопирит (ник. II. Увел. 108х, ширина поля 0,37 мм)

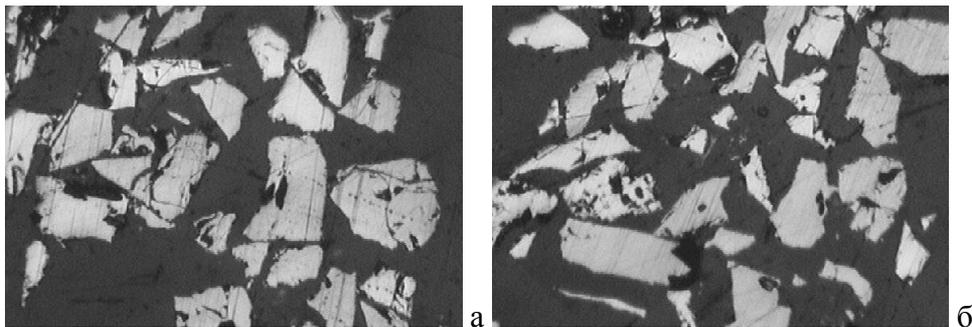


Рис. 9 (а,б). Класс -0,074+0,044. Неэлектромагнитная фракция. Основная. Во фракции наблюдается примерно равное соотношение пентландита и халькопирита (ник. II. Увел. 108х, ширина поля 0,37 мм)

### Прогнозная оценка обогатимости Ni-Cu-Co руды месторождения Шануч

По результатам минералого-технологических исследований была выполнена прогнозная оценка обогатимости Ni-Cu-Co руды месторождения Шануч (табл. 5). Прогнозная схема обогащения дана на рис. 10. Учитывая тонкое взаимное прорастание рудных минералов, исходная руда измельчалась до крупности менее 0,05 мм.



Рис. 10. Прогнозная схема обогащения Ni-Cu-Co руды месторождения Шануч

Прогнозные показатели обогащения исходной Ni-Cu-Co руды месторождения Шануч

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		пентландит	х/пирит	пентландит	х/пирит
Пирротиновый к-т	60	16	1	28,9	20,9
<b>Пентландитовый к-т</b>	<b>23</b>	<b>95</b>	<b>3</b>	<b>66,2</b>	<b>24</b>
Халькопиритовый продукт	1,5	5	95	0,2	49,5
Хвосты	15,5	10	1	4,7	5,6
Исходная руда	100	33,2	2,87	100	100

### Заключение

1. Минеральный состав пробы месторождения Шануч типичен для медно-никелевых месторождений и представлен, главным образом, пентландитом, пирротином, виоларитом и халькопиритом.

2. Минералогический просмотр продуктов ситового анализа пробы, дробленной до  $-2,5$  мм и  $-1,0$  мм, показал, что свободные сульфидные минералы в продуктах фракционирования отсутствуют. Рудные минералы находятся в сростках с нерудными и между собой и раскрываются полностью только при измельчении до  $-0,05$  мм.

3. Рудные минералы составляют 70–80%, представлены неравномерной вкрапленностью ксеноморфных зёрен величиной до 0,8 мм в кварц-полевошпатовой матрице. **Пирротин** образует сплошные массивные выделения. **Пентландит** образует: а) порфирировидные обособления величиной до 0,1 мм в пирротине, реже халькопирите или по границам сростаний этих минералов; б) скопления таких же размеров и прерывистые каймы вдоль сростаний халькопирита + пирротина, пирротина + нерудных минералов; в) пламенивидные и пластинчатые микровключения в пирротине; г) каймы по границам зёрен пирротина. Наиболее развиты формы а) и г). **Халькопирит** образует сростания с пирротинном и пентландитом.

4. При магнитном фракционировании сильно магнитная фракция содержит в пирротине до 8% пентландита в виде пламенивидных прорастаний.

5. Прогнозная оценка обогатимости Ni-Cu-Co руды месторождения Шануч показала, что возможно получить пентландитовый концентрат с выходом 23% от исходной руды и извлечением 66,2%. Основные потери (28,9%) в пирротинном продукте.

## ЗАДАЧИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО КОРРЕКТИРОВКЕ СХЕМ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ И ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

*Ильслова А.М., Аминев Р.Х.*

ООО «Башмедь», Сибай, Республика Башкортостан

В сложных условиях, когда идет сокращение запасов рудного сырья, на Сибайском горнодобывающем предприятии вынуждены увеличивать объемы добычи медной и медно-цинковой руды с низким содержанием металлов и вовлекать в переработку труднообогатимые полиметаллические руды.

В исследовательской лаборатории Сибайской ОФ были проведены испытания на рудах Сибайского месторождения Камаганского и Рубцовского месторождений.

Медно-цинковые руды Сибайских месторождений представлены как колчеданным, так и вкрапленным типами. Для них характерно преобладание сульфидов железа (пирита, пирротина, марказита). Другие рудообразующие сульфидные минералы представлены халькопиритом, сфалеритом, борнитом, блеклыми рудами, галенитом. Минералы пустой породы представлены серицитом, хлоритом, кварцем, баритом.

Камаганское месторождение приурочено к Восточно-Сибайской рудоносной тектонической зоне. Морфологические, структурные и текстурные особенности руд указывают на очень сложные процессы формирования оруднения. Руды Камаганского месторождения относятся преимущественно к вкрапленному типу. Характерной особенностью являются широкое развитие эмульсионных включений халькопирита и пирита в сфалерите и борните; образование борнит-сфалерит-пиритовых включений; тесная ассоциация первичных сульфидных минералов с пиритом.

Сложные условия образования рудных минералов обусловили развитую трещиноватость пирита, наличие халькопирита и сфалерита между зёрнами пирита, который находится в тесном сростании с ними. Для полного раскрытия этих сложных по структуре и крупности минеральных сростков необходимо очень тонкое измельчение руд до содержания класса  $-0,074$  мм – 100%, в то время как отделение сульфидных