

Р. А. ВИНОГРАДОВА, В. М. ОКРУГИН, О. Л. СВЕШНИКОВА,
Л. Т. СОШКИНА

ВИОЛАРИТ ИЗ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ НА КАМЧАТКЕ

Виоларит — железо-никелевый шпинелеподобный сульфид из группы линнеита — весьма характерен для сульфидных медно-никелевых руд. Несмотря на частую встречаемость в этих рудах, до недавнего времени он относился к числу малоизученных минералов, что связано с трудностью выделения его для химического анализа, а также с большим сходством виоларита в полированных шлифах с бравоитом и полидимитом. С внедрением в практику минералогических исследований микрорентгеновского и электронно-зондового микроанализа в последние годы в изучении виоларита достигнуты значительные успехи, о которых целесообразно сказать, прежде чем перейти к изложению результатов изучения виоларита из месторождения Шануч.

Исследование состава виоларита на зонде, сопровождавшееся рентгенометрическим контролем [1—6], выявило значительное отклонение от первоначально установленной для него теоретической формулы FeNi_2S_4 . Это отклонение обычно проявляется в небольшом дефиците серы, а также (что весьма существенно для состава виоларита) в широких вариациях содержаний железа (5—46 вес.%) и никеля (9—53 вес.%) при теоретическом содержании этих элементов в 18,5 и 38,9 вес.% соответственно, присутствии изоморфных примесей кобальта (до 10—13 вес.%) и изредка меди. В настоящее время большинством исследователей виоларит рассматривается как промежуточный член в ряду полидимит Ni_3S_4 —грейгит Fe_3S_4 с формулой $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_3\text{S}_4$, однако границы между виоларитом и крайними членами ряда не определены. Выделяются виолариты, обогащенные железом (в сравнении с FeNi_2S_4), и виолариты, обогащенные никелем. Составы богатого никелем виоларита образуют непрерывный изоморфный ряд с полидимитом. Между богатыми железом виоларитами и грейгитом непрерывного изоморфного ряда не установлено. По соотношению между Fe, Ni и Co анализы виоларита вместе с анализами полидимита на треугольной диаграмме (рис. 1) образуют обширное поле, протягивающееся вдоль Ni—Fe-стороны треугольника и ограниченное содержанием кобальта от 3—11 до 15—21 ат.%. Как видно из диаграммы, преобладают составы виоларита, обогащенные железом. Эмпирически установленная принадлежность виоларита, полидимита и грейгита к одному изоморфному ряду получила недавно кристаллохимическое обоснование — все три минерала относятся к типу обращенных тиошпинелей в отличие от линнеита, структура которого строится по типу нормальных тиошпинелей [8].

Виоларит — обычно гипергенный минерал, реже гипогенный. В составе медно-никелевых руд он развивается прежде всего по пентландиту, а также по пирротину, миллериту и иногда по пириту. Майченер [9] установил, что в условиях климата северной Канады в свежих неизмененных рудах гипергенный виоларит образуется по пентландиту в течение 25 лет. Возможность существования гипогенного виоларита подтверждается экспериментальными исследованиями в системе

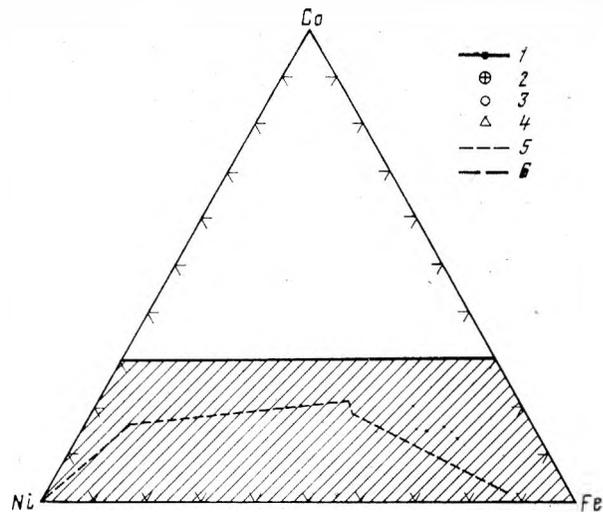
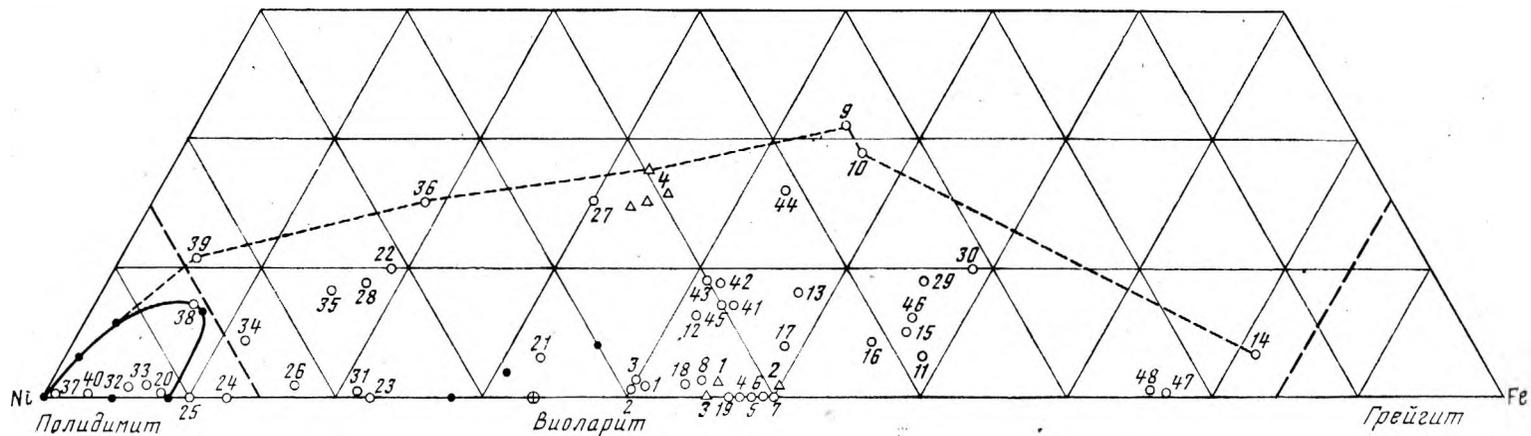


Рис. 1. Отношения между Ni, Fe и Co (в ат.%) в составе виоларита

1 — анализы полидимита и виоларита и контуры составов полидимита, по Крутову [17]; 2 — теоретический состав виоларита; 3 — новые микронзондовые анализы виоларита: 1—7 [1], 8—27 [2], 28—30 [4], 31—40 [5], 41—48 [6]; 4 — анализы виоларита из месторождения Шануч: 1 — виоларит по пентландиту (среднее из ан.— 1, 2, 3); 2 — виоларит по пирротину (среднее из ан.— 5, 6); 3 — виоларит по пириту (среднее из анализов — 9, 11, 12); 3 — кобальтовый виоларит (ан. 8, 13, 14, 15); 5 — контуры составов полидимита и виоларита; 6 — предлагаемые условные границы в ряду полидимит — виоларит — грейгит



Fe—Ni—S, где виоларит возникает как относительно низкотемпературная фаза при температуре ниже 461° [10, 11].

Характерные свойства гипергенного и гипогенного виоларита, обобщенные Никелем [1, 12] и дополненные дальнейшими исследованиями [2, 5], сводятся к следующему. Гипергенный виоларит образует главным образом агрегаты двух типов: 1) массивные зернистые («блочные»), когда он развивается по пентландиту, особенно в результате полного псевдоморфного замещения последнего и 2) пластинчатые, нередко с зазубренными краями, когда он развивается по моноклинному пирротину. Предпочтительное развитие виоларита по пентландиту определяется близостью строения и размеров кристаллических решеток этих минералов [2]. Гипергенный виоларит сильно трещиноват, обладает повышенной пористостью, часто содержит реликтовую спайность пентландита и отдельность пирротина. Постоянная трещиноватость гипергенного виоларита объясняется меньшим объемом кристаллической решетки виоларита по сравнению с объемом решеток пентландита и пирротина. Трещины нередко выполняются гидроокислами железа, магнетитом, иногда пиритом, марказитом, смайтитом, сидеритом и карбонатами никеля. Это происходит в том случае, если при окислении пентландита и пирротина избыточное по сравнению с виоларитом количество атомов металлов в их решетках не выносятся, а переотлагается на месте, в трещинах виоларита [1].

Вследствие микропористости, трещиноватости и возможного присутствия микровключений реликтовых и новообразованных минералов, гипергенный виоларит при микрозондовом анализе дает заниженные суммы и обычно обнаруживает дефицит серы, что приводит к частичному отклонению от идеальной стехиометрии виоларита Me_3S_4 . Гипогенный виоларит в отличие от гипергенного имеет гладкую полированную поверхность без выбоин и трещин. При микрозондовом анализе такого виоларита, как правило, получаются нормальные суммы и выдерживаются стехиометрические соотношения между суммой металлов и серой. Кроме того, гипогенный виоларит обычно характеризуется присутствием повышенных количеств кобальта.

Сопоставление приводимых различными исследователями химических анализов виоларита не только выявляет вариации состава минерала, но и позволяет обнаружить в этом ряд закономерностей. Эти закономерности выдерживаются на многих месторождениях и определяются минеральными ассоциациями виоларита, а также составом сопутствующих минералов. Как гипергенный, так и гипогенный богатый никелем виоларит вплоть до полидимита наблюдается в ассоциации с никелевыми минералами: пентландитом, миллеритом, вазситом,— при отсутствии в рудах пирротина [2, 5]. Если совместно с никелевыми минералами присутствует пирротин, состав виоларита в этом случае близок к теоретическому или обогащен железом [2, 6]. При этом на всех без исключения месторождениях гипергенный виоларит по пирротину относительно богаче железом и беднее никелем (в сравнении с $FeNi_2S_4$), чем виоларит по пентландиту.

Наличие кобальта в большей степени характерно для гипогенного виоларита как в ассоциации с пирротинном, так и в ассоциациях без него [1, 2, 5]. В гипергенном виоларите кобальт отмечается только в случае образования минерала по кобальтсодержащим пентландиту и пирротину [1, 6], причем содержание кобальта и никеля в виоларите хорошо коррелируется с содержанием этих элементов в исходном пентландите или пирротине, что указывает на определенную преобладание состава виоларита от состава замещаемых минералов.

Тем не менее до сих пор не выявлены зависимости между составом, свойствами и параметром элементарной ячейки виоларита. Мы попытались восполнить этот пробел на образцах виоларита из месторожде-

ния Шануч, где минерал совершенно не был изучен, но оказался благоприятным объектом для исследований такого рода. К тому же сведения о виоларите из отечественных месторождений вообще очень скудны. В литературе удалось найти лишь два описания минерала: из Березовского [13] и Норильского [14] месторождений.

Медно-никелевое месторождение Шануч находится в северо-западной части Срединного хребта на Камчатке. Оно открыто геологами КТГУ в результате геолого-поисковых работ 1973—1975 гг. и в настоящее время интенсивно разведывается. Рудные тела месторождения трубообразной или псевдопластовой (типа донных залежей) формы сложены массивными, густовкрапленными и прожилково-вкрапленными рудами и залегают внутри или в зоне экзоконтакта амфиболизированных габбро, располагающихся среди верхнемеловых двуслюдяных плагиогранитов и рассланцованных терригенно-карбонатных и вулканогенно-осадочных пород. Наиболее разведано и изучено рудное тело № 1, которое выходит на поверхность на северном склоне горы Тхонжа в долине ручья Ралли, северо-западнее пос. Мильково. Трубообразное по форме, оно сложено халькопирит-пентландит-пирротиновыми рудами преимущественно массивной текстуры. Рудные выходы на поверхности окислены и содержат охристые примазки гидроокислов железа. При минераграфическом исследовании руд, кроме указанных рудных минералов, обнаруживаются также пирит, виоларит, марказит, ильменит, гематит и более редкие герсдорфит, никелин, сперрилит и самородное золото.

Виоларит встречается в рудах повсеместно в тесной ассоциации с пентландитом, пирротинном и пиритом. Количество его в полированных шлифах колеблется от 2—5 до 25—35%. По особенностям морфологии можно выделить два типа виоларита. *Виоларит первого типа* (виоларит I) образует отдельные относительно крупные идиоморфные зерна (0,1—0,3 до 0,5—0,8 мм в поперечнике) с гладкой полированной поверхностью, без трещин и спайности. Встречается он сравнительно редко и обычно приурочен к раннему пириту, границы с которым у него ровные без реакционных взаимоотношений (рис. 2, а, 3, а). *Виоларит второго типа* (виоларит II) широко распространен и образуется путем замещения пентландита, пирротина и пирита (рис. 2, б, в). При этом можно проследить все стадии такого замещения — от развития одиночных тонких прожилков до густой сети их, часто с образованием полных псевдоморфоз в случае пентландита или участков массивного виоларита среди пирротина и пирита. Полная виоларитизация пентландита, а также появление среди пирротина и пирита массивного виоларита, наряду с увеличением его количества, характерны для близповерхностных или выходящих на поверхность руд, в которых постоянно наблюдаются гидроокислы железа.

В зависимости от исходных минералов характер возникающих по ним агрегатов виоларита различен. При замещении пентландита образуются грубозернистые агрегаты массивного виоларита с полигональным очертанием зерен. Агрегаты виоларита по пирротину мелкозернистые и имеют характерные зазубренные пилообразные края. В обоих случаях виоларит обнаруживает реликтовую спайность или отдельность исходных минералов. Агрегаты виоларита по пириту мелкозернистые, нередко заполняют своеобразные кольцевые трещины в пирите. Виоларит второго типа всегда трещиноват. Трещины заполнены нерудными минералами, гидроокислами железа, иногда в них отмечаются нитевидные прожилки позднего пирита. Оба тела виоларита могут присутствовать в рудах одновременно. Однако характер взаимоотношений между ними (рис. 3, а) отчетливо указывает на их разновременное образование — виоларит первого типа является более ранним образованием.

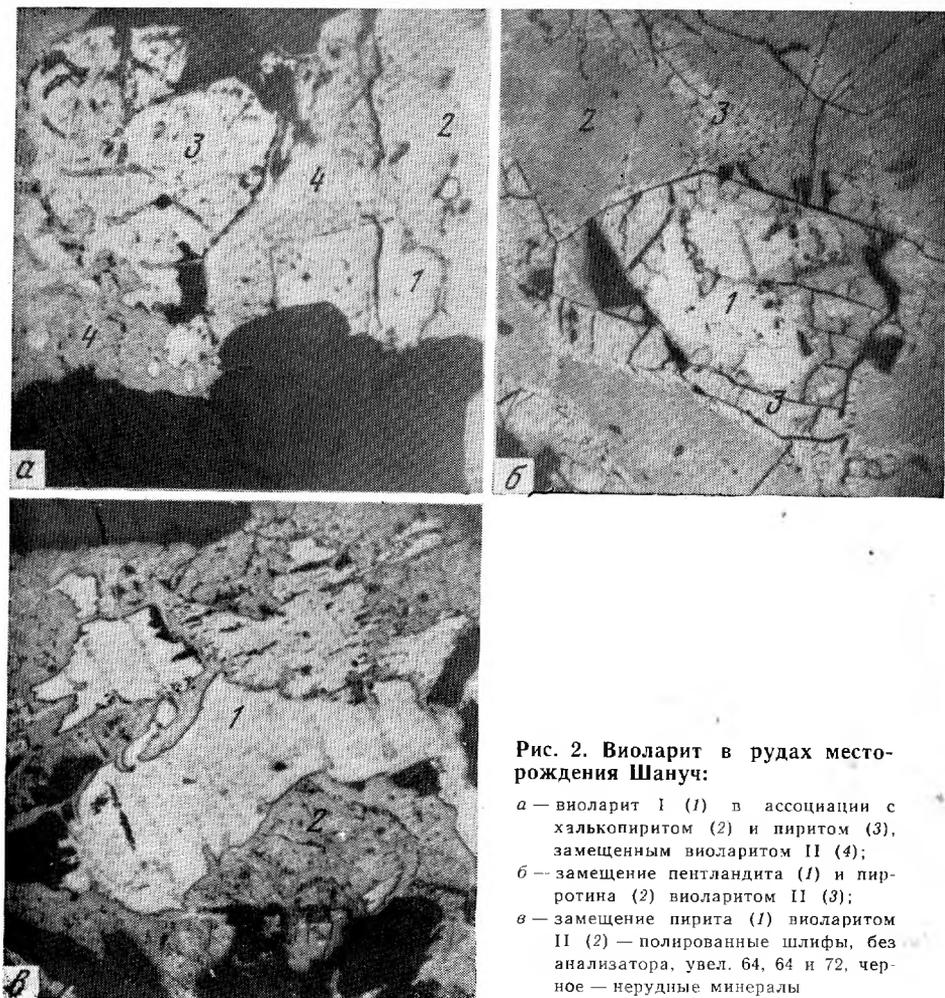


Рис. 2. Виоларит в рудах месторождения Шануч:

- а — виоларит I (1) в ассоциации с халькопиритом (2) и пиритом (3), замещенным виоларитом II (4);
 б — замещение пентландита (1) и пирротина (2) виоларитом II (3);
 в — замещение пирита (1) виоларитом II (2) — полированные шлифы, без анализатора, увел. 64, 64 и 72, черное — нерудные минералы

Состав виоларита изучался на микросонде JXA-50A фирмы «Jeol» в трех рудных образцах (рудное тело № 1, скв. 33). Одновременно анализировались ассоциирующие с виоларитом пентландит, пирротин и ранний пирит. Полный качественный анализ виоларита выявил в составе только железо, никель, кобальт и серу, которые распределяются относительно равномерно, что установлено при площадном и линейном сканировании минерала (рис. 4). Уже в результате качественного анализа обнаружилось различие в содержании кобальта в виоларите первого и второго типов (рис. 3).

Количественный анализ показал (табл. 1), что для виоларита I характерны высокие содержания кобальта (8,85—10,34 вес.%), а содержания железа в нем (18,15—19,28 вес.%) почти соответствует теоретическому. Виоларит II в целом более железистый (24,20—28,62 вес.% Fe,) чем виоларит I, и по соотношению железа и никеля должен быть отнесен к железистому виолариту. При этом относительно более железистым является виоларит по пирротину, менее железистым — виоларит по пириту. Примеси кобальта в виоларите II составляют менее 1 вес.% — от 0,08—0,45 в виоларите по пириту до 0,45—0,76 вес.% в виоларите по пентландиту и пирротину. Прямой зависимости между содержанием кобальта в виоларите II и содержанием этой примеси в замещаемых минералах не установлено.

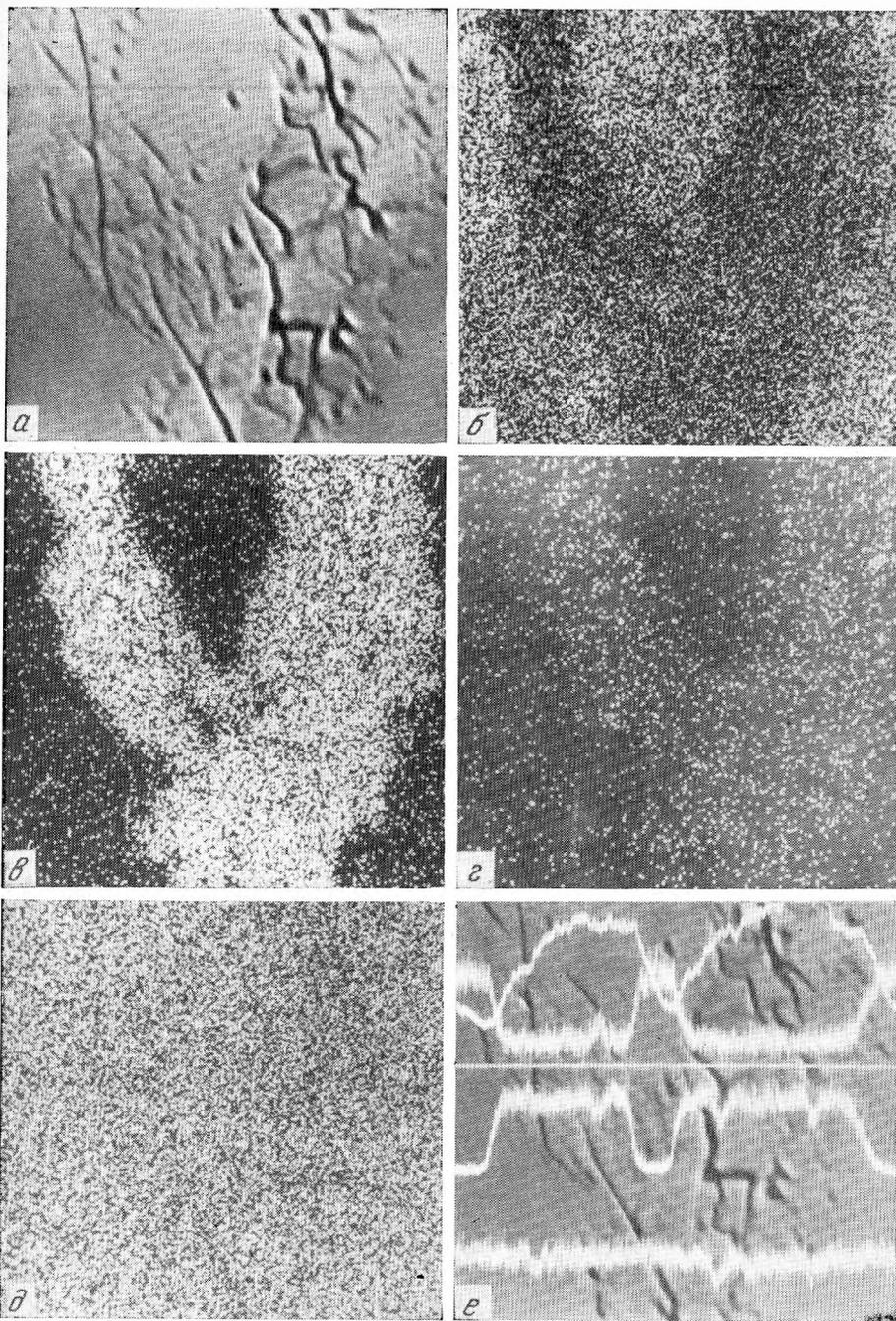


Рис. 3. Прожилки виоларита в пирротине из месторождения Шануч (обр. 33/160)

Изображение в обратно-рассеянных электронах (а) и в характеристических рентгеновских лучах FeK_{α} (б), NiK_{α} (в), CoK_{α} (г), SK_{α} (д); е — изображение в обратно-рассеянных электронах с профилем сканирования в лучах FeK_{α} , CoK_{α} , NiK_{α} и SK_{α} (сверху вниз); увел. 800, участок сканирования 100×100 мкм

Нанесенные на треугольную диаграмму (см. рис. 1) фигуративные точки анализов виоларита из Шануча хорошо иллюстрируют выявленные особенности его состава. Анализы виоларита II, бедные кобальтом, располагаются вблизи Ni—Fe-стороны треугольника, в области

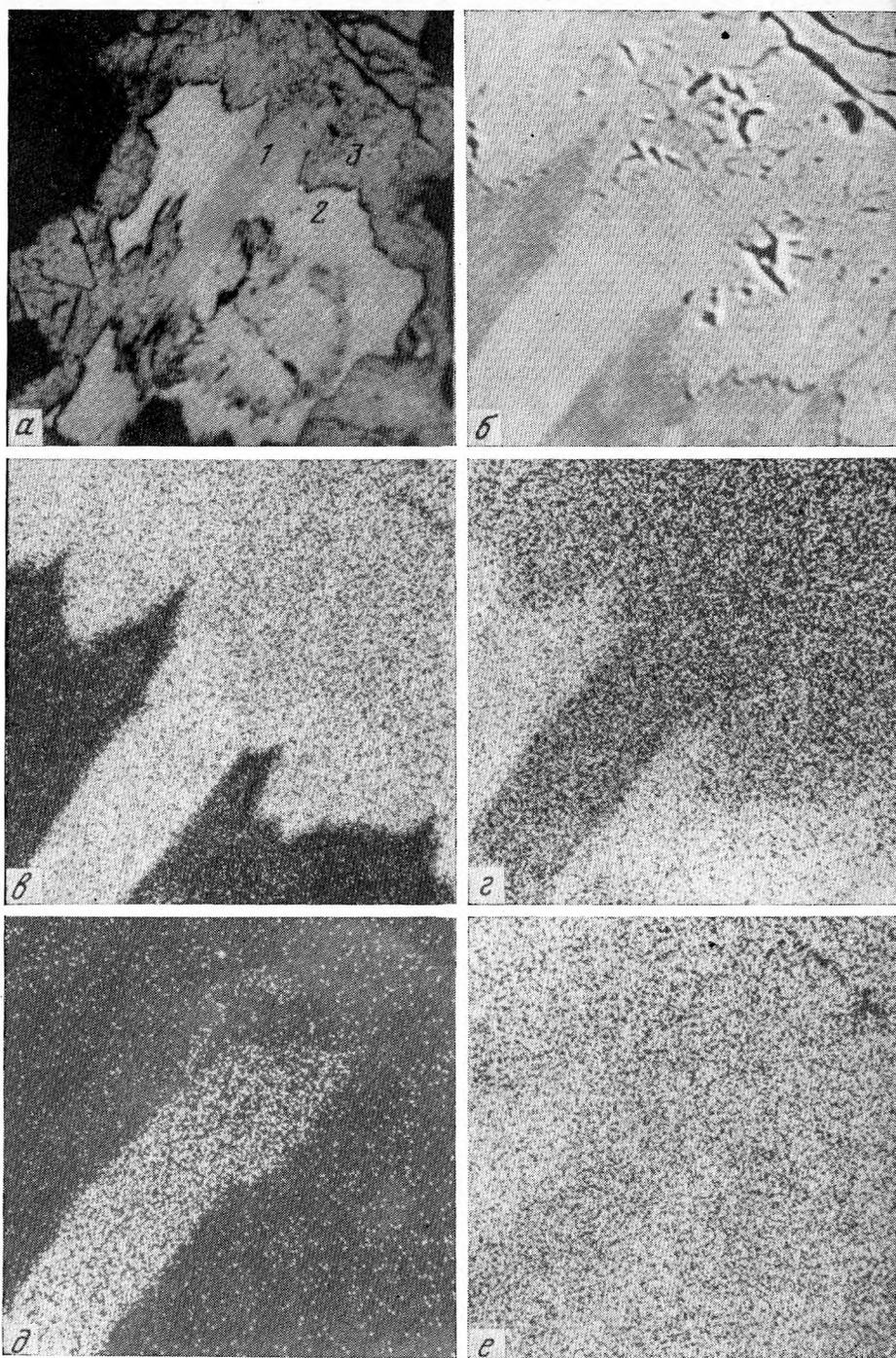


Рис. 4. Два типа виоларита в рудах месторождения Шануч (обр. 33/110)

a — оптическое изображение в полированном шлифе, без анализатора, увел. 64 (1 — виоларит I, 2 — пирит, 3 — виоларит II, замещающий пирит, черное — нерудные минералы); изображение в обратно-рассеянных электронах (*b*) и в характеристических рентгеновских лучах NiK_{α} (*c*), FeK_{α} (*d*), CoK_{α} (*e*); увел. 600, участок сканирования 100×100 мкм

Таблица 1

Состав виоларита и ассоциирующих с ним сульфидов из месторождения Шануч

Номер образца	Номер анализа	Минералы	Вес. %					Формула	Fe : Co : Ni (в ат.%)
			Fe	Co	Ni	S	Сумма		
33/160	1	Виоларит II по пентландиту	25,17	0,45	31,05	41,36	98,03	$(\text{Fe}_{1,397} \text{Co}_{0,024} \text{Ni}_{1,640})_{3,061} \text{S}_4$	45,6:0,8:53,6
	2		26,22	0,49	30,46	41,75	98,92	$(\text{Fe}_{1,442} \text{Co}_{0,025} \text{Ni}_{1,594})_{3,061} \text{S}_4$	47,1:0,8:52,1
	3		25,77	0,76	30,46	42,78	99,77	$(\text{Fe}_{1,383} \text{Co}_{0,039} \text{Ni}_{1,555})_{2,977} \text{S}_4$	46,5:1,3:52,2
	4	Пентландит	29,77	1,08	38,39	33,65	102,89	$(\text{Ni}_{4,985} \text{Fe}_{4,083} \text{Co}_{0,140})_{9,188} \text{S}_8$	
	5	Виоларит II по пирротину	28,62	0,56	29,06	40,44	98,68	$(\text{Fe}_{1,625} \text{Co}_{0,030} \text{Ni}_{1,670})_{3,225} \text{S}_4$	50,4:0,9:48,7
	6		27,91	0,60	27,33	41,41	97,25	$(\text{Fe}_{1,548} \text{Co}_{0,032} \text{Ni}_{1,442})_{3,022} \text{S}_4$	51,2:1,1:47,7
	7	Пирротин	65,36	0,02	1,58	35,30	102,26	$(\text{Fe}_{1,063} \text{Ni}_{0,024})_{1,087} \text{S}_1$	
33/110	8	Виоларит I в пирите	18,59	10,34	29,24	41,90	100,07	$(\text{Fe}_{1,018} \text{Co}_{0,537} \text{Ni}_{1,524})_{3,079} \text{S}_4$	33,1:17,4:49,5
	9	Виоларит II, замещающий пирит с виоларитом I	24,20	0,45	29,88	40,66	95,19	$(\text{Fe}_{1,367} \text{Co}_{0,024} \text{Ni}_{1,605})_{2,996} \text{S}_4$	45,6:0,8:53,6
	10	Пирит	46,66	0,02	0,48	52,16	99,32	$(\text{Fe}_{1,027} \text{Ni}_{0,010})_{1,037} \text{S}_2$	
	11	Виоларит II по пириту	25,71	0,08	31,83	40,54	98,16	$(\text{Fe}_{1,456} \text{Co}_{0,004} \text{Ni}_{1,715})_{3,175} \text{S}_4$	45,9:0,1:54,0
	12		24,99	0,09	32,50	40,60	98,18	$(\text{Fe}_{1,413} \text{Co}_{0,005} \text{Ni}_{1,749})_{3,167} \text{S}_4$	44,6:0,2:55,2
	13	Идиоморфное зерно виоларита I в пирите	18,15	9,04	30,50	40,62	98,31	$(\text{Fe}_{1,026} \text{Co}_{0,484} \text{Ni}_{1,640})_{3,150} \text{S}_4$	32,6:15,4:52,0
33/165a	14	Идиоморфные зерна виоларита I в пирите	18,30	8,85	29,93	42,04	99,12	$(\text{Fe}_{1,000} \text{Co}_{0,458} \text{Ni}_{1,524})_{2,982} \text{S}_4$	33,5:15,4:51,1
	15		19,28	9,42	27,96	41,63	98,29	$(\text{Fe}_{1,063} \text{Co}_{0,492} \text{Ni}_{1,467})_{3,022} \text{S}_4$	35,2:16,3:48,5

Примечание. Состав определялся в рентгеноспектральной лаборатории кафедры минералогии МГУ. Условия анализа: рентгеновский микроанализатор JXA-50A фирмы «Jeol», ускоряющее напряжение 15 кв, ток зонда $2 \cdot 10^{-8}$ А, диаметр зонда 1—2 мк, эталоны—чистые металлы Fe, Co, Ni и пирротин известного химического состава (на S). Пересчет интенсивностей на концентрации произведен по наиболее надежному в настоящее время методу [15] с введением поправок на поглощение [16], атомный номер [17] и флуоресценцию [18].

железистого виоларита. Анализы богатого кобальтом виоларита I группированы в верхней части виоларитового поля, вблизи наметившегося по литературным данным контура этого поля. При этом один анализ из четырех (ан. 8) несколько изменяет контур, увеличивая тем самым площадь виоларитового поля. Учитывая известные контуры полидимитового поля [7], а также непрерывность составов между виоларитом и полидимитом, с одной стороны, и отсутствие такой непрерывности между виоларитом и грейгитом — с другой, мы предлагаем провести условную границу между полидимитом и виоларитом по содержанию никеля в 85 ат. % (от суммы металлов), а между виоларитом и грейгитом — аналогично по содержанию железа в 85 ат. %.

Последующее детальное изучение рентгеновских характеристик и свойств виоларита из Шануча проведено на двух образцах: обычного виоларита (обр. 33/160, ан. 5) и богатого кобальтом виоларита (обр. 33/110, ан. 13).

Рентгеновское исследование виоларита выполнено микрометодом. По набору отражений, интенсивностям и величинам межплоскостных расстояний изученные образцы виоларита хорошо сопоставляются между собой и с эталонными данными (табл. 2). При этом значения величин межплоскостных расстояний и соответственно параметр a_0 обычного виоларита очень близки к эталонным, в то время как богатый кобальтом виоларит отличается от них меньшими величинами межплоскостных расстояний и соответственно меньшим значением a_0 .

Таблица 2
Межплоскостные расстояния и параметр a_0 виоларита из месторождения Шануч

Богатый Со виоларит			Обычный виоларит		Виоларит из Сёдбери [19]	
<i>l</i>	$d\alpha/n$	<i>hkl</i>	<i>l</i>	$d\alpha/n$	<i>l</i>	$d\alpha/n$
—	—	—	—	—	2	5,47
1	3,330	022	1	3,349	3	3,35
10	2,842	113	10	2,851	10	2,85
7	2,361	004	6	2,367	5	2,36
2	1,928	224	—	—	2	1,931
6	1,817	{ 115 333	6	1,820	6	1,820
9	1,668	044	8	1,674	8	1,674
2	1,606	135	—	—	3	1,602
2	1,436	335	—	—	2	1,445
2	1,362	444	—	—	2	1,365
3	1,228	{ 137 355	—	—	1	1,233
3	1,179	008	—	1,182	4	1,183
—	—	—	—	—	4	1,115
—	—	—	—	—	3	1,094
4	1,054	048	4	1,056	5	1,059

$$a_0 = 9,434 \pm 0,004 \text{ \AA}$$

$$a_0 = 9,461 \pm 0,006 \text{ \AA}$$

$$a_0 = 9,46 \text{ \AA}$$

Примечание. Fe—нефильтрованное излучение; 35 кВ; 10 мА; $d_{\text{камеры}}=57,3$ мм; $d_{\text{образца}}=0,2$ мм; внутренний стандарт — германий.

Цвет виоларита в отраженном свете в зависимости от сопутствующих минералов воспринимается различно: на фоне пентландита он сиреневый, на фоне пирротина — розовато-белый, кремовый, на фоне пирита — буровато-розовый. Отражательная способность минерала близка к таковой пентландита, заметно ниже, чем у пирита, и несколько выше, чем у пирротина. Спектры отражения обычного и богатого кобальтом виоларита были измерены на двух приборах (табл. 3, рис. 5).

Таблица 3
Отражение (R) и микротвердость (H) виоларита из месторождения Шануч

Образцы	R (в %) для различных длин волн (в нм)									
	400	420	440	460	480	500	520	540	560	
Обычный виоларит	31,41	33,19	34,56	39,7	36,83	40,4	37,53	38,95	41,7	41,42
Богатый кобальтом виоларит	39,26	41,15	42,43	43,0	43,74	44,0	44,14	45,00	46,6	46,73

Примечание. Измерения R выполнены Л. И. Бочек: в интервале 460—1100 нм на ФМЭ-1, усовершенствованном в ЦНИГРИ; эталон—кремний, объектив $21 \times 0,40$, диаметр зонда 0,02 мм; в интервале 400—700 нм на микроспектрофотометре MRM-01 фирмы «Ортон», эталон WTiC, объектив $16 \times 0,35$, диаметр зонда ~0,04 мм. Микротвердость измерена на микротвердомере ПМТ-3, тарированном по NaCl, при нагрузке 5 г.

Образцы	R (в %) для различных длин волн (в нм)									
	580	600	620	640	660	680	700	740	780	
Обычный виоларит	43,7	42,79	43,73	46,7	44,48	45,49	46,45	47,24	47,52	55,6
Богатый кобальтом виоларит	49,4	47,94	49,00	52,4	49,83	50,94	52,18	53,23	53,67	57,5

Образцы	R (в %) для различных длин волн (в нм)								H , кгс/мм ²	
	820	860	900	940	980	1020	1060	1100	Кол-во замеров	$H_{\text{средн}}$
Обычный виоларит	59,0	59,8	60,6	61,0	61,6	61,6	61,3	61,3	6	331
Богатый кобальтом виоларит	62,4	63,5	64,2	64,8	65,4	66,0	66,5	66,8	10	369

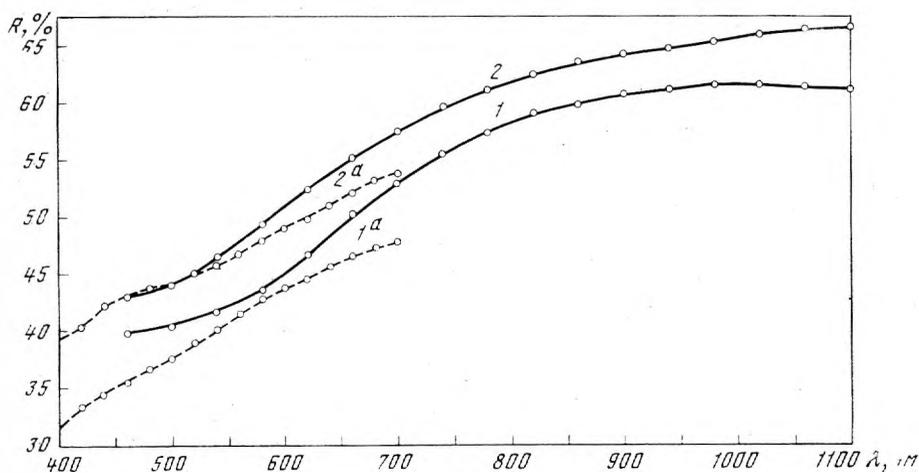


Рис. 5. Спектры отражения обычного виоларита (1, 1^a) и виоларита, богатого кобальтом (2, 2^a)

1, 2 — измерены на ФМЭ-1; 1^a, 2^a — измерены на микроспектрофотометре фирмы «Ортон»

Несмотря на некоторые отличия в форме спектров и абсолютных значений коэффициентов отражения, в обоих случаях богатый кобальтом виоларит имеет более высокие значения коэффициентов отражения, чем обычный виоларит. Микротвердость богатого кобальтом виоларита несколько больше, чем обычного, хотя это различие и незначительно (табл. 3).

В полированных шлифах виоларит с низким содержанием кобальта быстро тускнеет и покрывается буровой пленкой. За это же время и даже в течение более длительного срока (например, через 7 месяцев) кобальтовый виоларит совершенно не изменяется. Очевидно, вхождение кобальта в виоларит повышает его сопротивляемость коррозии. Этому же в данном случае, видимо, способствуют меньшая пористость и отсутствие трещиноватости в кобальтовом виоларите, которые так характерны для обычного виоларита и несомненно благоприятствуют быстрому окислению последнего.

Особенности морфологии выделенных в месторождении Шануч двух типов виоларита: более раннего виоларита I и более позднего виоларита II, сходны с отмеченными предыдущими исследователями [12, 1, 2, 5] для гипогенного и гипергенного виоларита соответственно. В пользу гипогенного характера виоларита I дополнительно может свидетельствовать установленное в нем повышенное содержание кобальта, вообще характерное, как отмечалось выше, для гипогенного виоларита. Присутствие кобальта именно в гипогенном виоларите представляется вполне естественным, так как относительно высокие температуры образования гипогенного виоларита, установленные экспериментально, несомненно благоприятствуют изоморфному вхождению кобальта в решетку виоларита. На гипергенный характер виоларита II указывает тесная связь виоларитизации и лимонитизации руд, а также усиление процесса виоларитизации с уменьшением глубины залегания руд.

Сравнительное изучение состава и свойств обычного и богатого кобальтом виоларита (содержание кобальта соответственно 0,56 и 9,04 вес.%) показало, что вхождение кобальта в решетку виоларита увеличивает его отражательную способность (в среднем на 5—6%) и микротвердость (в среднем на 38 кгс/мм²), повышает устойчивость минерала к окислению. Межплоскостные расстояния и соответственно параметр a_0 кобальтового виоларита уменьшаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nickel E. H., Ross J. R., Thornber M. R.* The supergene alteration of pyrrhotite-pentlandite ore at Kambalda, Western Australia.—*Econ. Geol.*, 1974, v. 69, N 1.
2. *Misra K. C., Fleet M. E.* Chemical composition and stability of violarite.—*Econ. Geol.*, 1974, 69, N 3.
3. *Speer J. A., Martin E. C.* Pennsylvania minerals. Violarite from the Gap nickel mine.—*Mineral. Rec.*, 1974, 5, N 5.
4. *Arnold R. G., Malik O. P.* Violarite in some nickel ores from Lynn Lake and Thompson, Manitoba, and Sudbury, Ontario, Canada.—*Canad. Mineralogist*, 1974, 12, N 5.
5. *Hudson D. R., Groves D. I.* The composition of violarite coexisting with vaesite, pyrite, and millerite.—*Econ. Geol.*, 1974, 69, N 8.
6. *Graig J. R., Higgins J. B.* Cobalt- and iron-rich violarites from Virginia.—*Amer. Mineralogist*, 1975, 60, N 1—2.
7. *Кругов Г. А.*—Месторождения кобальта. Госгеолтехиздат, 1959.
8. *Minčeva-Stefanova J., Kostov I.* On siegenite and the «miscibility» between linnaeite and polydymite.—*Bulg. Acad. Sci. Geochem., Mineral., Petrol.*, 1976, 4, Sofia.
9. *Michener C. E., Yates A. B.* Oxidation of primary nickel sulphides.—*Econ. Geol.*, 1944, 39.
10. *Graig J. R.* Violarite stability relations.—*Amer. Mineralogist*, 1971, 56.
11. *Graig J. R.* Pyrite—pentlandite and other low temperature assemblages in the Fe—Ni—S system.—*Amer. J. Sci.*, 1973, 273 A.
12. *Nickel E. H.* Violarite—a key mineral in the supergene alteration of nickel sulfide ores.—*Australas. Inst. Mining Metallurgy Conf., Ser. N 2, Papers, Western Australia*, 1973.
13. *Кутюхин П. Н.* Минералогия Урала, т. 2. Изд-во АН СССР, 1941.
14. *Генкин А. Д.* О виоларите из медно-никелевых месторождений.—*Изв. АН СССР, сер. геологич.*, 1950, № 2.
15. *Martin P., Poole D.*—*Metals and Materials*, 1973, 5, N 3.
16. *Duncumb P., Shielde P. K.* The electron microprobe analysis. N. Y., 1966.
17. *Duncumb P., Reed S. J. B.* Quantitative electron probe microanalysis.—*U. S. Dept. Commerce N. B. S.*, 1968.
18. *Reed S. J. B.* Characteristic fluorescence corrections in electronprobe microanalysis.—*Brit. J. Appl. Phys.*, 1965, 16.
19. *Berry L. G., Thompson R. M.* X-ray powder data for ore minerals.—*Geol. Soc. America*, 1962, 85.