УДК 549.322+553.411(471.5)

Э. М. Спиридонов, Ф. М. Спиридонов, Ю. К. Кабалов, Н. Н. Коротаева, Е. В. Соколова

ЗЛАТОГОРИТ $CuNiSb_2$ — НОВЫЙ МИНЕРАЛ[1] ЛИСТВЕНИТИЗИРОВАННЫХ РОДИНГИТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТАЯ ГОРА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Новый минерал установлен в рудах месторождения Золотая Гора, расположенного на окраине г. Карабаш в восточном борту Соймоновской долины (Средний Урал). Месторождение известно обилием медистого золота в рудах [3—6, 8]. Рудные тела месторождения контролируются дайкообразными телами апогабброидных (аподолеритовых) родингитов в довольно крупном альпинотипном дунит-гарцбургитовом массиве [1]. Гипербазитовый массив с запада граничит с мощной толщей вулканитов девона, с востока — с метаморфическими толщами раннего докембрия. Альпинотипные гипербазиты и колчеданоносные вулканиты метаморфизованы в условиях пренит-пумпеллиитовой и пумпеллиит-актинолитовой фаций. Гипербазиты в значительной степени превращены в зеленые лизардитовые серпентиниты и содержат брусит, хроммагнетит, тонкодисперсные графит, когенит, феррит [9]. Дайки титанистых габброидов (долеритов) среди гипербазитов превращены в родингиты (хлограпиты) (хлорит-пеннин, Cr-пикнохлорит, грандитовые гранаты, салит, Ti-, Cr—Ti- и Ti—V—Cr-гидроандрадит, Cl-апатит, вермикулит...) с вкрапленностью самородной меди. Эти образования пересечены мелкими интрузивными телами и дайками гранитоидов (кварцевые диориты, плагиограниты, гранодиориты, микродиориты, кварцевые габбро-диорит-порфириты...), с которыми связаны ореолы ороговикования, зоны «черных» магнитных серпентинитов с просечками хризотиласбеста и, вероятно, сопряженные с ними серии жил и прожилков белого диопсида, магнетита, сфена среди родингитов и метавулканитов, а также более молодые зоны лиственитизации.

Р. О. Берзон считает [1, 5], что месторождение Золотая Гора является представителем золото-родингитовой формации. Наши исследования показали, что родингиты и окружающие серпентиниты Золотой Горы золотоносны там, где они лиственитизированы [7]. Процессы лиственитизации —среднетемпературного углекислого метасоматоза — захватили базиты и гипербазиты, что обусловило сочетание Fe—Cu и Ni—Co в гидротермальных рудных образованиях. На участке месторождения наиболее интенсивно лиственитизированы родингиты и прилегающие к ним серпентиниты, которые хлоритизированы, карбонатизированы, отальковано, превращены в хлорит-карбонатные и магнетит-карбонатные метасоматиты. Лиственитизированные породы содержат новообразованные хлориты (пеннин, диабантит, пикнохлорит), тальк, магнезит, доломит, магнетит, Co-магнетит, ильменит, кварц, прожилки карбонатного, хлорит-кварц-карбонатного состава, редкую вкрапленность и микропрожилки гипогенных халькозина и самородной меди, брейтгауптита, герсдорфита, орселита, маухерита, минералов группы медистого золота (в родингитах) или золота (в метагипербазитах), ртутистых электрума и кюстелита, галенита [3—8].

---

[1] Минерал (№ 94—014) и его название утверждены Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации 30 июня 1994 г.

Основная масса арсенидов находится в лиственитизированных гипербазитах околорудных ореолов, основная масса антимонидов — в лиственитизированных родингитах золоторудных тел, а основная масса халькозина и медистого золота — в прожилках и гнездах кальцита (кварца и кальцита) и в их зальбандах среди лиственитизированных родингитов. По параметрам T (280—140°C, главным образом 245—155°), солености растворов (3—8 мас.%-экв. NaCl) [7], величинам Au/Ag = (3—10)/1 Золотая Гора — плутоногенное месторождение. Его рудные тела — крутопадающие линейные штокверки.

В отвалах одной из штолен на восточном склоне р. Карабаш (Золотая Гора) в лиственитизированных родингитах с тонкими прожилками и гнездами крупнокристаллического кальцита мы обнаружили гнездо самородной сурьмы с размерами 3×2 см. Сурьма самородная содержит массу мелких включений нисбита $NiSb_2$, купростибита Cu_2Sb, златогорита, ульманнита NiSbS, меньше — сейняйокита $FeSb_2$, гудмундита FeSbS [7].

Рис. 1. Срастание нисбита (*н*), златогорита (*з*) и купростибита (*к*) с галенитом (светло-серый) и свинцом самородным (темно-серый) в матрице самородной сурьмы. Ширина поля зрения 400 мкм

Златогорит слагает в самородной сурьме мелкие короткопризматические и округлые кристаллы размерами от 0,1 до 300 мкм, обычно 10—80 мкм, изредка отмечены мономинеральные срастания с поперечником до 2 мм. Кристаллы удлинены по оси *c*. Часто наблюдаются срастания златогорита с купростибитом и нисбитом (рис. 1—3), с которыми обычно ассоциируют мелкие выделения галенита и само-

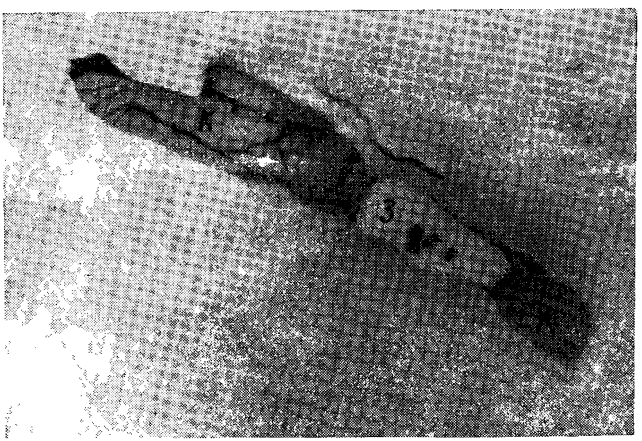

Рис. 2. Сросток кристаллов златогорита (*з*) и купростибита (*к*) в сурьме. Ширина поля зрения 150 мкм

родного свинца. Между златогоритом и купростибитом в их срастаниях развиты индукционные поверхности совместного роста. В ряде случаев кристаллы нисбита с оторочками сейняйокита или без них окружены полными или прерывистыми каймами ульманнита и/или златогорита. С внешней стороны таких срастаний нередко расположены мелкие длиннопризматические кристаллы купростибита. Реже наблюдаются сложнозональные кристаллы — срастания нисбита и златогорита (рис. 4).

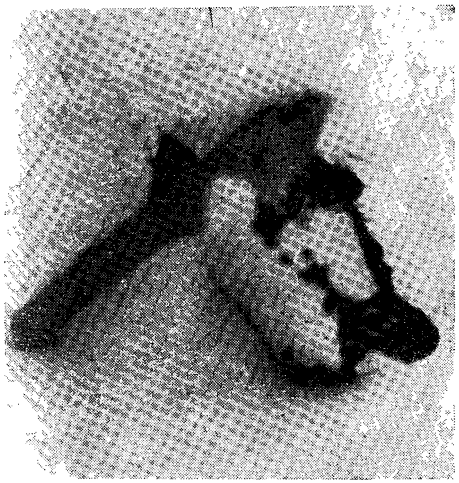

Рис. 3. Срастание златогорита (светлый рельефный) и купростибита (серый рельефный) со свинцом с мелкими вростками галенита, матрица — самородная сурьма. Ширина поля зрения 500 мкм

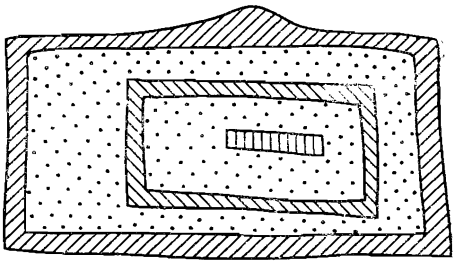

Рис. 4. Зональный кристалл — срастание нисбита (точки) и златогорита (штриховка). Длина кристалла 170 мкм

Цвет минерала серебристо-белый, блеск яркий металлический, цвет черты светлый серебристо-серый. Измерения физических свойств минерала проводились на незональных кристаллах. Твердость 4—4,5 по шкале Мооса. VHN_{50}= 195—340, в среднем 283 кг/мм^2 (n=56), конкретные значения твердости (в скобках — число анализов): 190—210 (5), 210—230 (6), 230—250 (2), 250—270 (5), 270—290 (6), 290—310 (10), 310—330 (10), 330—350 (7), 350—370 (5) (аналитик Н. Ф. Соколова). В более крупных зернах наблюдается отдельность по (001). Плотность минерала, определенная методом гидростатического взвешивания, 8,21 (6) г/см^3 (n=7) (аналитик В. Ф. Недобой). Полируется хорошо.

Златогорит — высокоотражающий минерал, в отраженном свете белый с желтоватым оттенком. На фоне самородной сурьмы выглядит отчетливо желтым и сходным с пиритом, на фоне нисбита — розово-желтым. В агрегатах разноориентированных зерен заметно слабое двуотражение. Отчетливо анизотропен. Оптически одноосный, отрицательный. Отражение в воздухе, по данным измерения 6 образцов, $R_{max}=R_0$ и $R_{min}=R_e$ (%): 59,3 и 52,4 (470 нм); 63,0 и 56,8 (546 нм); 65,5 и 60,9 (589 нм); 68,6 и 64,9 (650 нм). Спектры отражения златогорита (табл. 1) индивидуальны, отличны от других антимонидов Cu и Ni (рис. 5), несколько напоминают самородный висмут. Для кривой от-

Спектры отражения златогорита в воздухе

λ, нм	$R_1=R_0$	$R_2=R_e$	ΔR, %	λ, нм	$R_1=R_0$	$R_2=R_e$	ΔR, %
400	56,4	53,2	5,7	560	63,8	58,2	8,8
420	57,4	53,4	7,0	580	64,9	60,1	7,4
440	58,2	53,0	8,9	589	65,5	60,9	7,0
460	58,8	52,7	10,4	600	66,1	61,9	6,4
470	59,3	52,4	11,6	620	67,0	63,3	5,5
480	59,6	52,5	11,9	640	68,1	64,5	5,3
500	60,5	53,0	12,4	650	68,6	64,9	5,4
520	61,6	54,3	11,9	660	69,1	65,4	5,4
540	62,5	56,0	10,4	680	70,0	66,1	5,6
546	63,0	56,8	9,8	700	70,8	66,8	5,6

Примечание. Микроскоп-фотометр 03 фирмы Leitz—Opton, диаметр зонда 10—20 мкм, эталон WTIC, аттестованный в НФЛ (Англия). Аналитик В. К. Петров.

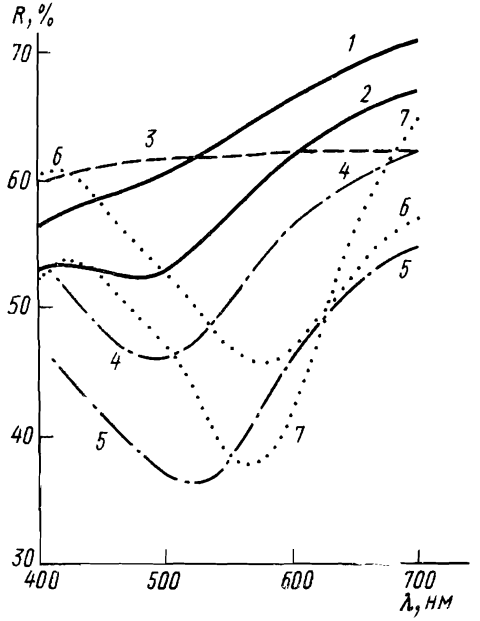

Рис. 5. Спектры отражения: *1* (R_0), *2* (R_e) — златогорита; *3* — нисбита; *4* (R_1), *5* (R_2) — брейтгауптита; *6* (R_1), *7* (R_2) — купростибита. Спектры отражения *3*—*7*, по [8]

ражения R_e златогорита характерен прогиб в зеленой области.

Химический состав минерала определен с помощью электронных микрозондов Camebax (аналитик Э. М. Спиридонов) и Camscan (аналитик Н. Н. Коротаева); в качестве эталонов использованы синтетические Cu_2Sb (Cu, Sb), $CuNiSb_2$ (Cu, Ni), чистые металлы Ni и Sb, химически анализированные кобальтин (Co, As) и халькопирит (Fe). Состав златогорита приведен в табл. 2 и 3. Средний химический состав златогорита в мас.% (n=24) (в скобках — колебания состава): Cu 17,31 (14,50—18,94); Ni 16,02 (13,79—17,96); Co 0,18 (следы — 0,62); Fe 0,23 (следы — 2,57); Sb 65,22 (62,11—65,75); As 0,84 (0,24—3,82); Bi и S — следы; сумма 99,80%; Au, Ag, Te Se, Mn не обнаружены. Эмпирическая формула в расчете на 4 атома:

$$Cu_{0,991}(Ni_{0,993}Co_{0,011}Fe_{0,015})_{\Sigma 1,019} \times$$
$$\times (Sb_{1,949}As_{0,041})_{\Sigma 1,990}.$$

Эмпирическая формула златогорита с учетом его плотности и объема элементарной ячейки:

$$Cu_{0,984}(Ni_{0,986}Co_{0,011}Fe_{0,015})_{\Sigma 1,012}(Sb_{1,935}As_{0,041})_{\Sigma 1,976}.$$

Вариации состава златогорита в целом:

$$Cu_{0,99}{}^{+0,10}_{-0,13}Ni_{0,99}{}^{+0,12}_{-0,12}Co_{0,01}{}^{+0,03}_{-0,01}Fe_{0,02}{}^{+0,14}_{-0,02}Sb_{1,95}{}^{+0,03}_{-0,16}As_{0,04}{}^{+0,14}_{-0,02}.$$

Таблица 2

Химический состав (мас. %) незональных кристаллов златогорита

Компоненты	1	2	2′	3	3′	4	4′	5
Cu	16,99	17,31	17,45	17,20	17,12	17,48	17,38	17,83
Ni	16,68	16,02	15,79	16,15	16,05	15,79	15,71	15,41
Co	0,15	0,18	0,19	0,20	0,23	0,18	0,19	0,05
Fe	0,27	0,23	0,21	0,23	0,20	0,22	0,21	0,08
Sb	64,81	65,22	65,28	66,02	65,30	65,79	65,58	64,87
As	1,25	0,84	0,68	0,70	0,74	0,70	0,68	1,00
Bi	0,10	сл.	—	0,02	—	0,02	—	0,17
S	0,08	сл.	—	сл,	—	сл.	—	0,02
Σ	100,33	99,80	99,60	100,52	99,64	100,18	99,75	99,43
Формульные единицы в расчете на 4 атома								
Cu	0,963	0,991	1,002	0,980	0,982	1,000	0,998	1,027
Ni	1,023	0,993	0,982	0,996	0,998	0,977	0,977	0,961
Co	0,009	0,011	0,012	0,012	0,014	0,011	0,012	0,003
Fe	0,017	0,015	0,014	0,015	0,013	0,014	0,014	0,005
Σ	2,012	2,010	2,010	2,003	2,007	2,002	2,001	1,996
Sb	1,917	1,949	1,957	1,963	1,957	1,964	1,966	1,950
As	0,060	0,041	0,033	0,034	0,036	0,034	0,033	0,049
Bi	0,002	—	—	—	—	—	—	0,003
S	0,009	—	—	—	—	—	—	0,002
Σ	1,988	1,990	1,990	1,997	1,993	1,998	1,999	2,004

Примечание. 1—5 — микрозонд Camebax; 2′, 3′, 4′ — микрозонд Camscan.

Таблица 3

Химический состав (мас. %) зональных кристаллов златогорита

Компоненты	6ц	6п	6в	7п	7в	8в	9п	9в
Cu	17,97	17,87	14,91	16,71	14,50	15,55	15,80	16,02
Ni	16,33	16,60	17,96	17,01	17,35	16,15	16,60	16,85
Co	0,05	0,02	0,09	0,40	0,32	0,47	0,15	0,47
Fe	0,07	0,11	0,33	0,32	0,37	2,57	0,42	0,38
Sb	64,99	65,14	64,45	65,11	64,80	62,11	65,21	62,28
As	0,95	0,87	1,04	1,17	1,40	3,82	1,34	3,30
Bi	0,12	—	—	сл.	сл.	—	—	—
S	0,09	0,08	0,00	0,00	0,00	0,13	0,15	0,05
Σ	100,57	100,69	98,78	100,72	99,74	100,80	99,67	99,35
Формульные единицы в расчете на 4 атома								
Cu	1,016	1,009	0,860	0,943	0,840	0,860	0,906	0,908
Ni	1,000	1,014	1,121	1,039	1,088	0,966	1,028	1,033
Co	0,003	0,001	0,005	0,024	0,020	0,028	0,009	0,029
Fe	0,005	0,007	0,022	0,020	0,024	0,162	0,027	0,024
Σ	2,024	2,031	2,008	2,026	1,972	2,016	1,970	1,994
Sb	1,918	1,918	1,941	1,918	1,959	1,791	1,948	1,842
As	0,046	0,042	0,051	0,056	0,069	0,179	0,065	0,158
Bi	0,002	—	—	—	—	—	—	—
S	0,010	0,009	—	—	—	0,014	0,017	0,006
Σ	1,976	1,969	1,992	1,974	2,028	1,984	2,030	2,006

Примечания. Микрозонд Camebax. Зоны кристаллов: ц — центральная, п — промежуточная, в — внешняя.

Величина (Cu+Ni+Co+Fe) : (Sb+As) = 0,97÷1,03, чаще (0,98÷1,02). Величина Cu : Ni = 0,77—1,22, обычно 0,87÷1,08, чаще 0,92÷1,04.

Итак, формула златогорита $CuNiSb_2$, теоретический состав Cu 17,37; Ni 16,05; Sb 66,58 (% мас.). В зональных кристаллах златогорита их ядерные части обогащены Cu, а внешние части — Ni и нередко также As и Fe (табл. 3).

Попытки выполнить монокристальную съемку были безуспешны. Кристаллическая структура минерала расшифрована методом Ритвельда по рентгенограмме порошка (168 рефлексов; программа DBWS—9006 PC REL 8.4.91); заключительные R-факторы: R_P=0,050, R_W=0,069, R_B=—, R_F=0,035, S=1,77 (аналитики Е. В. Соколова и Ю. К. Кабалов) [2]. В структуре минерала (рис. 6) атомы Sb расположены по закону искаженной двухслойной гексагональной плотнейшей упаковки: расстояния Sb—Sb в слое 4,051, между слоями 3,323 Å. В октаэдрических пустотах упаковки послойно расположены атомы Cu и Ni: *d* (Cu—Sb)=2,720, *d* (Ni—Sb)=2,620Å. Октаэдры $CuSb_6$ и $NiSb_6$ соединены через общие грани в колонки вдоль оси *c*, образуя связи металл—металл: *d*(Cu—Ni) = =2,5691 Å. Полученные данные позволяют отнести минерал к структурному типу NiAs. Упорядоченное послойное расположение атомов Cu и Ni в пустотах плотнейшей упаковки обусловило понижение симметрии от гексагональной (NiAs пр. гр. $P\ 63/mmc$) до тригональной ($CuNiSb_2$, пр. гр. $P\ \bar{3}m1$).

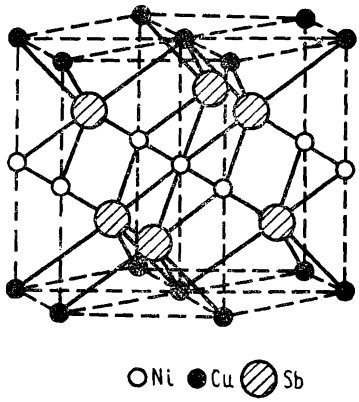

Рис. 6. Кристаллическая структура златогорита

Рентгенограмма порошка златогорита приведена в табл. 4. Сильнейшие отражения (Å): 2,901 (100) (101); 2,074 (65) (102); 2,026 (51) (110). Параметры элементарной ячейки: a_0=4,0489 (2), c_0=5,1358 (3) Å; V=72,91 Å^3, Z=1. Рентгеновская плотность 8,269 г/см^3. По рентгенограмме златогорит надежно отличается от других антимонидов Cu и Ni (рис. 7).

Итак, в рудах своеобразного плутоногенного гидротермального месторождения Золотая Гора — лиственитизированных родингитах (в окружении лиственитизированных гипербазитов) — установлен новый антимонид — златогорит $CuNiSb_2$, отличающийся от брейтгауптита NiSb составом и упорядоченным расположением атомов Ni и Cu. В составе златогорита сфокусированы геохимические особенности месторождения: обилие базитовой меди и гипербазитового никеля, очень низкая активность серы, дифференциация мышьяка (в околорудных породах) и сурьмы (в золоторудных телах).

Термобарогеохимическое изучение кальцита и окружающих кальцитовые прожилки минералов [7], а также ассоциации рудных минералов месторождения Золотая Гора в сравнении с данными [10—12] свидетельствуют о том, что златогорит образовался из углекислых гидротерм низкой солености при $T \approx 280$—240°C и крайне низкой фугитивности серы $\log f\ S_2 \approx -20$.

В Канаде, в оруденелых апогипербазитовых лиственитах, установлен минерал, сходный со златогоритом по сочетанию химических элементов — лапиит $CuNiSbS_3$ [13]. Лапиит ассоциирует с Ni-пиритом, тетраэдритом, полидимитом, халькопиритом, но не с купростибитом,

Таблица 4

Рентгенограмма златогорита

I	$d_{изм}$, Å	$d_{расч}$, Å	hkl
2	$5,13_6$	5,136	001
100	2,901	2,896	101
10	2,572	2,568	002
65	2,074	2,072	102
51	2,026	2,024	110
1	1,713	1,712	003
11	1,660	1,659	201
2	1,587	1,589	112
8	1,539	1,538	103
8	1,449	1,448	202
10	1,284	1,284, 1,283	004, 211
2	1,225	1,225	203
1	1,206	1,2055	104
5	1,1782	1,1777	212
3	1,1688	1,1688	300
3	1,0846	1,0843	114
1	1,0641	1,0638	302
2	1,0477	1,0480	213
1	1,0277	1,0272	005
1	0,8315	$0,8315_5$	106
1	0,8294	0,8296	402
2	0,8118	$0,8118_5$	215
2	0,7948	0,7949, 0,7947	224, 321

$a_0 = 4,0489 \pm 0,0002$ Å; $c_0 = 5,1358 \pm 0,0003$ Å;

Примечание. Дифрактометр АДП-2, Cu-антикатод, Ni-фильтр, внутренний эталон — кварц.

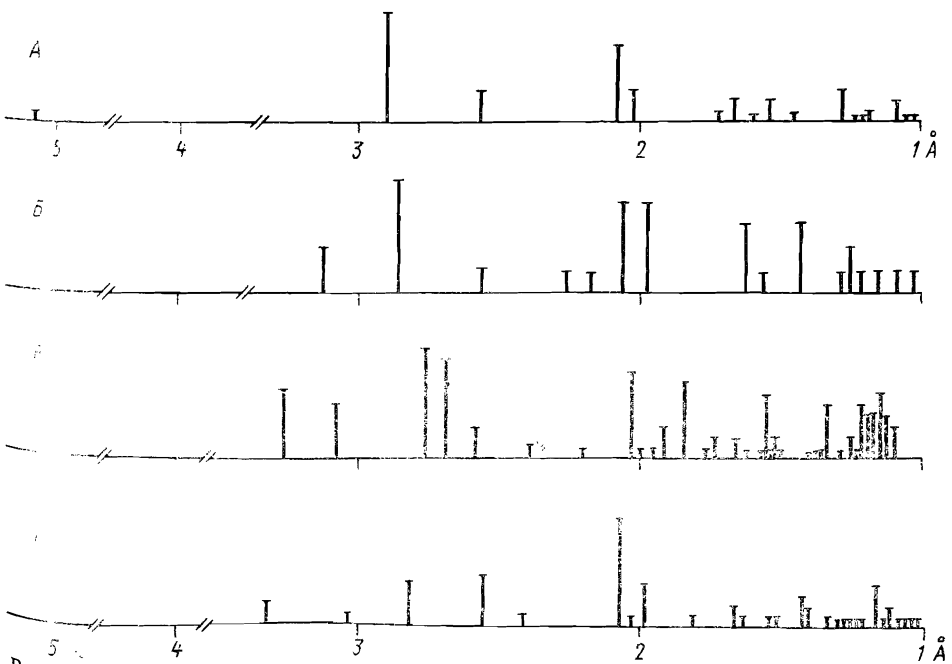

Рис. 7. Рентгенограммы (штрих-диаграммы) антимонидов Cu и Ni: *А* — златогорита, *Б* — брейтгауптита, *В* — нисбита, *Г* — купростибита

нисбитом, самородными сурьмой и медью, как златогорит, т. е. лапиит возник при существенно более высокой фугитивности серы.

Златогорит назван по наименованию месторождения. Типичный образец находится в Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана (Москва).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код 93—05—14594).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берзон Р. О. Месторождение Золотая Гора//Геология месторождений золота СССР. Т. 1. М.: Недра, 1985. С. 101—107.

2. Кабалов Ю. К., Соколова Е. В., Спиридонов Э. М. и др. Кристаллическая структура нового минерала $CuNiSb_2$//Докл. РАН. 1994. Т. 335. № 6. С. 709—711.

3. Ложечкин М. П. Карабашское месторождение медистого золота//Тр. Урал. фил. АН СССР. Свердловск, 1935. Вып. 4. С. 35—44.

4. Минералогия Урала. М.: Изд-во АН СССР, 1941. Т. 2.

5. Мурзин В. В., Кудрявцев В. И., Берзон Р. О. и др. Медистое золото в зонах родингитизации//Геол. рудных месторождений. 1987. Т. 29. № 5. С. 96—99.

6. Покровский П. В., Мурзин В. В., Берзон Р. О. К минералогии самородного золота месторождения Золотая Гора//Зап. ВМО. 1979. Ч. 109. Вып. 3. С. 317—326.

7. Спиридонов Э. М., Прокофьев В. Ю., Петров В. Л. и др. Сейняйокит, нисбит, купростибит, орселит, маухерит, ульманнит и сурьма месторождения Золотая Гора (Средний Урал) и условия их образования//Зап. ВМО. 1994. Ч. 123. Вып. 3. С. 65—77.

8. Чвилева Т. Н., Безсмертная М. С., Спиридонов Э. М. и др. Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М.: Недра, 1988.

9. Штейнберг Д. С., Чашухин И. С. Серпентинизация ультрабазитов. М.: Наука, 1977.

10. Barton P. B. Sulfide petrology//Miner. Soc. Amer. Spec. Pap. 1970. N 3. P. 187—198.

11. Barton P. B. The Fe—Sb—S system//Econ. Geol. 1971. Vol. 66. P. 121—132.

12. Barton P. B., Skinner B. J. Sulfide mineral stabilities//Geeochemistry of hydrothermal ore deposits/Ed. H. L. Barnes. 1979. P. 238—327.

13. Harris D. C., Roberts A. C., Thorpe R. J. et al. Lapieite $CuNiSbS_3$, a new mineral species from the Yukon Territory//Canad. Mineral. 1984. Vol. 22. Pt. 4. P. 561—564.

Поступила в редакцию
24.11.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 4, ГЕОЛОГИЯ. 1995. № 5

УДК 550.312

А. А. Булычев, А. Г. Гайнанов, Д. А. Гилод, Е. Л. Мазо, В. Р. Мелихов, Т. П. Федорова

МЕТОДИКА РЕДУЦИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Запуск искусственных спутников Земли расширил возможности изучения гравитационного поля Земли. При этом используется орбитальный метод, когда напряженность гравитационного поля измеряется по возмущениям орбит. Альтиметрический метод определяет высоты спутника над земной поверхностью, градиентометрический — измеряет градиенты и их изменения между двумя спутниками на одной орбите или на двух разных орбитах [5—8, 10, 14, 15]. Способ непосредственного измерения высот спутника над океаном с помощью радиоальтиметра приводит к более быстрому и точному определению высот геоида и аномалий силы тяжести [14, 15]. Известно, что $N\Delta = \Delta U/\gamma$, $\Delta U =$