

Э.М.Спирidonов

НАГИАГИТ  $AuPb_5Te_{4-x}Sb_xS_6$ ,  $x = 0-2$  (УТОЧНЕННЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ)

Нагиагит описан как серая листоватая золотая руда в 1772 г. [5]; Вернер дал минералу название *nagiakererz* (Werhner, 1789 г.), которое Хайдингер изменил до нагиагита (Haidinger, 1845 г.). Нагиагит - типоморфный минерал вулканогенных золото-теллуридных месторождений: Сэкэрэмб (Нагиаг) [3, 14, 19, 23, 29, 30, 36 и др.], Бая-де-Ареш (Оффенбанья) [3, 5, 14, 25 и др.], Крипл-Крик [25, 26, 34, 35], Калаверас [3, 25], Тавуа [21], Калгурли [4, 5, 14, 21, 28, 31 и др.], Зод и др. В некоторых месторождениях нагиагит является одним из ведущих минералов-носителей золота. Однако состав минерала однозначно не определен, чему ранее (в "домикрозондовый" период) препятствовало постоянное наличие микровростков теллуридов (алтаит, сивванит и др.), сульфидов (бурнонит, тетраэдрит и др.), самородного теллура в нагиагите.

Для нагиагита предлагались многочисленные варианты формулы:

| № п/п | Формула                              | Год  | Автор                  | Литература |
|-------|--------------------------------------|------|------------------------|------------|
| 1     | $AuPb_9Te_3SbS_{12}$                 | 1832 | Berthier               | По [17]    |
| 2     | $Au_2Pb_{11}Te_{11}S_{13}$           | 1853 | Wöhler et al.          | По [17]    |
| 3     | $(Pb, Au)(S, Te, Sb)_2$              | 1860 | C.F.Rammelsberg        | "          |
|       |                                      | 1920 | P.Niggli               | "          |
|       |                                      | 1924 | A.K.Boldirew           | "          |
|       |                                      | 1936 |                        | [7]        |
|       |                                      | 1955 | H.Schneiderhöhn        | [26]       |
| 4     | $(Pb, Au)_2(S, Te, Sb)_3$            | 1860 | C.F.Rammelsberg        | По [17]    |
|       |                                      | 1920 | E.Cahen et al.         | [18]       |
| 5     | $Au_2Pb_{14}Te_7Sb_3S_{17}$          | 1885 | L.Sipöcz               | [29]       |
|       |                                      | 1931 | H.Schneiderhöhn et al. | [27]       |
|       |                                      | 1940 | Ф.В.Чухров             | [11]       |
| 6     | $AuPb_6Te_6S_8$                      | 1897 | Přivoznik              | По [17]    |
| 7     | $Au_2Pb_{10}Te_6Sb_2S_{15}$          | 1897 | E.Schröder et al.      | [23]       |
|       |                                      | 1916 | A.J.Moses              | [22]       |
|       |                                      | 1921 | P.Groth                | По [17]    |
|       |                                      | 1926 | F.Slavik               | [30]       |
| 8     | $Au_2Pb_{14}Te_7Sb_3S_{16}$          | 1926 | F.Slavik               | [30]       |
| 9     | $(Au, Ag)_4Pb_{17}Te_{10}Sb_4S_{18}$ |      |                        |            |
| 10    | $AuPb_6(S, Te)_{14}$                 | 1935 | B.Gosner               | [20]       |
| 11    | $AuPb_6(S, Te, Sb)_{9-11}$           |      |                        |            |
| 12    | $AuTe_2 \cdot 6Pb(S, Te)$            | 1935 | B.Gosner               | [20]       |
|       |                                      | 1941 |                        | [12]       |
|       |                                      | 1957 | H.Strunz               | [33]       |
| 13    | $AuPb_7(Te, Sb)_5S_9$                | 1936 | D.Guiçcã               | [19]       |
| 14    | $AuPb_5(Te, Sb)_4S_{5-8}$            | 1944 | H.Berman et al.        | [25]       |
|       |                                      | 1956 | А.Г.Бетехтин           | [1]        |
|       |                                      | 1962 | П.Рамдор               | [14]       |
|       |                                      | 1971 | И.Костов               | [6]        |
|       |                                      | 1982 | G.Strübel              | [32]       |

| № п/п | Формула                             | Год  | Автор               | Литература |
|-------|-------------------------------------|------|---------------------|------------|
| 15    | $Au(Pb_{6,35}Sb_{1,45}Fe_{0,20})_8$ | 1946 | L.G.Berry           | [ 16 ]     |
|       | $(S_{7,75}Te_{3,25})_{11}$          | 1949 | R.M.Thompson        | [ 35 ]     |
|       | $Au(Pb, Sb, Fe)_8(S, Te)_{11}$      | 1984 |                     | [ 24 ]     |
| 16    | $AuPb_5Te_3Sb_5S_6$                 | 1966 | А.С.Поваренных      | [ 13 ]     |
|       |                                     | 1975 | Е.К.Лазаренко и др. | [ 8 ]      |
|       |                                     | 1982 | А.В.Дружинин и др.  | [ 4 ]      |
| 17    | $AuPb_7(Te, Sb)_5S_6$               | 1976 | Г.Б.Бокий и др.     | [ 2 ]      |
|       | $AuPb_7Te_3Sb_2S_6$                 | 1981 |                     | [ 9 ]      |

Разнообразие удивительное.

Формулы 3, 4, 10-12 и 15 неприемлемы, поскольку изоморфизм Au-Pb и соответственно Te-S весьма ограниченный. Первый рациональный вариант формулы нагиагита - 13 - дан Д.Джюкэ [ 19 ]: в одной позиции объединены Te и Sb, а Au, Pb и S от них обособлены. Уточненный вариант формулы Джюкэ, предложенный Г.Берманом [ 25 ], - 14 - наиболее популярен и приведен в большинстве учебников и справочных пособий. Дальнейшее уточнение той же формулы предложено А.С.Поваренных [ 13 ] - 16.

В табл. I даны составы нагиагита по литературным данным; железо и соответствующее составу пирита количество серы вычтены, поскольку микронзондовые анализы показали лишь следовые содержания Fe (табл. 2-7, [ 34 ]). Серия химических анализов нагиагита месторождения Сэкэрымб в табл. I расположена в порядке снижения содержаний Sb и роста Te; видно, что сумма Sb + Te практически постоянна. Разброс аналитических данных довольно велик, что обусловлено и наличием микровростков других минералов, и, вероятно, аналитическими погрешностями, особенно заметными для серы. Тем не менее для большей части анализов, особенно для средних составов минерала, соотношения компонентов Au : Pb : (Te+Sb) : S  $\approx$  1:5:4:6. Эти соотношения отвечают варианту формулы А.С.Поваренных. В соответствии с этим пересчет химических анализов проведен на 16 атомов.

Соотношение Te : Sb обычно колеблется от 3 до 2. Кроме того, известен анализ нагиагита, обогащенного Te и не содержащего Sb, 30 (в мас.%): Au - 8,11; Pb - 51,18; Te - 29,88; Sb - нет; S - 10,83; сумма - 100,00; формула  $Au_{0,77}Pb_{4,59}Te_{4,36}S_{6,28}$ . Состав этого образца нагиагита довольно близок к теоретическому для  $AuPb_5Te_4S_6$ : Au - 10,18 мас.%, Pb - 53,51, Te - 26,37, S - 9,94 мас.%

Ниже изложены результаты изучения состава нагиагита месторождений Сэкэрымб (образцы из коллекции Горного музея), Бая-де-Ареш (колл. Горного музея), Калгурли (колл. В.И.Степанова), Манка (колл. М.М.Старовой), Зод (колл. автора). В изученных образцах из Сэкэрымба нагиагит слагает таблитчато-пластинчатые выделения размером до 12x4x2 мм и сростания с алтаитом, сальванитом, бурнонитом; в образцах из Манки - сростания с тетраэдритом; в образцах из Бая-де-Ареш - сростания с алтаитом; в образцах из Калгурли и Зода представлены мономинеральные выделения нагиагита.

Химический состав нагиагита определен с помощью электронного микронзонда Camebax; условия съемки: 25 кВ, 15 нА; эталоны - химически анализированные сальванит (для Au, Ag, Te), алтаит (Pb, Te), глдит (Bi, S), галенит (S), пирит (Fe),

Т а б л и ц а I

Химический состав (в мас.%) нагиагита по литературным данным (за вычетом пирита и нерастворимого остатка)

| Компо-<br>ненты                           | Секерымб  |          |          |          |          |          |          |          |                   | Калгурли      | Крипл-Крик | Средний состав<br>для трех место-<br>рождений (9-II) |
|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|---------------|------------|--|
|   | I* [ 36 ] | 2 [ 19 ] | 3 [ 16 ] | 4 [ 34 ] | 5 [ 29 ] | 6 [ 30 ] | 7 [ 25 ] | 8 [ 23 ] | среднее<br>из I-8 | 10 [ 28, 31 ] | 11 [ 34 ]  |  |
| Au  | 7,6I      | 7,6I     | 7,94     | 7,6      | 7,5I     | 7,4I     | 8,43     | 9,52     | 7,95              | 9,25          | 9,0        | 8,73   |
| Ag  | -         | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -                 | 0,56          | 0,17       | 0,24   |
| Pb  | 54,50     | 56,4I    | 56,00    | 57,6     | 56,8I    | 57,16    | 55,44    | 53,66    | 55,95             | 54,06         | 58,8       | 56,27  |
| Te  | 17,80     | 16,39    | 17,43    | 16,4     | 17,72    | 17,87    | 18,92    | 19,25    | 17,72             | 18,17         | 15,1       | 17,00  |
| Sb  | 8,62      | 8,16     | 7,57     | 7,4      | 7,39     | 6,99     | 6,6I     | 6,05     | 7,35              | 7,24          | 7,8        | 7,46   |
| S   | 8,03      | 11,57    | 10,20    | 10,0     | 10,29    | 9,65     | 9,0I     | 11,90    | 10,08             | 9,30          | 10,1       | 9,83   |
| Сумма                                     | 96,56     | 100,14   | 99,14    | 99,0     | 99,75    | 99,44    | 98,4I    | 100,38   | 99,05             | 98,58         | 101,0      | 99,53  |
| Формульные единицы в расчете на 16 атомов |           |          |          |          |          |          |          |          |                   |               |            |  |
| Au  | 0,8I      | 0,7I     | 0,78     | 0,76     | 0,73     | 0,74     | 0,86     | 0,88     | 0,78              | 0,93          | 0,88       | 0,87   |
| Ag  | -         | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -                 | 0,10          | 0,03       | 0,04   |
| Pb  | 5,52      | 5,02     | 5,23     | 5,44     | 5,26     | 5,44     | 5,39     | 4,72     | 5,24              | 5,19          | 5,48       | 5,30   |
| Te  | 2,93      | 2,37     | 2,64     | 2,5I     | 2,67     | 2,76     | 2,99     | 2,75     | 2,70              | 2,83          | 2,28       | 2,60   |
| Sb  | 1,49      | 1,24     | 1,20     | 1,19     | 1,17     | 1,13     | 1,09     | 0,90     | 1,17              | 1,18          | 1,24       | 1,20   |
| Сумма                                     | 4,42      | 3,6I     | 3,84     | 3,70     | 3,84     | 3,89     | 4,08     | 3,65     | 3,87              | 4,0I          | 3,52       | 3,80   |
| S   | 5,26      | 6,66     | 6,15     | 6,10     | 6,17     | 5,93     | 5,67     | 6,75     | 6,10              | 5,77          | 6,08       | 5,99   |

\* Здесь и далее - номер анализа.

П р и м е ч а н и е. Ан. 2 и 10 - среднее из двух химических анализов.

Т а б л и ц а 2

Вариации химического состава (в мас.%) нагиагита в пределах одного штуфа.  
Месторождение Сэкэрымб, обр. 101/2 (Горный музей), сростание с алтаитом

| Компо-<br>ненты                           | 1      | 2      | 3     | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|---|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Au  | 11,26  | 11,28  | 10,61 | 11,49  | 11,59  | 10,79  | 11,60  | 10,23  | 10,13  |
| Ag  | -      | -      | -     | -      | -      | 0,02   | -      | -      | -      |
| Pb  | 55,37  | 53,77  | 53,43 | 54,10  | 54,81  | 54,34  | 54,52  | 55,01  | 55,45  |
| Fe  | 0,07   | 0,06   | -     | -      | -      | 0,08   | -      | 0,08   | -      |
| Te  | 17,09  | 17,28  | 16,81 | 18,46  | 17,84  | 17,52  | 15,01  | 18,81  | 18,58  |
| Sb  | 7,98   | 8,28   | 8,33  | 8,39   | 8,22   | 8,06   | 11,67  | 8,50   | 8,25   |
| S   | 10,35  | 10,29  | 10,41 | 10,49  | 9,85   | 9,81   | 10,23  | 10,27  | 9,95   |
| Сумма                                     | 102,12 | 100,96 | 99,59 | 102,93 | 102,31 | 100,54 | 103,03 | 102,90 | 102,36 |
| Формульные единицы в расчете на 16 атомов |        |        |       |        |        |        |        |        |        |
| Au  | 1,08   | 1,09   | 1,03  | 1,08   | 1,12   | 1,06   | 1,10   | 0,97   | 0,98   |
| Pb  | 5,04   | 4,93   | 4,93  | 4,86   | 5,05   | 5,07   | 4,93   | 4,96   | 5,08   |
| Fe  | 0,02   | 0,02   | -     | -      | -      | 0,03   | -      | 0,03   | -      |
| Te  | 2,53   | 2,57   | 2,52  | 2,69   | 2,67   | 2,65   | 2,20   | 2,75   | 2,76   |
| Sb  | 1,24   | 1,29   | 1,31  | 1,28   | 1,29   | 1,28   | 1,80   | 1,31   | 1,29   |
| Сумма                                     | 3,77   | 3,86   | 3,83  | 3,97   | 3,96   | 3,93   | 4,00   | 4,06   | 4,05   |
| S   | 6,09   | 6,10   | 6,21  | 6,09   | 5,87   | 5,91   | 5,97   | 5,98   | 5,89   |

Примечание. Hg, Pd, Sn, Cu, Se, Be, In не обнаружены. Содержания от следов (чаще) до Cd 0,07; Zn 0,04; Bi 0,21; Pt 0,05 мас.%.  
14

Т а б л и ц а 3

Вариации химического состава (в мас.%) нагиагита в пределах одного штуфа.  
Месторождение Бая-де-Ареш, обр. 83м (Горный музей), сростание с алтаитом

| Компо-<br>ненты | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7     | 8      | 9      | 10     |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Au              | 10,80  | 10,38  | 10,61  | 10,42  | 10,30  | 10,71  | 10,31 | 11,12  | 11,09  | 11,03  |
| Ag              | -      | -      | -      | 0,02   | Сл.    | 0,03   | -     | 0,01   | -      | 0,01   |
| Pb              | 54,56  | 54,08  | 55,17  | 52,64  | 53,80  | 54,84  | 53,42 | 52,61  | 54,13  | 54,55  |
| Cd              | 0,14   | -      | -      | -      | 0,11   | -      | -     | -      | 0,12   | 0,14   |
| Zn              | 0,04   | -      | -      | -      | 0,08   | -      | -     | -      | Сл.    | 0,00   |
| Mn              | 0,04   | -      | -      | -      | 0,01   | -      | -     | -      | 0,24   | 0,02   |
| Fe              | 0,02   | 0,03   | 0,04   | 0,03   | 0,05   | Сл.    | 0,06  | 0,07   | 0,03   | 0,04   |
| Te              | 18,93  | 18,07  | 18,54  | 19,36  | 19,27  | 19,76  | 18,96 | 19,26  | 18,12  | 18,53  |
| Sb              | 8,15   | 7,84   | 7,76   | 8,29   | 7,73   | 7,43   | 7,33  | 8,03   | 7,86   | 7,83   |
| As              | 0,16   | 0,10   | 0,08   | 0,16   | 0,17   | 0,14   | 0,16  | 0,14   | 0,17   | 0,16   |
| S               | 10,17  | 9,92   | 10,12  | 9,76   | 9,58   | 10,09  | 9,72  | 9,78   | 10,23  | 10,11  |
| Se              | 0,05   | 0,03   | 0,07   | 0,07   | 0,07   | 0,05   | 0,03  | 0,02   | 0,05   | 0,05   |
| Сумма           | 103,06 | 100,45 | 102,39 | 100,75 | 101,17 | 103,05 | 99,98 | 101,04 | 102,04 | 102,47 |

Таблица 3 (окончание)

| Компо-<br>ненты                           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Формульные единицы в расчете на 16 атомов |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Au  | 1,02 | 1,01 | 1,02 | 1,02 | 1,01 | 1,02 | 1,01 | 1,09 | 1,06 | 1,06 |
| Ag  | -    | -    | -    | -    | -    | 0,01 | -    | -    | -    | -    |
| Pb  | 4,92 | 5,02 | 5,03 | 4,92 | 5,00 | 4,97 | 4,97 | 4,88 | 4,91 | 4,95 |
| Cd  | 0,02 | -    | -    | -    | 0,02 | -    | -    | -    | 0,02 | 0,02 |
| Zn  | 0,01 | -    | -    | -    | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    |
| Mn  | 0,01 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,08 | 0,01 |
| Fe  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | -    | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| Сумма                                     | 4,97 | 5,03 | 5,04 | 4,93 | 5,06 | 4,97 | 4,99 | 4,90 | 5,02 | 4,99 |
| Te  | 2,77 | 2,73 | 2,74 | 2,91 | 2,91 | 2,90 | 2,86 | 2,90 | 2,67 | 2,73 |
| Sb  | 1,25 | 1,24 | 1,20 | 1,30 | 1,22 | 1,14 | 1,24 | 1,21 | 1,21 | 1,23 |
| As  | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Сумма                                     | 4,06 | 3,99 | 3,96 | 4,25 | 4,17 | 4,08 | 4,14 | 4,15 | 3,92 | 4,00 |
| S   | 5,94 | 5,96 | 5,96 | 5,83 | 5,75 | 5,91 | 5,84 | 5,87 | 5,99 | 5,94 |
| Se  | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

П р и м е ч а н и е. Cu, Sn, Mo, Ge, In не обнаружены; As определено количественным спектральным анализом.

Т а б л и ц а 4

Химический состав (в мас.%) нагиагита в сростаниях с алтаитом, бурнонитом, сильванитом

| Компо-<br>ненты | Сэкэрымб, обр. 82м |        |        |        | Бая-де-Арьеш, обр. 83м' |        |        |
|-----------------|--------------------|--------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
|                 | 1                  | 2      | 3      | 4      | 5                       | 6      | 7      |
| Au              | 10,45              | 10,73  | 10,28  | 10,21  | 11,32                   | 10,40  | 11,29  |
| Ag              | -                  | -      | -      | -      | -                       | -      | -      |
| Pb              | 54,06              | 53,58  | 55,47  | 55,18  | 52,86                   | 53,83  | 53,49  |
| Cd              | Сл.                | 0,03   | 0,03   | 0,05   | 0,07                    | -      | 0,06   |
| Zn              | -                  | -      | -      | -      | 0,03                    | -      | -      |
| Mn              | -                  | -      | -      | -      | 0,04                    | -      | 0,05   |
| Fe              | 0,01               | 0,01   | -      | 0,01   | -                       | -      | -      |
| Te              | 17,85              | 17,99  | 18,00  | 18,31  | 19,43                   | 18,94  | 18,72  |
| Sb              | 8,29               | 8,20   | 8,13   | 8,42   | 7,88                    | 7,80   | 7,65   |
| S               | 10,71              | 10,96  | 10,80  | 10,72  | 10,32                   | 10,79  | 10,20  |
| Se              | -                  | -      | -      | -      | 0,11                    | -      | -      |
| Сумма           | 101,37             | 101,50 | 102,71 | 102,90 | 102,06                  | 101,76 | 101,96 |

Таблица 4 (окончание)

| Компо-<br>ненты                           | Сэкэрымб, обр. 82м |      |      |      | Бая-де-Ареш, обр. 83м' |      |      |
|---|--------------------|------|------|------|------------------------|------|------|
|   | 1                  | 2    | 3    | 4    | 5                      | 6    | 7    |
| Формульные единицы в расчете на 16 атомов |                    |      |      |      |                        |      |      |
| Au  | 0,99               | 1,01 | 0,97 | 0,96 | 1,08                   | 0,98 | 1,08 |
| Pb  | 4,89               | 4,79 | 4,95 | 4,92 | 4,78                   | 4,82 | 4,89 |
| Cd  | -                  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01                   | -    | 0,01 |
| Zn  | -                  | -    | -    | -    | 0,01                   | -    | -    |
| Mn  | -                  | -    | -    | -    | 0,01                   | -    | 0,02 |
| Сумма                                     | 4,89               | 4,80 | 4,96 | 4,93 | 4,81                   | 4,82 | 4,92 |
| Te  | 2,61               | 2,61 | 2,61 | 2,65 | 2,85                   | 2,76 | 2,78 |
| Sb  | 1,27               | 1,25 | 1,24 | 1,28 | 1,21                   | 1,19 | 1,19 |
| Сумма                                     | 3,88               | 3,86 | 3,85 | 3,93 | 4,06                   | 3,95 | 3,97 |
| S   | 6,24               | 6,33 | 6,23 | 6,18 | 6,03                   | 6,25 | 6,03 |
| Se  | -                  | -    | -    | -    | 0,03                   | -    | -    |

П р и м е ч а н и е. Cu, Hg, Bi не обнаружены.

Т а б л и ц а 5

Химический состав (в мас.%) нагиагита месторождения Зод

| Компо-<br>ненты                           | Обр. А |       |       |       |       | Обр. Б |       |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|   | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6      | 7     |
| Au  | 12,20  | 10,68 | 8,78  | 10,69 | 12,03 | 11,18  | 10,76 |
| Pb  | 54,51  | 54,85 | 55,00 | 54,00 | 52,90 | 54,42  | 53,31 |
| Cd  | 0,09   | 0,05  | 0,04  | -     | -     | -      | -     |
| Fe  | 0,03   | 0,07  | 0,07  | -     | -     | -      | -     |
| Te  | 16,05  | 16,55 | 17,92 | 17,66 | 15,86 | 17,37  | 17,94 |
| Sb  | 6,96   | 7,88  | 8,02  | 7,57  | 8,89  | 8,28   | 8,03  |
| Bi  | 0,37   | 0,41  | 0,51  | 0,40  | 0,37  | -      | -     |
| As  | 0,15   | -     | -     | -     | -     | -      | -     |
| S   | 9,24   | 9,41  | 9,60  | 9,56  | 9,73  | 9,62   | 9,88  |
| Se  | 0,05   | -     | -     | -     | -     | -      | -     |
| Сумма                                     | 99,65  | 99,90 | 99,94 | 99,88 | 99,78 | 100,87 | 99,92 |
| Формульные единицы в расчете на 16 атомов |        |       |       |       |       |        |       |
| Au  | 1,24   | 1,07  | 0,87  | 1,07  | 1,19  | 1,10   | 1,06  |
| Pb  | 5,24   | 5,23  | 5,18  | 5,11  | 4,99  | 5,10   | 4,98  |
| Cd  | 0,02   | 0,01  | 0,01  | -     | -     | -      | -     |
| Fe  | 0,01   | 0,02  | 0,02  | -     | -     | -      | -     |
| Сумма                                     | 5,27   | 5,26  | 5,21  | 5,11  | 4,99  | 5,10   | 4,98  |

Таблица 5 (окончание)

| Компо-<br>ненты | Обр. А |      |      |      |      | Обр. Б |      |
|-----------------|--------|------|------|------|------|--------|------|
|                 | 1      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6      | 7    |
| Te              | 2,51   | 2,56 | 2,74 | 2,72 | 2,43 | 2,64   | 2,72 |
| Sb              | 1,14   | 1,28 | 1,29 | 1,22 | 1,43 | 1,32   | 1,28 |
| Bi              | 0,04   | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | -      | -    |
| As              | 0,04   | -    | -    | -    | -    | -      | -    |
| Сумма           | 3,73   | 3,88 | 4,08 | 3,98 | 3,90 | 3,96   | 4,00 |
| S               | 5,75   | 5,79 | 5,84 | 5,85 | 5,93 | 5,83   | 5,96 |
| Se              | 0,01   | -    | -    | -    | -    | -      | -    |

П р и м е ч а н и е. Ag, Hg, Cu, Sn, Zn не обнаружены. As - определено количественным спектральным анализом.

Т а б л и ц а 6

Химический состав (в мас.%) нагигита месторождения Калгурли

| Компо-<br>ненты | 1     | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Au              | 10,65 | 10,53  | 10,66  | 10,89  | 9,01   | 10,39  | 11,00  | 9,60   | 11,11  | 9,59   |
| Pb              | 53,88 | 53,27  | 53,62  | 54,44  | 53,92  | 54,00  | 54,02  | 54,65  | 54,56  | 55,64  |
| Fe              | -     | -      | 0,07   | 0,08   | 0,06   | 0,07   | -      | -      | -      | -      |
| Te              | 15,14 | 17,34  | 15,65  | 17,03  | 19,29  | 17,41  | 18,41  | 17,95  | 17,46  | 17,05  |
| Sb              | 10,35 | 10,16  | 10,37  | 7,46   | 7,89   | 7,66   | 7,52   | 9,42   | 7,63   | 8,44   |
| Bi              | -     | -      | 0,60   | 0,40   | 0,42   | 0,56   | -      | -      | -      | -      |
| As              | -     | -      | -      | 0,48   | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| S               | 9,86  | 9,76   | 9,42   | 9,89   | 9,92   | 10,20  | 10,13  | 9,90   | 10,22  | 9,89   |
| Сумма           | 99,88 | 101,06 | 100,39 | 100,67 | 100,51 | 100,29 | 101,08 | 101,52 | 100,98 | 100,61 |

Формульные единицы в расчете на 16 атомов

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Au    | 1,05 | 1,03 | 1,06 | 1,06 | 0,88 | 1,01 | 1,06 | 0,93 | 1,07 | 0,94 |
| Pb    | 5,04 | 4,93 | 5,06 | 5,06 | 4,99 | 5,00 | 4,97 | 5,03 | 5,03 | 5,18 |
| Fe    | -    | -    | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | -    | -    | -    | -    |
| Te    | 2,30 | 2,60 | 2,40 | 2,57 | 2,90 | 2,61 | 2,75 | 2,67 | 2,61 | 2,58 |
| Sb    | 1,65 | 1,60 | 1,66 | 1,18 | 1,24 | 1,21 | 1,18 | 1,48 | 1,20 | 1,34 |
| Bi    | -    | -    | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | -    | -    | -    | -    |
| As    | -    | -    | -    | 0,12 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Сумма | 3,95 | 4,20 | 4,12 | 3,91 | 4,18 | 3,87 | 3,93 | 4,15 | 3,81 | 3,92 |
| S     | 5,96 | 5,84 | 5,74 | 5,94 | 5,93 | 6,10 | 6,04 | 5,89 | 6,09 | 5,96 |

П р и м е ч а н и е. Ag, Hg, Cu, Zn, Sn, Se не обнаружены. As - определено количественным спектральным анализом.

Т а б л и ц а 7

Средний химический состав (в мас.%) нагигита некоторых золото-теллуридных месторождений

| Компо-<br>ненты | Сэкэрымб       |                           | Бая-де-Ареш |             |             | Манка  | Зод    |        | Калгур-<br>ли (10) |
|-----------------|----------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|--------|--------------------|
|                 | 101/2*<br>(10) | 101/2 <sup>а</sup><br>(9) | 82м<br>(4)  | 83м<br>(10) | 83м'<br>(3) | (3)    | А (5)  | Б (2)  |                    |
| Au              | 10,42          | 11,00                     | 10,41       | 10,68       | 11,00       | 10,83  | 10,88  | 10,97  | 10,43              |
| Ag              | Сл.            | Сл.                       | -           | 0,01        | -           | -      | -      | -      | -                  |
| Tl              | 0,02           | -                         | -           | -           | -           | -      | -      | -      | -                  |
| Pb              | 54,14          | 54,53                     | 54,57       | 53,98       | 53,39       | 53,06  | 54,25  | 53,86  | 54,20              |
| Hg              | -              | -                         | -           | -           | -           | 0,08   | -      | -      | -                  |
| Cd              | 0,09           | -                         | 0,03        | 0,13        | 0,06        | 0,07   | 0,06   | -      | -                  |
| Zn              | 0,02           | -                         | -           | 0,03        | 0,02        | 0,02   | -      | -      | -                  |
| Mn              | 0,06           | -                         | -           | 0,08        | 0,04        | 0,01   | -      | -      | -                  |
| Fe              | 0,03           | 0,07                      | 0,01        | 0,04        | -           | 0,05   | 0,06   | -      | 0,07               |
| Te              | 17,49          | 17,50                     | 18,04       | 18,88       | 19,03       | 19,48  | 16,81  | 17,66  | 17,27              |
| Sb              | 8,33           | 8,68                      | 8,26        | 7,83        | 7,78        | 7,05   | 7,86   | 8,16   | 8,69               |
| Bi              | 0,43           | -                         | -           | -           | -           | 0,17   | 0,41   | -      | 0,49               |
| As              | 0,16           | -                         | -           | 0,14        | -           | -      | 0,15   | -      | 0,48               |
| S               | 10,31          | 10,24                     | 10,79       | 9,95        | 10,44       | 10,30  | 9,51   | 9,75   | 9,92               |
| Se              | 0,05           | -                         | -           | 0,05        | 0,06        | -      | 0,05   | -      | -                  |
| Сумма           | 101,55         | 102,02                    | 102,11      | 101,80      | 101,82      | 102,12 | 100,04 | 100,40 | 101,46             |

Формульные единицы в расчете на 16 атомов

|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Au    | 1,01 | 1,04 | 0,98 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1,08 | 1,08 | 1,00 |
| Pb    | 4,97 | 4,97 | 4,89 | 4,94 | 4,83 | 4,84 | 5,13 | 5,04 | 4,99 |
| Hg    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,01 | -    | -    | -    |
| Cd    | 0,02 | -    | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | -    | -    |
| Zn    | 0,01 | -    | -    | 0,01 | 0,01 | 0,01 | -    | -    | -    |
| Mn    | 0,02 | -    | -    | 0,03 | 0,01 | -    | -    | -    | -    |
| Fe    | 0,01 | 0,02 | -    | 0,01 | -    | 0,02 | 0,02 | -    | 0,02 |
| Сумма | 5,03 | 4,99 | 4,90 | 5,01 | 4,86 | 4,89 | 5,16 | 5,04 | 5,01 |
| Te    | 2,60 | 2,59 | 2,62 | 2,81 | 2,79 | 2,89 | 2,58 | 2,68 | 2,58 |
| Sb    | 1,24 | 1,35 | 1,26 | 1,22 | 1,20 | 1,09 | 1,27 | 1,30 | 1,36 |
| Bi    | 0,04 | -    | -    | -    | -    | 0,02 | 0,04 | -    | 0,04 |
| As    | 0,04 | -    | -    | 0,04 | -    | -    | 0,04 | -    | 0,12 |
| Сумма | 3,92 | 3,94 | 3,88 | 4,07 | 3,99 | 4,00 | 3,93 | 3,98 | 4,10 |
| S     | 6,02 | 6,03 | 6,24 | 5,88 | 6,10 | 6,07 | 5,82 | 5,90 | 5,89 |
| Se    | 0,01 | -    | -    | 0,01 | 0,01 | -    | 0,01 | -    | -    |

\* Номер образца в коллекции Горного музея.

Примечание. Cu, Sn, Mo, Ge, In не обнаружены. Tl, As определены количественным спектральным анализом. В скобках - число анализов.



синтетические CdSe (Cd,Se), ZnSe (Zn), Mn (Mn); аналитик - автор; составы рассчитаны по программе CORRECS. Выделения нагиагита обычно однородны по составу, для каждого зерна (один анализ в табл. 2-7) проводились измерения не менее чем в 20 точках, время счета в точке - 10 с. Всего проанализировано 56 зерен нагиагита для 9 образцов.

**С э к э р ы м б.** Состав нагиагита по данным 23 микрозондовых анализов (см. табл. 2,4,7) довольно устойчив и близок к  $AuPb_5(Te,Sb)_4S_6$  при соотношении  $Te : Sb \approx 2$ . В редких случаях  $Te:Sb \approx 1,2$ . Содержания примесей достигают (в мас.%):  $Bi - 0,4$ ;  $Cd, Se$  и  $Mn - по 0,1$ ;  $Zn - 0,04$ ;  $Tl - 0,02$ ; частота встречаемости примесей  $Se, As, Cd, Zn, Mn$  низкая. Содержания примесей по данным спектрального анализа (в г/т):  $As - 2000$ ,  $Mn - 1000$ ,  $Bi - 200$ ,  $Tl - 150$ ,  $Cu - 30$ ,  $Mo - 2$ .

**Б а я - д е - А р ь е ш.** Состав нагиагита по данным 13 анализов (см. табл. 3,4) довольно устойчив и близок к  $AuPb_5(Te,Sb)_4S_6$  при  $Te : Sb \approx 2,5$ , изредка  $Te : Sb \approx 2$ . Нагиагит постоянно содержит примеси  $As$  (0,1-0,2 мас.%),  $Cd$  (0,06-0,14 мас.%),  $Se$  (до 0,1 мас.%),  $Mn$  (0,04-0,08 мас.%).

**З о д.** По составу нагиагит Зода близок к Сэкэрымбу,  $Te : Sb = 1,7-2,2$ . Минерал обогащен  $Bi$  (0,4-0,5 мас.%) (см. табл. 5).

**К а л г у р л и.** Состав нагиагита близок к  $AuPb_5(Te,Sb)_4S_6$ , отношение  $Te : Sb$  варьирует от 2,2 до 1,5, минерал обогащен  $Bi$  (0,4-0,6 мас.%) и  $As$  (0,5 мас.%) (см. табл. 6).

**М а н к а.** Нагиагит этого месторождения высокотеллуристый  $Te : Sb \approx 3$ , содержит примеси  $ng$  (0,08 мас.%), состав близок к  $AuPb_5(Te,Sb)_4S_6$  (см. табл. 7).

Т а б л и ц а 8

Химический состав (в мас.%) алтаита, сильванита, бурнонита, тетраэдрита, теллурувисмута из сростаний с нагиагитом

| Компо-<br>ненты | Алтаит |       | Сильванит |        |        | Бурнонит | Тетраэд-<br>рит | Теллурувис-<br>мутит |
|-----------------|--------|-------|-----------|--------|--------|----------|-----------------|----------------------|
|                 | 1      | 2     | 1         | 1      | 1      | 1        | 3               | 3                    |
| Au              | -      | 0,27  | 28,06     | 27,53  | 27,89  | -        | -               | Сл.                  |
| Ag              | 0,07   | 0,19  | 10,96     | 11,09  | 11,42  | 0,06     | 0,43            | 0,09                 |
| Hg              | -      | -     | 0,11      | 0,12   | 0,13   | 0,17     | -               | -                    |
| Pb              | 61,23  | 61,00 | -         | -      | -      | 41,69    | -               | Сл.                  |
| Cd              | 0,07   | -     | -         | -      | -      | 0,09     | 0,03            | -                    |
| Zn              | -      | -     | -         | -      | -      | 0,07     | 5,04            | -                    |
| Mn              | 0,02   | -     | -         | -      | -      | -        | -               | -                    |
| Fe              | -      | -     | -         | -      | -      | -        | 1,97            | -                    |
| Cu              | -      | -     | Сл.       | -      | -      | 13,81    | 38,60           | Сл.                  |
| Te              | 36,92  | 36,78 | 61,57     | 61,83  | 62,06  | -        | -               | 45,58                |
| Sb              | 0,32   | 0,31  | Сл.       | -      | -      | 24,62    | 25,24           | 0,77                 |
| As              | -      | -     | -         | -      | -      | -        | 2,59            | -                    |
| Bi              | 0,37   | -     | 0,24      | 0,22   | 0,34   | -        | -               | 52,13                |
| S               | -      | -     | -         | -      | -      | 19,79    | 25,46           | Сл.                  |
| Se              | 0,02   | -     | 0,68      | 0,78   | 0,59   | -        | -               | 1,12                 |
| Сумма           | 99,02  | 98,55 | 101,62    | 101,57 | 102,43 | 100,30   | 99,36           | 99,69                |

П р и м е ч а н и е. Месторождения: 1 - Сэкэрымб, 2 - Бая-де-Арьеш, 3 - Манка.

Итак, состав всех изученных современными методами образцов нагиагита отвечает  $AuPb_5(Te_{4-x}Sb_x)_{\Sigma 4}S_6$  ( $x = 0-2$ ), для наших образцов ( $n = 56$ ) -  $Au_{1+0,24}^{-0,13}Pb_{5+0,27}^{-0,20}Te_{2,20-2,91}Sb_{1,80-1,09}S_6^{+0,33}_{-0,26}$ , в 90% образцов вариации состава нагиагита -  $Au_{1+0,10}^{-0,07}Pb_{5+0,16}^{-0,14}Te_{2,43-2,90}Sb_{1,60-1,18}S_6^{+0,24}_{-0,18}$ . Таким образом, нагиагит является сульфотеллуридом - сульфостибиотеллуридом золота и свинца.

Для теллуристых минералов золота группы билибинскита-богдановита установлено наличие в одной структурной позиции Pb-Te-Sb [ I 5 ], подобный же изоморфизм характерен для минералов Pt-Pd. Возможно, что и нагиагит (по аналогии с указанными минералами) представляет собой сульфостибиоплюмботеллурид золота:

$Au[Pb_5(Te, Sb)_4]_{\Sigma 9}S_6$  или  $Au[Pb, Te, Sb]_9S_6$ .

Соотношение Te : Sb обычно составляет от 3 до 2. Теоретический состав нагиагита для Te : Sb = 3 и 2 соответственно (в мас.%): Au - 10,21 и 10,22; Pb - 53,68 и 53,73; Te - 19,84 и 17,64; Sb - 6,31 и 8,42; S - 9,97 и 9,98. Содержания примесей в нагиагите достигают (в мас.%): Bi - 0,56; As - 0,48; Se - 0,11; Fe - 0,08; Mn - 0,24; Zn - 0,03; Cd - 0,14; Hg - 0,08; Ag - 0,03; Tl - 0,02.

Состав ассоциирующих с нагиагитом минералов приведен в табл. 8. В типичной для месторождения Сэкэрэмб ассоциации нагиагит-сильванит-алтаит-бурнонит сильванит характеризуется преобладанием Au над Ag, наличием заметных примесей Se (до 0,8 мас.%), Bi (0,2-0,3 мас.%), Hg (0,1 мас.%), алтаит содержит заметные примеси Sb и Bi, бурнонит - примесь Hg. В типичной для Бая-де-Ареш ассоциации нагиагит-алтаит последний стехиометричен по составу, выделяется наличием примеси Au (до 0,3 мас.%). Теллурувисмутит из сростаний с нагиагитом Манки отличается заметной примесью Se (1,1 мас.%), а тетраэдрит представлен цинкистой разновидностью, лишенной Te и Bi.

Итак, нагиагит является сульфостибиотеллуридом золота и свинца, возможно, сульфостибиоплюмботеллуридом золота  $AuPb_5(Te, Sb)_4S_6$  (Sb = 0-2, обычно 1) или  $Au[Pb, Te, Sb]_9S_6$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Б е т е х т и н А.Г. Курс минералогии. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 508 с.
2. Б о к и й Г.Б., К о ч а н о в а Н.Н., Т е п п е р Х.Н. и др. Тезаурус по минералам русско-немецкий. М.: Наука, 1976. Т. I. 300 с.
3. Б р а у н с Р. Царство минералов. СПб., 1906. 507 с.
4. В о л ь ф с о н Ф.И., Д р у ж и н и н А.В. Главнейшие типы рудных месторождений. М.: Недра, 1982. 383 с.
5. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. М.: Наука, 1964. Т. 2. 830 с.
6. К о с т о в И. Минералогия. М.: Мир, 1971. 584 с.
7. Курс минералогии / Под. ред. А.К.Болдырева. Л.;М.: ОНТИ, 1936. 1051 с.
8. Л а з а р е н к о Е.К., В и н а р О.К. Минералогический словарь украинско-русско-английский. Киев: Наук.думка, 1975. 773 с.
9. Минералогические таблицы. М.: Недра, 1981. 399 с.
10. Минералы. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. I. 617 с.
11. Минералы СССР. М.;Л.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 2. 747 с.
12. Минералогия Урала. Свердловск: УФАН СССР, 1941. Т. I. 531 с.
13. П о в а р е н н ы х А.С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев: Наук. думка, 1966. 547 с.
14. Р а м д о р П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во иностр.лит. 1962. 1132 с.

15. С п и р и д о н о в Э.М., Ч в и л е в а Т.Н. Богдановит  $Au_2(Cu,Fe)_3(Te,Pb)_2$  - новый минерал из группы интерметаллических соединений золота // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 1979. № 1. С. 44-52.
16. B e r r y L.G. Nagyagite // Univ. Toronto Stud. Ser. Geol. 1946. N 50. P. 35-48.
17. B o l d i r e w A.K. Die chemische Formeln des Nagyagite // Neues Jb. Miner., Geol. und Paläontol. 1924. N 7. S. 193-201.
18. C a h e n E., W o o t t o n W.O. The mineralogy of rare metals. L., 1920. 254 p.
19. G i u s ç a D. Le chimisme de la nagyagite // Bull. Soc. Rom. Geol. 1937. N 3. P. 118-121.
20. G o s n e r B. Über Kristallform und molekulare Einheit von Nagyagit // Neues Jb. Miner., Geol. und Paläontol. A. 1935. N 11. S. 321-327.
21. M a r k h a m N.L. Synthetic and natural phases in the system Au-Ag-Te // Econ. Geol. 1960. Vol. 55. P. 1148-1178, 1460-1477.
22. M o s e s A.J., P a r s o n s C.L. Elements of mineralogy, crystallography, and blowpipe analysis. N.Y., 1916.
23. M u t h m a n n W., S c h r ö d e r E. Über die Zusammensetzung einiger Tellurminerale // Ztschr. Kristallogr. 1897. Bd. 29, H. 1/2. S. 140-145.
24. Nagyagite  $Au(Pb,Sb,Fe)_8(Te,S)_{11}$  // Lapis. 1984. Vol. 9, N 9. P. 8-11.
25. P a l a c h e C., B e r m a n H., F r o n d e l C. The system of mineralogy of J.D. Dana and E.S. Dana. N.Y.; L., 1944. Vol. 1. 834 p.
26. S c h n e i d e r h ö h n H. Erzlayerstätten kurzvorlesungen zur Einführung und Wiederholung. Jena, 1955. 495 S.
27. S c h n e i d e r h ö h n H., R a m d o r P. Lehrbuch der Erzmikroskopie. B., 1931. Bd. 2. 714 S.
28. S i m p s o n E.S. Detailed mineralogy of Kalgoorlie and Boulder with special reference to the ore deposits // Bull. Geol. Surv. W. Austral. 1912. N 42. P. 97.
29. S i p ö c z L. Über die chemische Zusammensetzung einiger seltenen Minerale aus Ungarn // Ztschr. Kristallogr. 1885. Bd. 11, H. 3. S. 209-219.
30. S l a v i k F. Nagyagit // Handbuch der Mineralchemie / Hrsg. C. Doelter, H. Leitmeier. Dresden; L., 1926. Bd. 4, H. 1. S. 882-884.
31. S t i l l w e l l F.L. The occurrence of telluride minerals at Kalgoorlie // Proc. Austral. Inst. Miner. Met. 1931. Vol. 84. P. 115-119.
32. S t r ü b e l G., Z i m m e r S.H. Lexicon der Mineralogie. Stuttgart, 1982. 494 S.
33. S t r u n z H. Mineralogische Tabellen. L., 1957. 524 S.
34. S t u m p f l E.F. New electron probe and optical data on gold tellurides // Amer. Miner. 1970. Vol. 55, N 5/6. P. 808-814.
35. T h o m p s o n R.M. The tellurides and their occurrence of Canada // Ibid. 1949. Vol 34, N 5/6. P. 342-382.
36. T o k o d y L. Proustite und xanthokonit von Nagyag // Neues. Jb. Miner., Geol. und Paläontol. A. 1930. N 3. S. 117-123.

УДК 549.334+553.252.2 (553.068.42)

Э.М. Спиридонов

#### О СОСТАВЕ И СТРУКТУРЕ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ БИЛИБИНСКИТА-БОГДАНОВИТА

В настоящее время интенсивно разрабатывается минералогия золота. Число минеральных видов золота достигло 28. В вулканогенных и телетермальных месторождениях золота недавно выявлены фишессерит, айтенбогардит, люджинойнит, пенжинит, кридлеит, минерал  $AuBi_5S_4$ . Наибольшее количество новых минеральных фаз золота выявлено в зоне цементации золото-теллуридных и золото-колчеданных месторождений: билибинскит, богдановит, безсмертновит, серия близких к ним по составу минера-