



ИНДИЙ И ДРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В РУДАХ КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ОЛОВОСУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

И. В. Гаськов^{1,2}, Г. А. Павлова¹, А. Г. Владимиров^{1,3}, В. И. Гвоздев^{4,5}

Исследования концентраций индия в колчеданно-полиметаллических и оловосульфидных месторождениях Сибири и Дальнего Востока показали повышенные содержания In в рудах этих месторождений, которые в целом превышают среднестатистические значения в подобных месторождениях разных регионов мира и могут представлять промышленный интерес. Главными концентраторами индия в рудах этих месторождений являются сульфидные минералы: сфалерит и халькопирит в колчеданно-полиметаллических месторождениях и халькопирит, борнит и сфалерит в грейзеновых олово-сульфидных месторождениях. Кроме того, в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений установлены повышенные содержания Cd, Ag и Te, а в оловосульфидных – повышенные концентрации Ge, Ga и Nb, что увеличивает их инвестиционную привлекательность.

Ключевые слова: индий, колчеданно-полиметаллические, оловосульфидные, месторождения, Сибирь, Дальний Восток.

INDIUM AND OTHER IMPURITY ELEMENTS IN ORES OF THE VOLCANOGENIC MASSIVE SULFIDE (VMS) POLYMETALLIC AND SN-SULFIDE DEPOSITS OF SIBERIA AND THE FAR EAST

I. V. Gaskov, G. G. Pavlova, A. G. Vladimirov, V. I. Gvozdev

Investigations of indium concentrations in the VMS polymetallic and Sn-sulfide deposits of Siberia and the Far East have shown the increased contents of indium in ores of these deposits. Such contents mainly are higher than average values in similar deposits of different world regions and can be considered as economically important in industry. Sulfides are the major indium-bearing minerals in these deposits such as sphalerite and chalcopyrite in VMS polymetallic deposits; chalcopyrite, bornite and sphalerite in greisens-related Sn-sulfide deposits. In addition, enhanced contents of Cd, Ag and Te in VMS polymetallic deposits and Ge, Ga and Nb increased ones in Sn-sulfide deposits have been determined. It increases their investment attraction.

Keywords: indium, VMS polymetallic, Sn-sulfide deposits, Siberia, the Far East.

Колчеданно-полиметаллические и полиметаллические месторождения во всем мире – основные промышленные поставщики многих редких элементов, включая In, Cd, Ge, Ga, Te, Se, а также Au и Ag. Большинство этих элементов, в том числе индий, используется в высокотехнологичной современной промышленности, и потребность в их производстве постоянно растет.

Из собственно полиметаллических месторождений повышенными содержаниями индия характеризуются сереброполиметаллические месторождения Фрейберга (Германия): до 2,9 % In в сфалерите. Также повышенные содержания In (75,83 г/т) установлены на месторождении Чо Дон в северо-восточном Вьетнаме [5]. В России индий главным образом добывается на медно-колчеданных месторождениях Южного Урала (Гайском, Узельгинском, Сафьяновском и др.), содержания индия в которых 10–24 г/т. Однако наиболее высокие его концентрации характерны для комплексных оловополиметаллических месторождений. Так, в рудах колчеданного месторождения Рио-

Тинто, характеризующихся повышенным содержанием олова, индия 0,4 %. Также повышенные его количества установлены в оловосульфидных месторождениях Китая и Дальнего Востока [1, 6].

В данной статье приводятся результаты наших исследований по определению уровней концентраций индия и сопутствующих элементов-примесей в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири и оловосульфидных месторождений Дальнего Востока.

Группа колчеданно-полиметаллических включает месторождения разных рудных районов Сибири, главным образом Рудного Алтая, относящиеся к разным минеральным типам: медно-колчеданное Малеевское, колчеданно-полиметаллические Юбилейное, Корбалихинское, Захаровское и барит-полиметаллическое Зареченское. Кроме того, были изучены медно-цинково-колчеданные руды месторождения Кызыл-Таштыг (Восточная Тыва) и существенно свинцовые руды Горевского (Енисейский кряж) (см. рисунок).

Установлено, что колчеданно-полиметаллические руды характеризуются широким спектром элементов-примесей, распределение которых в разных типах руд и рудных минералах чрезвычайно неравномерно [2]. По данным рентгенфлуо-

¹ИГМ СО РАН (Новосибирск); ²НГУ (Новосибирск);

³ТГУ (Томск); ⁴ДВГИ ДВО РАН (Владивосток);

⁵ДВФУ (Владивосток)



88 Содержание элементов-примесей в рудах и главных рудных минералах колчеданно-полиметаллических и полиметаллических месторождений (числитель – вариации содержания, знаменатель – средние содержания, в г/т)

Руды, минералы	Число проб	Mn, %	Fe, %	Ni	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
Руды	11	<u>0,22-0,06</u> 0,15	<u>22,1-2,18</u> 8,92	<u>818-8,40</u> 294,55	Юбилейное <u>188-2,67</u> 70,14	<u>634-9,71</u> 338,10	<u>69-0,12</u> 9,01	<u>26,20-0,31</u> 6,77	<u>590-0,5</u> 165,37	<u>8,24-0,20</u> 2,30
Сфалерит	7	<u>0,08-0,05</u> 0,06	<u>3,04-0,38</u> 1,16	<u>2955-2149</u> 2627,29	<u>61-22,90</u> 41,29	<u>2692-1666</u> 2277,71	<u>9,23-1,31</u> 5,63	<u>4,11-0,54</u> 2,97	<u>242-17,90</u> 70,09	He обн.
Галенит	3	<u>0,11-0,04</u> 0,07	<u>11,4-0,54</u> 4,21	<u>2849-1000</u> 2023,33	<u>3332-108</u> 1219,67	<u>1081-704</u> 896,67	He обн.	<u>613-234</u> 458,00	<u>2013-120</u> 1066,50	<u>137-54,90</u> 101,30
Халькопирит	2	0,06	<u>29,0-27,20</u> 28,45	<u>536-309</u> 422,50	<u>42,3-16,2</u> 29,25	<u>51,8-1,11</u> 26,46	<u>51,1-8,72</u> 29,91	1,60	<u>25,8-8,79</u> 17,30	2,42
Пирит	3	0,05	<u>46,6-45,3</u> 45,8	<u>120-38</u> 81,67	<u>16,9-7,0</u> 11,95	<u>273-9,40</u> 117,13	He обн.	<u>0,99-0,90</u> 0,95	<u>118-14,2</u> 49,97	<u>1,39-1,11</u> 1,25
Руды	12	<u>0,24-0,06</u> 0,12	<u>19,3-4,90</u> 15,83	<u>2217-17,80</u> 839,82	Корбалихинское <u>1698-13,90</u> 329,76	<u>1188-252</u> 690,50	<u>35,5-0,42</u> 6,53	<u>139-6,49</u> 47,39	<u>4234-22,10</u> 655,82	<u>6,78-0,87</u> 4,81
Сфалерит	3	<u>0,13-0,07</u> 0,09	<u>7,09-1,27</u> 3,82	<u>2805-1718</u> 2351,67	<u>92-22,40</u> 46,53	<u>2205-1497</u> 1959,67	<u>38,60-0</u> 12,8	<u>3,97-1,67</u> 2,82	<u>131-9,89</u> 55,23	He обн.
Галенит	1	0,06	5,65	1197,00	358,00	840,00	-	389,00	258,00	73,00
Халькопирит	3	<u>0,08-0,05</u> 0,06	<u>30,9-28,9</u> 30,20	<u>489-324</u> 399,33	<u>35,6-9,5</u> 25,9	<u>102-4,13</u> 40,91	<u>25,1-0,0</u> 12,53	<u>51-2,37</u> 24,56	<u>67-48,2</u> 60,69	<u>1,85-0,0</u> 0,81
Пирит	3	<u>0,08-0,03</u> 0,06	<u>46,1-43,7</u> 45,17	<u>871-20</u> 315,00	<u>35,7-19,5</u> 28,63	<u>440-3,36</u> 153,95	<u>2,34-2,01</u> 2,18	<u>256-3,92</u> 91,01	<u>103-17,50</u> 60,25	<u>75-4,49</u> 39,75
Руды	10	<u>0,1-0,02</u> 0,06	<u>26,6-5,22</u> 12,60	<u>2463-273</u> 965,5	Захаровское <u>214-12,2</u> 61,78	<u>1571-236</u> 751,9	<u>2,52-0,19</u> 1,16	<u>119-7,83</u> 34,33	<u>98-4,47</u> 40,24	<u>96-5,35</u> 22,89
Сфалерит	4	<u>0,11-0,05</u> 0,08	<u>21-2,97</u> 10,33	<u>2587-1896</u> 2168,50	<u>78-36,9</u> 57,80	<u>2220-1320</u> 1841,75	He обн.	<u>5,16-1,73</u> 3,47	<u>99-6,81</u> 56,83	<u>32,5-1,62</u> 12,13
Галенит	3	<u>0,07-0,03</u> 0,05	<u>2,31-1,38</u> 2,00	<u>1882-1244</u> 1659,33	<u>121-52</u> 77,00	<u>1276-900</u> 1078,33	He обн.	<u>810-585</u> 697,00	-	<u>254-173</u> 226,67
Халькопирит	2	<u>0,058-0,054</u> 0,056	<u>30,2-27,7</u> 28,95	<u>452-425</u> 438,5	<u>44,5-36,3</u> 40,40	34,00	<u>4,6-3,1</u> 3,85	<u>9,53-9,14</u> 9,34	<u>20,3-10,5</u> 15,40	<u>4,6-1,53</u> 3,07
Руды	13	<u>0,39-0,08</u> 0,21	<u>24,1-3,21</u> 20,16	<u>1796-10,3</u> 464,95	Малеевское <u>262-4,19</u> 79,21	<u>2097-5,13</u> 379,42	<u>18,1-0,19</u> 5,39	<u>9,16-0,86</u> 4,49	<u>1062-5,08</u> 148,49	<u>5,6-0,19</u> 2,70
Сфалерит	3	<u>0,27-0,16</u> 0,20	<u>14,8-3,17</u> 9,56	<u>1819-1644</u> 1704,33	<u>112-19,4</u> 74,80	<u>2771-1737</u> 2371	<u>17,1-14,6</u> 15,93	<u>8,83-1,94</u> 4,67	<u>50,8-23,5</u> 39,77	He обн.
Халькопирит	3	<u>0,13-0,05</u> 0,08	<u>30,30-28,6</u> 29,9	<u>640-52</u> 355,33	<u>104-21,6</u> 76,20	<u>582-9,37</u> 223,12	<u>11-5,78</u> 7,86	<u>13,7-2,3</u> 6,62	<u>65-10,9</u> 33,80	<u>4,25-1,22</u> 2,74
Пирит	1	0,07	43,2	204,00	79,00	69,00	10,5	3,61	94,00	6,05



Руды, минералы	Число проб	Mn, %	Fe, %	Ni	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
Руды	6	0,28-0,08	35,8-2,09	2258-207	Кызыл-Таштыг 282-26,6	1658-146	19,5-0,65	46,8-4,33	204-11,4	56-3,98
Сфалерит	3	0,16 0,1-0,05	15,56 15-12,6	1067,67 2197-703	104,28 199-26,5	709,83 1862-694	10,19 36-17,7	17,44 13-2,47	100,18 141-13,3	19,77 27,5-5,94
Халькопирит	2	0,07 0,05	13,80 27,9-31,4	1592,67 307-267	86,07 140-33	1470,33 313-182	1470,33 8,06-0,59	6,32 13-2,17	56,70 160-45,1	14,75 34,1-15,1
Руды	8	0,201-0,034	8,21-0,14	287,00	Зареченское 86,50	247,5	4,33	7,59	102,55	24,60
Сфалерит	8	0,11 0,1-0,0	2,53 3,63-0,05	1852-36,8	961-75	2648-105	26,5-2,45	70-1,68	11796-345	6,42-0,69
Галенит	3	0,04 0,05-0,02	0,97 1,02-0,29	746,22 2360-68	406,25 176-56	1620,12 4868-180	13,45 5,02-0,0	25,29 14,3-3,79	6011,87 1724-52,4	2,81 He обн.
Пирит	2	0,03 0,05-0,021	44,1 45,3-43,7	1041,38	118,5	2139,75	3,58	9,75	919,18	He обн.
Руды	4	1,73-0,39	2,45-1,69	1725-921	Горевское 1467-279	1678-1201	He обн.	544-304	18819-1794	104-37
Сфалерит	2	1,29 2,48-1,63	2,09 2,85-2,42	1306,67	733	1463,67	He обн.	439	11817,67	71,67
Галенит	2	2,06 0,039-0,016	2,65 1,06-0,65	273-27	748-45,6	367-18,4	5,4-5,38	12,8-4,15	1254-422	1,26-1,12
Руды	4	0,03	44,1	150,00	396,80	192,7	5,38	8,48	838,00	1,19
Сфалерит	2	1,29 2,48-1,63	2,09 2,85-2,42	1642-319	405-295	852-481	9,12-1,79	50,2-26,7	1758-576	148-75
Галенит	2	2,06 0,039-0,016	2,65 1,06-0,65	127,50	359,5	664,75	4,94	39,15	1107	111,5
	2	0,03	0,86	1877-853	62-48,7	16,3-4,79	He обн.	6,38-3,2	238-65	3,71-1,01
	2	0,03	0,86	1365,0	55,35	10,55	He обн.	4,79	151,50	2,36
	2	0,03	0,86	1365,0	485-342	1824-1182	He обн.	1008-677	301-160	204-159

Примечание: анализы выполнены методом РФА СИ в ИЯФ, ИГМ СО РАН.



Схема расположения месторождений

Колчеданно-полиметаллические: 1 – Захаровское, 2 – Юбилейное, 3 – Корбалихинское, 5 – Малеевское, 6 – Кызыл-Таштыг; полиметаллические: 4 – Зареченское, 7 – Горевское; грейзеновые оловосульфидные: 8 – Тигриное, 9 – Правоурмийское

ресцентного анализа (РФА СИ, ИЯФ, ИГМ СО РАН) (см. таблицу) в барит-полиметаллических рудах Зареченского месторождения установлены максимальные концентрации In, Ag, Cd, Sb; в медно-цинково-колчеданных рудах месторождения Кызыл-Таштыг – Ni, In, а в колчеданно-полиметаллических рудах Корбалихинского, Захаровского и Юбилейного месторождений все эти элементы отмечаются в меньших количествах. Содержания In в рудах разных месторождений распределено крайне неравномерно – от кларковых до 69 г/т. В колчеданно-полиметаллических рудах максимальные средние содержания In установлены в месторождениях Кызыл-Таштыг (10 г/т) и Юбилейное (9 г/т), наиболее высокие (69 г/т) – в сплошных пирит-халькопиритовых рудах Юбилейного месторождения.

Главными концентраторами In являются сфалерит и халькопирит. В рудах месторождений Кызыл-Таштыг и Малеевского максимальные концентрации In установлены в сфалерите (до 36,0 и 17,1 г/т соответственно), а Юбилейного – в халькопирите (до 51,1 г/т). В рудах Корбалихинского месторождения повышенные концентрации In фиксируются и в сфалерите (до 38,6 г/т), и в халькопирите (до 25,1 г/т), но распределены они чрезвычайно неравномерно.

В результате анализа корреляционных связей индия с главными рудными компонентами (цинк, медь, свинец) выяснена прямая корреляция с цинком на месторождениях Юбилейном, Малеевском, Кызыл-Таштыг) и отрицательная на Зареченском и Горьевском; с медью – положительная на Юбилейном и Корбалихинском и отрицательная на Зареченском. Для всех месторождений отмечается отрицательная корреляция индия со свинцом.

На Дальнем Востоке были изучены Тигриное и Правоурмийское оловосульфидные месторождения.

Тигриное месторождение расположено в западной части Арминского рудного района Приморского края [3], относится к грейзеновому типу. Собственно рудный этап представлен разнообразны-

ми по составу и строению жилами и прожилками (станнин-сфалерит-кварцевыми, касситерит-кварцевыми с вольфрамитом, станнином и др.), локализованными в грейзенизированных породах [6]. Основные компоненты месторождения – Sn и W, попутные – Zn, Cu, Bi, Pb, In, Cd, а также Sc, Ta, Nb, Mo. Исследования руд разного типа показали широкие вариации содержания индия – от 2,8 до 433,0, в среднем 70 г/т (16 определений). Максимальные концентрации установлены в сфалерите (1800–7500 г/т), в среднем по 30 анализам 4200 г/т. В несколько меньших количествах In установлен в станнине (до 240 г/т), халькопирите (до 900 г/т) и касситерите (до 18 г/т) [6]. Кроме индия, в рудах установлены повышенные концентрации германия (6–37 г/т), галлия (13–37 г/т) и ниобия (20–66 г/т).

Правоурмийское месторождение расположено в Баджальском рудном районе Хабаровского края, локализовано в зоне малоамплитудного надвига в экзоконтакте висячего бока дайки гранит-порфиров, прорывающей риолитовые игнибристы [3, 4]. Рудная зона мощностью до 17,2 м и протяженностью более 2400 м сложена метасоматитами, связанными с процессом грейзенизации. Промышленная ценность месторождения определяется высокими концентрациями касситерита и вольфрамита, а также сульфидов арсенопирита, леллингита, халькопирита борнита и более редких минералов (сфалерита, пирита, пирротина, станноидита, моусонита и станнина).

Содержание индия в рудах и минералах Правоурмийского месторождения детально изучено В. В. Гавриленко и Н. А. Погребс [1]. Наибольшие концентрации установлены в сфалерите (до 3600 г/т), а также в халькопирите и борните (300 и 170 г/т соответственно). В главных минералах месторождения (касситерите и вольфрамите) индия мало (7,2 и 5 г/т соответственно), на уровне первых граммов на тонну и в других сульфидах. В сульфидах он чаще всего находится в виде изоморфной примеси и редко образует самостоятельный минерал рокезит (InS), который в виде мелких включений в сростании со сфалеритом встречается в халькопирите [1]



По нашим данным, содержания индия в рудах варьируют от 10 до 130 г/т (среднее по 20 определениям 55 г/т), наиболее высокие (111–130 г/т) характерны для проб с преобладанием халькопирита или борнита (в сумме 25–35 % объема). Максимальны концентрации индия в сульфидных минералах (сфалерите, халькопирите, станнине), более низкие – в касситерите.

Высокие концентрации индия свойственны не только оловорудным жилам, но и сопровождающим их околожильным метасоматитам: до 400 г/т в зоне метасоматически измененных грейзенов с вкрапленностью халькопирита. Это значительно выше, чем в кварц-топазовых грейзенах на месторождении Мангабейра в Бразилии (40–113 г/т) [7].

Выводы

Результаты исследований концентраций индия в колчеданно-полиметаллических и оловосульфидных месторождениях Сибири и Дальнего Востока и анализ опубликованных данных показали, что уровень содержания In в рудах этих месторождений в целом превышает среднестатистический в подобных месторождениях разных регионов мира и может представлять промышленный интерес. Главными концентраторами индия в рудах этих месторождениях являются сульфидные минералы (сфалерит и халькопирит в колчеданно-полиметаллических месторождениях и халькопирит, борнит и сфалерит в грейзеновых оловосульфидных). Кроме того, в рудах колчеданно-полиметаллических месторождений установлены повышенные содержания Cd (до 1620 г/т), Ag (406 г/т) и Te (до 111,5 г/т), а в оловосульфидных – Ge (до 37 г/т), Ga (до 37 г/т) и Nb (до 66 г/т), что увеличивает их инвестиционную привлекательность.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта «Элементы-примеси в редкометалльных и полиметаллических рудно-магматических системах...» № 123, проекта РФФИ № 14-05-00191 и проекта ФЦП

«Создание научно-технического задела в области выявления промышленных типов месторождений индия» № 2014-14-576-0051-1203.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гавриленко, В. В.** Индий в рудах месторождения касситерит-кварцевой формации [Текст] / В. В. Гавриленко, Н. А. Погребс // Зап. ВМО. – 1992. – Т. 121, № 2. – С. 41–47.

2. **Гаськов, И. В.** Факторы концентрирования элементов-примесей в рудах колчеданных месторождений юга Сибири [Текст] / И. В. Гаськов, Э. Г. Дистанов, К. Р. Ковалев // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 3. – С. 303–317.

3. **Гоневчук, В. Г.** О генезисе оловорудного месторождения Тигриное (Россия) [Текст] / В. Г. Гоневчук, П. Г. Коростелев, Б. И. Семеняк // Геология рудных месторождений. – 2005. – Т. 47, № 3. – С. 249–264.

4. **Металлогения** Баджальского рудного района юга Дальнего Востока [Текст] / Б. И. Семеняк, С. А. Ефименко, П. Г. Коростелев, Г. А. Ткаченко // Металлогения главных оловорудных районов Дальнего Востока. – Владивосток, 1988. – С. 57–85.

5. **Минералого-геохимические** особенности и условия образования полиметаллических месторождений структуры Логам Северо-Восточного Вьетнама [Текст] / Чан Туан Ань, И. В. Гаськов, Чан Чонг Хоа [и др.] // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 7. – С. 817–833.

6. **Минералогия** руд W-Sn-месторождения Тигриное на Сихотэ-Алине и перспективы его освоения [Текст] / В. И. Попова, В. А. Попов, П. Г. Коростелев, В. В. Орловский. – Екатеринбург : ИМ УРО РАН ; Наука, 2013. – 132 с.

7. **Moura, M. A.** The indium-rich sulfides and rare arsenates of the Sn-In mineralized Mangabeira A-type granite, central Brazil [Text] / M. A. Moura, B. N. Francisquini, F. C. de Mendonca // Can. Mineral. – 2007. – Vol. 45, N 3. – P. 485–496.

© И. В. Гаськов, Г. А. Павлова,
А. Г. Владимиров, В. И. Гвоздев, 2014