

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

И.В. Гаськов¹, Г.А. Павлова¹, А.Г. Владимиров¹, В.И. Гвоздев²

1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т. Коптюга, 3, Россия;

2 – Дальневосточный геологический институт ДО РАН, 690022 г. Владивосток, пр-т 100 лет Владивостоку, 159, Россия

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 месторождениях являются сульфидные минералы: сфалерит и халькопирит на 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 – Ge, Ga и Nb, что увеличивает их инвестиционную привлекательность.

индий, колчеданно-полиметаллические, оловосульфидные, месторождения, Сибирь, Дальний Восток

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

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

Investigations of indium concentrations in the (VMS) polymetallic and Sn-sulfide deposits of Siberia and Far East have shown the enhanced contents of indium in the 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. Sulfi des are the major indium-bearing minerals in these deposits such as sphalerite and chalcopirite in VMS polymetallic deposits; chalcopirite, bornite and sphalerite in greisensrelated Sn-sulfi de deposits. In addition, enhanced contents of Cd, Ag and Te in VMS polymetallic deposits and Ge, Ga and Nb increased ones in Sn-sulfi de deposits have been determined. It increases their investment attraction.

indium, VMS polymetallic, Sn-sulfide deposits, Siberia, 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), в сфалерите до 2,9 % In. Также повышенные содержания In (75,83 г/т) установлены на месторождении Чо Дон в северо-восточном Вьетнаме [6]. 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, 4].

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) (рис. 1).



Рис. 1. 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

Установлено, что колчеданно-полиметаллические руды характеризуются широким спектром элементов-примесей, распределение которых в разных типах руд и рудных минералах чрезвычайно неравномерно [2]. По данным рентгенфлуоресцентного анализа (РФА СИ, ИЯФ-ИГМ СО РАН) (табл. 1) 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 Малеевском максимальные концентрации In установлены в сфалерите (до 36,0 и 17,1 г/т соответственно), а на Юбилейном – 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 разнообразными по составу и строению жилами и прожилками (станнин-сфалерит-кварцевыми, касситерит-кварцевыми с вольфрамитом, станнином и др.), локализованными в грейзенизированных породах [4]. 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) [4]. 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 всячего бока дайки гранит-порфиров, прорывающей риолитовые игнимбриты [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, лелингита, халькопирита борнита и более редких минералов (сфалерита, пирита, пирротина, станноидита, моусонита и станина). 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].

Таблица 1. Содержаний элементов-примесей в рудах и главных рудных минералах колчеданно-полиметаллических и полиметаллических месторождений. Над чертой – пределы вариаций содержания; под чертой – средние содержания (г/т)

Руды, минералы	Число проб	Mn, %	Fe, %	Ni	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
Юбилейное										
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	<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	н/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
Корбалихинское										
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	<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	н/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
Захаровское										
Руда	10	<u>0,11-0,02</u> 0,06	<u>26,6-5,22</u> 12,60	<u>2463-273</u> 965,5	<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	н/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	н/обн	<u>810-585</u> 697,00	<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	<u>34,00</u>	<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

<i>Руда</i>	13	<u>0,39-0,08</u>	<u>24,1-3,21</u>	<u>1796-10,3</u>	Малеевское		<u>2097-5,13</u>	<u>18,1-0,19</u>	<u>9,16-0,86</u>	<u>1062-5,08</u>	<u>5,6-0,19</u>
		0,21	20,16	464,95	79,21		379,42	5,39	4,49	148,49	2,70
	3	<u>0,27-0,16</u>	<u>14,8-3,17</u>	<u>1819-1644</u>	<u>112-19,4</u>		<u>2771-1737</u>	<u>17,1-14,6</u>	<u>8,83-1,94</u>	<u>50,8-23,5</u>	н/обн
		0,20	9,56	1704,33	74,80		2371	15,93	4,67	39,77	4,25-1,22
<i>Сфалерит</i>	3	<u>0,13-0,05</u>	<u>30,30-28,6</u>	<u>640-52</u>	<u>104-21,6</u>		<u>582-9,37</u>	<u>11-5,78</u>	<u>13,7-2,3</u>	<u>65-10,9</u>	2,74
	1	0,08	29,9	355,33	76,20		223,12	7,86	6,62	33,80	6,05
<i>Пирит</i>		0,07	43,2	204,00	79,00		69,00	10,5	3,61	94,00	
						Кызыл-Таштыг					
<i>Руда</i>	6	<u>0,28-0,08</u>	<u>35,8-2,09</u>	<u>2258-207</u>	<u>282-26,6</u>		<u>1658-146</u>	<u>19,5-0,65</u>	<u>46,8-4,33</u>	<u>204-11,4</u>	<u>56-3,98</u>
		0,16	15,56	1067,67	104,28		709,83	10,19	17,44	100,18	19,77
<i>Сфалерит</i>	3	<u>0,1-0,05</u>	<u>15-12,6</u>	<u>2197-703</u>	<u>199-26,5</u>		<u>1862-694</u>	<u>36-17,7</u>	<u>13-2,47</u>	<u>141-13,3</u>	<u>27,5-5,94</u>
		0,07	13,80	1592,67	86,07		1470,33	1470,33	6,32	56,70	14,75
<i>Халькопирит</i>	2	0,05	<u>27,9-31,4</u>	<u>307-267</u>	<u>140-33</u>		<u>313-182</u>	<u>8,06-0,59</u>	<u>13-2,17</u>	<u>160-45,1</u>	<u>34,1-15,1</u>
			28,95	287,00	86,50		247,5	4,33	7,59	102,55	24,60
						Зареченское					
<i>Руда</i>	8	<u>0,201-0,034</u>	<u>8,21-0,14</u>	<u>1852-36,8</u>	<u>961-75</u>		<u>2648-105</u>	<u>26,5-2,45</u>	<u>70-1,68</u>	<u>11796-345</u>	<u>6,42-0,69</u>
		0,11	2,53	746,22	406,25		1620,12	13,45	25,29	6011,87	2,81
<i>Сфалерит</i>	8	<u>0,1-0,0</u>	<u>3,63-0,05</u>	<u>2360-68</u>	<u>176-56</u>		<u>4868-180</u>	<u>5,02-0,0</u>	<u>14,3-3,79</u>	<u>1724-52,4</u>	н/обн
		0,04	0,97	1041,38	118,5		2139,75	3,58	9,75	919,18	
<i>Галенит</i>	3	<u>0,05-0,02</u>	<u>1,02-0,29</u>	<u>1725-921</u>	<u>1467-279</u>		<u>1678-1201</u>	н/обн	<u>544-304</u>	<u>18819-1794</u>	<u>104-37</u>
		0,03	0,59	1306,67	733		1463,67	439	439	11817,67	71,67
<i>Пирит</i>	2	<u>0,05-0,021</u>	<u>45,3-43,7</u>	<u>273-27</u>	<u>748-45,6</u>		<u>367-18,4</u>	<u>5,4-5,38</u>	<u>12,8-4,15</u>	<u>1254-422</u>	<u>1,26-1,12</u>
		0,03	44,1	150,00	396,80		192,7	5,38	8,48	838,00	1,19
						Горевское					
<i>Руда</i>	4	<u>1,73-0,39</u>	<u>2,45-1,69</u>	<u>1642-319</u>	<u>405-295</u>		<u>852-481</u>	<u>9,12-1,79</u>	<u>50,2-26,7</u>	<u>1758-576</u>	<u>148-75</u>
		1,29	2,09	713,25	359,5		664,75	4,94	39,15	1107	111,5
<i>Сфалерит</i>	2	<u>2,48-1,63</u>	<u>2,85-2,42</u>	<u>203-52</u>	<u>62-48,7</u>		<u>16,3-4,79</u>	н/обн	<u>6,38-3,2</u>	<u>238-65</u>	<u>3,71-1,01</u>
		2,06	2,65	127,50	55,35		10,55	4,79	4,79	151,50	2,36
<i>Галенит</i>	2	<u>0,039-0,016</u>	<u>1,06-0,65</u>	<u>1877-853</u>	<u>485-342</u>		<u>1824-1182</u>	н/обн	<u>1008-677</u>	<u>301-160</u>	<u>204-159</u>
		0,03	0,86	1365,0	413,5		1503,00	н/обн	842,50	230,50	181,50
<i>Примечание:</i> анализы выполнены методом РФА СИ в ИЯФ-ИГМС РАН.											

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриленко В.В., Погребс Н.А. Индий в рудах месторождения касситерит-кварцевой формации // Зап. ВМО, 1992. Т. 121. № 2. С. 41–47.
2. Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р. Факторы концентрирования элементов-примесей в рудах колчеданных месторождений юга Сибири // Геология и геофизика, 2005. Т. 46. № 3. С. 303–317.
3. Гоневчук В.Г., Коростелев П.Г., Семеняк Б.И. О генезисе оловорудного месторождения Тигриное (Россия) // Геология рудных месторождений, 2005. Т. 47. № 3. С. 249–264.
4. Попова В.И., Попов В.А., Коростелев П.Г. и др. Минералогия руд W-Sn-месторождения Тигриное на Сихотэ-Алине и перспективы его освоения. Институт Минералогии УО РАН. Наука: Екатеринбург, 2013. 132 с.
5. Семеняк Б.И., Ефименко С.А., Коростелев П.Г. и др. Металлогения Баджальского рудного района юга Дальнего Востока // Металлогения главных оловорудных районов Дальнего Востока. Владивосток, 1988. С. 57–85.

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

7. Moura Marcia Abrahao, Botelho Nilson Francisquini, Carvalho de Mendonca Fabio The indium-rich sulfides and rare arsenates of the Sn-In mineralized Mangabeira A-type granite, central Brazil // Can. Mineral., 2007. V. 45. № 3. P. 485–496.