

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЫШЬЯКА В КОЛЧЕДАНЫХ РУДАХ УРАЛА

© 2012 г. М. В. Титова, В. П. Молошаг

Содержание мышьяка в рудах колчеданных месторождений Урала находится в пределах десятых долей процента и в количественном отношении не определяет минералогическую и геохимическую их специфику. Тем не менее, наряду с такими ведущими компонентами колчеданных руд, как сера, медь, цинк и, в отдельных случаях, свинец, мышьяк определяет распределение и минеральные формы нахождения попутных компонентов руд: золота, серебра, теллура, висмута, сурьмы. Наличие минералов мышьяка в рудах позволяет детализовать физико-химические условия образования руд [4]. Целью предлагаемой статьи является анализ данных по распределению концентраций, составу минералов мышьяка в колчеданных рудах и связь его с попутными компонентами.

Фактической основой статьи являются анализы технологических проб по практически отработанным участкам или отдельным рудным телам таких месторождений, как Октябрьское, Барсучий лог, Сибайское и Сафьяновское (табл. 1), а также анализы сульфидов названных и других колчеданных месторождений Урала (табл. 2–4). Анализы технологических проб выполнялись в 1980–88 гг. в институте “Унипромедь” в соответствии с требованиями ГКЗ СССР [8]. Мы остановились на использовании анализов технологических проб по той причине, что по ним можно получить наиболее представительные результаты по рудам каждого из месторождений в целом, а также по отдельным сортам руд. Анализы минералов выполнялись в ИГГ УрО РАН на микроанализаторе JXA-5, а также в ИГЕМ РАН на Camebax microbeam [5]. Определение примесей благородных металлов в сульфидах, сульфосолях и других рудных минералах выполнено на микроанализаторах Camebax microbeam и Camebax SX-50 на основе, разработанной в ИГЕМ методики (Цепин А.И.), которая ранее использовалась при исследовании руд Александринского колчеданно-полиметаллического месторождения [1]. Результаты исследований состава и содержание в них примесей благородных металлов приведены в табл. 2–4.

В целом по каждому из рассматриваемых месторождений прослеживается связь мышьяка с пиритом, который является ведущим рудообразующим минералом. Несмотря на то, что пирит в качестве примеси содержит десятые-сотые доли процента мышьяка, он является ведущим минералом-концентратором мышьяка, поскольку руды колче-

данных месторождений на 70–90% состоят из пирита (табл. 2). Следующим по распространенности минералом мышьяка являются блеклые руды, количество которых в рудах составляет 1–2% и лишь в отдельных случаях достигает 10% и более их объема. Арсенопирит по объему составляет десятые доли %. Арсенопирит, также как блеклые руды, является минералом-индикатором условий образования колчеданных руд, что подробно описывалось в предыдущих публикациях [4].

Выявленные тенденции распределения примесей мышьяка и других элементов подтверждены на материалах детальных исследований состава пирита из слабо метаморфизованных руд Яман-Касинского, Сафьяновского, Александринского и других месторождений, полученных В.В. и С.П. Масленниковыми [2]. В опубликованных названными авторами анализах пирита прослеживается прямая связь примеси золота с мышьяком. Ранее такая связь была установлена для пиритов Карлинского месторождения, в последующем в рудах мезотермального золото-сурьмяного месторождения Хиллгров, Новый Южный Уэллс, Австралия [10, 11]. Из отечественных месторождений прямая зависимость содержания мышьяка и золота в пирите прослеживается в рудах Миндякского золоторудного месторождения (Южный Урал) [6]. Более того, для пиритов из руд Карлинского месторождения установлено уравнение регрессии для содержаний примеси золота от концентрации мышьяка [13]. Таким образом, наличие примеси мышьяка в пиритах колчеданных месторождений является одним из признаков их потенциальной золотоносности.

Для крупных и уникальных по запасам меди колчеданных месторождений оцененные запасы золота составляют первые сотни тонн [7]. Отличие колчеданных месторождений от золоторудных и, в первую очередь, карлинского типа и других малосульфидных руд заключается в том, что основная масса золота концентрируется преимущественно в пирите. Однако содержание его в колчеданном пирите значительно ниже такового в пирите из названных золоторудных месторождений и очевидно, в ближайшей перспективе извлечение золота из серных руд и собственно пиритных концентратов колчеданных руд с экономической точки зрения представляется невыгодным.

В отдельных случаях концентратором благородных металлов в рудах колчеданных месторождений могут выступать блеклые руды, что подтверждает-

Таблица 1. Обогащенность руд колчеданных месторождений (мас. %)

| Месторождение | Сафьяновское | | | | | | Сибайское | | | | | | Октябрьское | | | Барсучий лог | | | | |
|---------------|--------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------------|-------|-------|----------------|--------|-------|-------|------|
| | Медная | | | Медно-цинковая | | | Медно-цинковая | | | Медная | | | Медная | | | Медно-цинковая | | | | |
| | МК | ПК | Р | МК | ЦК | ПК | МК | ЦК | ПХ | Р | МК | ПХ | Р | МК | ОХ | Р | МК | ЦК | ПК | Р |
| Содержание | 18.97 | 0.27 | 1.55 | 17.51 | 2.82 | 0.28 | 0.89 | 19.10 | 0.62 | 0.11 | 0.40 | 0.51 | 15.39 | 0.35 | 4.44 | 21.60 | 2.88 | 0.25 | 3.02 | |
| | 83.83 | 16.17 | 100 | 56.28 | 14.68 | 29.04 | 100 | 66.37 | 6.54 | 27.09 | 100 | 100 | 94.32 | 5.68 | 100 | 84.89 | 8.36 | 6.75 | 100 | |
| | 3.49 | 0.11 | 0.34 | 7.45 | 46.32 | 0.77 | 3.07 | 5.87 | 48.71 | 0.65 | 2.75 | 0.28 | 4.54 | 0.46 | 1.57 | 4.32 | 47.96 | 0.76 | 5.32 | |
| | 68.14 | 31.86 | 100 | 6.94 | 69.86 | 23.20 | 100 | 2.97 | 74.75 | 22.28 | 100 | 100 | 78.67 | 21.33 | 100 | 9.63 | 79.06 | 11.31 | 100 | |
| | 39.67 | 45.35 | 43.00 | 39.08 | 31.56 | 40.45 | 40.00 | 37.26 | 41.97 | 41.53 | 37.26 | 43.61 | 35.65 | 22.31 | 25.94 | 37.35 | 33.83 | 42.98 | 41.51 | |
| | 6.32 | 93.68 | 100 | 2.08 | 3.65 | 93.55 | 100 | 1.25 | 3.37 | 95.38 | 100 | 100 | 37.39 | 62.61 | 100 | 10.68 | 7.15 | 82.17 | 100 | |
| | 0.42 | 0.07 | 0.094 | 1.42 | 0.75 | 0.068 | 0.14 | 2.25 | 0.11 | 0.089 | 0.12 | 0.14 | 0.11 | 0.06 | 0.08 | 3.61 | 1.49 | 0.14 | 0.67 | |
| | 30.61 | 69.39 | 100 | 29.37 | 25.12 | 45.51 | 100 | 26.06 | 3.87 | 70.07 | 100 | 33.59 | 66.41 | 37.37 | 62.63 | 100 | 63.92 | 19.50 | 16.58 | 100 |
| | 1.26 | 0.19 | 0.26 | 0.62 | 0.27 | 0.24 | 0.25 | 0.17 | 0.05 | 0.33 | 0.32 | 0.07 | 0.14 | 0.046 | 0.086 | 0.075 | 0.344 | 0.122 | 0.156 | 0.18 |
| | 32.61 | 67.39 | 100 | 7.03 | 4.96 | 88.01 | 100 | 0.74 | 98.60 | 100 | 1.05 | 98.95 | 100 | 16.69 | 83.31 | 100 | 23.27 | 6.17 | 70.56 | 100 |
| 2000 | 110 | 240 | 1300 | 660 | 150 | 210 | 220 | 177 | 451 | 437 | 120 | 350 | 140 | 129 | 132 | 450 | 220 | 170 | 210 | |
| 57.20 | 42.80 | 100 | 18.11 | 14.81 | 67.18 | 100 | 0.70 | 1.71 | 97.59 | 100 | 0.72 | 99.28 | 28.86 | 71.14 | 100 | 25.43 | 9.19 | 65.38 | 100 | |
| 180 | 140 | 50 | 84 | 33 | 23 | 25 | 12 | 30 | 23 | 24 | 12 | 22.2 | 35 | 25 | 28 | 183 | 54 | 48 | 65 | |
| 24.80 | 75.20 | 100 | 9.56 | 6.06 | 84.38 | 100 | 0.69 | 5.28 | 94.03 | 100 | 1.14 | 98.86 | 34.01 | 65.99 | 100 | 33.65 | 7.33 | 59.02 | 100 | |
| 32.0 | 24.0 | 24.55 | 40 | 18.0 | 17.0 | 17.70 | 11 | 6 | 16.5 | 16 | 11 | 21.2 | 31.64 | 28 | 30 | 30 | 20 | 10 | 13 | |
| 8.93 | 91.07 | 100 | 6.76 | 4.71 | 88.23 | 100 | 0.96 | 1.58 | 97.46 | 100 | 1.09 | 98.91 | 100 | 68.26 | 100 | 26.90 | 13.21 | 59.89 | 100 | |
| 56.0 | 8.76 | 12.0 | 63.0 | 160.0 | 33.28 | 40.0 | 25 | 23 | 20.85 | 21.0 | 25.0 | 20.91 | 15.5 | 0.39 | 4.5 | 4.50 | 41.25 | 2.00 | 26.98 | |
| 31.97 | 68.03 | 100 | 4.50 | 18.52 | 76.98 | 100 | 1.65 | 4.62 | 93.73 | 100 | 2.49 | 97.51 | 93.72 | 6.28 | 100 | 9.31 | 63.04 | 27.65 | 100 | |
| 1.6 | 0.967 | 1.01 | 4.12 | 1.24 | 1.45 | 1.52 | 3.51 | 1.34 | 1.63 | 1.64 | 2.57 | 0.95 | 5.03 | 1.65 | 2.57 | 6.60 | 2.8 | 3.21 | 3.57 | |
| 10.87 | 89.13 | 100 | 7.75 | 3.78 | 88.47 | 100 | 2.97 | 3.45 | 93.58 | 100 | 5.48 | 94.52 | 53.25 | 46.75 | 100 | 21.94 | 6.88 | 71.18 | 100 | |
| 202 | 29.14 | 40.98 | 311.5 | 240.4 | 54.11 | 70.10 | 73.45 | 79.52 | 16.13 | 19.60 | 46.35 | 8.82 | 58.9 | 12.50 | 25.13 | 147.50 | 104.20 | 16.59 | 39.80 | |
| 33.76 | 66.24 | 100 | 12.71 | 15.88 | 71.41 | 100 | 5.21 | 17.12 | 77.67 | 100 | 10.9 | 89.91 | 63.77 | 36.23 | 100 | 43.99 | 22.96 | 33.05 | 100 | |

Примечание. Числитель – содержание в продуктах (мас. % для Cu, Zn, S, Pb, As; г/т для Sb, Bi, Te, Hg, Au, Ag), знаменатель – распределение (отн. %), МК – медный колчедан, ПК – пиритный концентрат, ПХ – пиритные хвосты, ОХ – отвальные хвосты, Р – руда.

Таблица 2. Состав мышьяковистого пирита и арсенопирита Сафьяновского месторождения (мас. %)

| Образец | Минерал | Cu | Ag | S | As | Fe | Te | Sb | Se | Zn | Au | Bi | Hg | Pd | Pt | Co | Ni | Сумма |
|--------------|------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| C 0150/60.7 | FeS ₂ | | | 53.43 | 0.29 | 46.88 | | 0.00 | | | | | | | | 0.00 | 0.00 | 100.59 |
| C 0150/75.6 | FeS ₂ | | | 53.64 | 0.17 | 46.43 | | 0.00 | | | | | | | | 0.00 | 0.00 | 100.24 |
| C 0150/104.0 | FeS ₂ | | | 53.45 | 0.35 | 46.67 | | 0.00 | | | | | | | | 0.00 | 0.00 | 100.48 |
| C 2089/43.0 | FeS ₂ | | | 52.85 | 0.35 | 46.74 | | 0.00 | | | | | | | | 0.05 | 0.00 | 99.99 |
| C 0162/136.2 | FeS ₂ | 0.96 | | 54.15 | 0.49 | 46.29 | | 0.00 | | | | | | | | 0.03 | 0.01 | 101.94 |
| C 0150/136.2 | FeS ₂ | 0.00 | | 54.16 | 0.49 | 46.12 | | 0.00 | | | | | | | | 0.05 | 0.00 | 100.82 |
| 2151/212 | FeAsS | 1.71 | 0.07 | 19.10 | 48.48 | 29.80 | 0.33 | 0.05 | 0.33 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.05 | 0.00 | 100.15 |

Таблица 3. Химический состав блеклых руд из руд и энаргитов халькопиритовой фации (мас. %)

| Образец | Cu | Ag | S | As | Fe | Te | Sb | Se | Zn | Au | Bi | Hg | Pb | Pd | Pt | Сумма |
|--------------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| Блеклые руды | | | | | | | | | | | | | | | | |
| М 46/86 | 41.54 | 0.07 | 27.16 | 17.30 | 1.50 | 0.00 | 4.31 | 0.10 | 6.94 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | | | 99.09 |
| | 41.69 | 0.05 | 27.42 | 17.95 | 1.57 | 0.00 | 3.01 | 0.08 | 6.62 | 0.03 | 0.16 | 0.27 | 0.00 | | | 98.85 |
| 6/91 м.1 | 40.21 | 0.03 | 26.63 | 14.97 | 3.12 | 0.03 | 7.13 | 0.15 | 5.71 | 0.00 | 0.41 | 0.00 | 0.00 | | | 98.39 |
| | 39.80 | 0.14 | 27.23 | 15.20 | 3.13 | 0.00 | 7.08 | 0.12 | 5.69 | 0.00 | 0.62 | 0.09 | 0.00 | | | 99.10 |
| 6/91 м.1 | 40.50 | 0.06 | 27.31 | 16.47 | 3.42 | 0.00 | 5.35 | 0.13 | 5.93 | 0.00 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | | | 99.54 |
| 100/89 | 38.13 | 0.48 | 27.25 | 8.94 | 0.96 | 0.00 | 16.48 | 0.08 | 6.47 | 0.11 | 0.21 | 0.22 | 0.00 | | | 99.33 |
| | 38.66 | 0.37 | 27.53 | 10.31 | 1.10 | 0.00 | 14.14 | 0.04 | 6.51 | 0.00 | 0.34 | 0.05 | 0.00 | | | 99.05 |
| | 39.05 | 0.58 | 27.57 | 10.21 | 0.91 | 0.00 | 14.77 | 0.02 | 6.57 | 0.00 | 0.22 | 0.00 | 0.00 | | | 99.90 |
| | 39.48 | 0.53 | 27.29 | 10.94 | 1.13 | 0.00 | 13.39 | 0.04 | 6.76 | 0.02 | 0.00 | 0.32 | 0.00 | | | 99.90 |
| 118/90 | 38.18 | 0.47 | 27.45 | 12.41 | 2.69 | 0.00 | 11.25 | 0.08 | 6.21 | 0.11 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | | | 99.02 |
| | 38.57 | 0.41 | 27.15 | 12.57 | 2.08 | 0.00 | 11.94 | 0.03 | 6.17 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | | | 99.23 |
| 122/90 | 40.20 | 0.71 | 27.66 | 13.46 | 3.37 | 0.00 | 9.46 | 0.05 | 3.81 | 0.05 | 0.13 | 0.14 | 0.00 | | | 99.04 |
| 24/88 | 41.21 | 0.05 | 28.25 | 18.48 | 1.86 | 0.04 | 2.56 | 0.07 | 6.29 | 0.00 | 0.28 | 0.00 | 0.00 | | | 99.09 |
| | 39.06 | 0.09 | 27.46 | 19.70 | 4.84 | 0.00 | 1.72 | 0.05 | 5.44 | 0.05 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | | | 98.64 |
| 131/87 | 40.57 | 0.05 | 28.17 | 16.87 | 1.83 | 0.00 | 4.73 | 0.29 | 6.20 | 0.15 | 0.21 | 0.11 | 0.00 | | | 99.18 |
| 46/88 | 41.10 | 0.01 | 29.20 | 18.34 | 1.33 | 0.00 | 2.51 | 0.06 | 6.84 | 0.00 | 0.25 | 0.22 | 0.00 | | | 99.86 |
| | 37.94 | 0.00 | 25.34 | 3.32 | 0.93 | 0.00 | 22.66 | 0.06 | 7.30 | 0.03 | 2.55 | | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 99.19 |
| Уз-424/78 | 40.13 | 0.07 | 26.91 | 12.98 | 1.36 | 0.17 | 11.12 | 0.04 | 6.96 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 99.74 |
| | 38.18 | 0.07 | 26.52 | 12.20 | 0.90 | 0.17 | 11.89 | 0.00 | 9.97 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.15 |
| | 39.05 | 0.07 | 26.35 | 12.78 | 0.87 | 0.25 | 10.87 | 0.06 | 9.20 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 99.87 |
| Уз-405/78 | 39.16 | 0.00 | 27.03 | 16.72 | 1.52 | 0.13 | 7.06 | 0.06 | 7.76 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 95.53 |
| Ш-1367 | 41.92 | 0.45 | 26.75 | 20.10 | 1.02 | 0.20 | 2.09 | 0.09 | 7.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 100.12 |
| А 2267 | 43.00 | 0.00 | 27.62 | 15.07 | 1.33 | 0.00 | 5.25 | | 7.38 | | | 0.00 | | 0.38 | | 100.05 |
| С-0152/137.7 | 39.18 | 0.10 | 25.56 | 4.15 | 2.06 | 0.00 | 22.16 | 0.03 | 7.50 | 0.00 | 1.20 | | 0.08 | 0.05 | 0.00 | 100.07 |
| Энаргиты | | | | | | | | | | | | | | | | |
| С-0152/72.6 | 46.50 | 0.19 | 31.52 | 17.71 | 0.62 | 0.00 | 1.04 | 0.00 | 0.36 | 0.00 | 0.00 | | 0.89 | 0.00 | 0.00 | 98.83 |
| | 47.41 | 0.00 | 31.64 | 17.43 | 0.94 | 0.00 | 0.51 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 98.68 |
| С-2119/446.3 | 44.27 | 0.02 | 32.43 | 16.97 | 3.94 | 0.00 | 0.27 | 0.04 | 2.75 | 0.00 | 0.00 | | 0.08 | 0.00 | 0.05 | 100.82 |
| | 46.56 | 0.00 | 32.78 | 18.21 | 3.19 | 0.02 | 0.23 | 0.05 | 0.21 | 0.00 | 0.00 | | 0.23 | 0.04 | 0.06 | 101.58 |

ся анализами продуктов обогащения технологических проб (табл. 1), а также анализами данных минералов (табл. 3). В пользу того, что в медном концентрате сплошных медных руд Сафьяновского месторождения накапливаются блеклые руды, свидетельствует значительное накопление в нем мышьяка и, что особенно важно, сурьмы, а также теллура и висмута. Как ранее было установлено, теллуриды висмута, свинца и других металлов отмечаются только во вкрапленных рудах [9]. Блеклые руды Сафьяновского и других колчеданных месторождений Урала представлены преимущественно мышьяковистой разновидностью. Как один из минералов меди, в процессе обогащения они переходят в медный концентрат, о чем косвенно свидетельствуют анализы медных концентратов месторождений Барсучий лог и Сафьяновское (табл. 1). Данная тенденция не проявляется для руд Сибайского месторождения, что обусловлено относительно низкими содержаниями “строительных элементов” кристаллической структуры блеклых руд, в первую очередь – мышьяка, который, очевидно, почти полностью рассеивается в структуре пирита в качестве примеси. Тем не менее, как было сказано выше, большая часть колчеданных месторождений содержит достаточное количество блеклых руд, которые являются не толь-

ко одним из концентраторов мышьяка, но также теллура, висмута и благородных металлов.

Арсенопирит в рудах колчеданных месторождений является относительно редким минералом, что очевидно связано со значительным “поглощением” мышьяка пиритом, где он присутствует в качестве примеси. Это тем более вероятно, поскольку отношение содержания мышьяка к сере составляет величину порядка 1 : 100. Тем не менее, арсенопирит в количестве не более 3% довольно часто отмечается в рудах, чему способствовали процессы перекристаллизации пирита в процессах метаморфических преобразований.

Предпочтительное накопление золота в арсенопирите по сравнению с пиритом прослеживается в рудах карлинского и близкого к нему типов [10]. В парагенетических ассоциациях, содержащих эти минералы, примесь золота распределяется таким образом, что в арсенопирите содержание золота всегда выше такового в пирите. Лёллингит $FeAs_2$, в свою очередь, концентрирует золото предпочтительнее арсенопирита. Из этого следует, что содержание примесей золота и платиноидов в составе сульфидов, сульфоарсенидов и арсенидов возрастает с увеличением количества мышьяка в их составе.

Таблица 4. Распределение примеси благородных металлов в борните и теннантите (мас. %)

| № обр | I-754-3 | | | I – 754/3 | | 501/74 | | 502/76 | |
|---------|---------|--------|-------|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Минерал | Bn | | | Tn | | Bn | | Tn | |
| As | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 20.62 | 20.38 | | 13.08 | | 19.73 |
| S | 26.14 | 26.19 | 25.96 | 27.94 | 27.88 | 25.11 | 24.78 | 27.12 | 28.91 |
| Cu | 62.12 | 62.68 | 62.58 | 42.39 | 42.38 | 63.90 | | 61.35 | |
| Se | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.05 | 0.16 | | | | |
| Sb | 0.05 | 0.00 | 0.02 | 0.70 | 0.47 | | 9.03 | | 1.42 |
| Fe | 10.87 | 10.50 | 10.45 | 0.16 | 0.21 | 10.40 | 0.08 | 11.46 | 0.20 |
| Ag | 0.55 | 0.48 | 0.41 | 0.10 | 0.00 | 0.59 | 0.11 | 0.21 | 0.00 |
| Zn | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 7.74 | 7.70 | | 8.05 | | 8.47 |
| Te | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.23 | 0.12 | | 0.00 | | 0.18 |
| Hg | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| Pd | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| Pt | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| Pb | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| Au | 0.14 | 0.11 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| Bi | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | | |
| Сумма | 99.90 | 100.26 | 99.65 | 100.03 | 99.37 | 100.11 | 100.61 | 100.16 | 102.11 |

По всей видимости, арсенопирит является одним из золотосодержащих минералов и в рудах колчеданных месторождений. На данный момент мы располагаем единичными определениями концентрации золота в арсенопирите и данными микроскопических наблюдений золотосодержащих руд. С учетом часто наблюдаемого замещения арсенопирита блеклыми рудами можно заключить, что геохимическая связь золота и мышьяка в колчеданных рудах сохраняется при их метаморфических преобразованиях, несмотря на изменение минеральных форм нахождения мышьяка в рудах. Как следует из данных по составу блеклых руд, они действительно способны накапливать примеси благородных металлов (табл. 4).

На основе состава арсенопирита, структурно равновесного с леллингитом, а также экспериментальных исследований, можно заключить, что на Ишкининском месторождении ассоциация названных минералов с пирротином образовалась при значениях летучести серы (не выше $10^{-10.8}$ атм.) и температурах около 400°C [3, 12]. Опубликованные данные по составу арсенопирита гидротермальных сульфидных труб Сафьяновского месторождения, который находится в равновесии с пиритом, показали, что он изменяется от 30.5 до 32.0 ат. % мышьяка [2]. Это соответствует температурному диапазону образования данных образцов $380\text{--}420^{\circ}\text{C}$, который не выходит за пределы ранее выделенной арсенопиритовой фации и укладывается в диапазоне уточненных значений температуры растворов современных активных гидротермальных построек [4, 14]. Данная оценка получена за вычетом цинка, в виде ZnS , из опубликованных упомянутыми авторами анализов, так как цинксодержащая разновидность арсенопирита в природе пока не обнаружена. При выполнении микрозондовых анализов цинк, по видимому, был захвачен из сфалерита, что под-

тверждается приводимыми авторскими микрофотографиями [2]. Арсенопирит, таким образом, является одним из ведущих минералов-концентраторов благородных металлов в рудах колчеданных месторождений, который выступает в качестве одного из промежуточных “контейнеров”, поскольку данный минерал при метаморфических преобразованиях рудных залежей замещается, с одной стороны, блеклыми рудами при повышении летучести серы, а с другой – при ее понижении – леллингитом.

В отдельно взятых месторождениях концентрации примесей золота и платиноидов в леллингите выше, чем в арсенопирите. Однако распространенность данного минерала в колчеданных рудах ограничена месторождениями и отдельными залежами, телами, которые совместно с вмещающими породами подвергались интенсивным метаморфическим воздействиям, начиная с уровня амфиболитовой фации (Холоднинское месторождение, Северное Прибайкалье) [4]. Рудные залежи данного месторождения локализованы в вулканогенно-осадочных породах. Значительных концентраций благородных металлов в рудах не отмечается. Леллингит присутствует также в относительно мелких по запасам колчеданных рудах, локализованных в ультрамафитах палеоостроводужных структур. Из них наиболее детально изучены медно-кобальтовые Ишкининское, Дергамышское и Ивановское месторождения, залегающие в пределах Западно-Магницгорской палеоостровной дуги [3]. Названные месторождения формировались при умеренных значениях температур и давлений. Метаморфизм вмещающих пород отвечает зеленосланцевой фации. Благородные металлы представлены золотом. По анализам отмечаются платиноиды. Наличие в рудах кобальта мышьяка и благородных металлов, очевидно, связано с ультраосновными породами.

Результаты выполненных исследований и анализа литературных данных сводятся к следующему: основное количество мышьяка в рудах колчеданных месторождений концентрируется в пирите, наряду с которым накапливается и золото, что подтверждается анализами, получаемыми при обогащении руд пиритных концентратов. Ведущим в количественном отношении минералом мышьяка являются блеклые руды, которые, наряду с теллуридом, висмутом и серебром, способны накапливать примеси золота и платиноидов; арсенопирит при отсутствии леллингита может концентрировать максимальные содержания примесей золота и платиноидов, однако в количественном отношении он уступает блеклым рудам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викентьев И.В., Беленькая Ю.А., Агеев Б.И. Александринское колчеданно-полиметаллическое месторождение (Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42, № 3. С. 248–274.
2. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских “черных курильщиков” Екатеринбург-Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.
3. Мелекесцева И.Ю. Гетерогенные кобальт-медно-колчеданные месторождения в ультрамафитах палеоостроводужных структур. ИМин. УрО РАН. М.: Наука, 2007. 245 с.
4. Молошаг В.П. Использование состава минералов для оценки физико-химических условий образования колчеданных руд Урала // Литосфера. 2009. № 2. С. 28–40.
5. Молошаг В.П., Викентьев И.В. Распределение платиноидов и золота в минералах колчеданных месторождений Урала // Ежегодник-2000. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. С. 161–166.
6. Мурзин В.В., Кринов Д.И., Бортников Н.С., Сазонов В.Н. Стадийность, РТХ-условия образования руд и формы вхождения золота в рудах Миндякского месторождения (Южный Урал) // Ежегодник-2000. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. С. 166–171.
7. Сафонов Ю.Г. Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенический потенциал // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 4. С. 305–320.
8. Сборник руководящих материалов по геолого-экономической оценке месторождений полезных ископаемых. Т. 1. М.: ГКЗ СССР, 1985. С. 294–322.
9. Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В. Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского колчеданного месторождения в среднеуральском ретрошарьяже // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33, № 4. С. 47–58.
10. Ashley P.M., Creagh C.J., Ryan C.G. Invisible gold in ore and mineral concentrates from the Hillgrove gold-antimony deposits, NSW, Australia // Mineralium Deposita. 2000. V. 35. № 4. P. 285–301.
11. Fleet M.E., Mumin A.H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // American Mineralogist. 1997. V. 82. P. 182–193.
12. Kretschmar U., Scott S.D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application // Canadian Mineralogist. 1976. V. 14. P. 364–386.
13. Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Palenic C.S., Chryssoulis S.L., Ewing R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. № 11. P. 2781–2796.
14. Von Damm C.L., Lilley M.D., Shanks W.C. III et al. Extraordinary phase separation and segregation in vent fluids from the southern East Pacific Rise // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 206. P. 365–378.