УДК 553.411:622.7.1 DOI: 10.35597/2313-545X-2019-5-2-69-82

НЕОДНОРОДНОСТЬ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЙСКОЕ, СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ

О.А. Толканов
ОАО «Полиметалл», пр. Народного ополчения 2, г. Санкт-Петербург, 198216 Россия

HETEROGENEOUS COMPOSITION OF GOLD-SULFIDE ORES FROM THE MAISKOE DEPOSIT, NORTHEAST RUSSIA

O.A. Tolkanov
OAO «Polymetall», pr. Narodnogo opolcheniya 2, St. Petersburg, 198216 Russia

Геолого-технологическое картирование золото-сульфидных руд месторождения Майское (северо-восток России) выявило значительные неоднородности их технологически значимых характеристик вещественного состава: общих содержаний Au и Sb, содержаний основных золотосодержащих минералов – пирита и арсенопирита, а также отношения Au/As. Соотношение содержаний в руде Au и золотосодержащих пирита и арсенопирита, отраженное в коэффициенте золотоносности, определяет качество получаемого флотационного концентрата.

Илл. 7. Табл. 7. Библ. 5.

Ключевые слова: невидимое золото, вкрапленные золото-сульфидные руды, пирит, арсенопирит, коэффициент золотоносности, золотосодержащие сульфидные минералы, качество золотосодержащего флотационного концентрата.

The geological-technological mapping of gold-sulfide ores from the Maiskoe deposit (northeast Russia) has revealed significant heterogeneities of important technological characteristics of mineral composition: total Au and Sb contents, amount of major Au-bearing minerals (pyrite and arsenopyrite), and Au/As ratio. The proportion between Au content of ore and the presence of Au-bearing pyrite and arsenopyrite, which is reflected in coefficient of Au content, is responsible for the quality of flotation concentrate.

Figures 7. Tables 7. References 5.

Key words: invisible gold, disseminated gold-sulfide ores, pyrite, arsenopyrite, coefficient of gold content, gold-bearing sulfides, quality of gold flotation concentrate.

Введение

Золоторудное месторождение Майское на северо-востоке России относится к крупномасштабным по запасам золота гидротермальным месторождениям черносланцевой формации северо-востока России (рис. 1), характеризуется рассеянной в сульфидах (пирите и арсенопирите) формой золота – так называемым невидимым золотом (Волков и др., 2006), а также обогащением вмещающих пород органическим углеродистым веществом (УВ). Рассеянное состояние золота и УВ обуславливают упорность руд месторождения при их переработке (Меретуков, 2007).

В настоящее время установлено, что невидимое золото золото-сульфидных месторождений вкрапленных руд (ЗСМВР; Волков и др., 2017) связано с мелкокристаллическим арсенопиритом и тонкозернистым пиритом. Наиболее высокие содержания невидимого золота установлены в игольчатом арсенопирите – типоморфном и наиболее золотоносном рудном минерале ряда месторождений северо-востока России (Наталкинское, Майское), Казахстана (Бакырчик, Суздальское, Жерек, Большевик) и других регионов (Волков и др., 2006, 2017; Ковалев и др., 2011).

В геологическом строении месторождения Майское принимают участие алевролито-песчани-

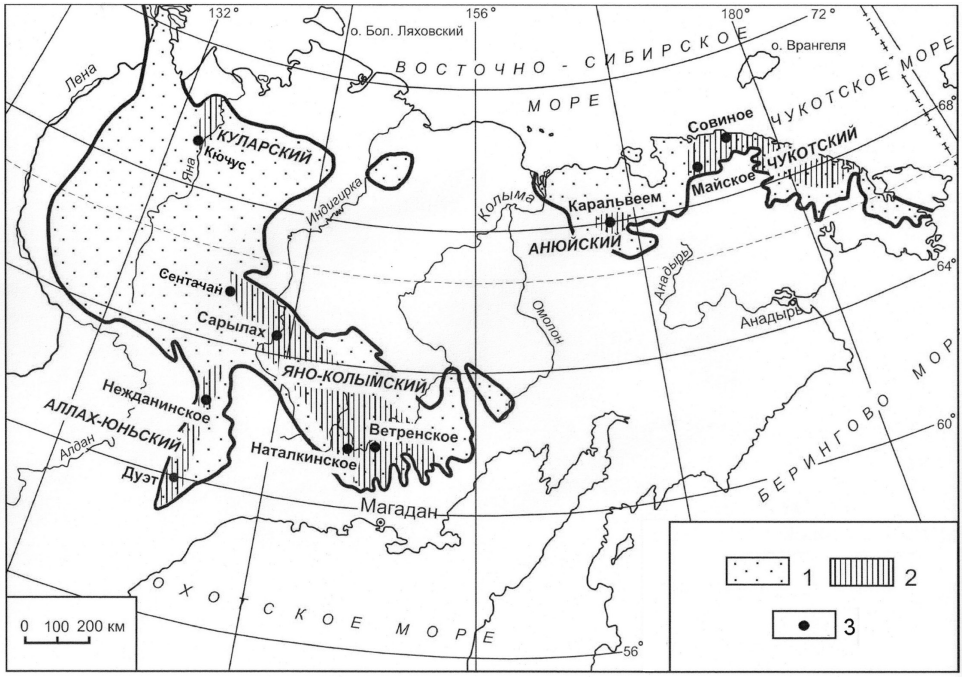


Рис. 1. Распространение пород черносланцевой формации (1) на Северо-Востоке России и положение в них золотоносных районов (2) и основных месторождений (3) (Волков и др., 2007).

Fig. 1. The spreading of black shales (1) in the Northeast of Russia; gold-bearing areas (2) and main deposits (3) (Volkov et al., 2007).

ковые образования мезозойского (триасового) возраста и меловые стратифицированные и жильные вулканиты кислого состава, которые подверглись многоэтапным метасоматическим преобразованиям (рис. 2). Золото отлагалось в два этапа: ранний (невидимое золото пирит-арсенопиритовой ассоциации) и поздний (микроскопически видимое самородное золото). При наложении на золотосодержащие рудные тела поздних кварц-антимонитовых жил в пределах пересечения ими рудных тел формировалась кварц-антимонитовая ассоциация с видимым самородным золотом (Волков и др., 2006).

Главный тип руд Майского месторождения – первичные (сульфидные) руды – составляют около 90 % запасов. Среднее содержание сульфидов в первичных рудах 6–8 %, при двух- трехкратном преобладании пирита (Волков и др., 2006).

В качестве характерных черт вещественного состава и свойств руд месторождения исследователи отмечают выдержанность строения и минерального и химического состава и физико-механических свойств для всех рудных тел и различных глубин. Арсенопирит имеет призматическую, игольчатую, ромбическую форму. Характерно присутствие антимонита размером 0.008–4.5 мм, приуроченного к кварцевым жилам. Другие рудные минералы присутствуют в незначительном количестве (десятые и сотые доли процента). Нерудные минералы представлены кварцем (до 60 %), серицитом (до 20 %), слюдой (до 7 %), каолинитом (до 13 %). Углеродсодержащие органические соединения составляют 0.5–1.3 %. Наряду с этим, отмечается неравномерность распределения сульфидов в породе (от 3 до 7 %). Размер зерен пирита составляет 0.04–0.1 мм (иногда до 0.15–1.5 мм); для него характерны тонкие прорастания арсенопирита размером 0.004–0.016 мм.

Основная часть золота в первичных рудах связана с сульфидами (до 90 %), большая часть – с арсенопиритом (до 80 %). Содержания Au в сульфидах месторождения широко варьируют: от 600–700 г/т в удлиненно-призматическом, игольчатом арсенопирите и до 14 г/т в изометричном арсенопирите. В пирите, ассоциирующем с игольчатым арсенопиритом, содержания Au достигают 25–57 г/т, в то время как в пирите из кварц-сульфидных прожилков – до 4 г/т. Среднее содержание Au в пирите составляет 60 г/т, в арсенопирите – 660 г/т. По данным микрорентгеноспектрального анализа и нейтронно-радиационной радиографии содержание Au в арсенопирите колеблется от 500 до 1100 г/т (Волков и др., 2006).

Распределение Au в арсенопирите крайне неравномерно. По данным мессбауэровской спек-

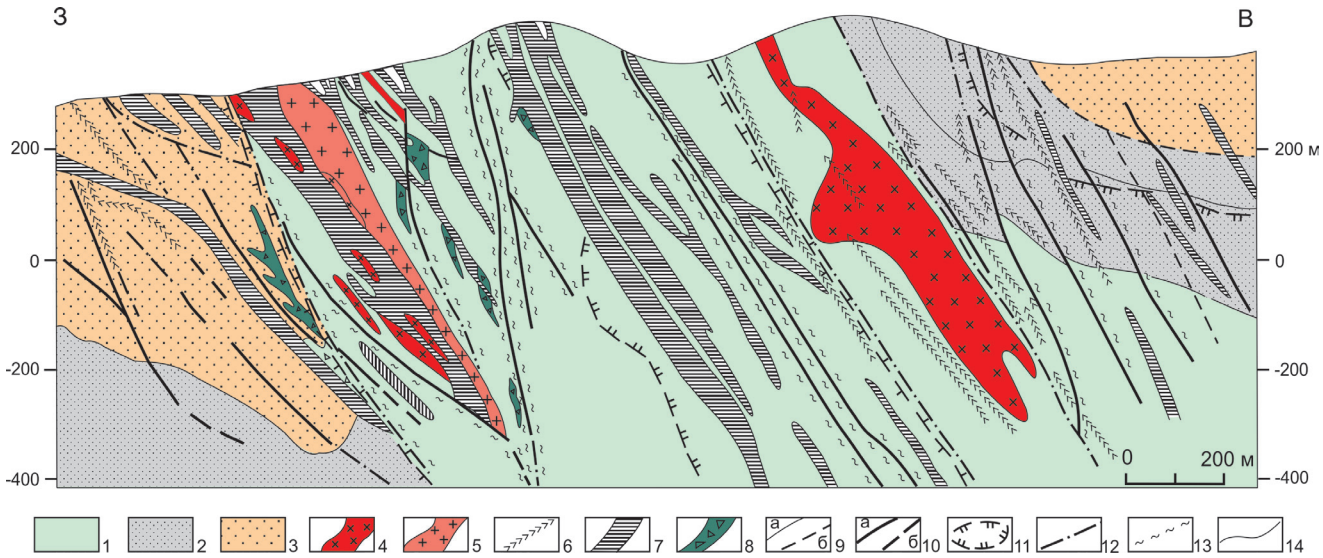


Рис. 2. Геологический разрез месторождения «Майское» (Волков и др., 2017).

1 – алевролиты, кевеемская свита среднего триаса; 2 – песчаники среднего триаса; 3 – переслаивающиеся песчаники и алевролиты триаса; 4 – гранодиориты и гранит-порфиры; 5 – аплиты; 6 – лампрофиры; 7 – риолит-порфиры; 8 – эксплозивные брекчии; 9 – разломы: установленные (а) и предполагаемые (б); 10 – рудные тела: установленные (а) – предполагаемые (б); 11 – контур серицитовых метасоматитов; 12 – зоны трещиноватости; 13 – зоны дробления, рассланцевания и смятия; 14 – геологические границы.

Fig. 2. Geological section of Mayskoye deposit (Volkov et al., 2017).

1 – siltstones, Keveem formation, Middle Triassic; 2 – sandstones, Middle Triassic; 3 – interbedded sandstones and siltstones of Triassic; 4 – granodiorites and granite-porphyries; 5 – aplites; 6 – lamprofyre; 7 – rhyolite-porphyre; 8 – explosive breccias; 9 – faults: proven (a) and inferred (b); 10 – ore bodies: proven (a) and inferred (b); 11 – contour of sericite metasomatites; 12 – zones of fracturing; 13 – crushing, shredding and crumple zones; 14 – geological boundaries.

троскопии в большинстве вкрапленных руд золото-сульфидных месторождений золото находится в арсенопирите в химически связанном или металлическом состоянии с размером частиц порядка 2 нм (размер атома золота оценивается в 0.144 нм). Для руд Майского месторождения исследования методами РЭМ и МРСА показали наличие в арсенопирите округлых включений золота размером 0.04–0.3 мкм, которые вероятно и являются основной формой нахождения золота в этих рудах (Волков и др., 2006).

Первоначально на месторождении выделено две зоны в соответствии с двумя рудными телами (№ 1 и № 2), представляющими два различных типа руд – углеродсодержащие алевролиты с сульфидной вкрапленностью и пирит-арсенопирит-кварц-серицитовые метасоматиты соответственно (рис. 3). Руды зоны 1 характеризуются повышенным содержанием органического углерода. В руде зоны 2 содержание органического углерода ниже, вплоть до практически полного его отсутствия, а углерод присутствует в составе карбонатов. Руды зон отличаются друг от друга по цвету (ввиду различного содержания органического углеродистого вещества) и физико-механическим свойствам (кварц-серицитовые метасоматиты несколько крепче углеродсодержащих алевролитов и алевропесчаников).

В настоящее время управление процессом переработки золотосодержащей руды месторождения ближе всего описывается как «управление по полезному компоненту». При разработке флотационных схем использовалсся многофакторный эксперимент Бокса-Уилсона, который проводился на одной пробе из каждой рудной зоны. В качестве изменяемых входных факторов использованы параметры реагентного режима и времени флотации, а в качестве контролируемого неизменяемого – содержание Au в исходной руде. Прочим характеристикам вещественного состава исходной руды отводилась роль возмущающих факторов, фиксированных для конкретного эксперимента и неконтролируемых при смене исходной руды. Результат эксперимента оценивался по показателям извлечения Au и качеству получаемого концентрата (по одному из показателей при фиксированном значении

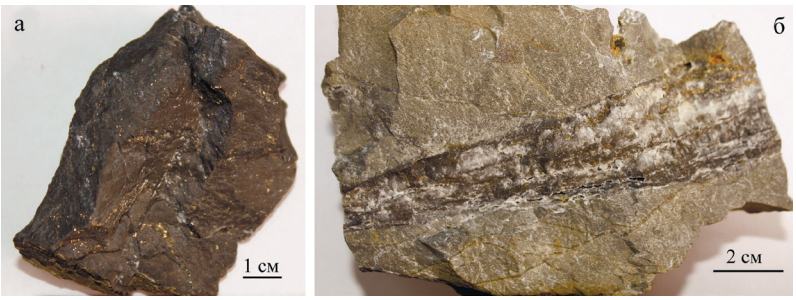


Рис. 3. Основные технологические разновидности руд месторождения «Майское».

а – алевролит с вкрапленностью пирита и арсенопирита, повышенным содержанием органического углеродистого вещества – 1 рудная зона; б – кварц-серицитовый метасоматит с тонкой вкрапленностью пирита и арсенопирита – 2 рудная зона.

Fig. 3. The main technological varieties of ores of the Mayskoe deposit.

a – siltstone with impregnation of pyrite and arsenopyrite and increased content of organic carbonaceous matter – 1 ore zone; б – quartz-sericite metasomatite with fine impregnation of pyrite and arsenopyrite – 2 ore zone.

второго). Влияние органического углерода в исходной руде учтено в раздельном проведении эксперимента для руд зон 1 и 2.

Дальнейшая переработка первичных сульфидных руд месторождения на золотоизвлекательной фабрике (ЗИФ) проводится на основе разработанных схем и реагентных режимов раздельно для зон 1 и 2. При работе нередко возникает необходимость корректировки реагентного режима, что указывает на отклонения в группе неконтролируемых (возмущающих) факторов (Бабин и др., 2014), к которым относятся и неконтролируемые характеристики вещественного состава. Управление производится посредством контроля выхода концентрата, в ходе которого стараются получать минимально допустимое извлечение золота (87–88 %), при необходимости жертвуя качеством (содержанием Au в концентрате). В практике работы ЗИФ случались периоды, когда не удавалось получать минимально необходимый показатель качества концентрата (40 г/т) даже при снижении извлечения ниже 87 %, что получало экспериментальное подтверждение в лабораторных условиях и свидетельствовало о необходимости изучения неоднородности характеристик вещественного состава руды, поступающей на переработку.

Целью работы является оценка неоднородности руды месторождения Майское, выявляемой на стадии геолого-технологического картирования (ГТК), и представление коэффициента золотоносности золотосодержащих сульфидов (КЗ) как инструмента прогнозирования качества получаемого флотационного концентрата.

Задачи и методы исследования

Неоднородность распределения Au в основных золотосодержащих минералах хорошо изучена и описана (Волков и др., 2006, 2017; Ковалев и др., 2011). В то же время, однородность руды, поступающей в переработку на ЗИФ, является важнейшим условием стабильности ее работы. Постоянство содержания Au в поступающей руде является основой планирования выпуска готового продукта (ГП) – золотосодержащего флотационного концентрата. Стабильность отношения Au/As в руде позволяет оперативно контролировать качество продуктов обогащения и своевременно корректировать процессы переработки. Присутствие Sb в виде антимонита осложняет флотационный процесс. Кроме этого, Sb является вредной примесью в дальнейшей переработке золотосодержащего концентрата. Количество золотосодержащих сульфидов в руде (пирита и арсенопирита) и содержащегося в них Au определяет качество получаемого ГП.

Задачами настоящей работы являлось выяснение степени неоднородности таких характеристик руды, как содержание Au (г/т), Sb (мас. %) и пирита и арсенопирита (мас. %), отношение Au/As и КЗ (коэффициент золотоносности). В качестве единицы, характеризующей вещественный состав и технологические свойства руды, принята проба ГТК руды весом около 30 кг, представительно характеризующая блок рудного тела размером 80 × 20 × M (м), где M – средняя мощность рудного тела оцениваемого блока.

Получение перечисленных выше характеристик пробы ГТК (продукта классифицированной флотационной навески, продукта флотационного

теста – концентрата, хвостов, промпродукта) предусматривает визуально-микроскопическую (качественную, полуколичественную) и количественную оценки неполного минерального состава исследуемого материала. Неполный количественный минеральный состав оценивается по результатам неполного химического анализа на комплекс химических компонентов: Au, $S_{общая}$, $S_{сульфидная}$, $As_{общий}$, $As_{сульфидный}$, Sb, Fe. Из стехиометрических соотношений элементов в формулах минералов оцениваются количества основных рудных минералов пробы.

Ввиду того, что распределение Au в золотосодержащих сульфидах крайне неравномерно, для оценки среднего содержания Au в сульфидных минералах пробы в работе рассчитан КЗ = Au / ∑ (пирит + арсенопирит). Его физический смысл состоит в том, что КЗ × 100 = β – качество концентрата (г/т), получаемого при условии извлечения 100 % пирита и арсенопирита в концентрат (без примесей других минералов, не содержащих золото). В настоящей работе результаты определения количества антимонита в пробах не используются в расчете КЗ, так как в антимоните не обнаружены заметные количества Au. Спорадически проявляющаяся «золотоносность антимонита» имеет, по-видимому, парагенетический характер и объясняется включениями самородного золота в кварцевых и антимонит-кварцевых жилах.

Для оценки пригодности КЗ как инструмента прогнозирования качества получаемого концентрата (в лабораторных условиях флотационных экспериментов над пробами ГТК) данные предварительно обрабатываются и расчетным путем приводятся к одному показателю извлечения, минимально допустимому регламентом работы фабрики – 87 %. Приведение к одному показателю извлечения производится следующим образом для каждого флотационного опыта:

1. Определяется график зависимости качества получаемого продукта (концентрата) от извлечения Au в продукт.

2. По графику (п. 1) определяется приведенное значение качества получаемого концентрата при извлечении 87 %.

3. Полученные приведенные значения качества концентрата (п. 2) ставятся в соответствие с КЗ исследуемой пробы руды ГТК.

4. Производится корреляционный анализ полученных соответствий приведенных значений качества концентрата и КЗ соответствующих проб руды ГТК.

Объем проанализированного в работе материала: 52 средние пробы ГТК рудной зоны 1 и 24 средние пробы ГТК рудной зоны 2; продукты флотационных тестов 42 проб ГТК рудной зоны 1 и 17 проб ГТК рудной зоны 2.

Неоднородность вещественного состава исходных руд ГТК

Для выбранных технологически значимых характеристик вещественного состава (табл. 1) рассчитан комплекс статистических оценок (табл. 2). Значимость различий характеристик вещественного состава проб рудных зон 1 и 2 между собой оценена по Манну–Уитни (табл. 3).

Изменчивость и неоднородность выбранных характеристик вещественного состава высокие (табл. 2). Содержания Au в пробах характеризуются значительными CV (коэффициентами вариации), составляющими 27.9 и 29.0 % для рудных зон 1 и 2 соответственно. Изменчивость отношения Au/As для рудной зоны 1 – сильная (коэффициент вариации CV = 30.2 %), для рудной зоны 2 – средняя (CV = 16.4 %).

Вопрос изменчивости отношения Au/As для месторождения Майское не может считаться закрытым. При отработке месторождения обнаруживаются участки с отношением Au/As, далеко выходящим за рамки статистически описанного в работе. Повышенные содержания As в рудном теле № 40 нарушают приведенную статистическую картину. Отклонение отношения Au/As в нем является локальным для месторождения и связано с присутствием в рудах минералов As – леллингита и реальгара (рис. 4, табл. 4).

Коэффициент вариации содержаний пирита и арсенопирита, Sb и КЗ превышают 33 %, иногда весьма значительно (в случае содержания Sb). По этим показателям руду месторождения в пределах анализируемых выборок следует считать неоднородной, а в случае с содержаниями Sb – крайне неоднородной. Для содержаний Sb в рудах зоны 1 снизить CV ниже 100 % удается отсечением не менее четверти крайних значений, для руд зоны 2 такая операция также не приводит к изменению характеристики из категории «неоднородность» в категорию «изменчивость» (CV >33 %).

Для руд зон 1 и 2 произведено статистическое сравнение выборок одноименных характеристик вещественного состава по Манну-Уитни (табл. 3).

Таблица 1

Технологически значимые характеристики средних проб ГТК

Table 1

Technologically significant characteristics of GTM average samples

№ п/п	Au (г/т)	Пирит (мас. %)	Арсенопирит (мас. %)	Au/As	Sb (мас. %)	КЗ
Рудная зона 1						
1	6.84	1.8	1.1	10.94	0.005	2.40
2	9.21	2.5	1.5	12.97	0.667	2.34
3	8.04	3.2	2.0	8.17	0.102	1.56
4	10.24	2.9	1.1	18.62	0.200	2.55
5	5.56	3.1	0.7	16.85	0.558	1.44
6	7.66	4.3	1.5	10.08	0.019	1.31
7	7.50	4.9	1.0	16.56	0.200	1.27
8	9.97	3.6	1.4	14.95	0.149	1.98
9	6.64	2.8	0.8	16.60	0.039	1.83
10	10.63	3.0	2.0	11.81	1.470	2.13
11	6.86	3.8	1.6	9.27	0.221	1.27
12	9.76	2.8	1.7	12.84	1.880	2.18
13	3.91	2.2	0.8	10.03	0.354	1.30
14	5.68	6.3	1.0	11.36	0.056	0.78
15	7.48	5.1	1.2	12.26	0.071	1.18
16	5.28	5.4	1.0	11.23	0.371	0.83
17	5.80	5.1	1.0	11.53	0.003	0.95
18	6.40	3.0	1.1	11.43	0.004	1.56
19	7.00	2.5	1.9	7.73	0.093	1.60
20	6.00	4.4	0.6	18.07	0.005	1.22
21	5.24	2.8	1.0	9.81	0.011	1.37
22	10.36	1.2	1.3	15.17	0.029	4.15
23	6.25	4.4	1.4	9.25	0.221	1.08
24	7.04	2.5	1.3	10.40	0.074	1.85
25	8.56	3.4	2.2	7.85	0.134	1.51
26	6.84	1.8	1.1	10.94	0.005	2.40
27	5.56	3.1	0.7	17.11	0.558	1.44
28	6.64	2.8	0.8	16.81	0.039	1.83
29	10.63	3.0	2.1	11.80	1.470	2.10
30	5.34	5.1	0.7	14.87	0.363	0.92
31	5.40	3.4	1.2	9.52	0.132	1.18
32	5.56	7.0	1.1	10.97	0.032	0.69
33	6.16	4.1	0.8	16.88	0.124	1.26
34	7.58	3.3	0.9	17.19	0.095	1.79
35	5.66	6.1	1.0	11.55	0.004	0.79
36	5.41	6.5	1.4	7.92	0.006	0.69
37	5.75	2.7	0.8	15.13	0.416	1.66
38	4.67	3.2	0.7	12.62	0.004	1.18
39	4.67	3.1	0.7	12.62	0.145	1.21
40	12.11	2.5	2.1	11.76	0.015	2.64
41	7.33	1.8	0.8	15.43	0.059	2.82
42	7.75	3.0	1.7	9.62	0.140	1.66
43	5.43	4.9	1.5	6.97	0.186	0.86
44	11.27	3.5	1.7	8.05	0.073	2.16
45	6.79	2.2	1.3	10.61	0.208	1.95
46	8.11	2.3	1.7	10.37	0.228	2.05
47	5.67	4.8	1.5	6.79	0.014	0.90
48	4.15	2.6	2.4	3.32	0.023	0.84
49	6.51	2.7	0.8	16.52	0.016	1.87
50	7.19	3.0	2.5	5.66	0.212	1.33

Окончание таблицы 1

№ п/п	Au (г/т)	Пирит (мас. %)	Арсенопирит (мас. %)	Au/As	Sb (мас. %)	КЗ
51	5.81	2.3	1.3	8.48	0.230	1.62
52	4.27	2.1	1.0	7.82	0.005	1.39
Рудная зона 2						
1	6.68	12.4	2.2	6.19	0.006	0.46
2	7.06	4.5	1.7	7.58	0.011	1.13
3	6.48	7.0	1.5	8.56	0.021	0.76
4	5.17	4.3	1.3	8.29	0.035	0.93
5	3.28	5.0	0.7	9.79	0.242	0.54
6	8.60	5.4	2.3	7.75	0.008	1.12
7	5.94	4.9	1.6	7.62	0.012	0.91
8	5.76	5.2	1.7	6.66	0.029	0.82
9	8.62	4.9	1.8	8.98	0.014	1.27
10	5.56	6.7	1.5	7.67	0.011	0.68
11	6.09	6.0	2.1	5.86	0.015	0.75
12	9.71	5.1	3.3	6.11	0.087	1.13
13	4.43	6.6	1.0	9.25	0.007	0.58
14	5.29	3.8	1.4	7.86	0.009	1.01
15	6.39	3.6	1.4	9.49	0.742	1.05
16	5.45	7.9	1.0	10.34	0.020	0.61
17	8.97	5.2	1.7	11.12	0.012	1.29
18	5.47	4.1	1.1	10.26	0.016	1.06
19	6.09	8.0	1.5	7.95	0.017	0.64
20	5.51	8.4	1.3	8.48	0.016	0.57
21	6.03	3.1	1.3	9.57	0.010	1.36
22	5.91	9.3	1.4	8.68	0.025	0.55
23	5.35	8.2	1.2	9.44	0.011	0.57
24	12.09	5.2	2.8	8.82	0.020	1.50

Считается, что при статистической значимости больше 5 % (>0.05) выборки статистически неотличимы, в противном случае (<0.05) – отличаются. Из анализируемых характеристик только выборки по содержанию Au статистически неотличимы для обеих рудных зон. Для остальных пяти характеристик их выборки по обеим рудным зонам оказались статистически различными, а по содержанию в пробах пирита и КЗ – резко отличными.

В рудах месторождения 90 % золота связано с пиритом и арсенопиритом, поэтому важно оценить корреляционные связи содержаний Au, As (рис. 5) и S (рис. 6). Корреляционная зависимость Au–As для проб ГТК руд зоны 1 (рис. 5а, б) умеренная (R = 0.499 для As сульфидного и R = 0.503 для As общего), а для зоны 2 (рис. 5в, г) – сильная (R = 0.846 для As сульфидного и R = 0.845 для As общего). Близость коэффициентов корреляции для общего As и сульфидного говорит об отсутствии несульфидных форм As и низкой окисленности исследуемых проб. Для тех же проб корреляционная зависимость Au-S (рис. 6) оценивается как слабая с коэффициентами корреляции R = 0.026–0.137. Как и для As, близость коэффициентов корреляции для общей и сульфидной S говорит о низкой окисленности проб и небольшом количестве несульфидных форм S (гипса неокислительного происхождения). Умеренная до сильной корреляционная зависимость Au–As и слабая Au–S отражают локализацию большей части золота в арсенопирите по сравнению с пиритом. Корреляционная зависимость Au (г/т) – арсенопирит (мас. %) повторяет зависимость Au–As, т.к. арсенопирит является абсолютно доминирующей минеральной формой As в рудах.

Особенности вещественного состава продуктов измельчения и флотации

В связи с тем, что главным типом руд на месторождении является сульфидный (89.4 %), и около 90 % золота находится в арсенопирите и пирите в невидимой форме (около 10 % золота находится в самородном виде), основным способом переработки на предприятии принят флотационный. Спорадически присутствующее в руде мелкодисперсное самородное (свободное) золото практически полностью флотируется в сульфидный концентрат. Основными операциями флотационной переработки

Таблица 2

Оценка неоднородности вещественного состава средних проб ГТК

Table 2

Evaluation of heterogeneous composition of GTM average samples

Статистический показатель	Технологически значимые характеристики вещественного состава					
	Au (г/т)	Пирит (мас. %)	Арсенопирит (мас. %)	Au/As	Sb (мас. %)	КЗ
Рудная зона 1						
Среднее	6.96481	3.45962	1.27885	11.79058	0.22573	1.59365
Медиана	6.6400	3.0500	1.1500	11.3950	0.0985	1.4750
Минимум	3.910	1.200	0.600	3.320	0.003	0.690
Максимум	12.110	7.000	2.500	18.620	1.880	4.150
Нижний квартиль LQ	5.5600	2.5500	0.8500	9.3950	0.0175	1.1800
Верхний квартиль UQ	7.7050	4.3500	1.5500	15.0400	0.2210	1.9650
Дисперсия	3.7645	1.7244	0.2358	12.6879	0.1455	0.4245
Стандартное отклонение	1.94022	1.31317	0.48561	3.56200	0.38139	0.65154
Стандартная ошибка	0.269060	0.182104	0.067342	0.493961	0.052889	0.090352
Коэффиц. вариации, %	27.9	38.0	38.0	30.2	169.0	40.9
Рудная зона 2						
Среднее	6.49708	6.03333	1.61667	8.43000	0.05817	0.88708
Медиана	5.9850	5.2000	1.5000	8.5200	0.0155	0.8650
Минимум	3.280	3.100	0.700	5.860	0.006	0.460
Максимум	12.090	12.400	3.300	11.120	0.742	1.500
Нижний квартиль LQ	5.4600	4.7000	1.3000	7.6450	0.0110	0.5950
Верхний квартиль UQ	6.8700	7.4500	1.7500	9.4650	0.0230	1.1250
Дисперсия	3.5617	4.6154	0.3414	1.9072	0.0235	0.0907
Стандартное отклонение	1.88724	2.14834	0.58434	1.38102	0.15346	0.30119
Стандартная ошибка	0.385230	0.438528	0.119277	0.281900	0.031324	0.061481
Коэффиц. вариации, %	29.0	35.6	36.1	16.4	263.8	34.0

Таблица 3

Статистическая значимость различий средних проб ГТК рудных зон 1 и 2

Table 3

Statistical significance of differences between GTM average samples of ore zones 1 and 2

	Технологически значимые характеристики вещественного состава					
	Au	Пирит	Арсенопирит	Au/As	Sb	КЗ
Статистическая значимость (p)	0.247442	0.000000	0.011014	0.000011	0.002901	0.000000

Таблица 4

Характеристика дифракционных линий леллингита и реальгара

Table 4

Characteristic of diffraction lines of löllingite and realgar

2Θ°	d, Å	I	h	k	l	Минерал
14.77	5.99	201.00	1	0	1	Реальгар
16.36	5.41	251.00	1	2	0	
28.32	3.15	107.00	1	4	0	
30.26	2.95	71.60	1	2	2	
31.62	2.83	315.00	0	2	0	Леллингит
33.46	2.67	2154.00	2	0	0	
35.24	2.54	131.00	0	1	1	
37.03	2.43	1165.00	2	1	0	
41.37	2.18	70.50	1	0	4	
43.11	2.10	271.00	1	1	8	
46.01	1.97	64.70	3	4	1	Реальгар
50.17	1.82	611.00	2	1	1	Леллингит
50.67	1.80	142.00	2	6	2	Реальгар
56.37	1.63	689.00	0	3	1	Леллингит
61.33	1.51	147.00	3	7	1	Реальгар

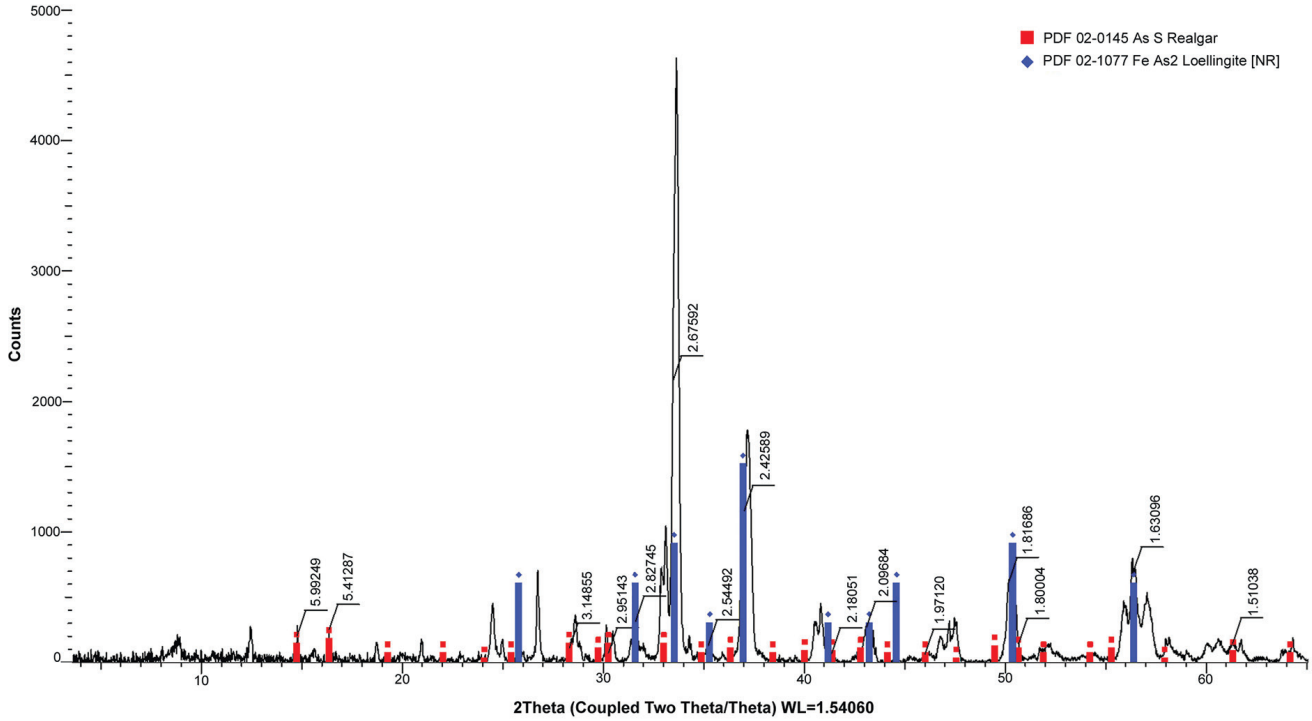


Рис. 4. Леллингит и реальгар рудного тела № 40 месторождения «Майское».

Дифрактограмма неориентированного воздушно-сухого препарата, Rigaku Ultima 4, детектор D-tex, 1°/минута, шаг 0.02 градуса. Аналитик Ю.М. Лопушняк.

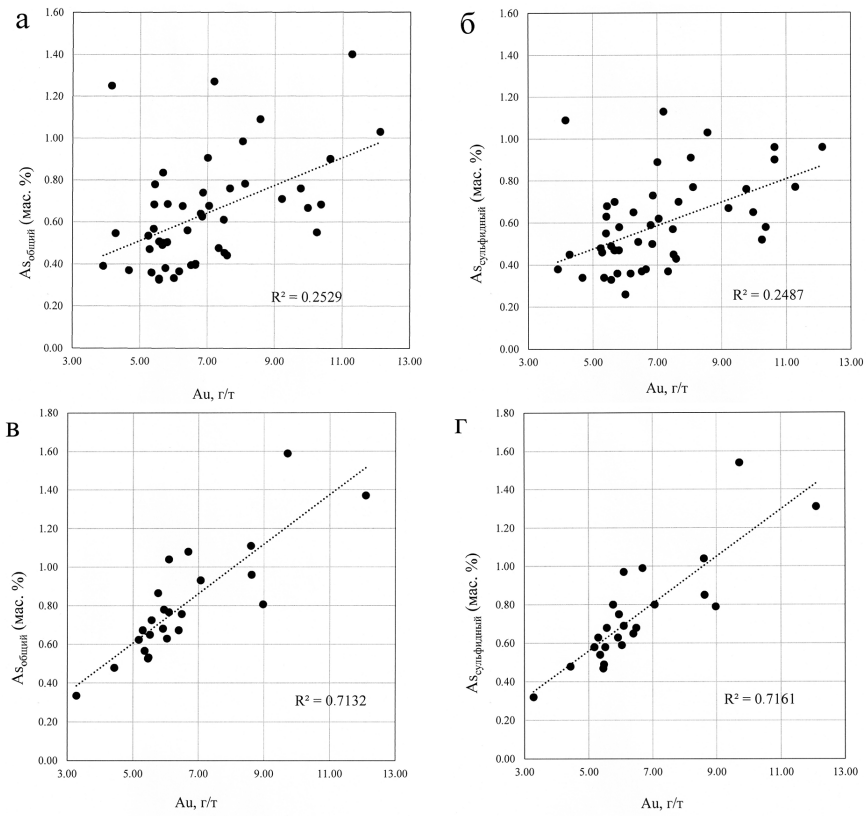
Fig. 4. Lellingite and realgar of ore body No. 40 of Mayskoe deposit. Diffractogram of undirected air-dry sample, Rigaku Ultima 4, D-tex detector, 1°/min, step 0.02 deg. Analyst Yu.M. Lopushnyak.

Рис. 5. Корреляционные зависимости содержаний золота (Au) с содержаниями мышьяка общего и сульфидного ($As_{общий}$, $As_{сульфидный}$).

а – Au–$As_{общий}$, 1 рудная зона, 52 пробы, R = 0.503, связь умеренная; б – Au–$As_{сульфидный}$, 1 рудная зона, 52 пробы, R = 0.499, связь умеренная; в – Au–$As_{общий}$, 2 рудная зона, 24 пробы, R=0.845, связь сильная; г – Au–$As_{сульфидный}$, 2 рудная зона, 24 пробы, R = 0.846, связь сильная.

Fig. 5. Correlation of gold (Au) content with As general and As sulfide content.

а – Au–$As_{general}$, 1 ore zone, 52 samples, R = 0.503, moderate correlation; б – Au–$As_{sulfide}$, 1 ore zone, 52 samples, R = 0.499, moderate correlation; в – Au–$As_{general}$, 2 ore zone, 24 samples, R = 0.845, strong correlation; г – Au-$As_{sulfide}$, 2 ore zone, 24 samples, R = 0.846, strong correlation.



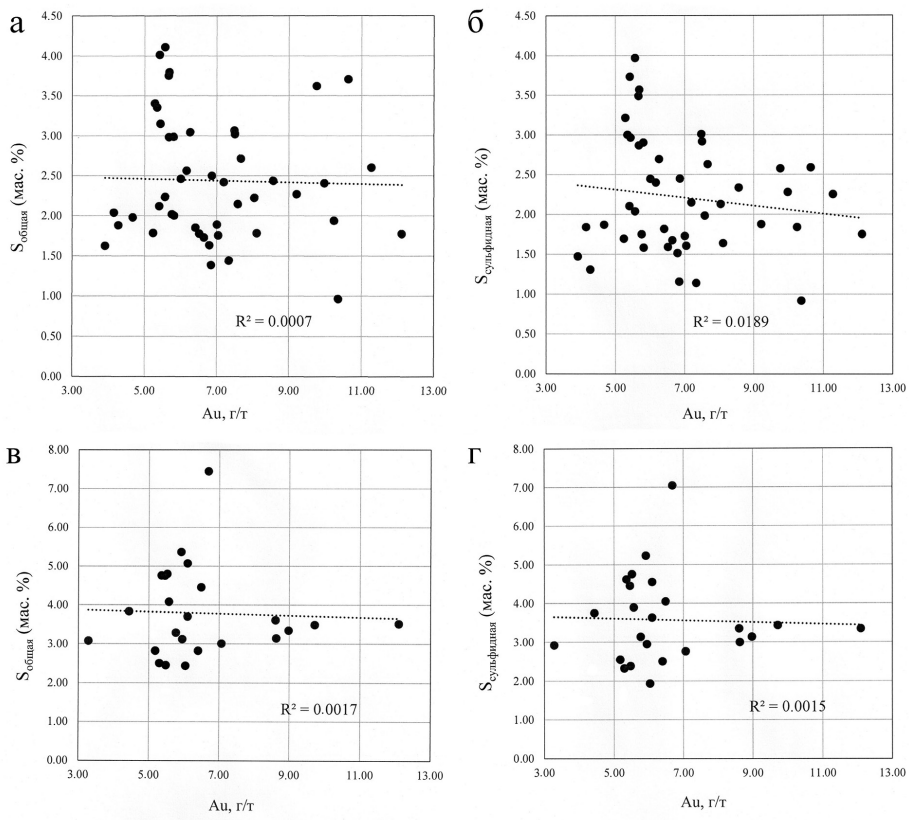


Рис. 6. Корреляционные зависимости содержаний золота (Au) с содержаниями серы общей и сульфидной ($S_{общая}$, $S_{сульфидная}$).

а – Au–$S_{общая}$, 1 рудная зона, 52 пробы, R=0.026, связь слабая; б – Au–$S_{сульфидная}$, 1 рудная зона, 52 пробы, R=0.137, связь слабая; в – Au–$S_{общая}$, 2 рудная зона, 24 пробы, R=0.041, связь слабая; г – Au–$S_{сульфидная}$, 2 рудная зона, 24 пробы, R=0.039, связь слабая.

Fig. 6. Correlation of gold (Au) content with S general and S sulfide content.

а – Au–$S_{general}$, 1 ore zone, 52 samples, R = 0.026, weak correlation; б – Au–$S_{sulfide}$, 1 ore zone, 52 samples, R = 0.137, weak correlation; в – Au–$S_{general}$, 2 ore zone, 24 samples, R = 0.041, weak correlation; г – Au–$S_{sulfide}$, 2 ore zone, 24 samples, R = 0.039, weak correlation.

являются измельчение руды до принятой флотационной крупности и собственно флотация. Измельчение и последующая флотация приводят к перераспределению минеральных и химических компонентов в средней пробе руды. Перераспределение компонентов происходит уже при классифицировании по крупности измельченной руды (табл. 5) и в полной мере проявляется при флотации (табл. 6).

В зависимости от КЗ сульфидов при практически одинаковом содержании Au в средних пробах (табл. 5) содержания пирита и арсенопирита в пробе могут варьировать от первых процентов до 10 % и более. В разных классах крупности флотационной навески КЗ отличается в результате перераспределения при измельчения пирита и арсенопирита, арсенопирита крупного (в том числе изометричного) и арсенопирита мелкого (игольчатого).

Лабораторный эксперимент по флотации пробы ГТК представляет собой получение из измельченной навески руды последовательной серии продуктов, обогащенных извлекаемым компонентом (концентраты), и продуктов, обедненных этим компонентом (хвосты). Перераспределение золотосодержащих компонентов и является целью процесса флотации. Результат эксперимента оценивается по показателю качества полученного концентрата (ГП) и достигнутому при этом показателю извлечения золота в ГП. В качестве ГП в общем случае может быть принята сумма любых продуктов флотации, удовлетворяющих регламентированным условиям извлечения и качества. Для ЗИФ месторождения Майское приняты минимально допустимые извлечение золота в ГП 87–88 % и качество ГП 40 г/т. Результаты флотации проб руды с разными КЗ (табл. 6) показывают, что регламентированное извлечение достигается для руд зоны 1 с качеством концентрата 51.5 г/т при содержании золотосодержащих сульфидов в концентрате 28.6 %, а для руд зоны 2 с качеством концентрата 24.5 г/т при содержании золотосодержащих сульфидов в концентрате 56.6 %. Несмотря на то, что пробы руд изначально имели близкие содержания Au (6.64 и 6.75 г/т), при данных $КЗ_{(1)}$ = 1.83 и $КЗ_{(2)}$ = 0.46 двукратное превышение содержания золотосодержащих сульфидов в ГП из руд зоны 2 не позволило получить минимальное регламентируемое качество концентрата.

Для оценки зависимости качества получаемого в лабораторных условиях концентрата от КЗ руды, участвующей в эксперименте, использованы приведенные значения качества, нормированные на величину 87 % извлечения Au в ГП (табл. 7). Корреляционная зависимость между КЗ руды, поступающей на флотацию, и качеством получаемого

Таблица 5

Table 5

Перераспределение компонентов исходной пробы руды ГТК при измельчении

Redistribution of components of primary GTM ore sample during grinding

Класс крупности, мм	Выход (мас. %)	Основные химические компоненты			Основные, золотосодержащие минералы (мас. %)		Распределение Au и основных золотосодержащих минералов по классам крупности (%)			Кз=Au/∑сульфидов
		Au (г/т)	$S_{сульфидная}$ (мас. %)	$As_{сульфидный}$ (мас. %)	Пирит	Арсенопирит	Au	Пирит	Арсенопирит	
Рудная зона 1, КЗ = 1.83										
+0.071	14.3	3.56	1.32	0.22	2.30	0.50	7.70	11.66	8.39	1.29
-0.071 +0.040	19.6	6.12	2.27	0.29	4.00	0.60	18.1	28.16	15.58	1.32
-0.040 +0.020	18.1	11.36	2.67	0.55	4.50	1.20	31.0	29.43	26.88	1.99
-0.020 +0	48.0	5.96	1.13	0.38	1.80	0.80	43.2	30.75	49.15	2.29
	Сумма	Среднее*					Сумма			Среднее*
	100.0	6.63	1.66	0.37	2.80	0.80	100.0	100.00	100.00	1.85
Средняя проба исходной руды		6.64	1.68	0.38	2.80	0.80				1.83
Рудная зона 2, КЗ = 0.46										
+0.071	12.4	4.24	5.56	0.84	9.70	1.80	8.10	10.13	9.69	0.37
-0.071 +0.040	23.3	4.36	8.68	0.73	15.6	1.60	15.8	30.75	15.96	0.25
-0.040 +0.020	16.2	7.96	9.48	1.06	16.9	2.30	20.1	23.09	16.18	0.42
-0.020 +0	48.1	7.50	5.31	1.29	8.90	2.80	56.0	36.04	58.17	0.64
	Сумма	Среднее*					Сумма			Среднее*
	100.0	6.44	6.80	1.07	11.9	2.30	100.0	100.00	100.00	0.45
Средняя проба исходной руды		6.68	7.05	0.99	12.4	2.20				0.46

Примечание: * – среднее взвешенное по флотационной навеске.

Note: * – weighted mean of flotation sample.

готового продукта при постоянном регламентированном извлечении характеризуется как «сильная» (R >0.7) для обеих рудных зон (рис. 7).

Обсуждение результатов, выводы и рекомендации

Анализ степени однородности геолого-технологических проб руд месторождения Майское по содержаниям Au, Sb и основных золотосодержащих минералов (пирита и арсенопирита), по отношению Au/As и КЗ показал значительную степень изменчивости и неоднородности практически всех названных характеристик. Содержание Au в пробах ГТК характеризуется сильной изменчивостью с CV, близким к 30 % для обеих рудных зон. Уменьшение естественной неоднородности добываемой руды по содержанию Au производится на стадии ее складирования в отдельные штабеля по близким значениям. При прочих равных условиях технологическая служба ЗИФ предпочитает руду с высоким содержанием Au, предполагая в этом больше возможности получения концентрата удовлетворительного качества при воздействии на его выход. Анализ результатов флотации проб руды с разной золотоносностью сульфидов (табл. 6) показывает, что высокое содержание Au в исходной руде не является условием получения качественного концентрата.

Корреляционное отношение Au/As характеризуется сильной и средней изменчивостью для руд зон 1 и 2, соответственно. С учетом того, что величина коэффициента корреляции Au–As существенно отличается в рудных зонах (R ~0.5 – зона 1 и R ~0.85 – зона 2), подход к его использованию в разных зонах может различаться. Целесообразно картирование геологической службой на стадии эксплуатационной разведки показателя Au/As, особенно для рудной зоны 1. При работе ЗИФ необходима регулярная проверка соотношения Au/As во время технологического процесса, особенно при смене руды зоны 1. В целом, характеристика Au/As условно пригодна как для оперативного управления добычей руды геологической службой, так

Таблица 6

Перераспределение компонентов исходной пробы руды ГТК при флотации

Table 6

Redistribution of components of primary GTM ore sample during flotation

Продукт	Выход, (мас. %)	Качество концентратов и потери в хвостах (Au, г/т)	Основные золотосодержащие минералы (мас. %)		Извлечение золота и основных золотосодержащих минералов в продукты флотации, (%)			Коэффициент обогащения	Коэффициент золотоносности Кз = Au/∑сульфидов
			Пирит	Арсенопирит	Au	Пирит	Арсенопирит		
Рудная зона 1, КЗ = 1.83									
Концентрат 1	4.20	86.20	40.1	9.30	53.38	57.16	46.32	12.79	1.75
Концентрат 2	2.50	66.91	26.4	8.90	24.59	22.37	26.21	9.92	1.90
Концентрат 3	2.20	17.90	7.10	2.90	5.79	5.32	7.44	2.66	1.79
Промпродукт (п/п)	2.70	10.75	3.90	1.80	4.31	3.61	5.72	1.59	1.89
Хвосты 1	77.4	0.68	0.30	0.10	7.81	7.91	9.27		1.70
Хвосты 2	11.0	2.52	1.00	0.40	4.12	3.63	5.04		1.87
Хвосты 1 + 2	88.4	0.91	0.40	0.10	11.93	11.55	14.31		1.76
	Сумма	Среднее*			Сумма				Среднее*
	100.0	6.74	2.90	0.80	100.00	100.00	100.00		1.79
Средняя проба исходной руды		6.64	2.80	0.80					1.83
Концентрат 1	4.20	86.20	40.1	9.30	53.38	57.16	46.32	12.79	1.75
Концентрат 1 + 2	6.70	79.01	35.0	9.20	77.97	79.52	72.53	11.72	1.79
Концентрат 1 + 2 + 3	8.90	63.93	28.1	7.60	83.76	84.84	79.97	9.48	1.79
Концентрат 1 + 2 + 3 + п/п	11.5	51.48	22.4	6.20	88.07	88.45	85.69	7.64	1.79
Рудная зона 2, КЗ = 0.46									
Концентрат 1	13.8	23.00	64.8	6.80	47.29	72.19	42.28	3.41	0.32
Концентрат 2	6.10	38.47	42.1	12.2	34.86	20.65	33.30	5.70	0.71
Концентрат 3	4.40	9.60	7.90	4.03	6.23	2.77	8.47	1.42	0.79
Промпродукт (п/п)	1.90	6.59	6.00	4.30	1.80	0.89	3.57	0.98	0.63
Хвосты 1	65.0	0.76	0.40	0.30	7.32	2.24	8.80		1.04
Хвосты 2	8.80	1.92	1.80	0.90	2.50	1.26	3.57		0.71
Хвосты 1 + 2	73.8	0.90	0.60	0.40	9.82	3.50	12.38		0.93
	Сумма	Среднее*			Сумма				Среднее*
	100.0	6.75	12.5	2.20	100.00	100.00	100.00		0.46
Средняя проба исходной руды		6.68	12.4	2.20					0.46
Концентрат 1	13.8	23.00	64.8	6.80	47.29	72.19	42.28	3.41	0.32
Концентрат 1 + 2	19,9	27.73	57.8	8.50	82.15	92.84	75.58	4.11	0.42
Концентрат 1 + 2 + 3	24.3	24.47	48.9	7.70	88.38	95.61	84.05	3.63	0.43
Концентрат 1 + 2 + 3 + п/п	26.2	23.21	45.8	7.50	90.18	96.50	87.62	3.44	0.44

Примечание: * – среднее взвешенное по флотационной навеске.

Note: * – weighted mean of product.

и для оперативного контроля качества продуктов ЗИФ.

Анализ значимости статистических различий выборок характеристик вещественного состава между собой по Манну-Уитни (за исключением общего содержания Au в пробе) позволяет говорить о статистически значимых различиях вещественного состава руд обеих рудных зон. Ранее для разделения на зоны из характеристик вещественного состава использовалось только содержание органического углерода.

Таблица 7

КЗ и соответствующие приведенные значения качества концентрата

Table 7

Coefficient of Au content and correspondent values of concentrate quality

№ пробы	КЗ	Качество концентрата (г/т)	№ пробы	КЗ	Качество концентрата (г/т)	№ пробы	КЗ	Качество концентрата (г/т)
Рудная зона 1								
1	2.27	56.5	15	1.17	47.3	29	0.91	32.8
2	2.31	49.9	16	0.83	29.3	30	1.17	46.2
3	1.53	67.0	17	0.95	29.0	31	0.69	31.8
4	2.53	66.3	18	1.54	38.5	32	1.26	39.8
5	1.45	55.7	19	1.59	41.3	33	1.78	50.3
6	1.29	42.0	20	1.19	45.7	34	0.79	42.8
7	1.26	58.5	21	1.34	38.6	35	0.68	41.7
8	1.97	70.5	22	3.93	80.7	36	1.20	39.5
9	1.82	54.7	23	1.08	40.4	37	1.65	47.6
10	2.13	66.1	24	1.82	57.6	38	0.84	28.7
11	1.26	59.0	25	1.49	61.1	39	1.85	36.6
12	2.18	94.3	26	1.45	55.8	40	1.91	64.5
13	1.29	48.4	27	1.82	54.7	41	2.04	56.7
14	0.78	41.4	28	2.13	41.0	42	0.87	34.5
Рудная зона 2								
1	0.46	25.7	7	0.90	33.0	13	1.06	59.3
2	1.10	70.8	8	0.82	58.4	14	0.56	40.1
3	0.75	49.0	9	1.25	71.1	15	1.35	74.5
4	0.92	31.4	10	0.67	36.8	16	0.55	36.7
5	0.57	27.6	11	0.58	36.7	17	1.66	83.7
6	1.10	70.9	12	1.29	81.4			

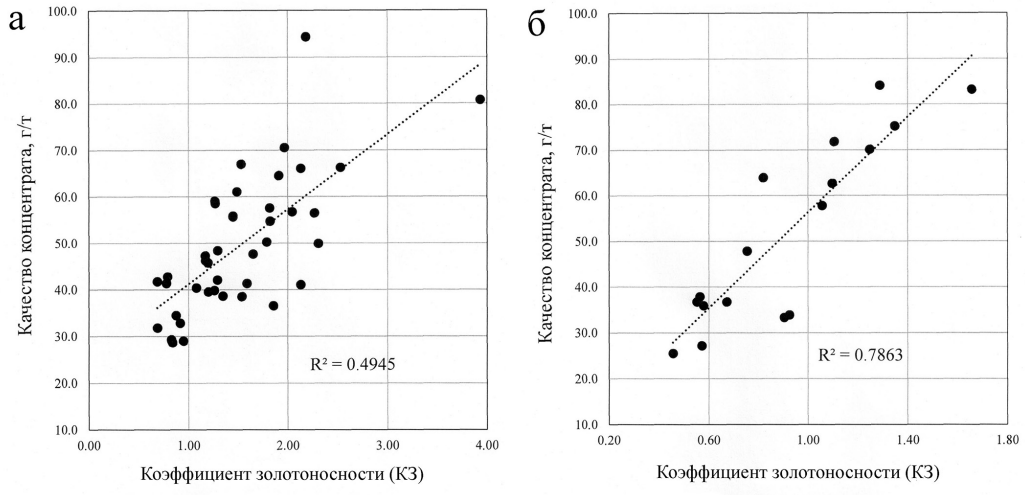


Рис. 7. Корреляционная зависимость качества флотационного концентрата и коэффициента золотоносности (КЗ) исходной руды.

а – 1 рудная зона, 42 пробы. R = 0.703, связь сильная; б – 2 рудная зона, 17 проб. R = 0.887, связь сильная.

Fig. 7. Correlation of the flotation concentrate quality and the gold content coefficient of the initial ore.

a – 1 ore zone, 42 samples. R = 0.703, strong correlation; б – 2 ore zone, 17 samples. R = 0.887, strong correlation.

Распределение Sb (соответственно, антимонита) в пробах крайне неоднородно. В среднем руды зоны 1 более сурьмянистые. Разделение добываемой руды по содержанию Sb производится на стадии ее складирования в отдельные штабеля.

Для содержаний пирита и арсенопирита характерна неоднородность в пробах обеих рудных зон (CV = 35–38 %). Средние содержания пирита и арсенопирита в рудной зоне 1 значительно ниже, чем в рудной зоне 2. Учитывая, что средние содержания Au в рудных зонах близки, КЗ в рудной зоне 1 должен быть выше, чем в рудной зоне 2. Действительно, расчет показывает, что КЗ руд зоны 1, в среднем, в два раза выше, чем КЗ руд зоны 2. Неоднородность значений КЗ несколько выше для зоны 1, чем для зоны 2.

Особый интерес представляет возможность использования показателя КЗ руды для прогнозирования качества получаемого флотационного концентрата. Сильная корреляционная зависимость между КЗ и качеством получаемого концентрата позволяет заранее определять стратегию флотационного процесса. При высоких значениях КЗ возможно высокое извлечение золота и удовлетворительное качество концентрата при относительно низких содержаниях пирита и арсенопирита в концентрате. При низких значениях КЗ следует сосредоточиться на получении максимально обогащенного сульфидами концентрата для обеспечения качества ГП. Корреляционный (а не линейный) характер зависимости «КЗ – качество концентрата» обусловлен, по-видимому, свойствами флотационного эксперимента (процесса) как плохо организованной, диффузной системы, в которой недостаточно известны причинно-следственные связи и в которой действует много переменных, не подлежащих разграничению (Бабин и др., 2014).

Золотоносность сульфидных минералов в руде (как и корреляционное отношение Au/As) целесообразно отслеживать, начиная с разведочной стадии геологоразведочных работ, для чего необходимо дополнительно к золоту (Au) определять содержание общих S, As и Sb с последующим расчетом и картированием количества сульфидов. Использование общих S и As вместо сульфидных для расчета количеств пирита, арсенопирита и антимонита приведет к незначительной погрешности анализа сульфидных (неокисленных) руд. Заранее известный КЗ на стадии выемки руды поможет в выборе вариантов складирования (шихтования) руды геологической службой и при переработке руды на ЗИФ. Коэффициент золотоносности сульфидных золотосодержащих минералов целесообразно использовать как показатель качества руды наряду с показателем содержания Au и Sb.

Литература

Бабин А.В., Ракипов Д.Ф. (2014) Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург, УрФУ, 114 с.

Волков А.В., Генкин А.Д., Гончаров В.И. (2006) О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское (северо-восток России). *Тихоокеанская геология*, **25**(6), 18–29.

Волков А.В., Сидоров А.А. (2017) Поисковая модель золото-сульфидных месторождений вкрапленных руд арктической зоны России. *Арктика: экология и экономика*, **2**(26), 62–75.

Ковалев К.Р., Калинин Ю.А., Наумов Е.А., Колесникова М.К., Королюк В.Н. (2011) Золотоносность арсенопирита золото-сульфидных месторождений Восточного Казахстана. *Геология и геофизика*, **52**(2), 225–242.

Меретуков М.А. (2007) Золото и природное углеродистое вещество. М., Руда и металлы, 112 с.

References

Babin A.B., Rakipov D.F. (2014) [Organization and mathematical planning of the experiment]. Yekaterinburg, UrFU, 114 p. (in Russian)

Kovalev K.R., Kalinin Y., Naumov E.A., Kolesnikova M.K., Korolyuk V.N. (2011) Gold-bearing arsenopyrite in eastern Kazakhstan gold-sulfide deposits. *Russian Geology and Geophysics,* **52**(2), 178–192.

Meretukov M.A. (2007) [Gold and natural carbonaceous matter]. Moscow, Ruda i metally, 112 p. (in Russian)

Volkov A.V., Genkin A.D., Goncharov V.I. (2007) [The mode of occurrence of gold in ores of the Natalka and Maiskoe deposits (northeast Russia)]. *Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology],* **25**(6), 18–29. (in Russian)

Volkov A.V., Sidorov A.A. (2017) [Exploration model disseminated gold-sulfide deposits of Arctic zone of Russia]. *[Arctic: ecology and economy]*, **26**(2), 62–75. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 30 мая 2019 г.