

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА КУТЫН

*Красюкова Т. О.<sup>1</sup>, Азарян А. М.<sup>1,2</sup>, Анисимов И. С.<sup>1</sup>, Васильев А. М.<sup>1</sup>,  
Баданина Е. В.<sup>2</sup>, Агапов И. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> АО «Полиметалл Инжиниринг», г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Месторождение Кутын расположено в Тугуро-Чумиканском районе Хабаровского края России, в южной части Тугурского полуострова между Тугурским и Ульбанским заливами, в 113 км к северо-востоку от Албазинского золоторудного месторождения. Кутын находится в северо-западной части Ульбанского турбидитового террейна Монголо-Охотского орогенного пояса. С точки зрения районирования золотоносных площадей юга Дальнего Востока, относится к Нижнеамурской зоне Сихотэ-Алинской провинции Тихоокеанского золотоносного пояса [3, 4].

Рудные штокверковые зоны локализованы в эндо- и экзоконтактах Биранджинского массива. Руды представлены кварц-карбонат-серпичитовыми метасоматитами по гранодиоритам и песчаникам, а также кварц-карбонатными жилами. Распространены руды с вкрапленными, прожилково-вкрапленными, прожилко-

выми текстурами. Многие разновидности руд брекчированы, катаклазированы, окислены. Среднее содержание золота в руде составляет 3.0 г/т. [1].

В рамках работы были изучены пробы эксплуатационного геотехнологического картирования пяти рудных зон. Пробы представлены упорными золотыми рудами с низкой долей цианируемого золота.

Для типизации рядовых проб были использованы следующие признаки: протолит (гранодиорит, песчаник), степень метасоматических изменений, окисленность (*гётит/сульфиды*), количество кварц-карбонатного прожилкования. На основании выделенных литотипов и пространственного расположения рядовые пробы были объединены в 49 частных технологических проб (ЧТП), которые стали объектом дальнейшего исследования (табл. 1).

Таблица 1

**Основные характеристики проб по рудным зонам**

| Рудная зона   | Глубина опробования, м | Масса, кг | Количество ЧТП | Количество рядовых проб | Среднее содержание золота, г/т |
|---------------|------------------------|-----------|----------------|-------------------------|--------------------------------|
| Седловинная   | 30–360                 | 582.5     | 15             | 253                     | 3.38                           |
| Дельинская    | 34–150                 | 152.1     | 9              | 87                      | 3.82                           |
| Родниковая    | 60–100                 | 48.3      | 4              | 32                      | 9.19                           |
| Геофизическая | 40–103                 | 174.9     | 14             | 106                     | 4.39                           |
| Перевальная   | 28–107                 | 94.1      | 7              | 54                      | 4.88                           |

Мультиэлементный анализ проб выполнен в лаборатории «СЖС Восток Лимитед» (г. Чита) с использованием методов атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой ICP-AES с предварительным сплавлением с метабора́том лития (16 элементов), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS с предварительным мультикислотным разложением проб (48 элементов) и метода

пробирного анализа (благородные металлы Au, Ag). Остальные аналитические исследования и эксперименты по гравитационному и флотационному обогащению и агитационному выщелачиванию руд выполнены в АО «Полиметалл Инжиниринг». Количественное определение минерального состава проб проведено методом порошковой рентгеновской дифракции методом Ритвельд. Концентрации серы и углерода

в пробах определены методом ИК-спектроскопии в соответствии с отраслевыми методиками (ТПИ 1.1.553.С.2018 НСАМ № 553-С, ТПИ 1.1.554.С.2018 № 554-С) [2]. Доля мышьяка окисленных форм рассчитана как отношение измеренного содержания мышьяка в окисленных минералах (скородит, мышьяковистый гётит

и др.) к общему содержанию мышьяка в руде. Концентрации мышьяка в руде и минералах определены атомно-абсорбционным методом.

Существенные вариации извлечения золота как во флотоконцентраты, так и в продуктивные растворы (табл. 2) диктуют необходимость деления рудного материала по сортам.

Таблица 2

**Результаты гравитационных, флотационных опытов и цианирования**

| Продукты                              | Выход, % | Содержание Au, г/т | Извлечение Au, % |
|---------------------------------------|----------|--------------------|------------------|
| Флотоконцентрат                       | 1.6–18.1 | 15.0–200           | 44.9–86.4        |
| Гравитационно-флотационный концентрат | 1.9–18.3 | 17.0–187           | 53–90            |
| Продуктивный раствор                  | –        | –                  | 12.1–66.2        |

В изученных пробах основными минералами являются кварц (28–56%), слоистые силикаты (20–40%), полевые шпаты (3–43%) и карбонаты (1.5–25%) (рис. 1). В пробах диагностированы акцессории: турмалин, актинолит, циркон, рутил, анатаз, ильменит, магнетит, гетит, гематит, апатит, гипс, ярозит. Сульфиды составляют 0.5–5.3% и представлены пиритом и арсенопиритом.

Несмотря на схожий макроэлементный состав, метасоматиты наследуют геохимические

черты протолита: метасоматиты по гранодиоритам отличаются более высокими содержаниями Rb, V, Cr (рис. 2). Они также часто несут медную-висмут-сурьмяную минерализацию, не представленную во вмещающих породах.

Изменение микроэлементного состава при метасоматозе заключается в выносе Na, Ba и Sr – элементов, входящих в плагиоклаз, и накоплении рудных элементов, отражающих минеральные ассоциации самородного золота – Ag, Bi, Cu, Zn, Sb, As, S (рис. 3).

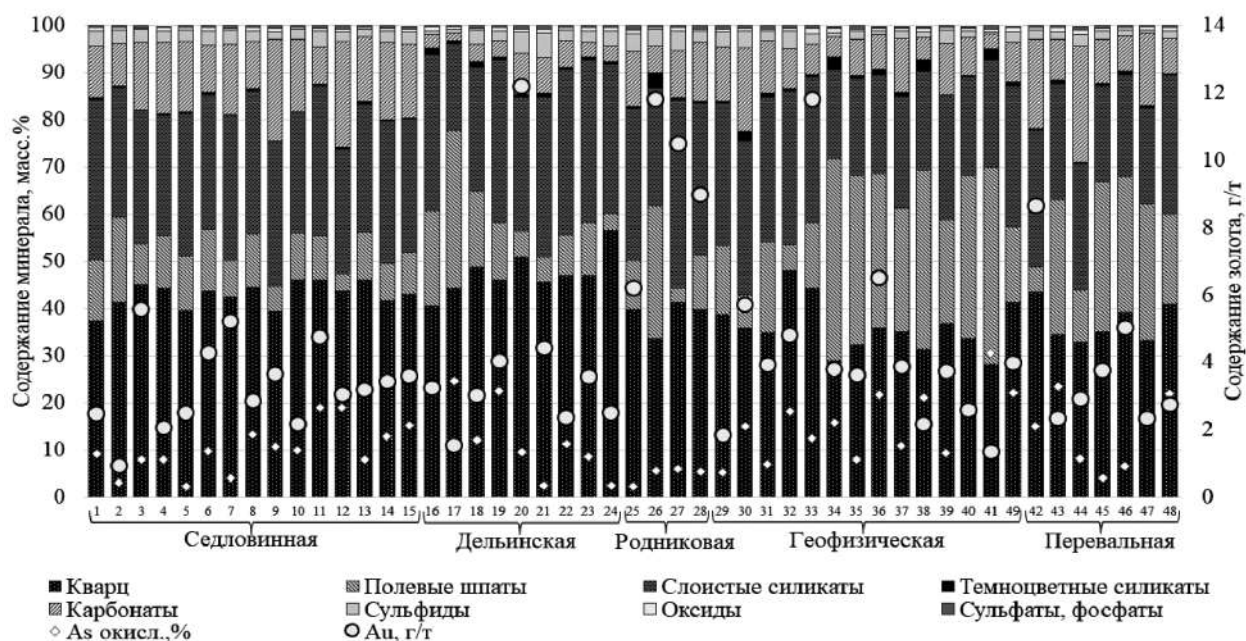


Рис. 1. Общий минеральный состав проб

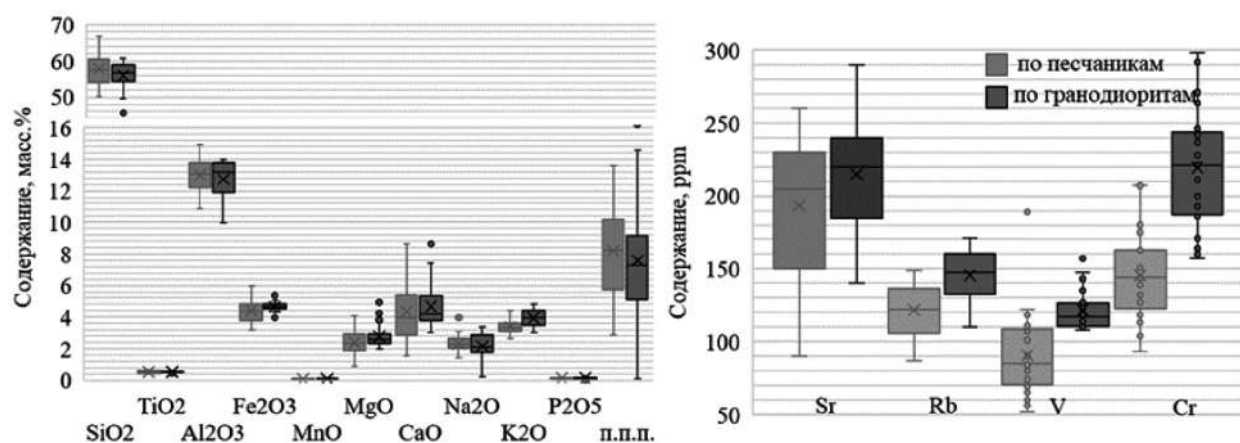


Рис. 2. Вариации состава метасоматитов по песчанникам и гранодиоритам

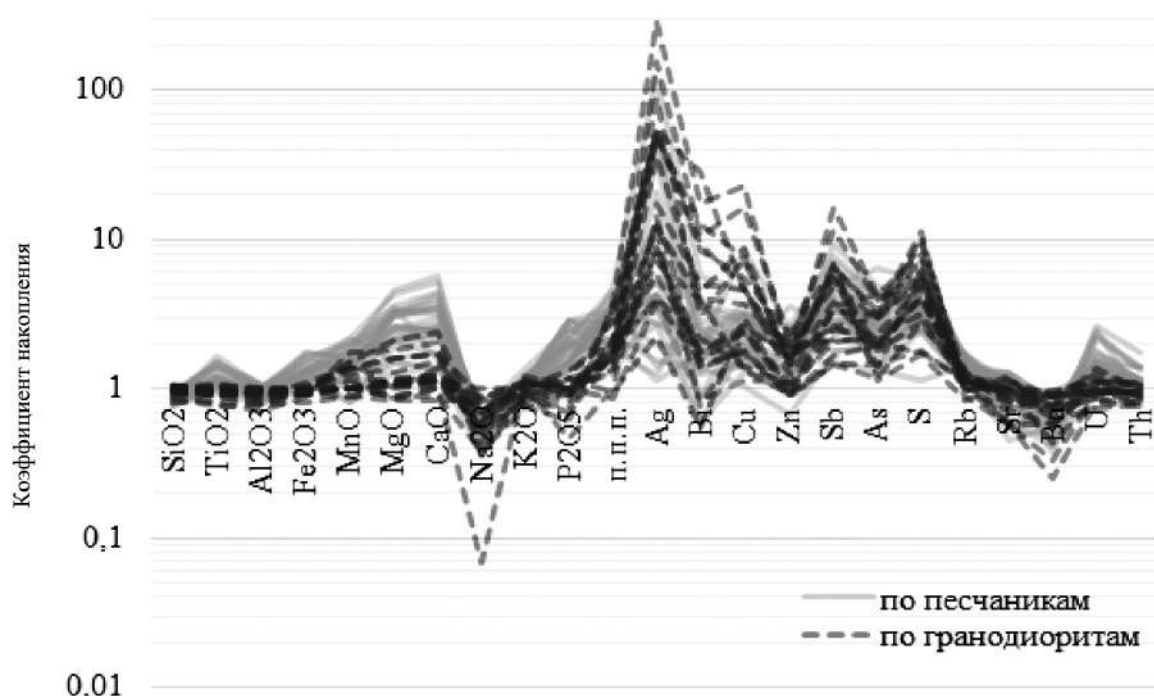


Рис. 3. Изменение петрохимического и микроэлементного состава гранодиоритов и песчанников при метасоматозе. Коэффициент накопления – отношение содержания элемента в рудоносном метасоматите к его содержанию в неизменной породе

Статистический анализ данных был проведен на основе 113 параметров:

- общий минеральный состав исходных проб по данным рентгенофазового анализа;
- содержания общей серы и углерода ( $S_{total}$ ,  $C_{total}$ );
- результаты химического анализа методами ICP-AES и ICP-MS;
- содержания благородных металлов (Au, Ag);
- тонина помола по выходу класса – 71 мкм (P-71);

- содержание ( $\alpha$ ) и извлечение ( $\epsilon$ ) элементов в гравитационный концентрат (GC), флотоконцентрат (C), хвосты (T) и черновые концентраты (SC);
- выход концентратов, гравитационных концентратов, хвостов, черновых концентратов и тяжелой фракции исходных проб  $+2.9 \text{ г/см}^3$  ( $\gamma_C$ ,  $\gamma_{GC}$ ,  $\gamma_T$ ,  $\gamma_{SC}$ ,  $\gamma_H$ );
- водородный показатель пульпы после измельчения и при флотации (pH, pHFI).

Ввиду того, что большинство параметров характеризуется логнормальным распределением,

а некоторые нормализованы на 100%, в анализе были использованы значения, преобразованные по Ачисону.

Корреляционные связи, показали наличие шести основных минерально-элементных ассоциаций:

- хлорит-актинолит-полевошпатовый (Na,  $\gamma$ T,  $\epsilon$ SsfdGC, содержания альбита, ортоклаза, микроклина, хлорита и актинолита);
- фосфатно-оксидной (P,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , V, Sc, Co);
- золото-теллур-медной (Au, Ag, Te, Cu, Pb, Cd,  $C_{\text{total}}$ ,  $\alpha$ AuGC,  $\alpha$ AgGC,  $\epsilon$ AgGC,  $\alpha$ AgC,  $\epsilon$ AgC,  $\alpha$ AsC,  $\alpha$ AuSC,  $\alpha$ AgSC,  $\epsilon$ AgSC,  $\alpha$ AuT, содержания марказита и сидерита);
- карбонатной ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , содержания анкерита и доломита);
- пирит-кварцево-слюдистой (As,  $S_{\text{total}}$ , Sb, P-71,  $\alpha$ SsfdGC,  $\gamma$ C,  $\epsilon$ AuC,  $\epsilon$ AsC,  $\alpha$ SsfdC,  $\epsilon$ SsfdC,  $\gamma$ SC,  $\epsilon$ AuSC,  $\epsilon$ AsSC,  $\alpha$ SsfdSC,  $\epsilon$ SsfdSC,  $\alpha$ FeSC,

содержания пирита, арсенопирита, кварца, мусковита, иллита);

– арсенопиритовой (As,  $\alpha$ AsGC,  $\alpha$ AsSC,  $\epsilon$ AuC, содержания арсенопирита и кварца).

Потери золота при флотации положительно коррелируют с окислением мышьяка, а также связаны первично значимыми связями с хлорит-актинолит-полевошпатовым геохимико-минеральным комплексом (медленно флотируемые сростки золота с полевыми шпатами и хлоритом). Вследствие низкого извлечения золота цианированием, можно предположить, что рассеянные частицы золота инкапсулируются в арсенопирите и являются упорными для выщелачивания. Связь извлечения золота в черновой флотоконцентрат и продуктивный раствор со степенью окисленности мышьяка проиллюстрирована на рисунке 4. На основе данных о доле окисленного мышьяка и извлечения золота в продуктивный раствор возможно разделить пробы на три композита (рис. 5).

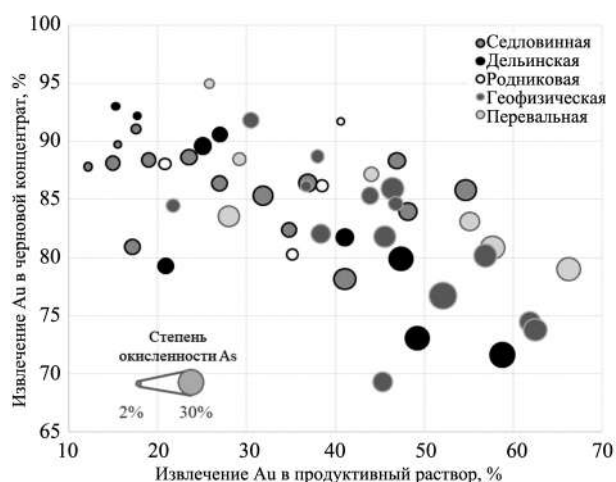


Рис. 4. Зависимость извлечений золота в продуктивный раствор и черновой флотоконцентрат от доли мышьяка окисленных форм

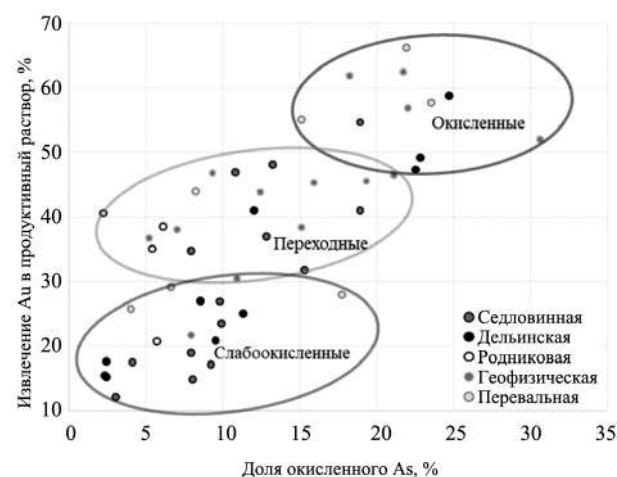


Рис. 5. Разделение проб на композиты

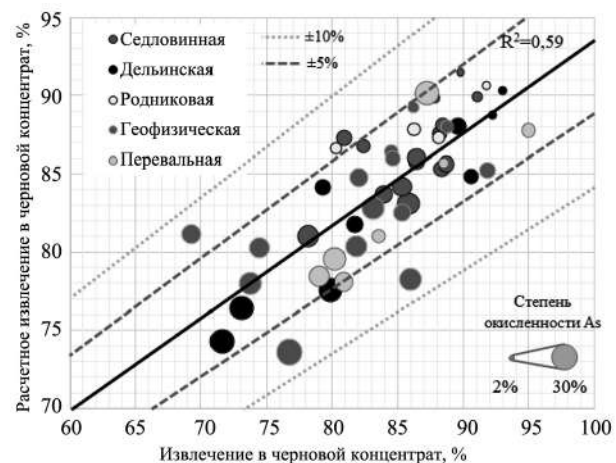


Рис. 6. Диаграмма прогнозных и опытных извлечений золота в концентрат

С целью прогноза извлечения золота в черновой концентрат ( $\epsilon\text{AuSC}$ ) был проведен регрессионный анализ. В качестве независимых переменных были выбраны содержания элементов. Прогноз извлечения золота в концентрат

$$\epsilon\text{AuSC} = 104.15 + 0.001\text{As}/\text{Au} - 0.523\text{As}_{\text{окисл}} - 0.124\text{S}_{\text{total}} + 0.677\text{C}_{\text{total}} - 0.209\text{SiO}_2 - 0.01\text{Cr} - 0.076\text{CaO} - 0.084\text{Na}_2\text{O}.$$

### Закключение

Изученные пробы представлены березитами, развивающимися по песчаникам и гранодиоритам, а также прожилковыми брекчиями. Основными рудными минералами являются пирит и арсенопирит. Существенные вариации извлечения золота в пробах, как флотацией, так и цианированием, свидетельствует о необходимости деления рудного материала по сортам. В качестве критериев предложено использовать

на основе элементного состава рассчитан с вероятностью  $R^2 = 0.59$ . Более 85% случаев попадают в 5% интервал вероятности (рис. 6). Формула включает девять наиболее значимых параметров вариативности пробы:

долю окисленного As и извлечение золота в продуктивный раствор. Связи между извлечением золота флотацией и цианированием, и степенью окисленности мышьяка свидетельствуют о том, что существенная часть золота рассеяна в арсенопирите и является упорным для выщелачивания. Такое предположение согласуется с ранее проведенными исследованиями [1].

*Часть исследований выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-90102).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Азарян А. М., Баданина Е. В., Анисимов И. С. Минеральный состав руд золотоносных метасоматитов месторождения Кутын (Хабаровский край) // Записки РМО. 2022. Ч. CLI. № 3. С. 1–21.

2. Отраслевой реестр методик анализа, допущенных (рекомендованных) к применению при лабораторно-аналитическом обеспечении ГРР на ТПИ // Федеральное агентство по недропользованию, ФГБУ «ВИМС». Москва, 2019. Лист 100–101 реестра.

3. Ханчук А. И., Иванов В. В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 11. С. 1635–1645.

4. Шевченко Б. Ф., Попеко Л. И., Диденко А. Н. Тектоника и эволюция литосферы восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 667–682.