

УДК 622.7.017: 622.75

**А.Р. Смольяков****ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СРОТКОВ В ПРОЦЕССАХ  
ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ**

Рассмотрено влияние минерального состава на плотность бинарных сротков золота с породообразующими минералами. Раскрытие минерала начинается при крупности частиц, равной максимальному размеру  $L_{\text{макс}}$  его зерен. Параметр  $L_{\text{макс}}$  определяет размер технологического сротка  $D_{\text{макс}}$ , который должен являться граничной крупностью классификации руды перед первой стадией обогащения.

Ключевые слова: минерал, золото, раскрытие, зерно, сроток, плотность, гравитационное обогащение.

**Р**аскрытие любого минерала при измельчении руды начинается при крупности частиц, не превышающих значение максимальной естественной длины  $L_{\text{макс}}$  его зерен. При этой крупности появляются первые раскрытые зерна и богатые сротки минерала, которые уже можно обогащать. В целом класс крупностью  $-L_{\text{макс}}+0$  в технологическом отношении уже подготовлен для обогащения и его следует своевременно, по мере его образования, выводить из цикла измельчения руды и направлять на обогащение, в процессе которого удаляются в хвосты раскрытые зерна пустой породы и бедные сротки с содержанием ценного компонента менее 10—12 %. Класс крупностью  $-L_{\text{макс}}+B_{\text{ср}}$  содержит сротки и раскрытые зерна обогащаемого минерала и для полного его раскрытия необходимо его доизмельчение до крупности  $-B_{\text{ср}}+0$ . Для класса  $-L_{\text{макс}}+0$  более тонкая его часть, имеющая крупность частиц обогащаемого минерала менее значения средней ширины его зерен, т.е. класс  $-B_{\text{ср}}+0$ , содержит только раскрытые частицы и не должна под-

вергаться дальнейшему измельчению. Поэтому оптимальными являются технологические схемы, в которых после каждой стадии измельчения предусмотрено выделение раскрытых частиц рудного минерала крупностью  $-B_{\text{ср}}+0$  мм и обогащение их с целью получения конечного концентрата.

Схема обогащения измельченной руды определяется технологическими свойствами минеральных частиц: их минеральным составом, размером, плотностью, электромагнитными и другими свойствами. Для процессов гравитационного обогащения золота, например, наиболее важными являются размер частиц и их плотность. Раскрытые частицы золота имеют практически постоянное значение плотности, обычно около  $17 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , и различаются друг от друга своими геометрическими параметрами. Золотосодержащие сротки отличаются друг от друга не только геометрическими параметрами, но и плотностью, которая определяется их минеральным составом и содержанием минералов. Таким образом, минеральный состав, размеры, форма и плотность

сростков определяют их технологические свойства и, следовательно, возможность и способ их эффективного обогащения.

Рассмотрим влияние минерального состава сростков на их плотность. Будем считать, что сростки в технологическом классе в диапазоне крупности  $-L_{\text{макс}}+B_{\text{ср}}$  состоят из двух минералов: рудный+нерудный, рудный + рудный и нерудный+нерудный. Определяющее значение имеют минералы, с которыми ценные компоненты образуют ассоциации.

Для анализа технологических свойств сростков наиболее важными, так сказать “крайними”, являются сростки золота с наиболее легким и наиболее тяжелым породообразующим минералом и с рудными минералами, если последние присутствуют в руде и ассоциируют с золотом. Плотность  $q$  сростка, состоящего из двух минералов — рудного и нерудного с плотностью  $q_i$  и  $q_j$ , соответственно, может быть определена по формуле

$$q = G_i(q_i - q_j) + q_j. \quad (1)$$

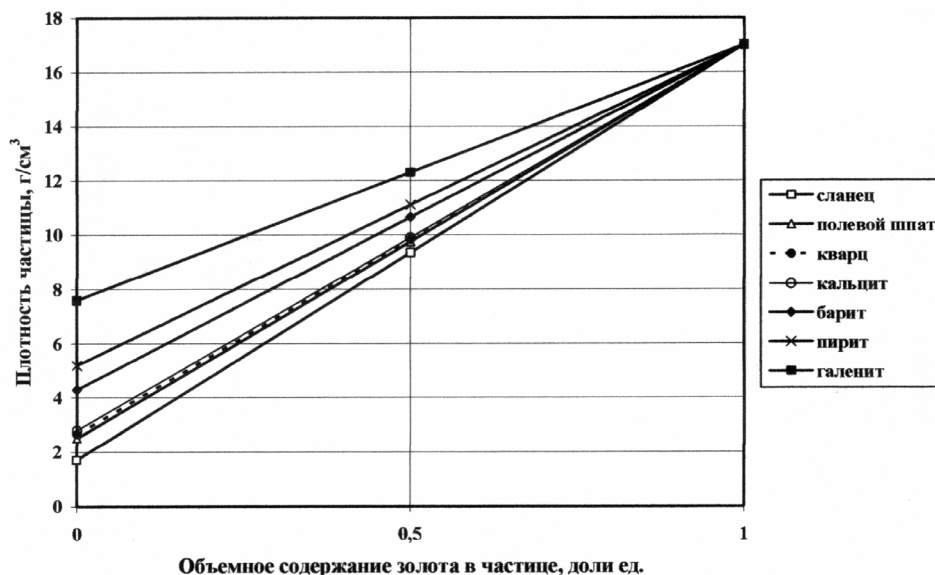
где  $G_i$  — объемное качество сростка, т.е. объемное содержание золота в сростке, доли ед. Содержание минеральных фаз в сростках определяется с помощью микроскопического метода анализа изображения (Image Analysis) [1].

При обогащении золота основной интерес представляют технологические свойства сростков золота с ассоциирующими с ним минералами. Из породообразующих минералов золотосодержащих руд наиболее низкую плотность имеют полевой шпат (2,54÷2,76), кварц (2,65), кальцит (2,7), для черносланцевых пород — углистый сланец (1,8÷2,3), а наиболее тяжелым является барит (4,3÷4,7).

Самым распространенным минералом, образующим тесные ассоциации с золотом, является кварц, поэтому значение его плотности можно принять за минимальное среди основных породообразующих минералов. Основная часть нерудных минералов, ассоциирующих с золотом, имеет плотность в интервале значений от 2,6 до 3,3. Плотность основных рудных минералов, образующих ассоциации с золотом, заключена в диапазоне значений от 4 до 8,4. В этот диапазон плотности входят гематит, магнетит, ильменит, антимонит, киноварь, аргентит, пирротин, гессит, галенит, арсенопирит, пирит и другие рудные минералы.

В некоторых месторождениях промежуточную по плотности группу минералов, ассоциирующих с золотом, образуют марматит, гетит, сидерит, сфалерит, халькопирит, азурит и оксиды марганца. Плотность минералов этой группы заключена в диапазоне значений от 3,5 до 4,4. Откладывая на диаграмме по оси абсцисс объемное содержание золота в частице, а по оси ординат значения плотности ассоциирующих с золотом минералов для каждого исследуемого типа руды, получим соответствующие зависимости плотности образующихся при измельчении руды бинарных сростков от содержания в них золота.

Так, например, для золотокварцевых руд, состоящих в основном из кварца, полевых шпатов, кальцита, хлорита и рудных минералов — пирита, галенита и сульфидов меди, зависимость плотности бинарных сростков этих минералов с золотом представлена на рис. 1. При таком минеральном составе все сростки основных нерудных минералов друг с другом имеют плотность не более 3,3. Бинарные сростки



**Рис. 1. Зависимость плотности бинарных сростков минералов с золотом от объемного содержания золота в сростке**

нерудных минералов с пиритом имеют плотность не выше 5,2. Плотность сростков золота с породообразующими минералами в зависимости от качества сростков лежит в интервале значений от 2,6 до 17.

При гравитационном обогащении руды, выбирая необходимую граничную плотность разделения  $q_0$ , можно обеспечить требуемое извлечение в тяжелый продукт сростков золота с нерудными минералами. Численную разницу в плотности минералов, достаточную для их эффективного гравитационного разделения на обогащенный и отвальный продукты, можно определить с помощью критерия концентрации  $K_k$ , который рассчитывают по формуле [2]

$$K_k = (q_T - q_{ж}) / (q_L - q_{ж}), \quad (2)$$

где  $q_T$  и  $q_L$  — плотность тяжелого и легкого разделяемых минералов,  $\times 10^3$  кг·м<sup>-3</sup>;  $q_{ж}$  — плотность суспензированной жидкости, кг·дм<sup>-3</sup>.

Если разделение минералов происходит при ньютоновских условиях, то есть в условиях свободного падения частиц, то плотность жидкости можно принять равной плотности воды (1 кг·дм<sup>-3</sup>). При значении критерия концентрации  $K_k \geq 2,5$  эффективное разделение минералов возможно в большом интервале размеров частиц. При  $K_k \leq 1,25$  эффективная сепарация гидравлическими методами будет весьма затруднительна для частиц любой крупности. В общем случае преимуществом при гравитационном обогащении является соразмерность частиц обогащаемого материала, то есть обогащение узких классов крупности, и полное раскрытие минералов.

При гравитационном обогащении золотосодержащих руд эффективное выделение в тяжелый продукт сростков золота с кварцем или другими минералами возможно при критерии концентрации  $K_k \geq 2,5$ . Для сростка

золота с кварцем из (2) для критерия концентрации получим

$$K_k = (q_c - q_{ж}) / (q_k - q_{ж}) \geq 2,5, \quad (3)$$

где  $q_c$ ,  $q_k$  — плотность сростка и разделяемой с ним свободной частицы кварца, соответственно. Из (3) можно определить плотность золотосодержащего сростка, который может быть эффективно выделен в гравитационный концентрат:

$$q_c = K_k (q_k - q_{ж}) + q_{ж}. \quad (4)$$

Принимая  $K_k = 2,5$ ,  $q_{ж} = 1$  и  $q_k = 2,65$ , получим из (4) значение граничной плотности сростка золота  $q_c = 5,125$ , которое обеспечивает его эффективное извлечение в тяжелый продукт при ньютоновских условиях процесса гравитационного обогащения.

Сросток золота с кварцем с такой плотностью будет иметь объемное качество  $G = 0,172$ , то есть  $G = 17,2\%$ , что соответствует массовой доле золота в сростке  $\alpha = 57\%$ . Таким образом, все сростки золота с кварцем, содержащие более  $57\%$  золота, будут эффективно извлекаться в тяжелый продукт при мокром гравитационном обогащении. Для сростков золота с хлоритом в тяжелый продукт будут извлекаться все сростки с массовой долей золота более  $76\%$ , что соответствует объемному содержанию золота в сростке более  $30\%$ .

Сростки более низкого качества будут переходить как в тяжелый, так и в легкий продукт в зависимости от их плотности и размера. Так, например, сростки золота с кварцем, содержащие более  $45\%$  массовых золота и имеющие размер более  $0,18$  мм, будут переходить в тяжелый продукт. Более мелкие сростки такого же качества пойдут в легкий продукт. Для сростков с массовым содержанием золота  $30\%$

такой граничной крупностью является размер сростков около  $0,5$  мм. Сростки крупнее  $0,5$  мм будут переходить преимущественно в тяжелый продукт, а более мелкие — в легкий продукт. С учетом критерия концентрации можно рассчитать качество и размер любых сростков, которые будут переходить в тяжелый или легкий продукт при гравитационном обогащении руды.

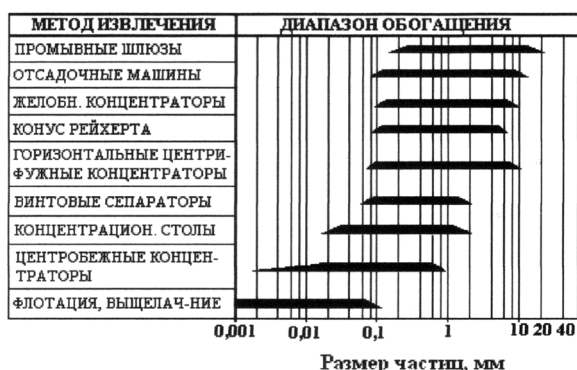
С учетом естественного максимального размера  $L_{\max}$  золотин в руде можно определить максимальный размер сростка золота с породообразующими минералами, который может быть извлечен в тяжелую фракцию. Так выше было рассчитано, что сростки, содержащие золота более  $57\%$  массовых или  $17\%$  объемных, будут эффективно извлекаться в тяжелый продукт. Размер  $D_{\max}$  соответствующего сростка можно рассчитать по формуле

$$D_{\max} = L_{\max} / \sqrt[3]{G}, \quad (5)$$

где  $G$  — объемное качество сростка, доли ед.

Для сростка золота с кварцем при  $G \geq 17\%$  получим  $D_{\max} = 1,8 L_{\max}$  и, например, при естественном максимальном размере золотин в руде  $L_{\max} = 0,5$  мм максимальный размер технологического сростка составит  $D_{\max} = 0,9$  мм, то есть в данном случае сростки золота с породообразующими минералами размером более  $0,9$  мм не могут быть извлечены методами гравитационного обогащения в тяжелый продукт. Для эффективного обогащения таких сростков необходимо их доизмельчение.

Все сростки, для которых объемное содержание золота превышает  $17\%$ , будут эффективно извлекаться в тяжелый продукт при гравитационном обогащении руды. Частично будут переходить в тяжелый продукт и сростки более низкого качества, на-



**Рис. 2. Диапазоны действия различных аппаратов для обогащения золотосодержащего минерального сырья**

пример, сработки золота с кварцем размером более 0,5 мм при объемном содержании золота в сработке более 7 %. Предельный размер сростков такого качества при естественном максимальном размере золотин в руде и в сработках  $L_{\text{макс}} = 0,5$  мм составит 1,2 мм. Отношение объемов сростка  $V_C$  и вкрапления в него золота  $V_{Au}$  составляет при этом  $V_C / V_{Au} = 14$ . Следовательно, 1 объем золота может привести в тяжелый продукт до 14 объемов кварца или другого породообразующего минерала с близким к кварцу удельным весом.

Таким образом, получив с помощью анализатора изображения естественную гранулометрическую характеристику и структурно-геометрические параметры ценного минерала в руде, не производя при этом никаких технологических экспериментов, можно по значению параметра  $V_{\text{ср}}$  определить предельную крупность

измельчения руды, необходимую для полного раскрытия минерала, а максимальный размер его зерен  $L_{\text{макс}}$  определяет крупность измельчения руды, при которой минерал начинает раскрываться, и крупность технологических сростков, которые можно эффективно извлекать в концентрат при гравитационном или другом методе обогащения руды. Следовательно, параметр  $L_{\text{макс}}$  определяет максимальный размер

технологического сростка  $D_{\text{макс}}$ , который должен являться граничной крупностью классификации руды перед первой стадией обогащения. Материал, крупность которого превышает значение  $D_{\text{макс}}$ , будет содержать только бедные сростки ценного минерала, которые не могут быть выделены в концентрат и поэтому необходимо их доизмельчение.

В зависимости от крупности вкраплений зерен золота в руде и технологических свойств получаемых при измельчении руды сростков выбираем и соответствующее оборудование для извлечения золота и/или процесс обогащения. Для этого достаточно наложить интегральные гранулометрические характеристики зерен золота в руде ( $-L_{\text{макс}}+0$ ) и технологических сростков ( $-D_{\text{макс}}+0$ ) на диапазоны крупности обогащения на рис. 2 и выбрать оптимальное оборудование.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Choi W.Z., Adel G.T. and Yoon R.H. Liberation Modeling Using Automated Image Analysis. /Int. J. Miner. Process., v. 22, April 1988, p. 59—73.

2. Берг Р.О. при участии К. Милла. Технология гравитационного обогащения: Пер. с англ./Пер. Е.Д. Бачевой. — М.: Недра, 1990. — 574 с. **ГЛАВ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Смольяков А.Р. — кандидат технических наук, a\_smolyakov@mail.ru, Московский государственный горный университет.