

ГОРНАЯ КНИГА

ISSN 0236-1493

ГОРНЫЙ

ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
БЮЛЛЕТЕНЬ

(НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ)

MINING INFORMATIONAL
AND ANALYTICAL
BULLETIN

(SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)

СПЕЦИАЛЬНЫЙ
ВЫПУСК 24

2017

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ
И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ
НЕДР СЕВЕРА

А.В. Александров, Т.Н. Александрова,
Н.М. Литвинова, А.В. Рассказова

КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ТРУДНООБОГАТИМЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД ЯКУТСКОГО КЛАСТЕРА

В промышленности России золотодобыча – одна из перспективных областей развития, имеющая значительный потенциал роста. Российские месторождения с упорными рудами условно можно разделить на четыре кластера: Красноярский, Забайкальский, Дальневосточный и Якутский. Разведанные запасы рудного золота Якутского кластера сосредоточены в основном на крупных золоторудных месторождениях — Куранах, Нежданинском и Кючус.

Базовым переделом для переработки руд коренных месторождений является цианирование. Тетраэдрит – главный минерал-носитель серебра в исследуемых пробах (примесь серебра варьируется от 12 до 22 масс. %).

Серебро в условиях кислотного высокотемпературного автоклавного окисления переходит из сульфидной формы в ярозитовые соединения и становится упорным для цианидных растворов. Ведение цикла селективной «серебряной» флотации позволит избежать этих проблем. Исследована динамика извлечения золота, серебра и органического углерода в концентрат. Установлены кинетические закономерности флотационного извлечения золота и серебра. В результате проведенных исследований предложена комбинированная гравитационно-флотационная схема обогащения, в которой предусмотрено гравитационное выделение крупного свободного золота, затем серебряная флотация и далее на хвостах флотации реализуется золотосульфидная флотация.

Ключевые слова: золоторудные месторождения, цианирование, серебро, тетраэдрит, гравитационное обогащение, селективная серебряная флотация, золотосульфидная флотация, гравитационно-флотационная схема обогащения, гидрометаллургическая переработка.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-40-49

Введение

В промышленности России золотодобыча – одна из перспективных областей развития, имеющая значительный потенциал роста. Основные запасы золота располагаются на территориях Краснояр-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16–05–00460 А.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11 (специальный выпуск 24). С. 40–49.

© А.В. Александров, Т.Н. Александрова, Н.М. Литвинова, А.В. Рассказова, 2017.

ского края, республики Саха (Якутия), Магадана, Забайкальского края и Иркутской области. Российские месторождения с упорными рудами условно можно разделить на четыре кластера:

1. Красноярский кластер (Олимпиадинское, Благодатное, Титумхта, Ведугинское, Васильевское, Удерейское, Боголюбовское).
2. Забайкальский кластер (Ключевское, Итакинское, Дарасунское, Талатуйское, Уконик, Наседкино, Солонеченское).
3. Дальневосточный кластер (Покровское, Пионер. Маломырское, Албазинское, Куранахское, Нижнеякоkitское).
4. Якутский кластер (Кючус, Нежданинское).

Разведанные запасы рудного золота Якутского кластера сосредоточены в основном на крупных золоторудных месторождениях — Куранах, Нежданинском и Кючус. Эти запасы являются реальным резервом для наращивания золотодобычи [1]. Пять российских объектов, относящихся к геолого-промышленному типу месторождений золото-кварц-сульфидных руд в углеродсодержащих песчано-сланцевых толщах — Сухой Лог, Наталкинское, Олимпиадинское, Благодатное и Нежданинское — заключают почти две трети золота страны. В золоторудных регионах мира всегда встречаются месторождения других полезных ископаемых (серебро, вольфрам, сурьма, уран, полиметаллы и др.). Примером может служить территория, непосредственно примыкающая к Нежданинскому рудному узлу, где выявлены месторождения серебра, вольфрама и полиметаллов. Данное месторождение по комплексности оруденения не является исключением среди других объектов Якутии. Принципиально такая же особенность у месторождений Кючус, Куранах, Сарылах и др., хотя профиль попутных металлов на их площадях существенно иной. Из изложенного очевидна необходимость комплексного освоения данных руд с повышением степени извлечения попутных компонентов.

Подходы к обогащению упорных руд благородных металлов

Методы борьбы с адсорбционным активным углистым природным веществом

Известно, что базовым переделом для переработки руд коренных месторождений является цианирование. Таким образом, золото-сульфидные концентраты обогащения являются исходным питанием для данного передела. Поскольку рудное углеродное вещество оказывает негативное влияние на дальнейшую переработку, то одной из основных задач при разработке технологии обогащения рассматривается снижение содержания углеродного вещества в золотосульфидных концентратах [2–6]. На сегодняшний день известно несколько подходов к решению данного вопроса. Одним из таких подходов к решению данного вопроса выступает углеродная флотация [4–6]. Уг-

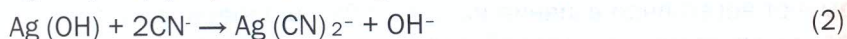
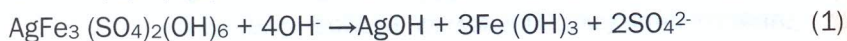
леродная флотация, находясь в «голове» технологической схемы позволяет выделить до 1/3 всего углерода. Рудное углеродное вещество является природногидрофобным, исходя из этого, для его концентрирования необходимы реагенты вспениватели. Выбор оптимально вспенивателя, его расхода тонины помола для данной операции и времени флотации осуществляют для каждого объекта индивидуально. Иногда из-за некоторых особенностей минералогического характера данная операция не применима, ввиду высоких потерь золота с углеродным продуктом [6]. На сегодняшний день в мире ведутся разработки альтернативных типов флотомашин для улучшения технологических и эксплуатационных характеристик существующих. Одним из актуальных направлений является внедрение машин «гидродинамического» типа. За счет оригинального взаимодействия пузырька воздуха и минерала, малого размера пузырька и тесного контакта с минералом машины Jameson Cell хорошо себя зарекомендовали и используются на многих месторождения мира [7]. Еще одним направлением в области снижения рудного углеродного вещества выступает применения различного типа депрессоров органического углерода. На сегодняшний день российские и зарубежные производители реагентов разработали ряд депрессоров органического углерода, которые показывают высокую эффективность [4, 6].

Оптимизация технологической схемы обогащения, «серебряная» флотация

Серебро в условиях классического кислотного высокотемпературного автоклавного окисления переходит из одной упорной формы в другую. Серебро, содержащееся в сульфидах, достаточно полно высвобождается, однако затем большая часть связывается ярозитовыми соединениями $\text{AgFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, осаждающимися в твердой форме после окисления и становится упорным для цианидных растворов:



Поэтому, перед операцией цианирования, обычно [8] проводят щелочную обработку при 80–95 °С в течение 2–4 часов для перевода ярозитов в гидроксиды железа (1) и серебра в доступную для цианирования форму (2):



Для устранения этих дополнительных дорогостоящих операций на стадии обогащения возможна реализация цикла «серебряной» флотации. Важен правильный выбор схемы рудоподготовки перед флотацией. Специалисты Исследовательского института цветных металлов (Ху-

нань) исследовали возможность повышения извлечения серебра, ассоциированного с сульфидными минералами. Крупность вкраплений ценного компонента размером –50 мкм обуславливает необходимость тонкого измельчения для улучшения раскрытия. При оптимальном доизмельчении в цикле медной флотации (73 % класса –37 мкм) удалось повысить извлечение серебра на 2,68 %. С металлургической точки зрения большее содержание серебра в концентрате не только более экономически выгодно, но и более технологически удобно [9].

Удаление мышьяк-содержащих минералов из концентратов является важной задачей ввиду ужесточения природоохранных требований к выбросам. В университете Queensland (Австралия) были проведены исследования по флотационному извлечению меди и серебра, ассоциированных с сульфидными минералами, с удалением мышьяка с хвостами обогащения. Мышьяк в питании медной флотации представлен арсенопиритом (FeAsS), который частично уходит в хвосты при первой стадии медной флотации. Однако, теннантит (сульфоарсенид меди) проявляет близкие флотационные свойства с сульфидными минералами меди и обуславливает высокое содержание мышьяка в черновом концентрате. Доизмельчение черновых концентратов лишь частично повышает раскрытие теннантита. Селективность извлечения меди существенно повысилась при более низком извлечении меди и серебра. Различия во флотационной активности сульфидных минералов меди и теннантита увеличиваются при более тонком измельчении. Варьирование pH и Eh также приводит к повышению селективности меди относительно теннантита при малом размере частиц обогащаемого материала [10].

Материал и методы исследования

В данной работе для повышения комплексности использования руды одного из крупных месторождений Якутского кластера и снижения эффекта «прег-роббинга» при последующей переработке концентратов изучена возможность реализации адаптированной по топологии и реагентному режиму комбинированной гравитационно-флотационной схемы обогащения с получением концентратов, пригодных для последующего автоклавного окисления и цианирования для упорной золото-содержащей руды одного из месторождений Якутсконо кластера.

Результаты и обсуждение

В исследуемой пробе руды самородное золото наблюдается в виде небольших округлых и овальных включений в пирите, где оно встречается совместно со сфалеритом, галенитом, халькопиритом и тетраэдритом. В гравитационных концентратах часто наблюдается самородное золото в сростании с арсенопиритом. Тетраэдрит (фрей-

бергит) – главный минерал-носитель серебра в пробах месторождения – кристаллизуется в виде включений замещения в пирите или в трещинах карбонат-кварцевых прожилков, реже формирует структуры замещения минералов более ранних парагенезисов. Примесь серебра в тетраэдрите варьируется от 12 до 22 масс. % (рис. 1–2).

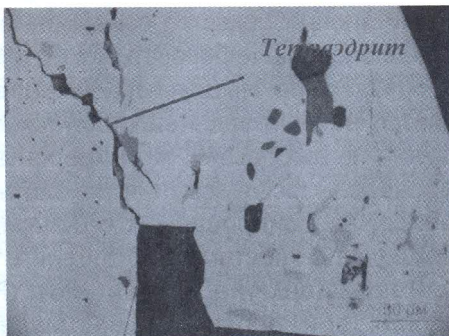
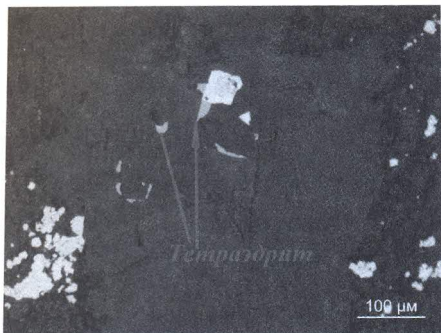


Рис. 1. Развитие тетраэдрита по трещинам в карбонат-кварцевом прожилке

Рис. 2. Тетраэдрит по трещинам в пирите

Основная часть золота в исследуемой пробе находится в самородной форме, а основную часть серебра содержит минерал тетраэдрит (блеклая сурьмяная руда). Остальная часть золота и серебра находится в твердых растворах сульфидных минералов (рис. 3–4).

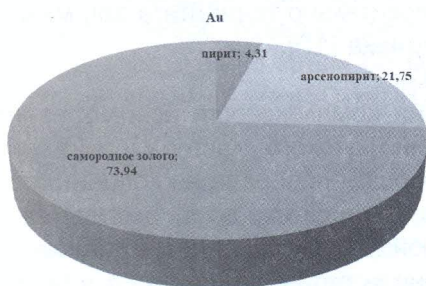


Рис. 3. Распределение золота по основным минералам-носителям



Рис. 4. Распределение серебра по основным минералам-носителям

Таким образом, серебро почти полностью (88 %) сосредоточено в одном минерале – тетраэдрите, в котором его содержание в среднем принято около 18 %. Оставшаяся часть серебра находится в виде примеси в самородном золоте и в виде твердого раствора в сульфидных минералах.

В настоящем исследовании в качестве собирателя использовали реагент, который представляет собой малополярный сульфгидрильный собиратель класса тионоккарбаматов (основное вещество N-аллил-О-изобутилтионоккарбамат) и считается эффективным реагентом для селективного повышения флотоактивности серосодержащих минералов меди (в нашем случае – тетраэдрита) [11]. В качестве депрессора органического углерода использовался реагент, который представляет собой смесь углеводородного полимера и красителя. В состав реагента входит крезоловая кислота [6]. Для установления кинетических зависимостей в цикле «серебряной» флотации проводился фракционный сьем флотоконцентрата. Результаты операционного извлечения золота, серебра и органического углерода приведены на рис. 6–7.

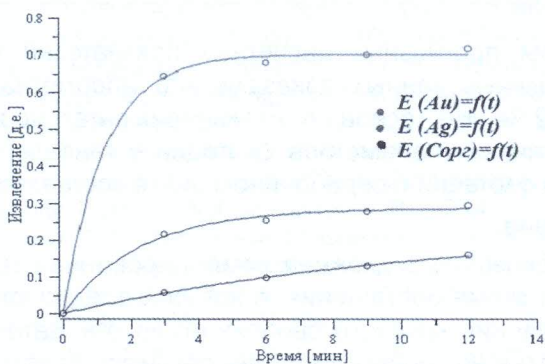


Рис. 5. Зависимость извлечения золота, серебра и органического углерода в концентрат от времени для цикла «серебряной» флотации

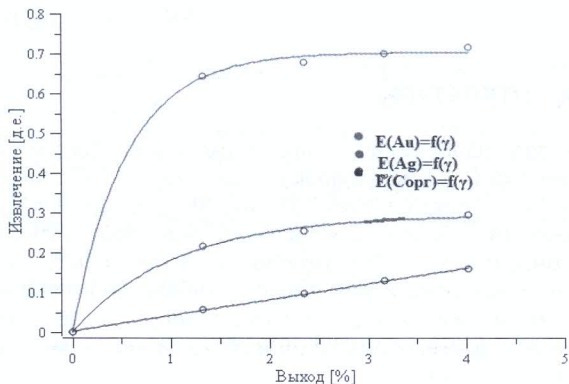


Рис. 6. Зависимость извлечения золота, серебра и органического углерода в концентрат от выхода для цикла «серебряной» флотации

С использованием кинетического подхода с учетом нефлотируемого остатка примем за основу уравнение кинетики флотации [12]:

$$\varepsilon = a \cdot (1 - e^{-Kt}).$$

Для данного объекта исследования полученные параметры уравнения кинетики для серебра и золота приведены в табл. 1:

Таблица 1

Параметры уравнения кинетики в цикле «серебрянной» флотации

Элемент	Параметр а	Параметр К
серебро	0,7	- 0,81
золото	0,29	- 0,44

Сравнения прогнозных расчетных показателей извлечения и экспериментальных данных показали, что абсолютная ошибка не превышает 2 %. На основании экспериментально-теоретической оценки кинетических параметров флотации установлено, что эффективное время флотации в серебрянном цикле составляет 5–6 минут.

Заключение

Таким образом, предложена комбинированная гравитационно-флотационная схема обогащения, в которой предусмотрено гравитационное выделение крупного свободного золота, затем серебрянная флотация и далее на хвостах флотации реализуется золотосульфидная флотация. Основное преимущество данной топологии схемы является выделение серебра в отдельный продукт, что значительно снижает его потери при дальнейшей гидрометаллургической переработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор золотодобывающие промышленности России за 2014–2015 [Электронный ресурс] Союз золотопромышленников // URL: [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-gold-survey-2016-rus/\\$FILE/ey-gold-survey-2016-rus.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-gold-survey-2016-rus/$FILE/ey-gold-survey-2016-rus.pdf).
2. Седельникова Г. В. Мировая практика переработки упорных золотосульфидных руд и концентратов // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2014): материалы Международного совещания (16–19 сентября 2014 г.) /АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения» — Алматы, ТОО «Арко» — Караганда – 2014 – 34–38 с.
3. Мамаев Ю. А. К вопросу извлечения золота из упорных руд / Ю. А. Мамаев, Т. Н. Александрова, Н. М. Литвинова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – № 2. – с. 102–109.

4. *Afenya P. M.* Treatment of carbonaceous refractory gold ores // Minerals Engineering. – 1991. – Vol.4. – No 7-11. – pp. 1043-1055.

5. *Александрова Т. Н.* Развитие методов оценки и управления эколого-технологическими системами при рудной и россыпной золотодобыче и использовании вторичного сырья в Дальневосточном регионе: Дис. ... докт. техн. – Чита: ГОУВПО «Читинский государственный университет», 2008. – 433 с.

6. *Александрова Т. Н.* Удаление сорбционно-активных углеродистых веществ из упорных золотосульфидных руд и концентратов месторождения Майское / Т. Н. Александрова, В. Н. Цыплаков, А. О. Ромашев, Д. Н. Семеняхин // Обогащение руд. – 2015. – № 4. – с. 3-8.

7. *Чистяков А. А.* Полупромышленные испытания флотомашины Jameson Cell на золотоизвлекательной фабрике ОАО «Ресурсы Албазино» / А. А. Чистяков, В. Н. Ковалев, В. В. Голиков, Б. В. Аксенов, Р. Рахбани // Обогащение руд. – 2014. – № 4. – с. 23-26.

8. *Patino F.* Kinetic Modeling of the Alkaline Decomposition and Cyanidation of Argentojarosite / F. Patino, A. Roca, M. Reyes, M. Cruells, I. Rivera, L. Esperanza Hernández// Sociedad Química de México. – 2010. – Vol. 54(4) – pp. 216-222.

9. *Daixiong Ch.* Mineralogical Characterization of a Polymetallic Sulfide Ore to Improve Silver Recovery / Chen Daixiong, Xiao Jun // Journal of Wuhan university of technology-materials science edition. – Vol. 32. – 2017. – № 3. – pp. 501-507.

10. *Graham L.* Flotation separation of copper sulphides from arsenic minerals at Rosebery copper concentrator / Long Graham, Peng Yongjun, Bradshaw Dee // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 66-68 (SI). – 207-214.

11. *Игнаткина В. А.* Селективное повышение флотоактивности сульфидов цветных металлов с использованием сочетаний сульфгидрильных собирателей / В. А. Игнаткина, В. А. Бочаров, Ф. О. Милович, П. Г. Иванова, Л. С. Хачатрян // Обогащение руд. – 2015. – № 3. – с. 18-24.

12. *Рубинштейн Ю. Б.* Кинетика флотации / Ю. Б. Рубинштейн, Ю. А. Филипов. – М.: Недра, 1980. – 375 с. **ГЛАВ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Александров Александр Васильевич*¹ – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,

Александрова Татьяна Николаевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой Обогащения полезных ископаемых, Санкт-Петербургский горный университет, alexandrovat10@gmail.com,

*Литвинова Наталья Михайловна*¹ – кандидат технических наук, заведующая Лабораторией обогащения полезных ископаемых,

*Рассказова Анна Вадимовна*¹ – кандидат технических наук, научный сотрудник,

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, (ИГД ДВО РАН).

A.V. Alexandrov, T.N. Alexandrova, N.M. Litvinova, A.V. Rasskazova

THE COMBINED TECHNOLOGIES OF PROCESSING OF REFRACTORY GOLD ORES OF THE YAKUT CLUSTER

Russian gold mining industry is one of perspective areas of development having the considerable potential of increase. Russian refractory ore deposits can be conventionally divided into four clusters: Krasnoyarsk, Transbaikal, Far East and Yakut. Explored reserves of ore gold of the Yakut cluster are concentrated generally in large-scale gold deposits — Kuranakh, Nezhdaninsk and Kyuchus.

Basic technological method of gold ore processing is cyanidation. Tetrahedrite is the main host mineral of silver in the samples (silver content varies from 12 to 22 % mass.).

Silver transforms from sulphide form into jarosite compounds in the acid high-temperature auto-clave oxidation process. Jarosite does not react with cyanide solution. Addition of a cycle of the selective silver flotation will allow avoiding these problems. Dynamics of extraction of gold, silver and organic carbon to concentrate is researched. Flotation kinetics of gold and silver extraction are determined. As a result of the conducted research the combined gravitational and flotation processing flow sheet was developed. Gravity concentration of coarse gold particles is the first stage; silver flotation is the second one; gold-sulfide flotation of silver flotation tailings is the third stage. The main advantage of this flow sheet topology is the extraction of silver to separate product that considerably reduces its losses at further hydrometallurgical processing.

Key words: gold deposits, cyanidation, silver, tetrahedrite, gravity concentration, selective silver flotation, gold-sulfide flotation, gravity-flotation flow sheet of mineral processing, hydrometallurgical processing.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-40-49

AUTHORS

Alexandrov A.V., DPhil, Professor, chief researcher of Federal state budgetary institution of science Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IGD FEB RAS), Russia;

Alexandrova T.N., DPhil, Professor, head of department of Mineral processing, St. Petersburg Mining University, alexandrovat10@gmail.com, Russia;

Litvinova N.M., Cand.Tech.Sci. (Ph.D. in Technical Science), head of Mineral Processing Laboratory, Mining Institute Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia;

Rasskazova A.V., Cand.Tech.Sci. (Ph.D. in Technical Science), researcher, Mining Institute Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia.

REFERENCES

1. *Obzor zolotodobyvajushhie promyshlennosti Rossii za 2014-2015 [Jelektronnyj resurs] Sojuz zolotopromyshlennikov*. URL: [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-gold-survey-2016-rus/\\$FILE/ey-gold-survey-2016-rus.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-gold-survey-2016-rus/$FILE/ey-gold-survey-2016-rus.pdf).

2. Sedel'nikova G. V. *Mirovaja praktika pererabotki upornyh zolotosul'fidnyh rud i koncentratov*. Progressivnye metody obogashhenija i kompleksnoj pererabotki prirodnogo i

tehnogenogogo mineral'nogo syr'ja (Plaksinskie chtenija - 2014): materialy Mezhdunarodnogo soveshhanija (16-19 sentjabrja 2014 g.). AO «Centr nauk o Zemle, metallurgii i obogashhenija» Almaty, TOO «Arko», Karaganda, 2014, pp. 34-38.

3. Mamaev Ju. A. K voprosu izvlechenija zolota iz upornyh rud (On the issue of gold extraction from refractory ores). Ju. A. Mamaev, T. N. Aleksandrova, N. M. Litvinova. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznych iskopaemyh. 2009. no 2. pp. 102-109.

4. Afenya P. M. *Minerals Engineering*. 1991. Vol.4. no 7-11. pp. 1043-1055.

5. Aleksandrova T. N. *Razvitie metodov ocenki i upravljenija jekologo-tehnologicheskimi sistemami pri rudnoj i rossypnoj zolotodobyche i ispol'zovanii vtorichnogo syr'ja v Dal'nevostochnom regione*: Dis. ... dokt. tehn. Chita: GOUVPO «Chitinskij gosudarstvennyj universitet», 2008. 433 p.

6. Aleksandrova T. N. *Obogashhenie rud*. 2015. no 4. pp. 3-8.

7. Chistjakov A. A. *Obogashhenie rud*. 2014. no 4. pp. 23-26.

8. Patino F. *Kinetic Modeling of the Alkaline Decomposition and Cyanidation of Argentarosite*. F. Patino, A. Roca, M. Reyes, M. Cruells, I. Rivera, L. Esperanza Hernández. Sociedad Química de México. 2010. Vol. 54(4). pp. 216-222.

9. Daixiong Ch. Mineralogical Characterization of a Polymetallic Sulfide Ore to Improve Silver Recovery / Chen Daixiong, Xiao Jun // *Journal of Wuhan university of technology-materials science edition*. Vol. 32. 2017. no 3. pp. 501-507.

10. Graham L. Flotation separation of copper sulphides from arsenic minerals at Rosebery copper concentrator. Long Graham, Peng Yongjun, Bradshaw Dee. *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 66-68 (SI). pp. 207-214.

11. Ignatkina V. A. *Obogashhenie rud*. 2015. no 3. pp. 18-24.

12. Rubinshtejn Ju. B. *Kinetika flotacii* (Flotation Kinetics). Moscow: Nedra, 1980. 375 p.

