

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / MINERAL PROCESSING

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.64>

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБОГАЩЕНИЯ
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ

Научная статья

Саломатова С.И.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-4293-6646;

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, Якутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ssalomatova[at]mail.ru)

Аннотация

Статья посвящена проблеме извлечения мелкого и тонкого золота при доводке золотосодержащих продуктов обогащения. Флотационный способ остается практически единственным при обогащении тонких классов крупности, основной проблемой технологии флотации руд многих типов является сокращенное число перечистных операций или даже их полное отсутствие, обусловленное наличием в рудах труднофлотируемых частиц золота (крупных, в сростках, с покровными образованиями и т.д.), которые с трудом перейдя в концентрат, могут теряться в перечистках.

Наиболее рациональным является вариант получения флотационного концентрата высокого качества и промпродуктов с последующей их переработкой по другим комбинированным схемам. В этом случае упрощается задача флотационной доводки черного концентрата наподобие «снятия золотой головки» в гравитационных схемах. При этом необязательно проводить традиционные схемы флотационной перечистки.

В разработанном в лаборатории «Обогащение полезных ископаемых» ИГДС СО РАН способе флотации разделение минеральных частиц происходит по гидрофобности в тонком слое на поверхности вращающегося потока воды (пульпы).

Представлены результаты экспериментальных исследований проб продуктов переработки золото-сурьмяной руды месторождения «Сентачан».

Ключевые слова: извлечение мелкого и тонкого золота, центробежная флотация.

THE RESULTS OF COMPARATIVE EXPERIMENTAL STUDIES OF ENRICHMENT OF GOLD-BEARING
PRODUCTS

Research article

Salomatova S.I.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-4293-6646;

¹ Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

* Corresponding author (ssalomatova[at]mail.ru)

Abstract

The article is dedicated to the problem of extraction of fine-grained and fine-dispersed gold in the process of refining gold-containing enrichment products. The flotation method remains practically the only method for enrichment of fine particle size classes; the main problem of flotation technology of many types of ores is the reduced number of refining operations or even their complete absence, caused by the presence in ores of hardly flocculated gold particles (large, in clusters, with cover formations, etc.), which are difficult to convert to concentrate and can be lost in the refining.

The most rational is the option of obtaining flotation concentrate of high quality and intermediate products, with their subsequent processing by other combined schemes. In this case, the task of flotation fine-tuning of the crude concentrate is simplified, much like the "removal of the gold head" in the gravity schemes. In this process, it is not necessary to carry out traditional schemes of flotation refinement.

In the method of flotation developed in the laboratory "Mineral processing" of N.V. Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, separation of mineral particles is carried out by hydrophobicity in a thin layer on the surface of the rotating flow of water (pulp).

The results of experimental studies of samples of processed products of gold-antimony ore of the Sentachan deposit are presented.

Keywords: fine-grained and fine-dispersed gold recovery, centrifugal flotation.

Введение

При обогащении золотосодержащих руд одной из проблем является эффективное извлечение мелкого и тонкого золота. Основная масса золота менее 70 мкм гравитационными методами не извлекается. Флотация остается практически единственным способом обогащения тонких классов крупности. При этом основной проблемой технологии флотации руд многих типов является сокращенное число перечистных операций или даже их полное отсутствие, обусловленное наличием в рудах труднофлотируемых частиц золота (крупных, в сростках, с покровными образованиями и т.д.), которые с трудом перейдя в концентрат, могут теряться в перечистках. Поэтому на многих фабриках предпочитают получать менее богатые концентраты, но с более высоким извлечением в них золота [1].

Например, для упорных в технологическом отношении углистых золотомышьяковых руд, с применением развитой схемы флотационного обогащения, с двумя перечистками коллективного концентрата и трех ступенчатой контрольной

флотации и дополнительных операций дофлотации хвостов и промпродуктов, удалось получить отвальные хвосты с содержанием золота ниже 1 г/т при извлечении в концентрат 92% [2]. При этом качество полученных флотоконцентратов не превышает 30 г/т, при выходе 5% и выше от исходной руды.

Во флотационный концентрат обычно переходят сульфидные минералы, а также породообразующие минералы, где свыше 60% материала силикаты и алюмосиликаты. Породообразующие минералы попадают в концентрат, в основном, в виде шламистых частиц, а сульфиды – в силу одинаковой с золотом флотуемости. Для последующей перечистки концентратов от пустой породы иногда применяют комбинированный способ доводки, который сводится к дополнительной классификации материала на песковую и шламовую фракции и в получении в шламовой фракции отвальных хвостов [2].

Снижение доли сульфидных минералов во флотоконцентратах в цикле перечистки проводят в режиме депрессии некоторых из них. При обработке рядовых золотосодержащих руд, где основные сульфидные минералы представлены пиритом и арсенопиритом, процесс селективной флотации часто заключается в разделении именно этих минералов [3].

В одной из работ [4] для снижения выхода концентрата, поступающего на цианирование и повышения его качества, полученные черновые флотационные концентраты подвергались двум последовательным перечистным операциям флотации. Реагентный режим при этом регулировался только по значению pH добавлением соды (1000 г на тонну концентрата) для депрессии сульфидов. Исследования показали, что первая перечистная флотация сокращает выход концентрата в среднем на 50%. В результате двух перечисток получен концентрат с содержанием золота 75 г/т, при извлечении 82-86% от операции флотации и выходе концентрата 2,4-2,9%. Суммарный выход промпродуктов составляет 6,5-7 %. В эти продукты извлекается от 8 до 11% золота. Содержание металла в первом промпродукте (3,2-5 г/т) примерно соответствует содержанию золота в исходной руде. Содержание металла во втором промпродукте находится в пределах 12-19 г/т.

Традиционные схемы доводки с применением флотационных перечисток в целом решают задачу повышения качества, но при этом снижается сквозное извлечение металлов из руды. Вся сложность традиционной флотационной перечистки состоит в том, что пенный продукт переводится в объем пульпы и в последующем происходит перефлотация, где действительно высока вероятность потери труднообогатимой фракции золота, и в этих случаях необходима тонкая регулировка процесса в смысле поддержания оптимального реагентного режима, продолжительности флотации и т.д.

Вместе с тем при флотации свободного золота достигается лучшая степень концентрации и извлечения в пену в сравнении с концентрационным столом, концентрацией в короткокonusном гидроциклоне и даже амальгамацией [5]. Но подобный эффект достигается лишь на обезиленном материале; наличие илов увеличивает выход пенного продукта и заметно снижает извлечение. Если к шламу добавить и наличие труднофлотуемых фракций, сульфидов обладающих высокой флотуемостью, то флотация как доводочная операция менее эффективна.

Таким образом, с одной стороны флотация как метод разделения имеет высокий потенциал, а с другой стороны она не эффективна для доводки материалов сложного вещественного состава.

Наиболее рациональным является вариант получения флотационного концентрата высокого качества и промпродуктов с последующей их переработкой по другим комбинированным схемам обогащения: упрощается задача флотационной доводки чернового концентрата, нет необходимости проведения традиционных схем флотационной перечистки.

Известны способы переработки и обогащения, которые основаны на разделении минералов по удельным массам в воде (мокрое обогащение), разделении по удельной массе в восходящей струе воздуха (отсадка), магнитной проницаемости (магнитное обогащение), смачиваемости поверхностей (флотация), центробежному воздействию (центрифугированию), по температуре плавления и др. [1], [2]. Данные способы обогащения не позволяют извлекать мелкое и тонкое золото крупностью менее 0,5 мм до 90%. Однако мелкое и субмикронное золото присутствует во всех россыпях, и количество его составляет от 30 до 95% всего золота, высвобожденного из руд [3]. В работе [6] представлены результаты тестовых испытаний на центробежных аппаратах.

Проблема разделения минералов с близкими технологическими свойствами решается повышением селективности разделения в обогатительных процессах – с использованием реагентов направленного действия, избирательного изменения технологических свойств минералов с помощью различных энергетических воздействий [7], [8], в работе [9] предложены способы концентрирования и извлечения ультратонкодисперсного золота с применением методов лазерного воздействия.

Один из способов влияния на эффективность процесса флотации – применение дополнительных центробежных сил вращения жидкости – центробежная флотация [10].

В разработанном в лаборатории «Обогащение полезных ископаемых» ИГДС СО РАН способе флотации разделение минеральных частиц происходит по гидрофобности в тонком слое на поверхности вращающегося потока воды (пульпы) [11], [12].

Цель данного исследования – повышение качества флотационного концентрата на основе применения центробежной флотомшины нового типа.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на тонкоизмельченных рудных материалах месторождения «Сентачан», характеризующегося исключительно богатыми рудами [13].

Предварительно проведен комплекс исследований по изучению вещественного состава используемых материалов. Для отбора, обработки и анализа проб использованы существующие методики определения гранулометрического, минерального состава и физических свойств минералов.

Для анализа вещественного состава продуктов разделения использовался пробирный анализ (для золота), химический (для сурьмы, мышьяка), спектральный метод анализа элементного состава на последовательном

рентгенофлуоресцентном спектрометре фирмы «Bruker» SRS-3400 и анализ фазового состава проб на рентгеновском дифрактометре D8 DISCOVER с системой GADDS.

Характеристика применяемого флотационного реагента: ксантогенат бутиловый – основной собиратель для флотации сульфидных минералов, применяется в виде 2-10 % -го раствора, при расходе 20-100 г/т [11].

При проведении исследований используется экспериментальный вариант центробежной флотомашины с периферийной разгрузкой концентрата, конструкции ИГДС СО РАН (патент РФ) [12].



Рисунок 1 - Экспериментальный образец центробежной флотомашины с периферийной разгрузкой концентрата
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.64.1>

При вращении цилиндрикоконического корпуса, под действием центробежных сил вода движется снизу вверх, образуя вогнутую поверхность. Исходная пульпа (пенный концентрат) подается в нижнюю часть флотомашины на поверхность воды. Минерализованный слой из гидрофобных частиц остается на поверхности воды, с которой попадает в желоб для концентрата, а гидрофильные частицы собираются в нижней части корпуса и удаляются через патрубок для вывода хвостов.

Результаты исследования

Серией экспериментов по флотации на лабораторной центробежной флотомашине с периферийной разгрузкой концентрата (ЦФМ) и на лабораторной механической флотомашине (ФМ), проведенной на продуктах обогащения золото-сурьмяной руды, при одинаковом реагентном режиме установлено, что извлечение золота и сурьмы в концентрат выше на центробежной флотомашине (рисунок 2), а извлечение мышьяка ниже, что позволяет получить концентрат с содержанием As – 0,11%.

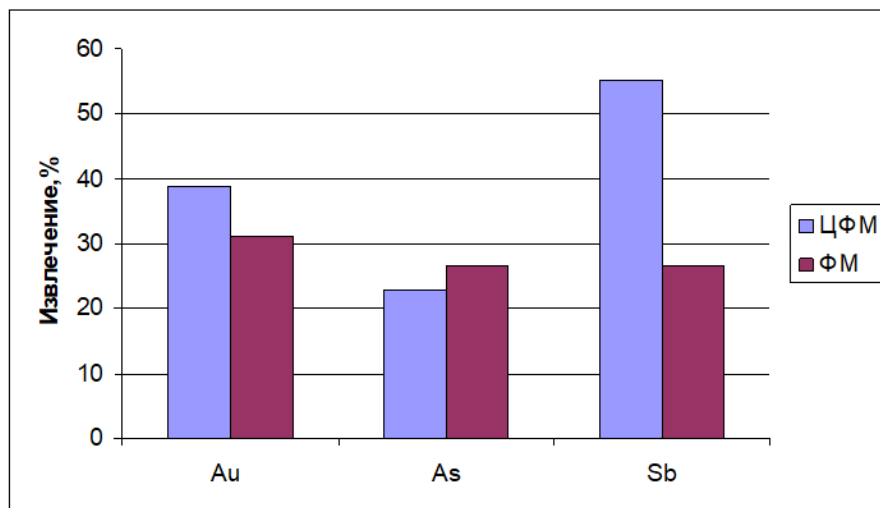


Рисунок 2 - Извлечение золота, мышьяка и сурьмы в концентрат при флотации на центробежной флотомашине (ЦФМ) и на лабораторной механической флотомашине (ФМ)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.64.2>

Из рисунка 3 видно, по качеству концентратов получено содержание мышьяка в концентрате центробежной флотомашины (ЦФМ) ниже, чем в концентрате лабораторной механической флотомашине (ФМ), при этом содержание сурьмы значительно выше.

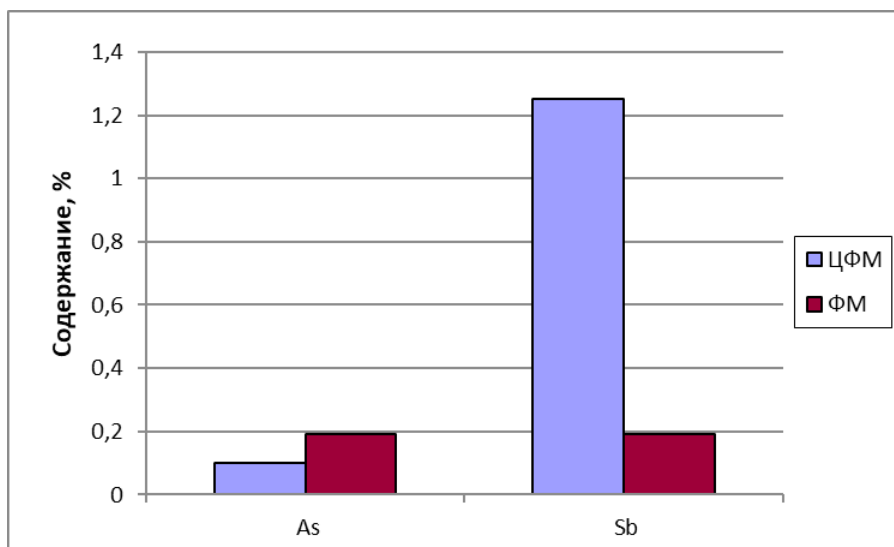


Рисунок 3 - Содержание мышьяка и сурьмы в концентратах флотации центробежной флотомашины и лабораторной флотомашины
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.64.3>

Примечание: ЦФМ - центробежная флотомашина; ФМ - механическая флотомашина

На рисунке 4 и 5 представлены примеры дифрактограммы концентрата флотации.

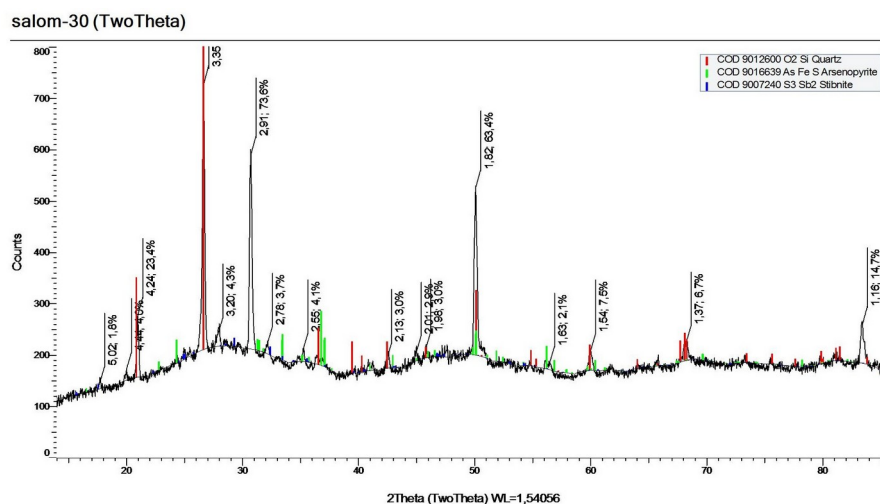


Рисунок 4 - Дифрактограмма концентрата флотации
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.64.4>

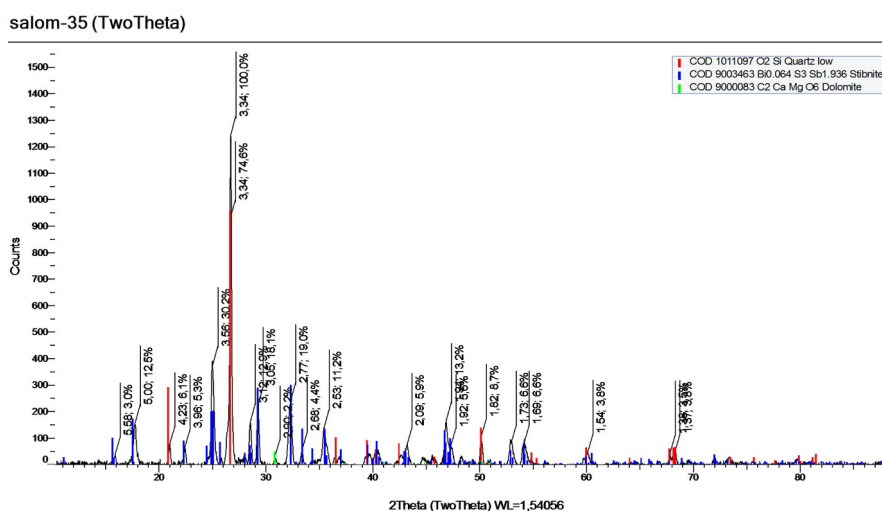


Рисунок 5 - Дифрактограмма концентрата флотации
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.64.5>

Изучение вещественного состава продуктов флотации показало, что в анализируемых образцах кварц содержится во всех образцах, арсенопирит и антимонит присутствуют в концентрате.

Заключение

Сравнительными экспериментальными исследованиями, проведенными с использованием центробежной флотомашин (ЦФМ) установлено, что сочетание воздействия центробежной силы вращения жидкости и гидрофобных свойств минералов позволяет усилить показатели селективности разделения минералов, при флотационной перемычке в центробежной флотомашине с периферийной разгрузкой концентрата повышается качество получаемого концентрата.

Финансирование

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант №13.ЦКП.21.0016.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out using the equipment of the CCP FITC YANC SB RAS grant No. 13.CCP.21.0016.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Фишман М.А. Практика обогащения руд цветных и редких металлов / М.А. Фишман, В.И. Зеленев. — Т 5. — М.: Недра, 1967. — 253 с.
2. Горбунова Т.Г. Исследование комбинированной технологии доводки флотационных золото- и серебросодержащих концентратов / Т.Г. Горбунова, Ю.И. Фролов // Разработка технологии обогащения рудных и россыпных месторождений. — Магадан: Изд. ВНИИ-1, 1985. — с. 3-9.
3. Лодейщиков В.В. Извлечение золота из упорных руд и концентратов / В.В. Лодейщиков. — М.: Недра, 1968. — 201 с.
4. Извлечение золота, алмазов и цветных металлов из руд // Научные труды ИРГИРЕДМЕТ. — М.: Недра, 1970. — Вып. 20. — 383 с.
5. Лопатин А.Г. Разработка технологической схемы для полного выделения свободного золота из проб золотосодержащих песков / А.Г. Лопатин, З.М. Гирдасова // Исследование вещественного состава, технология обогащения и анализ золотосодержащего сырья. — Москва, 1971. — с. 33-35.
6. Алгебраистова Н.К. Технология извлечения золота из золотосодержащего техногенного сырья / Н.К. Алгебраистова, П.Н. Самородский, Д.М. Колотушкин и др. // Обогащение руд. — 2018. — 1. — с. 33-37.
7. Чантурия В.А. Повышение эффективности флотации на использовании энергетических воздействий / В.А. Чантурия, А.А. Лавриненко, Г.Д. Краснов // Горный журнал. — 2006. — 10. — с. 48-52.
8. Лавриненко А.А. Современное состояние и основные направления создания флотаионной техники / А.А. Лавриненко, Г.Д. Краснов // Горный журнал. — 2007. — 2. — с. 108-117.
9. Банщикова Т.С. Создание нетрадиционных технологий извлечения упорных форм золота из минерального сырья техногенных месторождений / Т.С. Банщикова, Н.А. Леоненко, Л.Н. Шокина // Обогащение руд. — 2009. — 3. — с. 11-14.
10. Рубинштейн Ю.Б. Обзорная информация / Ю.Б. Рубинштейн, Э.Я. Перельман, И.Н. Спиваковский // ЦНИИТЭИтяжмаш. — М., 1988. — 24 с.
11. Матвеев А.И. Флотация золота на поверхности вращающейся жидкости / А.И. Матвеев, С.И. Саломатова. — Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. — 141 с.
12. Пат. №2460586 Российская Федерация. МПК В03Д1/24. Центробежная флотационная машина / Саломатова С.И., Матвеев А.И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского Сибирского отделения РАН. — 2010127600/03; заявл. 2.07.2010.; опубл. 10.09.2012, Бюл.№25. — 3 с.: 1 ил.
13. Болтухаев Г.И. Переработка крупнообъемных проб золото-сурьмяных руд Сентачанского месторождения / Г.И. Болтухаев, П.М. Соложенкин // Цветные металлы. — 2009. — 4. — с. 41-44.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fishman M.A. Praktika obogashheniya rud cvetnyh i redkih metallov [The practice of enrichment of ores of non-ferrous and rare metals] / M.A. Fishman, V.I. Zelenov. — Vol. 5. — M.: Nedra, 1967. — 253 p. [in Russian]
2. Gorbunova T.G. Issledovanie kombinirovannoj tehnologii dovodki flotacionnyh zoloto- i serebrosoderzhashhih koncentratov [Research of combined technology of fine-tuning of flotation gold and silver—containing concentrates] / T.G. Gorbunova, Yu.I. Frolov // Razrabotka tekhnologii obogashcheniya rudnyh i rossypnyh mestorozhdenij [Development of technology of ore and placer deposits enrichment]. — Magadan: Publishing House of VNII-1, 1985. — p. 3-9. [in Russian]
3. Lodeishchikov V.V. Izvlechenie zolota iz upornyh rud i koncentratov [Extraction gold from stubborn ores and concentrates] / V.V. Lodeishchikov. — M.: Nedra, 1968. — 201 p. [in Russian]
4. Izvlechenie zolota,almazov i cvetnyh metallov iz rud [Extraction of gold, diamonds and non—ferrous metals from ores] // Nauchnye trudy IRGIREDMET [Scientific works of IRGIREDMET]. — M.: Nedra, 1970. — Issue 20. — 383 p. [in Russian]
5. Lopatin A.G. Razrabotka tehnologicheskoy shemy dlja polnogo vydelenija svobodnogo zolota iz prob zolotosoderzhashhih peskov [Development of a technological scheme for the complete isolation of free gold from samples of gold-bearing sands] / A.G. Lopatin, Z.M. Girdasova // Issledovanie veshchestvennogo sostava, tekhnologiya obogashcheniya i analiz zolotosoderzhashchego syr'ja [Research of material composition, technology of enrichment and analysis of gold-containing raw materials]. — Moscow, 1971. — p. 33-35. [in Russian]
6. Algebraistova N.K. Tehnologija izvlechenija zolota iz zolotosoderzhashhego tehnogennoho syr'ja [Technology of gold extraction from gold-containing technogenic raw materials] / N.K. Algebraistova, P.N. Samorodsky, D.M. Kolotushkin et al. // Obogashchenie rud [Ore enrichment]. — 2018. — 1. — p. 33-37. [in Russian]
7. Chanturia V.A. Povyshenie jeffektivnosti flotacii na ispol'zovanii jenergeticheskikh vozdejstvij [Improving the efficiency of flotation using energy influences] / V.A. Chanturia, A.A. Lavrinenko, G.D. Krasnov // Gornyj zhurnal [Mining Journal]. — 2006. — 10. — p. 48-52. [in Russian]
8. Lavrinenko A.A. Sovremennoe sostojanie i osnovnye napravlenija sozdaniya flotaionnoj tehniki [The current state and main directions of the creation of flotation equipment] / A.A. Lavrinenko, G.D. Krasnov // Gornyj zhurnal [Mining Journal]. — 2007. — 2. — p. 108-117. [in Russian]
9. Banshchikova T.S. Sozdanie netradicionnyh tehnologij izvlechenija upornyh form zolota iz mineral'nogo syr'ja tehnogennyh mestorozhdenij [Creation of unconventional technologies for extracting resistant forms of gold from mineral raw materials of technogenic deposits] / T.S. Banshchikova, N.A. Leonenko, L.N. Shokina // Obogashchenie rud [Ore enrichment]. — 2009. — 3. — p. 11-14. [in Russian]
10. Rubinstein Yu.B. Obzornaja informacija [Overview] / Yu.B. Rubinstein, E.Ya. Perelman, I.N. Spivakovsky // Tsniiteityazhmash. — M., 1988. — 24 p. [in Russian]

11. Matveev A.I. Flotacija zolota na poverhnosti vrashhajushhejsja zhidkosti [Flotation of gold on the surface of a rotating liquid] / A.I. Matveev, S.I. Salomatova. – Yakutsk: Publishing house of the YANC SB RAS, 2008. — 141 p. [in Russian]
12. Pat. No. 2460586 Russian Federation. MPK B03D1/24. Centrobezhnaja flotacionnaja mashina [Centrifugal flotation machine] / Salomatova S.I., Matveev A.I.; applicant and patent holder Institution of the Russian Academy of Sciences Institute of Mining of the North named after N.V.Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2010127600/03; application 2.07.2010.; publ. 10 09.2012, Bul.No. 25.. — 3 p.: 1 ill. [in Russian]
13. Boltukhaev G.I. Pererabotka krupnoob'emnyh prob zoloto-sur'mjanyh rud Sentachanskogo mestorozhdenija [Processing of large-volume samples of gold-antimony ores of the Sentachan deposit] / G.I. Boltukhaev, P.M. Solozhenkin // Cvetnye metally [Non-ferrous metals]. - 2009. — 4. — p. 41-44. [in Russian]