

УДК 546.59:622.7

Лаврик Александра Викторовна
младший научный сотрудник, аспирант,
Институт горного дела
Дальневосточного отделения РАН,
680000, г.Хабаровск, ул. Тургенева, 51.
e-mail: alexalavrikxx@gmail.com

Рассказова Анна Вадимовна
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела
Дальневосточного отделения РАН
e-mail: annbot87@mail.ru

Копылова Александра Евгеньевна
старший инженер, аспирант,
Институт горного дела
Дальневосточного отделения РАН.

Лаврик Наталья Анатольевна
старший научный сотрудник,
Институт горного дела
Дальневосточного отделения РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЕЛЬКЕН

Аннотация:

Исследования проводились на золотосодержащих рудах месторождения Делькен. Особенностью руды месторождения Делькен является как присутствие крупного золота, так и высокое содержание тонкодисперсного и предположительно инкапсулированного, кластерного золота в кварце. В статье представлены исследования способов переработки руды с целью извлечения благородных металлов. Было установлено содержание органического углерода в руде в пределах 0,13 – 0,18 %. Для исследования золотоносных руд, содержащих крупное золото, применяются схемы гравитационного обогащения в комбинации с флотационными и гидрометаллургическими методами. В результате были получены низкие показатели выхода золота в концентрат гравитации – от 18 до 49,5 %. Проведенные флотационные исследования показали, что данная технология обогащения для исследуемых руд неэффективна как этап, предшествующий цианированию, т.к. не удалось получить извлечение золота в концентрат. Гидрометаллургические исследования проводились с использованием трех режимов выщелачивания цианистыми растворами: 1) цианидное выщелачивание с агитацией, 2) активационное цианидное выщелачивание с механической активацией, 3) активационное цианидное выщелачивание с агитацией и двухстадийной сорбцией смолой. Показатели извлечения золота колеблются в пределах от 85,65 до 89,82 %. Активационное цианидное выщелачивание с агитацией и двухстадийной сорбцией смолой наиболее эффективно по сравнению с другими схемами извлечения. Золотосодержащая руда месторождения Делькен характеризуется рядом факторов, осложняющих гидрометаллургическую переработку: содержит тонковкрапленное золото и примеси, увеличивающие расход цианида. В руде месторождения Делькен присутствует органический углерод, а также кварц, что обуславливает повышенную сорбционную активность по отношению к растворенным в цианиде благородным металлам.

Ключевые слова: золото в кварце, тонкодисперсное золото, упорные руды, гравитационное обогащение, флотация, выщелачивание цианистыми растворами

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.028

Lavrik Alexandra V.
Junior Researcher, Graduate Student,
Mining Institute, Far Eastern Branch of RAS,
680000 Khabarovsk,
51 Turgeneva Str.
e-mail: alexalavrikxx@gmail.com

Rasskazova Anna V.
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Mining Institute,
Far Eastern Branch of RAS
e-mail: annbot87@mail.ru

Kopylova Aleksandra E.
Senior Engineer, Graduate Student,
Mining Institute,
Far Eastern Branch of RAS

Lavrik Natalya A.
Senior Researcher,
Mining Institute,
Far Eastern Branch of RAS

STUDY OF METHODS OF PROCESSING GOLD-BEARING ORE OF THE DELKEN DEPOSIT

Abstract:

The research material is gold-bearing ores of the Delken deposit. A feature of the ore of the Delken deposit is the presence of coarse gold and dispersed gold as well as, presumably encapsulated, cluster gold in quartz. The article presents results of research on methods of ore processing in order to recover precious metals. The content of organic carbon in the ore is 0.13-0.18 percent. Gravity concentration schemes in combination with flotation and hydrometallurgical methods enable the study of gold-bearing ores containing coarse gold. As a result, we obtained low rates of gold recovery (18 to 49.5 percent) to gravity concentrate. Flotation tests occur as ineffective for these types of ores as a previous stage before cyanidation. Gold was distributed between flotation products and was not concentrated. Hydrometallurgical studies are carried out using three modes of leaching with cyanide solutions: 1) vat cyanide leaching, 2) activated cyanide leaching with mechanical activation, 3) activated vat cyanide leaching and two-stage sorption with resin. Gold recovery rates range from 85.65 to 89.82 percent. Activated cyanide leaching with two-stage resin sorption is most effective compared to other recovery schemes. A number of factors that complicate hydrometallurgical processing characterizes the gold-bearing ore of the Delken deposit: it contains finely dispersed gold and impurities that increase the consumption of cyanide. The ore of the Delken deposit contains organic carbon as well as quartz; it results in increased grebbling.

Key words: gold in quartz, fine gold, refractory ores, gravity concentration, flotation, cyanide leaching

Введение

Особенностью руды месторождения Делькен является как присутствие крупного золота (содержание в верхнем классе $-1 +0,5$: Au – 19, 4 г/т, Ag–1,63 г/т), так и высокое содержание тонкодисперсного (в классе $-0,04+0,0$: Au – 41,1 г/т, Ag – 4,36 г/т) и предположительно инкапсулированного, кластерного золота в кварце. Тонкая вкрапленность золота — одна из наиболее распространенных причин упорности золотых руд. Высокие показатели извлечения мелкого золота удается получать с использованием цианистых растворов для различных типов руд. Тем не менее тонкодисперсное золото, заключенное в кварце, не поддается извлечению с помощью цианистых растворов, так как в этом случае исключается диффузионное выщелачивание из-за отсутствия какой-либо заметной пористости в кварцевом чехле. Кварц характеризуется низкой пористостью и проницаемостью для растворов выщелачивания, что осложняет процесс выщелачивания [1 – 2]. Вкрапленность золота в кварце является осложняющим фактором при гидрометаллургической переработке руды также по причине адсорбции золото-цианистых комплексов на поверхности кварца.

Целью исследования было тестирование данной руды гравитационным, флотационным способами и ее цианирование для выявления метода, позволяющего эффективно извлекать золото. Как известно, для крупных частиц благородных металлов эффективно применение гравитационного обогащения; гравитационное обогащение нецелесообразно для извлечения мелких частиц золота. Целью флотации золотых и серебряных руд, содержащих извлекаемые цианированием металлы, обычно является получение отвальных хвостов. Это позволяет подвергать цианированию относительно небольшую массу материала, что снижает затраты на переработку руд [3].

Фактический материал

Перед проведением технологических исследований изучался вещественный состав материала (минералогический анализ с использованием электронного микроскопа, химический анализ проб) и его гранулометрические характеристики. Исследуемая проба представлена кварц-полевошпатовыми метасоматитами по диоритам [4 – 6].

В предшествующих исследованиях было установлено, что в пробе присутствует крупное золото (до 1,5 мм) и тонкодисперсное (менее 40 мкм). Почти треть ценного компонента в исследуемой руде (26 %) представляет собой мелкое и тонкодисперсное золото (класс меньше 0,071 мм).

В табл. 1 представлены результаты по определению углерода, мышьяка и железа в исследуемых пробах.

Таблица 1

Содержание углерода и элементов, осложняющих цианирование
в руде месторождения Делькен

Класс крупности, мм	As, г/т	Fe, %	C _{орг} , %
-1+0,5	470	1	0,13
-0,5+0,2	1148	1,4	0,17
-0,2+0,1	668	1,6	0,18
-0,1+0,071	809	1,8	0,16

Использование высокотемпературного каталитического метода ИК-детектирования позволило установить содержание органического углерода в руде месторождения Делькен в пределах 0,13 – 0,18 %, что, вероятней всего, будет являться осложняющим фактором извлечения золота.

Сульфидные и окисленные минералы меди, железа, мышьяка, цинка и др., взаимодействуя с другими щелочными цианистыми растворами, могут существенно затруднить процесс растворения благородных металлов. Отрицательное воздействие примесных компонентов на извлечение золота, серебра при цианистом выщелачивании характеризуется как «химическая депрессия» извлекаемых металлов. Основной формой проявления химической депрессии золота и серебра в цианистом процессе является медленное и/или неполное растворение металлов вследствие поглощения растворителя (цианида) или кислорода активными компонентами руды – «цианисидами» и восстановителями [1].

Арсенопирит (FeAsS) и мышьяковистый пирит являются наиболее частыми минералами-носителями «невидимого» золота. К данной категории золота относят частицы, которые не обнаруживаются с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. К «невидимому» золоту относят тонко- и ультрадисперсные формы золота, кластерное, коллоидное и химически связанное с сульфидами золото [7]. Можно сделать предположение о присутствии золота описанных форм нахождения в данной руде в арсенопирите и пирите, что будет являться фактором упорности при извлечении ценного компонента.

Методы исследований

В работе было использовано современное аналитическое, лабораторное оборудование ведущих зарубежных и отечественных фирм. Пробоподготовка осуществлялась с использованием современного оборудования Fritsch. Качественный минералогический анализ проб и сокращенный минералогический анализ на благородные металлы проводился с использованием бинокляров и микроскопов Stemi 2000, StereoDiscoveryV8, фирмы ZEISS. Детальное изучение выделенных зерен благородных металлов и тонкодисперсных частиц ценного компонента проводилось на сканирующем электронном микроскопе «JEOL 6000 Plus» (Япония). Для количественной оценки содержания золота в исходных материалах применялся атомно-абсорбционный спектрофотометр ААС-7000, ААС – 6200 [8].

Гравитационное обогащение проводилось на материале крупности $-1 +0,5$ и $-0,5 +0,2$ с использованием концентрационного стола.

Исследования флотационной способности проводились на материале класса крупности $-1 +0,5$, истертого до размерности $-0,1 +0$, промпродукта гравитационного стола. В качестве флотореагентов использовались: собиратели – бутиловый ксантогенат (25 г/т) и аэрофлот ИМА-И413п (25 г/т); вспениватель – сосновое масло (60 г/т). Длительность кондиционирования составляла 2 мин, флотации – 5 мин.

Эксперимент по агитационному выщелачиванию проводился на промпродукте гравитационного обогащения, истертого до крупности $-0,071$ мм с применением трех схем: 1) цианидное выщелачивание с агитацией; 2) активационное цианидное выщелачивание с механоактивацией; 3) активационное цианидное выщелачивание с агитацией и двухстадийной сорбцией смолой. Также было проведено сравнительное стандартное горячее цианирование.

Результаты гравитационных исследований

Гравитационное обогащение обычно предшествует флотации или цианированию и предназначено для тех частиц золота и серебра, которые не извлекаются или трудно извлекаются указанными способами [1].

В результате проведенных экспериментов по гравитационному обогащению выход золота в концентрат составил: 18% – для класса $-1 +0,5$; 9 % – для класса $-0,5 +0,2$. Большая часть золота сосредоточена в пром. продукте (61,55 % – в классе $-1 +0,5$; 49,5 % – в классе $-0,5 +0,2$). Данный факт, вероятно, обусловлен тесным срастанием частиц золота и кварца, что требует его более тонкого измельчения [9].

Результаты флотационных исследований

Исследования проводились на материале пром. продукта гравитационного обогащения со следующими содержаниями металлов: золота – 19,31 г/т, серебра – 2,33 г/т.

Серия опытов проводилась с целью установления возможности флотации исследуемых руд с применением собирателей различного типа – бутилового ксантогената и дитиофосфата (аэрофлот ИМА-И413п), классически используемых для флотации золота [10]. Результаты переработки руды представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели извлечения благородных металлов с применением флотации

Тип собирателя	Продукт	Выход продукта, %	Извлечение (ξ), %	
			Au	Ag
Дитиофосфат аэрофлот ИМА	Концентрат	17,5	50,19	58,52
	Хвосты	82,5	49,81	41,48
Ксантогенат бутиловый	Концентрат	9,9	61,89	56,5
	Хвосты	90,1	38,11	43,55

Существенное влияние на процесс извлечения золота оказывает минералогический состав руды. Во флотационный концентрат переходят частицы кварца, которые содержат золото, выступающее на поверхности минерала. Потери благородных металлов в хвостах объясняются наличием высокого содержания дисперсного и инкапсулированного золота в виде закрытых включений и сростаний в кварце. При этом рудный материал содержит в качестве сопутствующего ценного компонента серебро в виде примесей к золоту в подчиненном количестве, а также в виде самостоятельных минеральных форм, что объясняет корреляцию его извлечения с показателями извлечения золота.

Таким образом, при выборе объектов для применения технологии флотационного обогащения следует руководствоваться наличием в исходном сырье труднообогатимых минералов и сложноизвлекаемых форм нахождения золота и серебра.

Исследование возможности гидрометаллургического обогащения

Поскольку флотационное обогащение оказалось неэффективным в качестве предшествующей операции гидрометаллургическому методу при переработке руд месторождения Делькен, исследования цианированием проводились на пром. продукте. Показатели извлечения золота выщелачиванием представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты извлечения золота с использованием различных режимов выщелачивания

№	Режим выщелачивания	Извлечение золота ε(Au), %
1	Контрольное цианидное выщелачивание с агитацией	85,65
2	Активационное цианидное выщелачивание с механоактивацией	87,82
3	Активационное цианидное выщелачивание с агитацией и двухстадийной сорбцией смолой	89,82

В результате проведенных исследований по выщелачиванию золота с использованием трех режимов цианирования не были получены высокие результаты извлечения. Извлечение золота составило от 85,65 до 89,82 %. Как видно из представленных дан-

ных, механохимическое выщелачивание в активной среде позволяет повысить извлечение золота на 2 % по сравнению с цианидным выщелачиванием с агитацией. Можно сделать вывод о том, что механохимическая активация, помимо доизмельчения относительно крупных минеральных частиц, обеспечивает формирование микротрещин в зернах кварца, соответственно, вскрытие дисперсного наноразмерного золота. Активационное цианидное выщелачивание с агитацией и двухстадийной сорбцией смолой наиболее эффективно по сравнению с другими схемами извлечения (89,82 %).

Выводы

Золотосодержащая руда месторождения Делькен характеризуются тремя типами технологической упорности:

1) имеет тонковкрапленное золото и серебро (причина физической депрессии золота в цианистом процессе); 2) содержит примеси, проявляющие «цианисидные» свойства (причина химической депрессии); 3) наличие органического углерода, а также вкрапленность золота в кварц проявляют повышенную сорбционную активность по отношению к растворенным в цианиде благородным металлам. Для исследования золотосодержащих руд месторождения Делькен методы гравитационного и флотационного обогащения представляются неэффективными. Приемлемое извлечение золота было получено при цианировании. Наилучшие результаты продемонстрировало активационное цианидное выщелачивание с агитацией и двухстадийной сорбцией смолой (89,82 %) по сравнению со стандартной схемой цианирования (85,65 %). Для разработки технологических решений, которые обеспечат повышение эффективности переработки упорных золотосодержащих руд необходимо более детальное изучение всех факторов упорности.

Благодарности

Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования "Центр исследования минерального сырья" ХФИЦ ДВО РАН за то, что на его базе были выполнены химический, рентгенофлуоресцентный и спектральный анализы, микроскопические и минералогические исследования.

Список литературы

1. Дементьев В.Е., Дружина Г.Я., Гудков С.С., 2004. *Кучное выщелачивание золота и серебра*. Иркутск: ОАО Иргиредмет, 352 с.
2. Фазлуллин М.И., 2001. *Кучное выщелачивание благородных металлов*. Москва: Издательство Академии горных наук, 647 с.
3. Зеленов В.И., 1989. *Методика исследования золото- и серебросодержащих руд*. 3-изд., переработ. и доп. Москва: Недра, 302 с.
4. Лаврик А.В., Лаврик Н.А., Рассказова А.В., Литвинова Н.М., Конарева Т.Г., 2020. Исследование комплексной золотосодержащей руды месторождения Делькен и оценка ее технологических свойств. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 17 - 23. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.017.
5. Лаврик А.В., Лаврик Н.А., Рассказова А.В., Литвинова Н.М., Конарева Т.Г., 2020. Минералого-технологические особенности золота месторождения Делькен (Хабаровский край). *Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020): материалы Международной конференции, Апатиты, 2020 г.* Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, С. 79 - 81.
6. Рассказов М.И., Потапчук М.И., Цой Д.И., Терешкин А.А., Гладырь А.В., 2020. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного месторождения Делькен. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 116 - 126. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.116

7. Афанасова А.В., 2019. *Разработка эффективных технологических решений переработки золотосодержащих руд с учетом их критериев упорности*: Дис. ... канд. техн. наук: 07.11.19. Москва, 148 с.

8. Прохоров К.В., Гладырь А.В., Рассказов М.И., 2020. Центр коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья». *Горная промышленность*, № 4, С. 120–124. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-4-120-124>.

9. Лаврик А.В., Рассказова А.В., 2020. Исследование возможности применения технологии гравитационного обогащения золотосодержащих кварцевых руд при освоении месторождения «Делькен». *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Материалы XX Международной научно-практической конференции*. В 3-х частях. Чита: Забайкальский государственный университет, С. 32 – 35.

10. Абрамов А.А., 2005. *Технологии переработки и обогащения руд цветных металлов*. В 2-х кн., Кн. 2. Москва: МГГУ, 575 с.

References

1. Dement'ev V.E., Druzhina G.Ya., Gudkov S.S., 2004. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolota i serebra* [Heap leaching of gold and silver]. Irkutsk: OAO Irgiredmet, 352 p.

2. Fazlullin M.I., 2001. *Kuchnoe vyshchelachivanie blagorodnykh metallov* [Heap leaching of precious metals]. Moscow: Izdatel'stvo Akademii gornykh nauk, 647 p.

3. Zelenov V.I., 1989. *Metodika issledovaniya zoloto- i serebrosoderzhashchikh rud* [Methodology for studying of gold- and silver-containing ores]. 3-izd., pererabot. i dop. Moscow: Nedra, 302 p.

4. Lavrik A.V., Lavrik N.A., Rasskazova A.V., Litvinova N.M., Konareva T.G., 2020. *Issledovanie kompleksnoi zolotosoderzhashchei rudy mestorozhdeniya Del'ken i otsenka ee tekhnologicheskikh svoystv* [Investigation of complex gold-bearing ore of the Delken deposit and evaluation of its technological properties]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, pp. 17 - 23. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.017.

5. Lavrik A.V., Lavrik N.A., Rasskazova A.V., Litvinova N.M., Konareva T.G., 2020. *Mineralogo-tekhnologicheskie osobennosti zolota mestorozhdeniya Del'ken (Khabarovskii krai)* [Mineralogical and technological features of gold from the Delken deposit (Khabarovsk Krai)]. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2020): materialy Mezhdunarodnoi konferentsii, Apatity, 2020 g. Apatity: FITs KNTs RAN*, pp. 79 - 81.

6. Rasskazov M.I., Potapchuk M.I., Tsoi D.I., Tereshkin A.A., Gladyr' A.V., 2020. *Izuchenie gorno-geologicheskikh osobennostei i opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornykh porod zolotorudnogo mestorozhdeniya Del'ken* [Study of mining and geological features and determination of physical and mechanical properties of rocks of the Delken gold deposit]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, pp. 116 - 126. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.116

7. Afanasova A.V., 2019. *Razrabotka effektivnykh tekhnologicheskikh reshenii pererabotki zolotosoderzhashchikh rud s uchetom ikh kriteriev upornosti* [Development of effective technological solutions for processing of gold-bearing with reference to their persistence criteria]: *Dis. ... kand. tekhn. nauk: 07.11.19. Moscow, 148 p.*

8. Prokhorov K.V., Gladyr' A.V., Rasskazov M.I., 2020. *Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya "Tsentr issledovaniya mineral'nogo syr'ya"* [Shared facilities center "The Center of research of mineral raw materials"]. *Gornaya promyshlennost'*, № 4, pp. 120–124. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-4-120-124>.

9. Lavrik A.V., Rasskazova A.V., 2020. *Issledovanie vozmozhnosti primeneniya tekhnologii gravitatsionnogo obogashcheniya zolotosoderzhashchikh kvartsevykh rud pri osvoenii mestorozhdeniya "Del'ken"* [Study of possible applying the technology of gravity enrichment of gold-bearing quartz ores during development of the Delken deposit]. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov: Materialy XKH*



Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. V 3-kh chastyakh. Chita: Zabaikal'skii gosudarstvennyi universitet, pp. 32 – 35.

10. Abramov A.A., 2005. *Tekhnologii pererabotki i obogashcheniya rud tsvetnykh metallov* [Technologies for processing and beneficiation of non-ferrous metal ores]. V 2-kh kn., Kn. 2. Moscow: MGGU, 575 p.