

Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений Нижнеякоkitского рудного поля

М.В. Рыльникова^{1, a} ✉, С.В. Рыжов^{1, 2}, Е.Н. Есина^{1, b}

¹ Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. академика Н.В. Мельникова, г. Москва, Российская Федерация

² ПАО «Селигдар», г. Москва, Российская Федерация

^a ORCID 0000-0002-9984-5980

^b ORCID 0000-0002-1685-2406

✉rylnikova@mail.ru

Резюме: На современной стадии развития горнотехнических систем в результате длительной эксплуатации золоторудных месторождений наблюдается сокращение объема воспроизводства ресурсной базы, снижение качественных характеристик добываемых руд, усложнение геомеханической обстановки, удорожание добычи, усложнение экологической ситуации в регионе. В условиях постоянного истощения богатых и легкодоступных к разработке золоторудных месторождений происходит изменение категории запасов и прогнозных ресурсов. Вместе с тем, неуклонное развитие техники и технологий поиска, разведки, добычи и переработки руд с оптимальными параметрами геотехнологии в значительной мере компенсирует на этапах освоения месторождения снижение качества вовлекаемого в разработку золотоносного сырья, обеспечивая прирост производства золота в стране. В статье рассмотрены особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений Нижнеякоkitского золоторудного поля, расположенных в республике Саха (Якутия). Показано, что ввиду значительной изменчивости содержаний золота при освоении запасов месторождения особое внимание необходимо уделить управлению качеством добываемой и подаваемой на переработку руды. Доказано, что в сложных природно-климатических и горнотехнических условиях эффективное освоение запасов месторождения зависит от дифференцированного подхода к выбору способа переработки руд различного качества с обоснованием рациональной структуры производственных мощностей рудника и перерабатывающих производств.

Ключевые слова: комплексное освоение, золоторудное месторождение, горно-геологические условия, горнотехнические условия, эффективность, безопасность, открытая геотехнология, Нижнеякоkitское рудное поле

Для цитирования: Рыльникова М.В., Рыжов С.В., Есина Е.Н. Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений Нижнеякоkitского рудного поля. *Горная промышленность*. 2020;(2):115–120. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-115-120.

Geological and Mining Features of Gold Deposits Development in Nizhneyakokitskoye Ore Field

M.V. Rylnikova^{1, a} ✉, S.V. Ryzhov^{1, 2}, E.N. Esina^{1, b}

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Seligdar Holding, Moscow, Russian Federation

^a ORCID 0000-0002-9984-5980

^b ORCID 0000-0002-1685-2406

✉rylnikova@mail.ru

Abstract: Due to long-term exploitation of gold deposits, the current stage in development of mining systems is characterized with decreasing reserve replacement, degradation of the mined ore quality, complications in geomechanical environment, higher mining costs and aggravation of the environmental situation in the region. Constant depletion of rich and easily accessible gold deposits leads to changes in the category of reserves and inferred resources. At the same time, steady development of equipment and technologies for prospecting, exploration, extraction and processing of ores with optimal geotechnological parameters to a great extent compensate for the decline in the quality of gold-bearing raw materials mined at the deposits, ensuring an increase in gold production in the country. The article reviews specific features of geological and mining conditions in development of gold deposits at the Nizhneyakokitsky gold field, located in the Republic of Sakha (Yakutia). It is shown that due to a significant variability of gold grades mined at the deposit, a special attention should be paid to the quality management of the ore extracted and delivered for processing. It has been proved that in difficult natural, climatic and mining conditions, effective development of the deposit reserves depends on a differentiated approach to the selection of a method to process ores of different quality with the justification of a rational structure of the mine's production capacities and processing facilities.

Keywords: integrated development, gold deposit, rock conditions, mining conditions, efficiency, safety, open pit geotechnology, Nizhneyakokitskoye ore field

For citation: Rylnikova M.V., Ryzhov S.V., Esina E.N. Geological and Mining Features of Gold Deposits Development in Nizhneyakokitskoye Ore Field. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(2):115–120. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-115-120.

Введение

В условиях крупнейшего мирового экономического кризиса золотодобыча является одной из немногих отраслей, эффективное функционирование которой в меньшей степени зависит от потребностей рынка в условиях мирового спада производства и способно компенсировать падение ВВП [1–5]. Для России, обладающей значительными запасами золоторудных месторождений, часто расположенных в районах с неблагоприятными климатическими условиями, с неразвитой инфраструктурой, характеризующихся весьма сложным залеганием рудных тел, низким и невыдержанным в массиве месторождения содержанием ценных компонентов, выбор и обоснование оптимальных параметров геотехнологий добычи и переработки сложноструктурных месторождений золотосодержащих руд представляет весьма актуальную задачу [6–9].

Таковыми золоторудными месторождениями является группа месторождений Нижнеякоkitского рудного поля, расположенная в республике Саха (Якутия). Отработку месторождения осуществляет ПАО «Селигдар» – одна из ведущих золотодобывающих компаний России, отмечающая в этом году пятнадцатилетие своей деятельности.

Изменение категории запасов и прогнозных ресурсов жильных золоторудных месторождений происходит в условиях постоянного истощения богатых и легкодоступных к разработке руд. Вместе с тем, неуклонное развитие техники и технологий поиска, разведки, добычи и переработки руд с оптимальными параметрами геотехнологии в значительной мере компенсирует на этапах освоения месторождения снижение качества вовлекаемого в разработку золотосодержащего сырья, обеспечивая прирост производства золота в стране [10–13].

Общая характеристика месторождений

Нижнеякоkitское рудное поле, включающее в себя золоторудные месторождения «Надежда», «Верхнее», «Смежное» и ряд других, а также крупные рудопоявления, находится в Алданском районе республики Саха (Якутия) в 45–65 км к югу от районного центра г. Алдана и в 10–20 км к юго-западу от г. Томмота (рис. 1)¹.

Все месторождения Нижнеякоkitского рудного поля (НЯРП) относятся к единому геолого-промышленному типу месторождений золота в перекрывающих глинистых отложениях коры выветривания и расположены в схожих геологических условиях. Месторождения однотипны в структурном плане, по морфологии рудовмещающих залежей, вещественному составу, генетическим и геохимическим особенностям руд. Представляется, что это части некоего единого крупного золоторудного объекта, который в свою очередь являлся восточным флангом Куранахского рудного поля.

Золоторудные тела представляют собой залежи лентообразной, плащевидной формы с извилистыми контурами, раздувами и пережимами, как по вертикали, так и в плане обусловленные карстовыми впадинами, провалами, взбросами доломитов вблизи поверхности. Наиболее характерной особенностью, типичной и для аналогичных залежей куранахских месторождений, являются сложные невыдержанные параметры залегания залежей, обусловленные облеплением, обволакиванием подстилающих

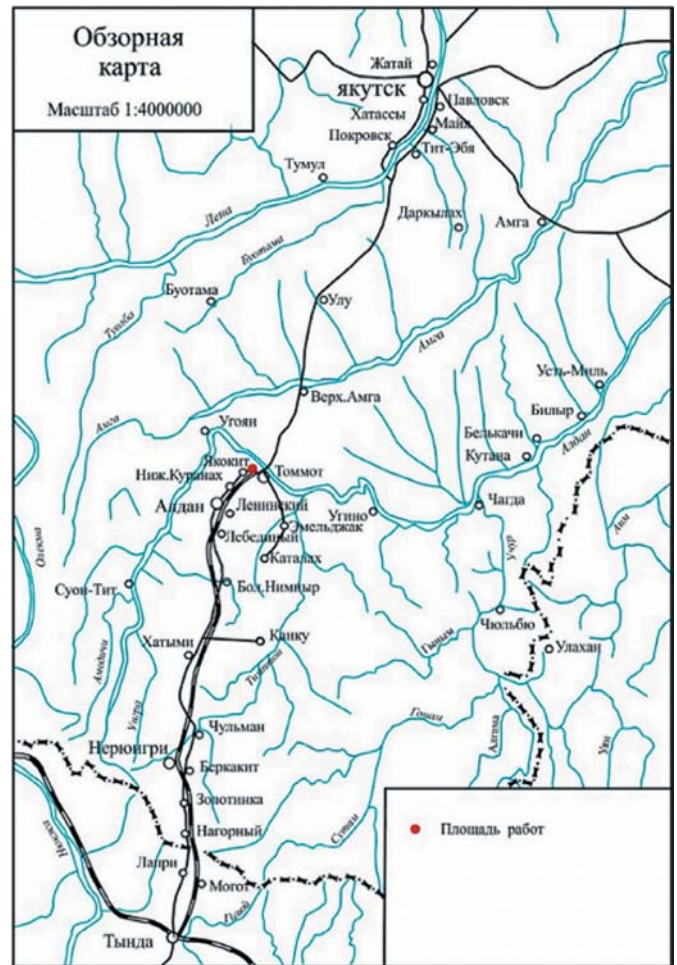


Рис. 1
Обзорная карта площади работ

Fig. 1
Overview map of the work area

закарстованных пород. В плане большая часть залежей имеет вытянутую в северо-западном, северо-северо-западном, субмеридиональном или северо-северо-восточном направлениях форму с отчетливым сужением мощности в глубине массива горных пород.

Внутри рудных тел золото распределено неравномерно, участки с высоким содержанием чередуются с убогими рудами и безрудными участками, что предопределяет при разработке месторождения контрольные эксплуатационные опробования и применение методов управления качеством рудной массы.

Кроме горизонтальных пластообразных залежей выделяются также «рудные столбы» – рудные тела в узких желобообразных, мульдообразных, щелевидных, воронкообразных карстовых полостях, образующих сложный лабиринт впадин. Размеры рудных залежей и тел колеблются в широких пределах: мощность – от 1 до 40–90 м и более (средняя по месторождениям – 13,3–26,4 м), ширина – от 20 до 100–140 м, длина – от метров до 1300–1800 м (месторождение «Надежда»). Выход рудных залежей на поверхность и неглубокое их залегание позволяют большую часть месторождений отрабатывать эффективно открытым способом. При доразведке глубоких горизонтов центральной части месторождения была вскрыта крутопадающая минерализованная зона, контролируемая дайками сиенитов. Минерализованная зона развивается по системе тектонических нарушений и представлена дезинтегрированными, метасоматически измененными

¹ ТЭО постоянных разведочных кондиций для золоторудных месторождений Нижнеякоkitского рудного поля и подсчет запасов по месторождениям «Надежда», «Смежное», «Верхнее», «Трассовое», «Хвойное» и проявлениям Табардыр, Кэдэрги, Склон, Еньне Центрально-Алданского золотосодержащего района Республики Саха (Якутия). ООО «ОРЕОЛЛ-ГЕО»; 2017. Т. 2, кн. 1.

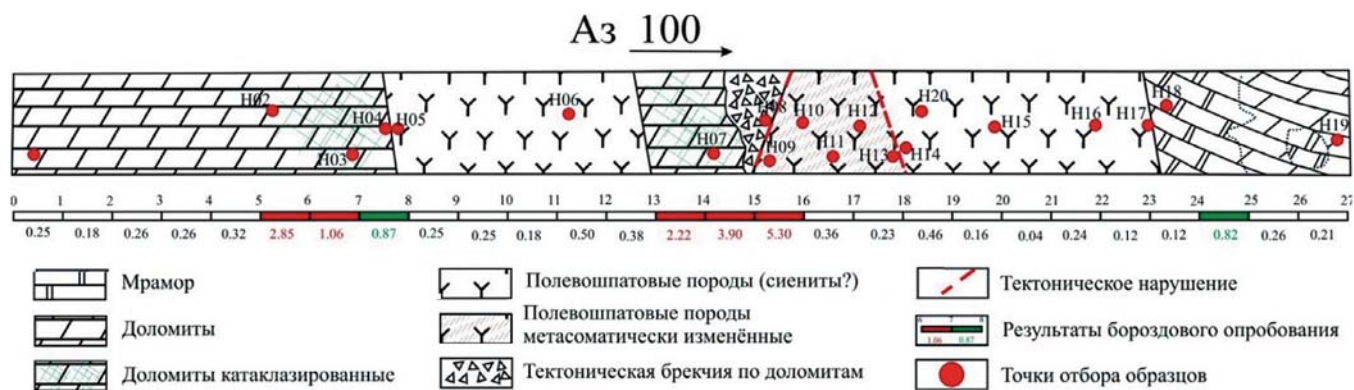


Рис. 2
Геологическая схема
крутопадающей
минерализованной зоны, вскрытой
в северном борту карьера

Fig. 2
Geological map of steeply
dipping mineralized zone
discovered at northern pit
wall

доломитами и сиенитами (рис. 2).

Руды Нижнеякоkitского рудного поля по буримости отнесены к VI–VII категории². Крепость их по шкале проф. М.М. Протоdjяконова составляет 2–4. Руды месторождения залегают в зоне вечномёрзлых грунтов, поэтому, несмотря на невысокую крепость пород, отработка их требует применения буровзрывных работ. Коэффициент разрыхления дезинтегрированных пород – 1,4. Содержание свободной SiO₂ в рудах – более 70%. Плотность вмещающих пород меняется от 2,45 до 2,78 т/м³ и в среднем составляет 2,7 т/м³. Естественная влажность пород менее 1%. Временное сопротивление одноосному сжатию в сухом состоянии изменяется от 42,2 до 146,7 МПа.

В настоящее время на месторождениях «Надежда», «Смежное-2», «Верхнее» и «Трассовое» ведутся эксплуатационные работы по добыче руд. В период с 2008 по 2015 г. на месторождениях в сумме извлечено из недр 11358,6 тыс. т. руды, в них 14715,6 т. золота и 18,1 т. серебра. Эксплуатационные потери руды составили 2,1% (241,6 тыс. т), металла – 2,0% (302,3 кг золота и 350,0 кг серебра), разубоживание руды составило 8,0% (908,2 тыс. т). Погашено в недрах 9064,5 тыс. т руды, 13528,4 кг золота и 17,91 т серебра балансовых и забалансовых запасов категорий C₁ и C₂. Переработка руды и извлечение золота проводится на двух участках с применением метода кучного выщелачивания (КВ). Горнорудный комбинат «Нижнеякоkitский» перерабатывает руду с месторождений «Надежда», «Смежное-2» и «Трассовое», а на производственной площадке «Межсопочный» перерабатывает руду с месторождения «Верхнее».

По состоянию на конец 2019 г. месторождение «Надежда» отработано свыше, чем на 90%, «Смежное-2» – на 65% и «Верхнее» – на 45%. На месторождении «Трассовое» добычные работы находятся в стадии развития производственной мощности, а на месторождениях «Хвойное» и «Смежное-1» горные работы находятся в начальной стадии развития.

В связи с изменением экономических условий за период после утверждения ТЭО постоянных разведочных кондиций в 2008 году, ТКЗ Якутнедра было рекомендовано пересмотреть существующие кондиции для Нижнеякоkit-

ского рудного поля, поскольку переутверждение запасов по новым экономическим параметрам позволит вовлечь в отработку дополнительную часть из ранее забалансовых запасов и, как следствие, продлить срок эксплуатации месторождений Нижнеякоkitского рудного поля³.

Пересчет запасов в оптимизированном экономически обоснованном контуре карьера осуществлен по оптимизированному варианту при бортовом содержании золота 0,3 г/т, при минимальной мощности рудного тела и максимальной мощности пустого прослоя – 5 м⁴.

Рассмотрим особенности освоения месторождений Нижнеякоkitского рудного поля.

Особенности горно-геологических и горнотехнических условий разработки

Месторождение Надежда находится в северо-восточной части Нижнеякоkitского рудного поля, занимает водораздельное пространство ручьев Дьяхтар-Елбют, Сугурунгу-Табар и Табардыр-Юрюйэтэ. Расстояние до г. Алдан – 58 км, до Куранахской ЗИФ – 33 км. Общая площадь месторождения составляет около 2,0 км².

Золоторудные проявления месторождения Надежда по геолого-структурным особенностям, вещественному составу руд и околорудных метасоматитов относятся к куранахскому подтипу оруденения золото-джаспероидного геолого-промышленного типа. Золотоносность месторождения связана с дезинтеграцией пирит-кварцевых метасоматитов и перетолжением продуктов разрушения в карстовые полости неоген-четвертичного возраста.

Месторождения золота Смежное-1 и Смежное-2 фактически представляют собой две отдаленные части единого объекта и размещаются в пределах Нижнеякоkitского рудного поля в его центральной части. Эти месторождения также относятся к куранахскому типу месторождений в перетолженных корах выветривания.

По результатам отработки месторождения «Смежное-2» установлено, что на долю мелких рудных тел, со средними размерами по длине $l = 14,3$ м и ширине $b = 6,0$ м, площадью S менее 200 м², приходится 10,4% всех запасов; на долю средних по площади рудных тел, с $S = 200–2000$ м², со средними $l = 51,8$ м и $b = 14,9$ м, – 48,0% и на долю относительно крупных рудных тел, с $S > 2000$ м², со средними $l = 122,3$ м и $b = 27,3$ м, – 41,6%.

Причем, распределение золота весьма неравномерное: от безрудного или низкого содержания (менее 0,3%) до высокого – до 10 г/т. Это предопределило необходимость разделения извлекаемых запасов со складированием не-

2 ТЭО постоянных разведочных кондиций для золоторудных месторождений Нижнеякоkitского рудного поля и подсчет запасов по месторождениям «Надежда», «Смежное», «Верхнее», «Трассовое», «Хвойное» и проявлениям Табардыр, Кадэрги, Склон, Еньне Центрально-Алданского золотоносного района Республики Саха (Якутия). ООО «ОРЕОЛЛ-ГЕО»; 2017. Т. 2, кн. 1.

3 Там же.

4 Там же.

кондиционных бедных руд во временные рудные склады, укладкой бедных кондиционных руд в штабели выщелачивания и переработкой рядовых и богатых кондиционных руд на обогатительной фабрике. Оптимизация структуры производственной мощности рудника по добыче бедных некондиционных, бедных кондиционных и рядовых кондиционных руд, обеспечивающего устойчивое эффективное функционирование предприятия в сложных экономических условиях, позволяет повысить полноту освоения запасов месторождения.

Месторождение Трассовое расположено в западной части Нижнеякобитского рудного поля. Рудные залежи, расположенные в толще дезинтегрированных отложений коры выветривания, также характеризуются невыдержанными характеристиками элементов залегания рудных тел, резкой изменчивостью глубины залегания верхних и нижних границ, наличием раздувов и пережимов. Морфология рудных залежей – сложная, определяется сочетанием линейных лентообразных и площадных плащеобразных форм. Месторождение находится на начальной стадии эксплуатации.

При этом, как и характерно для всех месторождений Нижнеякобитского рудного поля, богатые руды проявляются на ограниченных участках. При обосновании параметров геотехнологии учитывается, что появление богатых руд обусловлено рудоконтролирующими дайками, либо связано с рудоподводящими каналами, мощность которых ограничена, а залегание – либо крутопадающее, либо субвертикальное.

Минеральный состав руд: карбонаты (1,5–17%), окислы и гидроокислы железа и марганца (10–17,4%), глинистые минералы (14,5–35%), кварц и полевые шпаты (38,3–73,2%), прочие минералы (0,01–0,3%). Основным золотосодержащим минералом является лимонит. Кроме тонкодисперсного золота в лимоните, в окисленных рудах содержится так называемое «хрупкое» золото, представленное мельчайшими выделениями в тонком сростании с гидроокислами железа и глинистыми минералами. Кроме золота, руды всех месторождений содержат серебро.

Показатели технологии переработки руд

Минеральный состав руд и вмещающих пород, относительно повышенного содержания драгоценных металлов указывает на целесообразность использования методов кучного выщелачивания для извлечения золота и серебра.

Руды всех месторождений по химическому составу весьма близки и идентичны. Среднее содержание золота и серебра по участкам составило 1,23 г/т и 1,53 г/т, соответственно; извлечение золота и серебра в товарную продукцию методами кучного выщелачивания 75,50 и 11,56% (табл. 1).

Таблица 1
Средние содержания металлов в руде и их извлечения за 2008–2017 гг.

Участок	Среднее содержание в руде, г/т		Извлечение, %	
	Золото	Серебро	Золото	Серебро
Надежда	1,24	1,46	75,36	12,25
Смежное	1,25	1,42	75,37	10,87
Верхнее	1,16	2,08	76,58	9,11
Трассовое	1,04	1,46	75,32	5,83
Итого	1,23	1,53	75,50	11,56

Серебро, из-за весьма низкого содержания в рудах и невысокого извлечения имеет незначительную извлекаемую ценность, и может рассматриваться в качестве попутного компонента только условно.

В период с 2008 по 2016 г. ГРК «Нижнеякобитский» перерабатывал руду участков «Надежда», «Смежное», «Трассовое» методом кучного выщелачивания. Месторождение «Верхнее» перерабатывалось на ГРК «Межсопочное». Ввиду сокращения затрат на транспортировку и снижения капитальных затрат на строительство перерабатывающих мощностей ГРК «Нижнеякобитский», отработка участка «Верхнее» осуществляется на ГРК «Межсопочное».

При обосновании кондиций контур продуктивной залежи был проведен по условному бортовому содержанию, близкому к содержанию золота в хвостах обогащения – 0,3 г/т. При таком подходе к проектированию в контуре залежи сосредоточены запасы при максимальном коэффициенте рудоносности. В целом, по всем месторождениям Нижнеякобитского рудного поля снижение бортового содержания золота с 0,6 г/т до 0,3 г/т привело к увеличению (приросту) балансовых запасов на 75,2% по руде и на 31,3% по золоту.

Совершенствование проектных решений при снижении в 2 раза бортового содержания золота привело к формированию технологических схем добычи и переработки руды, которые включают следующие операции:

- вскрытие и буровзрывная разработка карьера по комбинированной продольно-поперечной системе, предусматривающей отработку месторождения экскаваторами с применением при минимальном разносе рабочего борта вкрест простирания рудных залежей;

- доставка автосамосвалами кондиционной руды из карьеров на рудный склад дробильно-сортировочной установки с формированием бульдозером рудного усреднительного склада;

- подача бульдозером руды на дробильно-сортировочную установку с предварительным грохочением, которая перед двухстадиальным дроблением руды с получением готового класса минус 40 мм конвейером подается на склад;

- подача бульдозером дробленой руды на установку окомкования, смешивание руды с цементом, окомкование смеси в аппарате барабанного типа, откуда готовые окатыши конвейером транспортируются на площадку кучного выщелачивания. Затем окатыши со стационарных конвейеров перегружаются на передвижные, посредством штабелеукладчика формируется рудный штабель выщелачивания, высотой 7 м, с радиусом укладки руды до 30 м;

- выщелачивание руды (перевод золота в раствор) цианидными защелаченными растворами с применением бактерий [14].

Table 1
Average ore grades and metal recovery in 2008-2017

Region	Average ore content, g/t		Extraction, %	
	Gold	Silver	Gold	Silver
Nadezhda	1.24	1.46	75.36	12.25
Smezhnoe	1.25	1.42	75.37	10.87
Verhnee	1.16	2.08	76.58	9.11
Trassovoe	1.04	1.46	75.32	5.83
Total	1.23	1.53	75.50	11.56

Показатели выщелачивания

Промышленная отработка месторождений Нижнеякоитского рудного поля, за исключением месторождения Хвойное, осуществляется с 2008 года. На промплощадке «Нижнеякоитский» методом кучного выщелачивания перерабатываются руды участков «Надежда», «Смежное-1», «Смежное-2» и «Трассовое»⁵.

Результаты технологических испытаний показывают, что руда месторождений Нижнеякоитского рудного поля пригодна для переработки кучным выщелачиванием. Схема технологического процесса включает двухстадийное дробление в замкнутом контуре с грохочением и получением материала размером – 40 мм. Дробленая руда окомковывается с цементом и укладывается в штабеля. Штабеля затем орошаются раствором цианидов, а продуктивные растворы собираются в резервуары.

Продуктивные растворы прокачиваются через сорбционные колонны, где золото осаждается на активированный уголь. Периодически уголь с адсорбированным металлом отправляется на десорбцию и последующий электролиз. Готовая товарная продукция – слитки лигатурного золота – сплав Доре. При отработке месторождения необходимо уделить внимание управлению качеством добываемой и подаваемой на переработку руды [15].

Проектная производительность – 1,25 млн. т в год, фактическая – 2,10 млн. т в год (2016 г). На промплощадке «Межсопочное» перерабатываются руды участка Верхнее. Фактическая производительность – 0,6 млн. т в год. Методом кучного выщелачивания перерабатывается 0,52 млн. т в год. Оставшиеся 0,08 млн. т в год перерабатываются по отдельной гидromеталлургической технологии на опытно-промышленной установке (кучное выщелачивание класса -40+1 мм и чановое выщелачивание класса -1+0 мм). С учётом незначительного экономического эффекта

⁵ ТЭО постоянных разведочных кондиций для золоторудных месторождений Нижнеякоитского рудного поля и подсчет запасов по месторождениям Надежда, Смежное, Верхнее, Трассовое, Хвойное и проявлениям Табарды, Кэдэрги, Склон, Енные Центрально-Алданского золотоносного района Республики Саха (Якутия). ООО «ОРЕОЛЛ-ГЕО»; 2017. Т. 2, кн. 1.

по сравнению с кучным выщелачиванием компания отказалась от внедрения данной технологии на всю производительность.

По результатам промышленной отработки месторождения были оптимизированы проектные технологические параметры технологии кучного выщелачивания: увеличена высота отсыпки куч с 6 до 10 м, снижен расход цианида с 0,37 до 0,12 г/т, увеличен расход цемента с 12 до 15 кг/т. Согласно результатам выщелачивания в агитационном режиме, извлечение золота зависит от крупности дробления. Данная зависимость наблюдается до определенной крупности. Установлено, что процесс выщелачивания золота протекает быстрее при более мелком дроблении.

Заключение

Однотипность горно-геологических условий месторождения Нижнеякоитского рудного поля определила возможность эффективного применения открытой геотехнологии с разделением руд на богатые для передела на обогатительной фабрике, кондиционных фракций для кучного выщелачивания, некондиционных фракций – на склад бедных руд и безрудную фракцию – на отвал. Руды месторождения отличаются значительной изменчивостью содержания золота. При отработке месторождения необходимо уделить внимание управлению качеством добываемой и подаваемой на переработку руды. Выбор метода кучного выщелачивания с биоокислением руд определяется сочетанием благоприятных факторов для применения биологических бактерий в сложных климатических условиях Якутии. Доказано, что дифференцированный подход к выбору способа переработки руд различного качества с обоснованием рациональной структуры производственных мощностей рудника и перерабатывающих производств способен обеспечить рост совокупного дисконтированного дохода и полноту освоения месторождения, даже в сложных природно-климатических и горнотехнических условиях Якутии.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н. (ред.) *Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых*. М.: ИПКОН РАН; 2014.
2. Asad M.W.A., Qureshi M.A., Jang H. A review of cut-off grade policy models for open pit mining operations. *Resources Policy*. 2016;49:142–152. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.05.005.
3. Zayernyuk V.M., Mukhomorova I.V., Zabaikin Iu.V., Egorova E.N., Seifullaev B.M. Analysis of the current state and prospects of the gold mining industry in Russia. *Espacios*. 2017;38(58):24. Available at: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n58/a17v38n58p24.pdf>.
4. Howe S., Pan J. *Application of Enterprise Optimisation Considering Ultra High Intensity Blasting Strategies*. Whittle Consulting Ltd.; 2018.
5. Wellmer F.-W., Scholz R.W. What Is the Optimal and Sustainable Lifetime of a Mine? *Sustainability*. 2018;10(2):480. DOI: 10.3390/su10020480.
6. Трубецкой К.Н., Рьльникова М.В. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S1-1):21–32.
7. Арсентьев А.И., Холодняков Г.А. *Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений*. М.: Недра; 1994.
8. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. *Проектирование карьеров*. М.: Гемос Лимитед; 2002.
9. Вареничев А.А., Комогорцев Б.В., Громова М.П. Сырьевая база золота России. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(8):212–220. Режим доступа: http://www.giab-online.ru/files/Data/2016/8/212_220_8_2016.pdf.
10. Беневольский Б.И. *Золото России: проблемы использования и воспроизводства минерально-сырьевой базы*. 2-е изд. М.: Геоинформцентр; 2002.
11. Абрамова М.А. Перспективы мирового потребления драгоценных металлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S52):8–12. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-52-8-12.
12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(6):591–594.

13. Arteaga F. *The Mining Rate in Open Pit Mine Planning. A thesis submitted for the degree of Master of Philosophy at The University of Queensland.* The University of Queensland; 2014. Available at: <https://vdocuments.site/the-mining-rate-in-open-pit-mine-planning.html>.
14. Башлыкова Т.В., Рыжов С.В., Аширбаева Е.А., Грознов И.Н. Способ извлечения благородных металлов из отработанных штабелей кучного выщелачивания. Патент на изобретение РФ № 2622534. Заявл. от 23.09.2015. Оpubл. 16.06.2017.
15. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Методологические аспекты проектирования системы управления минерально-сырьевыми потоками в полном цикле комплексного освоения рудных месторождений. *Рациональное освоение недр.* 2016;(2-3):36–41.

References

- Trubetskoy K.N. (ed.) *Development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies of complex development of mineral deposits.* Moscow: IPKON RAN; 2014. (In Russ.)
- Asad M.W.A., Qureshi M.A., Jang H. A review of cut-off grade policy models for open pit mining operations. *Resources Policy.* 2016;49:142–152. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.05.005.
- Zayernyuk V.M., Mukhomorova I.V., Zabaikin Iu.V., Egorova E.N., Seifullaev B.M. Analysis of the current state and prospects of the gold mining industry in Russia. *Espacios.* 2017;38(58):24. Available at: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n58/a17v38n58p24.pdf>.
- Howe S., Pan J. *Application of Enterprise Optimisation Considering Ultra High Intensity Blasting Strategies.* Whittle Consulting Ltd.; 2018.
- Wellmer F.-W., Scholz R.W. What Is the Optimal and Sustainable Lifetime of a Mine? *Sustainability.* 2018;10(2):480. DOI: 10.3390/su10020480.
- Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V. Situation and prospects of open-pit mining development in the XXI century. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin.* 2015;(S1-1):21–32. (In Russ.)
- Arsentieva A.I., Kholodnyakov G.A. *Design of mining operations in open field development.* Moscow: Nedra; 1994. (In Russ.)
- Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu. *Pit design.* Moscow: Gemos Limited; 2002. (In Russ.)
- Varenichev A.A., Komogortsev B.V., Gromova M.P. The raw material base of gold Russia. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin.* 2016;(8):212–220. (In Russ.) Available at: http://www.giab-online.ru/files/Data/2016/8/212_220_8_2016.pdf.
- Benevolsky B.I. *Gold of Russia: Challenges in Use and Reproduction of Mineral Resources.* 2nd ed. Moscow: Geoinformtsentr; 2002. (In Russ.)
- Abramova M.A. Perspectives for global consumption of the precious metals. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin.* 2018;(S52):8–12. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-52-8-12.
- Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry.* 2015;7(6):591–594.
- Arteaga F. *The Mining Rate in Open Pit Mine Planning. A thesis submitted for the degree of Master of Philosophy at The University of Queensland.* The University of Queensland; 2014. Available at: <https://vdocuments.site/the-mining-rate-in-open-pit-mine-planning.html>.
- Bashlykova T.V., Ryzhov S.V., Ashirbaeva E.A., Groznov I.N. *Method for extracting precious metals from spent piles of heap leaching. Patent for invention of the Russian Federation No. 2622534.* Statement of 23.09.2015. Publ. 16.06.2017. (In Russ.)
- Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Methodological aspects of the engineering of mineral raw flows control system in the full cycle of comprehensive of ore deposits development. *Ratsionalnoe osvoenie neдр.* 2016;(2-3):36–41. (In Russ.)

Информация об авторах

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теории проектирования освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-9984-5980; e-mail: rylnikova@mail.ru.

Рыжов Сергей Владимирович – Председатель Совета директоров золото- и оловодобывающей компании, ПАО «Селигдар»; научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. академика Н.В. Мельникова, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: sryzhov@seligdar.ru.

Есина Екатерина Николаевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1685-2406; e-mail: esina555@list.ru.

Information about the author

Marina V. Rylnikova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-9984-5980; e-mail: rylnikova@mail.ru.

Sergey V. Ryzhov – Chairman of the Board of Directors, Seligdar Holding; Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: sryzhov@seligdar.ru.

Ekaterina N. Esina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Scientist, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1685-2406; e-mail: esina555@list.ru.

Article info

Received: 23.04.2020

Revised: 30.04.2020

Accepted: 06.05.2020

Информация о статье

Поступила в редакцию: 23.04.2020

Поступила после рецензирования: 30.04.2020

Принята к публикации: 06.05.2020