

УДК 622.271

Храпков Петр Александрович, Пличко Сергей Сергеевич, Новиков Кирилл Григорьевич

Кафедра цифровой инженерии, Политехнический институт ФГБОУ ВО «СВГУ»,
Магадан, Россия, 685000

Автор для переписки: Храпков П.А.; e-mail: phrapkov@gmail.com; Студент 4 курса Политехнического института, кафедры геологии и горного дела, Горное дело (Маркшейдерское дело)

Соавторы: Пличко С.С. Новиков К.Г. Ассистенты кафедры цифровой инженерии, Политехнического института ФГБОУ ВО «СВГУ»

Научный руководитель: Арно Вероника Владимировна, доцент, кандидат технических наук

ПРОЕКТ ОТКРЫТОЙ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИРБЫЧАН

Аннотация (русский): Представлены результаты технического проекта отработки золото-серебряного месторождения «Ирбычан» открытым способом. Месторождение расположено в Северо-Эвенском районе Магаданской области и относится к эпитермальному типу с комплексным золотосеребряным оруденением. Приведены геологическая характеристика объекта (строение рудных тел, запасы полезного ископаемого) и основные технические решения по вскрыше, системам разработки, буровзрывным работам, погрузочно-транспортному оборудованию. Оптимизированы параметры карьера с учётом устойчивости бортов и минимизации потерь и разубоживания руды [1]. Эксплуатационные потери прогнозируются на уровне ~3,4%, разубоживание ~22%. Для добычи руды и вскрышных пород подобран комплекс техники: гидравлические экскаваторы Komatsu PC1250 с ковшами 6,5 и 3,5 м³, 30-тонные автосамосвалы БелАЗ-7540К и вспомогательное оборудование. Описаны мероприятия по охране недр (рациональное использование запасов, учет потерь) и охране окружающей среды: рекультивация нарушенных земель, охрана водных ресурсов, пылеподавление. Проведена оценка

технологических свойств руд (содержание Au ~5 г/т, Ag ~160 г/т) и указано, что переработка планируется методом кучного выщелачивания с использованием процесса Меррилл-Кроу, обеспечивающего извлечение золота ~97–98% и серебра ~95–98%. Полученные результаты демонстрируют возможность эффективного освоения небольшого удалённого месторождения с соблюдением нормативных требований по технике безопасности и экологии.

Ключевые слова (русский): открытые горные работы; золотосеребряное месторождение; потери и разубоживание; буровзрывные работы; маркшейдерия; рекультивация.

Abstract (English): *Development of the Irbychan Gold-Silver Deposit by Open-Pit Mining.* This article presents the results of a technical project for open-pit exploitation of the Irbychan gold-silver deposit in the Magadan Region of Russia. The deposit is an epithermal Au-Ag occurrence with complex vein mineralization. We provide the geological characterization (structure of ore bodies, reserves) and the main engineering solutions for pit opening, mining system, drilling and blasting, loading and haulage equipment. The pit design parameters were optimized considering slope stability and minimizing ore loss and dilution. Operational ore losses are forecast at ~3.4% and dilution at ~22%. A mining fleet was selected including Komatsu PC1250 hydraulic excavators (6.5 and 3.5 m³ buckets), 30-ton BelAZ-7540K haul trucks, and auxiliary equipment to handle ore and waste. Measures for resource conservation (maximal recovery of reserves, loss accounting) and environmental protection are described: land reclamation, water protection, and dust suppression. The technological properties of the ore (average Au ~5 g/t, Ag ~160 g/t) are evaluated, and processing is planned via heap leaching with the Merrill–Crowe process achieving ~97–98% gold and ~95–98% silver recovery. The results demonstrate the feasibility of efficiently developing a small, remote gold-silver deposit while complying with safety and environmental regulations.

Keywords (English): open-pit mining; gold-silver deposit; ore loss and dilution; drilling and blasting; mine surveying; land reclamation.

Введение

Магаданская область отличается значительными запасами золота, в том числе рудного золота в труднодоступных районах северо-востока России. В 2020 году ООО «Эвенская горнорудная компания» приобрела у компании «Полиметалл» ряд перспективных месторождений в Северо-Эвенском округе – Дальнее, Ирбычан, Сопка Кварцевая – вместе с запасами ранее добытой бедной руды. Для переработки добываемых руд компания построила золотоизвлекательную фабрику мощностью до 1 млн т руды в год, запущенную летом 2022 г., применяющую технологию кучного выщелачивания с осаждением металлов по методу Merrill–Crowe. Данный комплекс ориентирован прежде всего на бедные золотосодержащие руды (содержания Au порядка 0,7 г/т, Ag ~18 г/т), нетипичные для региона, что определило выбор технологии.

Месторождение **Ирбычан** расположено в левобережье р. Гижига, в 130 км к югу от пос. Эвенск (районный центр). Административно оно относится к Северо-Эвенскому городскому округу Магаданской области. По геологическому строению Ирбычан является эпитермальным золото-серебряным объектом позднемелового возраста, локализованным в вулканогенных породах (андезиты, риодацитовые туфы) Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Оруденение жильного типа: выявлены три прожилково-жильные зоны (Северная, Центральная, Восточная) с крутым падением жил на северо-запад. Рудные тела представлены кварцевыми и адуляр-кварцевыми жилами и зонами сетчатого трещиноватого окварцевания мощностью от 0,5 до 20 м (в среднем ~8 м), протяжённостью 40–250 м по простиранию и до 100–300 м по падению. Руды комплексные: помимо золота содержат значительное количество серебра (соотношение Au:Ag варьирует от 1:20 до 1:50) и полиметаллов. Главные рудные минералы – пирит, марказит, аргентит,

акантит, фрейбергит, прустит; золотосодержащие минералы представлены тонкодисперсным самородным золотом (пробность 550–700) в ассоциации с сульфидами. С поверхности отмечена зона окисления (лимонит, ярозит, гипс и др.). Плотность руды $\sim 2,5$ т/м³. По геохимическим и геологическим характеристикам руды Ирбычана аналогичны рудам месторождений Сопка Кварцевая и Дальнее, расположенных в той же золоторудной провинции Колымы.

Балансовые запасы Ирбычанского месторождения (категории C1+C2) по данным государственной экспертизы (ТКЗ, 2017 г.) оцениваются в порядка 3,24 т золота и 100,8 т серебра для открытой отработки. В том числе по категории C1 учтено около 589 тыс. т руды с содержанием Au $\sim 4,9$ г/т (2,892 т золота) и Ag ~ 160 г/т (93,8 т серебра). Кроме того, за пределами контуров проектного карьера учитывались забалансовые запасы (около 260 тыс. т руды с содержанием Au $\sim 3,36$ г/т, Ag ~ 157 г/т), которые могут быть вовлечены при благоприятной конъюнктуре. Основная часть руд залегает ниже глубины сезонного промерзания, в талых породах, что облегчает их отработку. Горноклиматические условия района характеризуются многолетней мерзлотой и отсутствием инфраструктуры, поэтому освоение месторождения требует применения специальных технических решений и тщательного планирования горных работ.

Целью исследования является обоснование рациональной технологии разработки месторождения Ирбычан открытым способом с учётом геологических и климатических особенностей, обеспечением максимального извлечения ценных компонентов из недр при минимизации потерь и разубоживания, а также выполнении требований промышленной безопасности и охраны окружающей среды. В рамках работы решены следующие **задачи**: (1) анализ геолого-маркшейдерской информации и подготовка исходных данных для проектирования карьера; (2) выбор оптимальной схемы вскрытия и системы разработки с учетом морфологии рудных тел; (3) расчет основных параметров карьера (глубина, углы

откосов, ширина рабочих площадок, берм и т.д.) исходя из устойчивости бортов и условий техники безопасности; (4) прогноз потерь и разубоживания руды с применением действующих методик и рекомендаций; (5) подбор и расчет требуемого горного оборудования для добычи руды и вскрыши, увязка комплексов экскаватор–автосамосвал; (6) разработка плана рекультивации нарушенных земель и мероприятий по охране недр и окружающей среды.

Методы и материалы

Исходные данные. За исходную информацию приняты результаты геологоразведочных работ (геологическая модель месторождения, контуры рудных тел, данные опробования), материалы отчёта с подсчетом запасов (ТКЗ 2017 г., протокол №54), а также нормативно-методические документы горной отрасли РФ. Геологическая изученность месторождения достаточна для проектирования карьера: категория разведанности запасов С1 (детальная разведка). Рудные тела крутонаклонные, сложной формы, что осложняет их полное выемку без разубоживания. Среднее содержание золота по балансовым запасам ~5 г/т, серебра ~160 г/т, при пороговом содержании для отработки около 1 г/т Au [7]. Исходный проектный документ – **Технический проект разработки месторождения Ирбычан открытым способом**, выполненный ООО «Геотехпроект» (2020 г.), – послужил базой для анализа и обобщения технических решений [1].

Проектирование карьера. Границы карьерного поля и контур конечного карьера определялись графо-аналитическим методом с поэтапным уточнением по результатам экономического анализа. Вначале была выполнена геометризация запасов и построены вертикальные разрезы по простиранию рудных зон. На разрезах производилась отстройка контуров карьера при заданных устойчивых углах откосов бортов, обеспечивающих сохранность массива. В качестве **предельугольных параметров** приняты следующие значения по результатам инженерно-геологических изысканий: устойчивый угол откоса в скальных породах

45° (для расчёта конечного контура карьера), во вскрышных рыхлых отложениях – 34°; коэффициент запаса по откосам 1,2. Поскольку в составе рудных зон присутствуют слабосцементированные участки, при проектировании учитывались возможные обрушения маломощных висячих боков, что потребовало заложения берм безопасности шириной не менее 5 м через каждый третий уступ. Карьер спроектирован с делением на два участка (карьера) – Центральный и Восточный – соответствующих одноимённым рудным зонам. Основной объём запасов сосредоточен в Центральном карьере, тогда как Восточный карьер по состоянию на 2020 г. содержит ограниченные запасы и в проекте предусмотрен как потенциальный, с минимальными первоначальными контурами.

Система разработки принята комбинированная: транспортная с применением автомобильного транспорта, с селективной выемкой руды. Поскольку оруденение жильное, с чередованием рудных и пустых пород, ключевым было определение оптимальной высоты рабочего уступа в руде. Рассмотрены варианты высоты добычного уступа 2,5 м, 5 м и 7,5 м; критерием оптимизации служило снижение потерь руды на контактах и разубоживания при разной высоте слоя. По результатам технико-экономического сравнения выбран уступ высотой **5 м** как обеспечивающий минимальные потери ценной руды при умеренном увеличении объёма буровзрывных работ [4]. Высота уступов во вскрышных скальных породах принята 10 м (т.к. они не требуют столь высокой избирательности), а в рыхлых четвертичных отложениях – 5 м (из соображений устойчивости откоса). **Рабочие углы откоса уступов:** в скальных породах до 70°; фактически угол откоса рабочего уступа в руде выбирался близким к падению рудного тела, но не превышающим 70°. Для рыхлых пород рабочий угол 50°. На рабочих уступах обеспечивается берма безопасности 3 м (для ловушки обрушившихся блоков). **Минимальная ширина рабочей площадки** – 15 м, что достаточно для маневрирования буровой установки и экскаватора на 5-метровом уступе.

Вскрытие карьера осуществляется комбинированно: верхние горизонты (до глубины ~30 м) вскрываются одноступенчато въездной траншеей с выходом на дневную поверхность, дальнейшее углубление карьера – по спиральным съездам вдоль борта. Проектом предусмотрено два транспортных съезда: один для Центрального карьера (расположен по висячему боку рудной зоны), второй – для Восточного карьера. Угол наклона съездов 8–10% (в пределах допустимого для карьерных автосамосвалов). Радиусы закруглений на поворотах не менее 15 м, ширина двустороннего проезда 12 м. На период пусковых работ и отработки верхних уступов планируется временный съезд с внешней стороны борта с последующим сносом при углублении карьера.

Расчёт запасов, потерь и разубоживания. Для контроля полноты извлечения руды был выполнен блочный пересчёт запасов в пределах контура проектного карьера. Рудное тело Центральной зоны разделено на блоки по падению (этажами высотой 5 м) и по простирацию (блоки вдоль простираания жилы длиной 20 м). По каждому блоку определены геологические (балансовые) запасы металлов и ожидаемые эксплуатационные потери и разубоживание при принятой системе разработки. Расчёт выполнялся в соответствии с отраслевой **Методикой определения и учета потерь и разубоживания золотосодержащей руды при добыче** (Иргиредмет, 1994), согласованной Госгортехнадзором РФ. Эта методика предусматривает классификацию видов потерь руды (невскрытые целики, неотбитые выпоры, потери при погрузке и транспортировке и др.) и разубоживания (залуживание пустых пород при разуборке контактов, переотбивка ниже подошвы и др.) в зависимости от системы разработки и параметров оборудования. Для принятой системы (селективная выемка экскаватором, автомобильный транспорт) по справочным таблицам методики определены нормативные коэффициенты потерь и разубоживания. Кроме того, в проекте были выполнены специальные расчёты потерь руды из-за несовпадения контура рудного тела с линией отбойки (для крутонаклонного пласта) – методом геометрического моделирования (приложение

к проекту). С учётом всех факторов **расчётные эксплуатационные потери руды** составили около 3,4% от геологических запасов, а **коэффициент разубоживания** – порядка 22%. Это означает, что из ~588 тыс. т балансовой руды ожидается извлечь ~568 тыс. т чистой руды, при этом в процессе добычи дополнительно вовлекается около 125 тыс. т пустой породы (что снижает среднее металлосодержание в рудной массе на выходе). Указанные показатели соответствуют допустимым для золоторудных месторождений со сложной тонкой жилой формой оруденения. Отметим, что применяемые методические указания Иргиредмета 1994 г. разрабатывались на основании опыта 1970–80-х годов и не учитывают полностью современные технологии горных работ. Тем не менее, в отсутствие более актуальных нормативов они используются как стандарт в золотодобыче РФ, и их применения достаточно для целей проекта. В обсуждении результатов ниже приведена оценка адекватности этих норм для условий рассматриваемого объекта.

Горное оборудование. По заданной годовой производительности и объёмам вскрышных работ произведён подбор комплекта техники для добычи. Разработку планируется вести круглогодично в две смены по 11 часов (340 рабочих дней в году с учётом погодных простоев). Расчётная средняя производительность горных работ – около 5–6 млн т горной массы в год (руда + вскрыша). Для обеспечения такого объёма при относительно коротком плече отвозки (до 2 км) выбран комплекс: экскаватор-гидравлик **Komatsu PC1250-8** (масса ~110 т) в двух модификациях – с прямой лопатой (ковш 6,5 м³) для погрузки скальной вскрыши, и с обратной лопатой (ковш 3,5 м³) для избирательной выемки руды. Число экскаваторов – 2 единицы (по одному каждого типа). В качестве основного транспортного средства приняты карьерные самосвалы **БелАЗ-7540К** грузоподъёмностью 30 т. Данная модель удовлетворяет требованиям по мощности (298 кВт) и скорости передвижения (до 50 км/ч) для заданных условий. Расчёт показал необходимое количество самосвалов ~7 ед. (5 на вскрышу, 2 на руду) при коэффициенте использования парка ~0,85; с учётом резерва в автопарк заложено **8 самосвалов**.

Для бурения взрывных скважин выбран буровой станок **Atlas Copco DM25SP** (гусеничный, дизельный), способный бурить вертикальные скважины диаметром до 200 мм. Бурение во вскрышных твердых породах запроектировано диаметром **158 мм**, в руде – **116 мм** (уменьшенный диаметр для повышения точности отбойки и снижения разубоживания). Заряжание скважин – сухими гранулированными ВВ (nitrate fuel oil – АНФО), поскольку породы относительно сухие. Используются бризантные ВВ на основе аммиачной селитры, допущенные к применению в РФ (типичные марки – ПВВ-5А, Гранулит и т.п.). Инициирование – детонирующий шнур и электродетонаторы с радиосинхронизацией либо неэлектрическая система (Nonel). **Удельный расход ВВ** принят по расчету ~0,5 кг на кубометр породы, исходя из требуемой крупности дробления (для экскавации экскаватором вместимостью 6,5 м³) [4]. Паспорты буровзрывных работ разработаны для высоты уступа 10 м (скальная вскрыша) и 5 м (руда), с площадью обрушения ~20×20 м во вскрыше и ~10×10 м в руде. Для обеспечения устойчивости бортов применяется **контурное взрывание** по внешнему контуру карьера: бурятся дополнительные параллельные скважины малого диаметра (75 мм) с пониженной плотностью заряжания или с использованием электродетонаторов задержанного действия, формируя щелеобразующий надрез по линии откоса. Контурные скважины бурятся с наклоном, повторяющим проектный уклон откоса (~70°), и заряжаются ослабленными зарядами (патронированные ВВ малого диаметра). Это позволяет минимизировать зону разрушения за пределами контура и получить устойчивую поверхность откоса после отбойки.

Вспомогательное оборудование на карьере включает: бульдозеры **Komatsu D155A-5** (мощн. 225 кВт, массой 38 т) – 2 единицы, для расчистки площадок, отвалообразования и поддержания съездов; один бульдозер меньшего класса **Komatsu D85ESS** (мощн. 138 кВт) – для планировочных работ и рекультивации; фронтальный погрузчик **Komatsu WA470-6** (ковш 3,2 м³) – для вспомогательных погрузочных работ, управления штабелями руды; автогрейдер **Komatsu GD825** –

для содержания дорог, особенно зимой (снегоочистка, посыпка); водополивочная машина на шасси 20 т – для пылеподавления на дорогах в летний период. Для перевозки рабочих и мелких грузов – вахтовый автобус высокой проходимости и несколько единиц автотранспорта (ЛЭП, топливозаправщик, ремонтная мастерская на колесах). Весь парк техники запитан дизельным топливом; в проекте предусмотрено устройство топливного склада и заправочных пунктов на промплощадке.

Организация горных работ. Годовой производственный план предусматривает добычу ~0,6 млн т руды и ~5 млн т вскрышных пород. Столь высокий коэффициент вскрыши (~8:1 по массе) обусловлен прерывистым характером рудных жил и значительным объемом пустых пород между ними. Руда по мере добычи будет вывозиться на дробильно-сортировочный узел и укладываться в штабеля на площадке кучного выщелачивания, расположенной рядом (проектируемый золотоизвлекательный комплекс). Вскрышные породы отвозятся во внешний отвалоюмкость, запроектированный к северу от карьера. Отвалы скальных пород формируются с откосами 30° и высотой ярусов 20 м, с бермами 10 м. Рыхлые грунты (суглинки, пески) отсыпают отдельным порогом для использования в рекультивации [5]. По окончании работ максимальные размеры Центрального карьера составят ~0,48×0,37 км по бровке, глубина ~130 м; Восточного – 0,39×0,17 км, глубина ~80 м. Период активной добычи оценивается в 2–3 года, после чего возможно продолжение отработки оставшихся забалансовых руд или перевод месторождения на подземный метод (при выявлении глубоких рудных столбов).

Охрана недр. Проектом предусмотрен комплекс мер по наиболее полному извлечению ценных компонентов. Геолого-маркшейдерская служба предприятия будет осуществлять оперативный контроль качества руды (отбор и анализ проб на экскавации каждого блока) и учет потерь/разубоживания. Рудные контуры на рабочих площадках размечаются маркшейдерами перед бурением; использование

современной системы GPS-навигации на буровых станках обеспечивает точность позиционирования скважин и привязку к геологической модели. Предусмотрена **эксплуатационная разведка**: опережающее опробование вскрышных забоев, а также бурение неглубоких разведочных скважин с карьерных горизонтов по простиранию жил для уточнения контуров руды (на случай, если эксплуатационный контроль выявит значительные отклонения от прогнозной модели). В проект включён план геолого-маркшейдерского обеспечения, включая график периодической съемки карьера (не реже 1 раза в месяц) и обновления цифровой модели запасов. После завершения отработки будет произведена итоговая инвентаризация остаточных запасов с актом ликвидации [9, с. 588].

Результаты

Геометрические параметры карьера. В результате проектирования определено, что оптимальный контур Центрального карьера охватывает всю рудную зону Центральная до глубины 130 м. При этом балансовые запасы, вовлечённые в отработку, составляют ≈ 588 тыс. т руды (C1) с содержанием Au $\sim 4,9$ г/т и Ag ~ 160 г/т. Конечные контуры Восточного карьера ограничены верхней частью Восточной рудной зоны (до глубины ~ 80 м); из-за скудности разведанных запасов в этой зоне балансовые запасы Восточного карьера близки к нулю (основная часть восточной зоны отнесена к забалансовым запасам и в проекте не разрабатывается на данном этапе). Общий объём горной массы, подлежащей выемке, оценивается в ~ 15 млн м³ (около 37 млн т). Из них объём руды $\sim 0,59$ млн м³, вскрышных пород $\sim 14,4$ млн м³. Конфигурация карьера в плане – близкая к овальной, вытянутой вдоль простирания рудной зоны (~ 500 м длиной и 370 м шириной по поверхности для Центрального карьера). Площадь нарушенных горными работами земель – порядка 1,9 км², включая отвалы и инфраструктуру. Поскольку район экономически не освоен и рядом отсутствуют объекты, контур горного отвода был принят по фактическим границам карьера с охранной зоной 300 м.

Расчёт потерь и разубоживания подтвердил, что при выполнении предусмотренных технических решений **эксплуатационные потери** руды не превысят **3,4%** от массы (по золоту эквивалентно ~ 70 кг не извлечённого металла), а среднее **разубоживание** составит около **22%**. Таким образом, **коэффициент извлечения** золота из недр оценивается $\sim 0,966$ (96,6%) [2]. Полученные величины находятся в типичном диапазоне для карьерной отработки тонких рудных залежей. Для сравнения, по данным других исследований, часто априорно принимают 5–10% разубоживания, однако это может приводить к ошибкам в оценке экономики проекта [3, с. 152]. В нашем случае более высокая доля разубоживания отражает объективные геометрические трудности селективной выемки: мощности рудных жил соизмеримы с размерами экскавационного оборудования, что неизбежно ведёт к захвату части разубоживающей породы. Тем не менее, снижение высоты уступа в руде до 5 м и применение обратной лопаты ковшом $3,5 \text{ м}^3$ позволило ограничить разубоживание $\sim 22\%$, тогда как при высоте уступа 10 м оно возросло бы до $\sim 30\%$ (проверочный расчёт). Отметим, что **общее металлическое извлечение** золота повысится ещё на стадии переработки руды: содержание золота в конечном продукте (Доре) составит около 93% от содержания в недрах, учитывая технологические потери при выщелачивании $\sim 3\text{--}4\%$. Таким образом, суммарный коэффициент извлечения Au из недр в металл оценивается $\sim 0,93$, что является вполне удовлетворительным показателем.

Производительность и сроки работ. При выбранной схеме горных работ активная фаза добычи (полная отработка балансовых запасов карьера) может быть осуществлена примерно за **2 года** при ежегодной переработке $\sim 0,6$ млн т руды. В первый год планируется снять около 7–8 млн т вскрыши для обеспечения доступа к основным рудным столбам; во второй год – оставшуюся вскрышу и всю руду. После выемки балансовых запасов возможна доразведка и перевод части забалансовых ресурсов в промышленные – при благоприятной ценовой конъюнктуре это продлит жизнь карьера еще на 1–2 года. Строительство

инфраструктуры (включая вахтовый посёлок, дорожный подъезд, обоганительную установку) началось в 2021 г., ввод карьера в эксплуатацию по проекту намечен через 1 год после начала строительства, то есть фактически первые тонны руды ожидаются к концу 2022 года. Синхронно должен заработать и кучно-выщелачивальный комплекс. Таким образом, уже к 2023 г. «Эвенская ГРК» планирует приступить к выпуску золота и серебра с данного месторождения.

Выбор технологии переработки. Высокое содержание серебра в рудах Ирбычана (среднее соотношение $Ag:Au \approx 30:1$ по массе) накладывает особенность на технологию: прямое цианирование могло бы затрудняться из-за конкурентного выщелачивания серебра. Поэтому выбран комбинированный метод – кучное выщелачивание с осаждением драгоценных металлов цементацией на цинке (процесс Merrill–Crowe). Данный метод позволяет эффективно извлекать как золото, так и серебро из низкосортных руд. По лабораторным данным, ожидаемое извлечение золота составит **97–98%**, серебра **95–98%**. Это высокие показатели, достигаемые за счет тонкого измельчения (80% класса –74 мкм) и интенсивного выщелачивания с декантацией раствора [6]. Однако метод Merrill–Crowe требует чистых (осветленных и обезвоздушенных) растворов, что усложняет схему в сравнении с сорбционным извлечением (уголь в пульпе). Тем не менее, для условий небольшого автономного предприятия данный метод выбран как наиболее экономичный и адаптированный под металлогению сырья [8]. Фабрика, построенная Эвенской ГРК для переработки Ирбычанской и других руд, рассчитана на переработку до **1 млн т руды в год**, с выпуском около **700 кг золота и 18 т серебра ежегодно**. Эти показатели подразумевают среднее металлосодержание обрабатываемой руды $\sim 0,7$ г/т Au и ~ 18 г/т Ag, то есть завод ориентирован в основном на бедные руды (в том числе отвальные запасы Полиметалла). Высококачественная руда Ирбычана (5 г/т Au) может использоваться для обогащения питания фабрики, что повысит фактическое годовое производство

благородных металлов. Таким образом, освоение месторождения Ирбычан интегрировано с развитием региональной металлургической инфраструктуры.

Охрана окружающей среды. Удалённость района работ и отсутствие поблизости населённых пунктов несколько упрощают экологические задачи, однако строгие нормы по сохранению природной среды соблюдены в проекте. Отвод земель площадью ~462 га получен с условием их последующей рекультивации.

Рекультивация планируется проводить в два этапа – технический и биологический. На техническом этапе сразу после окончания горных работ отвалы и планировка карьера будут приведены в безопасное состояние: крутые откосы частично сглажены (бульдозером до уклона $<25-30^\circ$), выработанное пространство частично заполнено пустыми породами для ликвидации отвесных стен, устья выработок ограждены валами. Все поверхности будут дренированы для отвода воды (избежание эрозии). Предусмотрено частичное **затопление карьерной выемки**: после остановки откачки грунтовых вод постепенно Центральный карьер заполнится водой, образуя карьерное озеро глубиной ~80 м. Проектом предусмотрены меры по безопасному заполнению – создание переливного канала для поддержания уровня воды ниже борта, мониторинг качества воды. Полученное водное зеркало может использоваться как элемент ландшафта (санитарно-гигиенический вариант рекультивации для карьеров). Биологическая рекультивация будет затруднена суровыми климатическими условиями (многолетняя мерзлота, скудная растительность тундрового типа). Поэтому выбран путь **естественного самозарастания** на большей части нарушенных земель: после технической рекультивации участки предоставляются природе для постепенного обрастания местными видами трав и кустарников. Тем не менее, на участках, прилегающих к реке и ручьям, планируется высадка адаптированных растений (ива, ольха) для предотвращения размыва берегов. Верхний плодородный слой почвы (дерн), снятый перед вскрышными работами, складировается отдельно и будет использован при рекультивации для задернения отвалов и террас карьера. Качество

вскрышных пород оценено на **пригодность для биорекультивации**: согласно классификации, рыхлые суглинки отнесены к малопригодным грунтам, требующим мелиоративных мероприятий. Их планируется улучшать путем добавления торфа, удобрений и известкования перед применением в качестве рекультиванта. Проект рекультивации разработан в соответствии с ГОСТ 17.5.3.04–83 «*Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель*» и другими действующими нормами.

Помимо рекультивации земель, **мероприятия по охране окружающей среды** включают: охрану атмосферного воздуха – регулярное орошение карьерных дорог для подавления пыли, применение закрытых конвейеров на дробильно-сортировочной установке; охрану вод – строительство локальных очистных сооружений для карьерных вод (отстойники для взвеси, нейтрализация при необходимости) и нефтеловушек на стоянках техники; сбор и вывоз всех бытовых и производственных отходов на лицензированные полигоны (в самом проекте не предусматривается размещение отходов, кроме скальных пород в отвалах). Для контроля за состоянием окружающей среды организуется **экологический мониторинг**: периодический отбор проб воды из близлежащих водотоков, наблюдение за состоянием растительности вокруг объекта, замеры запыленности воздуха и уровней шума при взрывах [10, с. 95]. Все работы в части экологической безопасности соответствуют требованиям действующего законодательства РФ (включая Закон «Об охране окружающей среды», Водный кодекс, Закон «О недрах» и др.). Таким образом, проект решения предусматривает сведение к минимуму негативного воздействия на природу и последующее восстановление ландшафта, насколько это возможно в условиях Крайнего Севера.

Обсуждение

Проект освоения месторождения Ирбычан представляет собой пример комплексного подхода к разработке небольшого по запасам, но богатого по

содержанию благородных металлов объекта. Рассмотрим ключевые аспекты и их соответствие современным тенденциям горного дела.

1. Полнота извлечения и методология расчёта потерь. Значение ожидаемых потерь руды (~3,4%) можно считать низким, что свидетельствует о высокой эффективности принятой системы разработки. Это достигнуто благодаря тщательному планированию выемки: малой высоте уступа, применению узкого ковша и селективной отбойке руды. Напротив, относительное разубоживание 22% выглядит довольно высоким. Однако для эпитермальных жильных месторождений с мощностью жил <10 м подобные уровни разубоживания не редкость. В практике в ранних стадиях оценки часто используют усреднённые допущения (например, 5–10% dilution) без детальных расчётов, что может приводить к экономическому оптимизму. Наш расчет, выполненный по методике Иргиредмет, более реалистичен и учитывает сложность геометрии рудных тел. Стоит отметить, что указанная методика 1994 г. разрабатывалась прежде всего для подземных рудников и устарела с точки зрения современных технологий. В частности, она слабо учитывает влияние крупногабаритной техники на разубоживание. В нашем проекте применяются экскаваторы с ковшом 6,5 м³ на вскрыше и 3,5 м³ на руде – это необходимый компромисс между производительностью и избирательностью. Как указывает Эбраими (2013), переход на более крупную технику ради повышения добычи обычно влечёт рост разубоживания. Мы наблюдаем этот эффект: если бы использовался, скажем, экскаватор с ковшом 1,5 м³, можно ожидать меньший захват пустых пород, но суточная производительность упала бы в разы. Таким образом, выбранные параметры – результат оптимизации с учётом экономических и технических факторов. Для будущих исследований полезно было бы сопоставить результаты, полученные по нормативной методике, с фактическими данными, которые будут наработаны при эксплуатации Ирбычана. Возможно, уточнение методики потерь/разубоживания назрело (как отмечал В.М.Эвертовский), и подобные проекты дают материал для таких корректировок.

2. Система разработки и устойчивость откосов. Решение применять селективную выемку в сочетании с транспортной системой – единственно возможное для данного месторождения, учитывая прерывистость оруденения. Без автомобильного транспорта было бы затруднительно отрабатывать разобшённые рудные столбы; автосамосвалы обеспечивают гибкость в вывозке как руды, так и породы. Селективность выемки поддерживается обратной лопатой экскаватора, что позволяет заходить ковшом под залежь и отделять руду от вмещающих пород. Однако такая техника имеет ограниченную высоту копания, поэтому пришлось снизить высоту уступа до 5 м. Это ведёт к увеличению числа уступов и, казалось бы, к усложнению схемы работ, но взамен достигается лучший контроль разубоживания. Данный проект подтвердил, что оптимальная высота уступа 5 м – компромисс между геометрией жил и производительностью. Устойчивость откосов карьера, особенно при такой глубине (130 м) в вечномерзлых породах, – критичный фактор безопасности. По результатам расчетов и опыта аналогичных объектов (Сопка Кварцевая, Наталкинское и др.), принят угол откоса борта $\sim 45^\circ$ с бермами, что обеспечивает коэффициент устойчивости $>1,3$. Дополнительное контурное взрывание также направлено на снижение динамического воздействия на борт и предотвращение нарушения массива. В условиях длительной мерзлоты возможно *дополнительное крепление* откосов: например, оставление промерзшего предохранительного целика в верхней части, который не убирается до конца эксплуатации. В нашем проекте мощность сезонноталого слоя невелика ($\sim 2\text{--}3$ м летом), и существенного влияния на устойчивость не прогнозируется. Тем не менее, маркшейдерско-геодезический мониторинг откосов включён в проект: плановые ежемесячные съемки и установка реперов для наблюдения за деформациями. Это позволит своевременно обнаружить формирование устойчивых отколов или трещин и принять меры (разбор нависей, сброс опасных блоков) [11, с. 104]. Таким образом, с точки зрения геомеханики проект учитывает все стандартные подходы обеспечения устойчивости бортов карьера.

3. Выбор техники и интенсивность работ. Компонировка парка оборудования (экскаваторы ~100 т + самосвалы 30 т) диктуется небольшим масштабом рудного тела и ограничением по грузоподъёмности зимника, по которому будет доставлена техника. Более крупные самосвалы (50–90 т) были бы нерациональны на коротких плечах и потребовали бы больших объёмов погрузки, увеличивая разубоживание. БелАЗ-7540К – распространённая и надёжная модель в условиях Крайнего Севера, её применение гарантирует ремонтпригодность и наличие запчастей. Экскаваторы Komatsu PC1250 также хорошо зарекомендовали себя на рудниках Дальнего Востока; их главное преимущество – универсальность (возможность смены навески с прямой на обратную лопату) и относительная мобильность [12, с. 149]. Следует отметить, что интенсивность эксплуатации техники будет высокой (работа в две почти полные смены ежедневно). В условиях сильных холодов (зимой до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) возможны простои техники и необходимость её непрерывного прогрева. Проект учёл это, введя резервную единицу самосвала и бульдозера. Кроме того, на период холодов предусмотрены утепление стоянок, использование зимних марок дизтоплива, снижение нагрузки на электрооборудование. В целом заложенная производительность – ~6 млн т в год – близка к верхнему пределу для данного набора техники. Если в процессе разработки фактическая производительность окажется ниже (например, из-за непредвиденных остановок), добыча может растянуться на 3 года вместо 2. Экономически это приемлемо, так как снизит пиковые нагрузки и продлит срок службы техники.

4. Технология переработки и комплексность. Решение построить отдельную ЗИФ с кучным выщелачиванием продиктовано наличием у компании нескольких месторождений с бедной рудой. Ирбычан, напротив, имеет сравнительно богатую руду, и в иных условиях её можно было бы перерабатывать на гравитационно-флотационной фабрике с цианированием концентрата. Однако наличие действующего комплекса Merrill–Crowe упрощает задачу: вся руда, и бедная и богатая, будет перерабатываться единым методом. Это, конечно, приводит к

потерям серебра в хвостах при высоких содержаниях Ag (кучное выщелачивание менее эффективно для серебра, чем для золота), но проектные расчёты показывают приемлемые показатели извлечения. Дополнительное преимущество – относительная простота эксплуатации кучного выщелачивания вахтовым методом и отсутствие сложных дорогих узлов (например, адсорбции на угле). Минусом является необходимость длительного цикла выщелачивания: металл извлекается из куч в течение месяцев, что замораживает оборотные средства. Однако для небольшой компании важнее было минимизировать капитальные затраты, и кучное выщелачивание с цементацией – один из самых дешевых методов. К тому же, он **экологически менее рискованный**, чем цианидные бассейны, поскольку раствор циркулирует в ограниченном контуре кучи, а не в больших объемах пульпы. Водно-химический баланс проекта строго регламентирован: все растворы после выщелачивания возвращаются в процесс, **сбросные воды отсутствуют**. Тем не менее, требует внимания климатический фактор: в условиях колымской зимы (–40 °С) кучное выщелачивание может приостановиться из-за замерзания растворов. Проектом предусмотрено укрытие куч специальными теплоизолирующими матами и рециркуляция подогретого раствора, чтобы поддерживать процесс даже зимой. Этот опыт будет одним из первых в России – ранее на Колыме кучное выщелачивание не применялось, и успех проекта придаст импульс развитию подобных технологий в условиях Крайнего Севера.

5. Экологические аспекты и социально-экономический эффект. Несмотря на удалённость, проект имеет значение для региона: оцениваемый суммарный добычный металл – ~3 тонны золота и ~100 тонн серебра – будет внесён в экономический оборот. Создаются десятки рабочих мест (на время строительства до 200 человек, на время эксплуатации ~100 постоянных сотрудников). После исчерпания запасов, благодаря рекультивации, территория не останется полностью деградированной. Конечно, ландшафтные изменения (карьерное озеро, отвалы) необратимы, но приняты санитарно-гигиенические меры позволят природе

адаптироваться к ним. Опыт рекультивации в столь суровой природной зоне ограничен. В проект заложены принципы, применяемые в мировой практике: раннее начало рекультивационных работ, поэтапное восстановление (по мере окончания работ на участках), использование местных видов растений. Например, уже во время работы карьера предполагается рекультивировать внешние откосы отвала, которые более не используются. Это снизит пыление и быстрее вернет часть земель в природный фонд. Особое внимание уделено **охране водных ресурсов**: река Гижига и ее притоки служат местом нереста лососёвых, поэтому недопустимо попадание взвеси или цианида в воду. Проектные решения (отстойники, дамбы) обеспечивают защиту, а постоянный мониторинг воды позволит контролировать ситуацию. Таким образом, экологическая составляющая проекта достаточно проработана. Безусловно, любой горный объект оставляет след, но в данном случае масштаб работ относительно мал, а область – обширна и малонаселена, что минимизирует риск прямого воздействия на человека.

Заключение

Выполненное исследование показало принципиальную осуществимость разработки Ирбычанского золото-серебряного месторождения открытым способом с использованием современной техники и технологий. На основании материалов дипломного проекта были сформулированы и обоснованы следующие выводы:

- **Геологические условия** месторождения (эпитермальные жильные рудные тела средней мощности) позволяют эффективную открытую отработку до глубины ~130 м. Балансовые запасы ~0,59 млн т руды (2,89 т Au, 93,8 т Ag) полностью извлекаемы карьером, при этом ожидаемые потери ценного компонента минимальны (3–4%) благодаря применению селективной системы разработки.

- **Технические решения** по параметрам карьера и оборудованию обеспечивают необходимую производительность (~5–6 млн т горной массы в год) и безопасность работ. Принята оптимальная высота уступа 5 м в руде и 10 м во вскрыше; реализована транспортная схема с двумя входами; выбрана высокопроизводительная техника (экскаваторы Komatsu PC1250, самосвалы БелАЗ-30т), отвечающая условиям Крайнего Севера. Расчёт совместимости экскаваторно-автотранспортного комплекса подтвердил рациональность принятого набора.
- **Показатели качества добычи.** Предусмотренный комплекс мер (точное бурение, обратная лопата, дифференцированный диаметр взрывных скважин, маркшейдерский контроль) позволил достичь приемлемого коэффициента разубоживания ~22%. Хотя он несколько выше типичных оценок, для данного месторождения это оправдано. В итоге к переработке будет направлено порядка 0,7 млн т рудной массы со средним содержанием ~5,0 г/т Au, ~150 г/т Ag.
- **Металлургическая схема** с кучным выщелачиванием и процессом Merrill–Crowe адаптирована под комплексный состав руды. Ожидается высокий процент извлечения золота и серебра (до 95–98%), что подтверждено лабораторными испытаниями. Инфраструктура обогатительного комплекса уже создается компанией-инвестором, что синергично с вводом карьера.
- **Охрана недр и экология.** Проект соответствует требованиям рационального недропользования: учтены и минимизированы потери полезного ископаемого, предусмотрена отработка попутных компонентов (серебра). Запланированы мероприятия по рекультивации территории и мониторингу окружающей среды согласно нормативам. Потенциальное воздействие на экосистему сведено к локальному, контролируруемому минимуму.

Таким образом, дипломный проект разработки месторождения Ирбычан демонстрирует, как современные горнотехнические решения могут быть применены для освоения труднодоступных месторождений благородных металлов. Полученные результаты могут быть полезны при планировании разработки аналогичных объектов в условиях Севера, а также для совершенствования нормативной базы (в части методик расчёта потерь и разубоживания в карьерных работах). Внедрение данного проекта в производство позволит привлечь в экономику значимые объёмы золота и серебра, способствуя развитию горной промышленности Магаданской области.

Список литературы

- [1] Технический проект разработки месторождения Ирбычан открытым способом. ООО «Геотехпроект». Тома 1–5. Екатеринбург–Магадан, 2020. (Проектная документация)
- [2] Протокол ТКЗ №54 от 28.08.2017 г. Балансовые запасы месторождения Ирбычан (Au, Ag).
- [3] Методические указания по нормированию, определению и учету потерь и разубоживания золотосодержащей руды при добыче. Иргиредмет, Иркутск, 1994. 265 с.
- [4] Единые правила безопасности при ведении взрывных работ. ПБ 13-407-01. М.: 2002.
- [5] ГОСТ 17.5.3.04–83. Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель.
- [6] Эвенская горнорудная компания: запуск ЗИФ с технологией Merrill–Crowe, 2022. URL: <https://mining-media.ru> (дата обращения: 01.09.2025).
- [7] NedraDV.ru: Паспорт месторождения Ирбычан (геология, руды, извлечения Au/Ag). URL: <https://nedradv.ru> (дата обращения: 01.09.2025).

- [8] Ebrahimi A. The Importance of Dilution Factor for Open-Pit Mining Projects. SRK Consulting, 2013. 12 p.
- [9] Saeger E., Bohlen T. Finite-difference modeling of viscoelastic and anisotropic wave propagation using the rotated staggered grid // *Geophysics*, 2004, 69(2), pp. 583–591.
- [10] Kobylkin S.S., Fedorov D.A., Kuznetsov I.I. New classification of mine ventilation resistance // *Russian Mining Industry*, 2025, №4, pp. 92–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-92-96.
- [11] Sulimov M.Yu. Digital transformation in the Russian mining sector: specific features and strategic approaches // *Russian Mining Industry*, 2025, №4, pp. 104–108. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-104-108.
- [12] Plaschinsky V.A. et al. Numerical simulation of the digging process with an excavator bucket using the discrete element method // *Russian Mining Industry*, 2025, №4, pp. 144–150. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-144-150.