

Выход на проектную мощность и производственные показатели за длительный период установки Albion Process™ на предприятии GeoProMining Gold, Армения,

П. Войт¹, Д. Уолкер², О. Клойбер-Дин³ и А. Цветков⁴

1. Руководитель гидрометаллургического направления, «Glencore Technology», Брисбен, Квинсленд 4000. Адрес электронной почты: paul.voigt@glencore.com.au
2. Генеральный менеджер по комплексным решениям, «Core Resources», Брисбен, Квинсленд 4010. Адрес электронной почты: dwalker@coreresources.com.au
3. Главный технолог, «Core Resources», Брисбен, Квинсленд 4010. Адрес электронной почты: okloiber-deane@coreresources.com.au
4. Заместитель генерального директора по обогащению и металлургии, ООО «GeoProMining Gold», Ереван, Армения. Адрес электронной почты: atsvetkov@geopromining.com

АННОТАЦИЯ

На золотодобывающем руднике компании ГЕОПРОМАЙНИНГ в поселке Сотк (Зод) в Армении установка «Albion Process™» эксплуатируется с 2014 года. Впервые публикуются данные за длительный период эксплуатации установки. В настоящей работе представлены такие данные, как объем концентрата в виде питания установки Albion Process™ (тонн в сутки), содержание серы в концентрате (% S), общее окисление сульфидной серы в установке Albion Process™ (% SOx) и извлечение золота из осадков установки Albion Process™ (%). Данные служат основой для оценки эффективности запуска, выхода на проектную мощность и эксплуатации установки Albion Process™. Невзирая на задержку запуска обогатительной фабрики, по шкале МакНалти (McNulty), которая описывает наращивание мощности, установка относится к группе 1, что свидетельствует об успешном запуске и быстром наращивании производительности. В результате изучения данных и производственного опыта можно сделать заключение, что успешной эксплуатации удалось добиться благодаря гибкой, надежной и стабильной технологии, разработанной на основании результатов испытаний и эксплуатации опытных установок на этапе ТЭО, которые проводились совместно Glencore Technology и Core Resources, кроме того местные операторы прошли обучение по эксплуатации установки на действующей фабрике.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Проект ГЕОПРОМАЙНИНГ, Аи

В собственности и под управлением ООО «GeoProMining Gold» (ГЕОПРОМАЙНИНГ) находится золотой рудник Сотк (Зод) и Арагатская ЗИФ в Армении («ГЕОПРОМАЙНИНГ Голд»). Карьер находится недалеко от границы с Азербайджаном, золотая руда перевозится по государственной железной дороге на Арагатскую ЗИФ, неподалеку от турецкой границы.

Запасы на руднике Сотк (оценка по состоянию на август 2011 года) составляли 14,2 млн тонн с содержанием 4,3 г/т Au. По оценкам, объем выявленных ресурсов составляет 28 млн тонн руды с содержанием 4,2 г/т Au, прогнозные ресурсы насчитывают 16 млн тонн при 4,2 г/т Au. Минералогический состав руды представлен преимущественно арсенопиритом и пиритом. Золото преимущественно связано с арсенопиритом и в меньшей степени с пиритом. Золото встречается в легко обогащаемой форме, в виде включений в сернистом мышьяке и теллуридах. Геологические характеристики месторождения рассматривались в других работах (Voigt, Hourn, Mallah and Turner 2014).

Проект отрабатывается на протяжении нескольких десятилетий, изначально добывались выветрелые окисленные руды, покрывавшие сульфидную часть. Компания ГЕОПРОМАЙНИНГ приобрела проект в 2007 и приступила к отработке габбро и низкосульфидных руд. Извлечение золота по результатам испытаний, проведенным на образцах, полученных при разведочном бурении подстилающих сульфидных зон, составило 20-30 процентов в традиционном процессе сорбционного выщелачивания «уголь-в-щелочи» (CIL). Были проведены дополнительные испытания для оценки окисления сульфидного материала перед цианированием. Успешно проведено окисление арсенопирита и пирита перед цианированием полученного осадка, извлечение золота повысилось с 20-30 процентов

до 90 процентов и выше.

ГЕОПРОМАЙНИНГ провели оценку четырех технологий окисления: обжиг, автоклавное окисление (POX), биоокисление (BiOX) и процесс Albion Process™ (технология атмосферного окислительного выщелачивания). Было проведено экологическое-техничко-экономическое обоснование, по результатам которого технология Albion Process™ оказалась оптимальным решением. Основными определяющими факторами стали низкие капитальные затраты и короткое время реализации.

Испытания на этапе разработки по проекту начались в 2009 году. Проведены испытания на четырех образцах сульфидной руды (по 600 кг) из рудного тела, которые увенчались программой непрерывного цикла на опытной установке окислительного выщелачивания. Окончательная технологическая схема состоит из измельчения и сульфидной флотации с получением сульфидного концентрата, который направляется на переработку в установке окислительного выщелачивания Albion Process™. Осадки, получаемые в установке Albion Process™, объединяют с хвостами флотации и подают в действующий цикл процесса CIL.

Паспортная производительность установки составляет 100 000 тонн концентрата в год с получением в среднем ~100 000 унций в год золота в виде сплава доре. Установка Albion Process™ была поставлена ГЕОПРОМАЙНИНГ по фиксированной цене в виде технологического комплекса, с привязкой к гарантиям производительности от Glencore Technology. Механическое проектирование было выполнено в декабре 2012 года. Строительство установки было завершено в апреле 2014 года, пуско-наладочные работы завершены в июле 2014 года.

Технология Albion Process™

Технология Albion Process™ является зарекомендовавшей себя технологией атмосферного окисления для переработки упорных сульфидных концентратов. В настоящее время технология установлена на шести предприятиях по всему миру, из них две установки Albion Process™ используются для выщелачивания золота, связанного с упорными сульфидами. Химические характеристики технологии Albion Process™ широко рассматривались в других работах (Voigt, Mallah and Hourn 2017).

Технология Albion Process™ для золотой руды состоит из нескольких этапов: измельчение сульфидного концентрата с последующим окислением в реакторах при атмосферном давлении в присутствии газообразного кислорода, который вводится на сверхзвуковой скорости для максимального повышения массового переноса кислорода и содействия протеканию реакции окисления. Окисленный остаток процесса Albion Process™ далее перерабатывается в стандартном цикле цианистого выщелачивания для извлечения золота.

Реакция окисления протекает при немного кислотном pH (5,5) и поддерживается за счет добавления известняка. Реакторы автотермические, рабочая температура обычно находится в диапазоне 85-98°C. Типовым коэффициентом использования кислорода является 80-90 процентов. Технология Albion Process™ для золота не предусматривает растворения цветных металлов и получения элементарной серы или ярозитов, то есть пульпа не требует промывки и расход цианида в цикле выщелачивания остается низким. Осадкам свойственны хорошие фильтрационные характеристики, а требования к материалам изготовления обычно ниже, чем для циклов кислотного автоклавного выщелачивания или биоокисления.

РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ALBION PROCESS™ ДЛЯ ГЕОПРОМАЙНИНГ

Общая схема технологического процесса установки на ГЕОПРОМАЙНИНГ показана на Рис. 1.

До внедрения технологии Albion Process™ в состав производства ГЕОПРОМАЙНИНГ входили переделы измельчения, процесс CIL и золотоизвлекательная фабрика для обогащения руды непосредственно с рудника Сотк. На предприятии был цех флотации, однако он выведен из эксплуатации. Для внедрения Albion Process™ потребовалось провести реконструкцию цеха флотации и установить новое оборудование Albion Process™.

Состав технологической схемы Albion Process™ по переработке упорных концентратов для извлечения золота типичные стадии: тонкое измельчение с последующим окислительным выщелачиванием и иногда сгущением. На ГЕОПРОМАЙНИНГ производство состоит из установки тонкого измельчения IsaMill™ M3000, девяти (9) реакторов выщелачивания Albion Process™ объемом 270 м³, далее установлен высокоскоростной сгуститель диаметром 10 м, откуда осадок выщелачивания направляется в процесс CIL при целевом содержании твердого 42 процента. Технологическая установка подробно описывается в других работах (Voigt, Hourn, Mallah and Turner, 2015).

Ключевые критерии проектирования для проекта ГЕОПРОМАЙНИНГ представлены в Таблице 1.

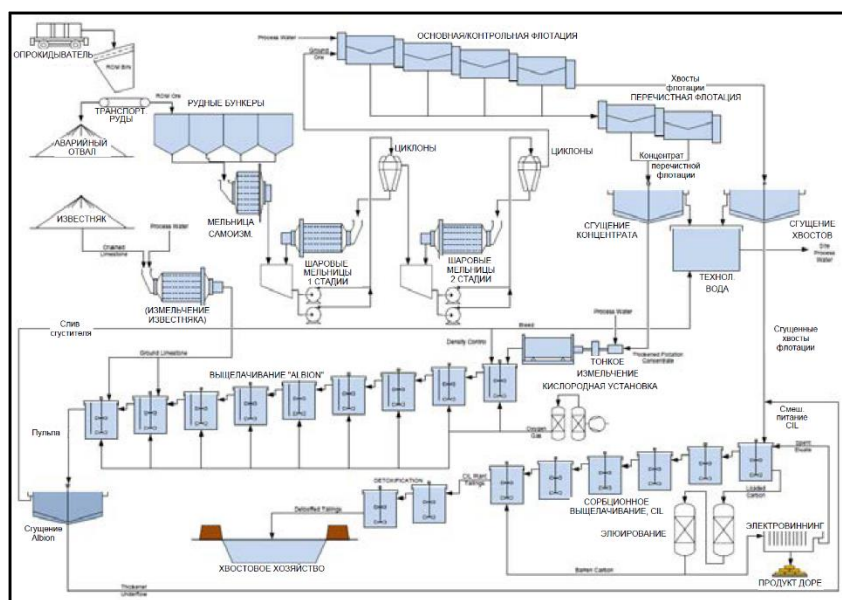


Рисунок 1: Технологическая схема ГЕОПРОМАЙНИНГ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ГЕОПРОМАЙНИНГ

В настоящей работе приводятся технологические данные за период с 2014 года по 2017 год, предоставленные ГЕОПРОМАЙНИНГ, с целью оценки наращивания мощности и производительности процесса Albion Process™. Это крупнейший блок производственных данных по технологии Albion Process™, опубликованный на сегодняшний день. Данные описывают работу процесса Albion Process™ в нескольких режимах работы, некоторые из них считаются отрицательными для циклов гидрометаллургической переработки сульфидов.

Ключевые технологические данные собирали на протяжении срока эксплуатации установки с последующим анализом. К ним относятся:

1. Объем концентрата в виде питания установки Albion Process™ (тонн в сутки);
2. Содержание серы в концентрате (% S²⁻);
3. Общее окисление сульфидной серы в установке Albion Process™ (%); и
4. Извлечение золота из осадков установки Albion Process™ (%).

На предприятии не собирают данные по использованию кислорода, эти сведения подавались с других объектов на основании исследовательских работ (Voigt, Mallah and Hourn, 2017). Так как договор на поставку электроэнергии заключен на условиях полной оплаты при отказе от поставки, полученное избыточное количество кислорода направляется в процесс CIL.

Месячные данные приводятся на Рисунках 3-6. Графики технологических данных составлены с использованием среднемесячных значений, столбики на диаграммах обозначают одно стандартное отклонение, вычисленное из отдельных суточных данных по каждому месяцу. Представленные данные основаны на среднемесячных значениях суточных данных, без обработки данных - то есть, простои на техобслуживание и прочие обстоятельства не вычитались из данных перед выдачей среднемесячных значений.

Изучение подробных технологических данных в совокупности с производственным опытом свидетельствует о том, что кроме достижения проектных параметров в части производительности и извлечения, успешная реализация проекта также выражается в некоторых ключевых факторах:

1. Быстрое наращивание мощности – процесс Albion Process™ был запущен и вышел на проектную мощность в течение трех месяцев с даты строительства;
2. Гибкость, надежность и стабильность – установка Albion Process™ эффективно перерабатывает подаваемый концентрат при варьируемой производительности и непостоянном качестве питания;
3. Изначально безупречное проектирование - проект был разработан и исполнен на основании фундаментальных испытаний и инженерно-технического проектирования, благодаря чему

результаты работы промышленной установки превзошли лабораторные испытания (Voigt and Walker, 2018); и

4. Передача технологии – технический опыт по процессу Albion Process™ был эффективно передан персоналу заказчика, чтобы они обладали всеми необходимыми знаниями по эксплуатации и обслуживанию установки.

В настоящей работе данные факторы рассматриваются более подробно.

Параметр	Ед. изм.	Значение
Номинальная производительность по питанию установки Albion	т/ч	12,1
	т/сут	290
Проектная производительность по питанию установки Albion	т/ч	13,5
	т/сут	334
Концентрация S ²⁻ во флотационном концентрате	%	17,6
Степень окисления S ²⁻	%	76
Проектный коэффициент использования кислорода	%	80
Проектное извлечение золота в цикле флотации	%	88
Проектное извлечение золота в процессе CIL (осадок Albion)	%	92
Проектное извлечение золота в процессе CIL (хвосты флотации)	%	40
Проектное общее извлечение золота	%	85,8
Годовая производительность по золоту	унц.	100 000
Годовая производительность по руде	т/год	1 000 000

Таблица 1: Ключевые критерии технологического проектирования

Быстрый выход на проектные показатели

Ввод в эксплуатацию установки Albion Process™ на предприятии ГЕОПРОМАЙНИНГ был завершён в июле 2014 года. Запуск произошёл за четыре месяца до завершения пуско-наладочных работ на фабрике, что привело к сокращению поставок концентрата и повлияло на скорость наращивания мощности установки Albion Process™. Кроме того, вскоре после запуска произошла поломка одной из двух воздухоподогревателей кислородной станции, однако в тот период установка Albion Process™ не испытывала недостатка в кислороде и производительность по концентрату не пострадала.

Данные по производству золота на заводе ГЕОПРОМАЙНИНГ были нанесены на график МакНалти для оценки показателей наращивания мощности, как показано на Рисунке 2.

На Рисунке 2 показано, что показатели установки на заводе ГЕОПРОМАЙНИНГ находятся между группами 1 и 2 в течение первых двух лет, по прошествии двух лет, показатели относятся к группе 1. Показатели, соответствующие группе 1, свидетельствуют об успешной реализации проекта, обычно подразумевается высокая степень «тщательного подхода на этапе разработки проекта». (McNulty, 2014). Основанием для анализа послужило производство золота, которое было принято в качестве основного мерила успешности всего проекта в целом.

На ранних стадиях проекта показатели соответствуют группе 2, что отчасти обусловлено задержкой запуска фабрики. Однако вскоре характеристики наращивания мощности проекта быстро повысились, и показатели установки вышли на уровень группы 1 в течение первых трех лет эксплуатации.

Это является серьезным достижением данной технологии. МакНалти и соавторы утверждают, что «проекты, показатели которых соответствуют группе 1, обычно применяют апробированные технологии» (McNulty, 2014) и использование лицензированной технологии «без предшествующего опыта или с небольшим опытом» (McNulty, 2014) является одним из факторов риска, который может способствовать замедлению наращивания мощности с переходом из группы 2 в группу 4. Опыт

установки на производстве ГЕОПРОМАЙНИНГ опровергает данное наблюдение, где ограничения по фабрике оказались более существенными, чем ограничения, связанные с процессом Albion Process™.

Наращивание мощности обогатительной фабрики

В течение 2015 года показатели производительности и извлечения на обогатительной фабрике оставались на низком уровне по причине проблем с наращиванием мощности и переработкой переходных руд с неудовлетворительными результатами по флотации. Начиная со второй половины 2015 года в цех флотации стали подавать первичную сульфидную руду, что привело к соответствующему повышению извлечения, содержания и производительности. В середине 2016 года произошло качественное повышение производительности после реализации проекта по устранению «узких мест».

На Рисунке 3 показано, что производительность обогатительной фабрики существенно повысилась с запуска в категориях абсолютного содержания, извлечения и производительности, а также стабильности. Извлечение золота и производство концентрата в цикле флотации остается ниже номинального и проектного уровня (88 процентов, 282 тонны в сутки и 324 тонны в сутки, соответственно), однако содержание золота и серы выше проектных, что позволяет достичь проектной переработки золота. Единицы золота, которые не флотируются, обычно представлены несulfидным типом и лучше поддаются переработке в цикле прямого цианирования, поэтому данные хвосты флотации направляются непосредственно в цикл CIL.

Наращивание мощности установки Albion Process™

В течение периода после запуска эксплуатационные показатели установки Albion Process™ оставались на стабильном уровне выше проектного, производилось окисление всех видов питания, загружаемого в процесс, несмотря на существенные колебания в качестве и количестве питания, как упоминалось в предыдущем разделе. Ограничивающим фактором для установки Albion Process™ является загрузка концентрата, установка работает на проектной скорости в почасовом выражении до сработки всего питания. Это способствует эффективной и стабильной работе мельницы IsaMill™.

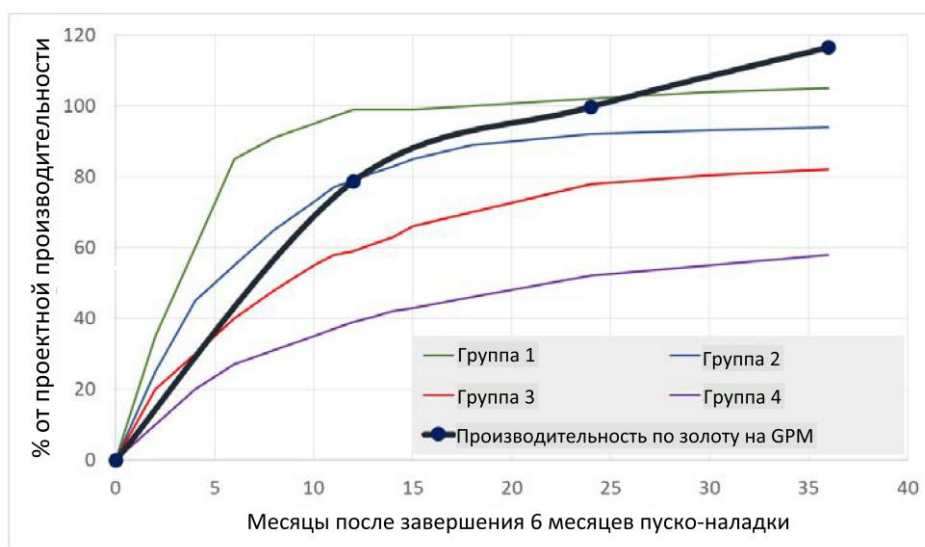


Рисунок 2 – Шкала МакНалти по технологической установке ГЕОПРОМАЙНИНГ.

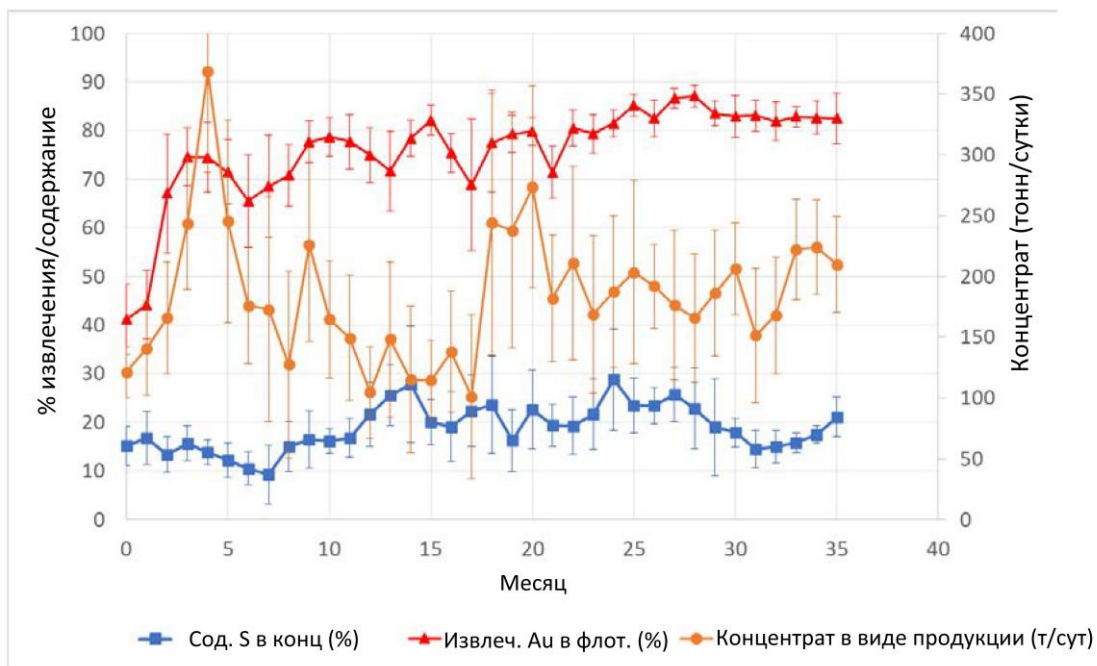


Рисунок 3: Показатели работы ОФ.

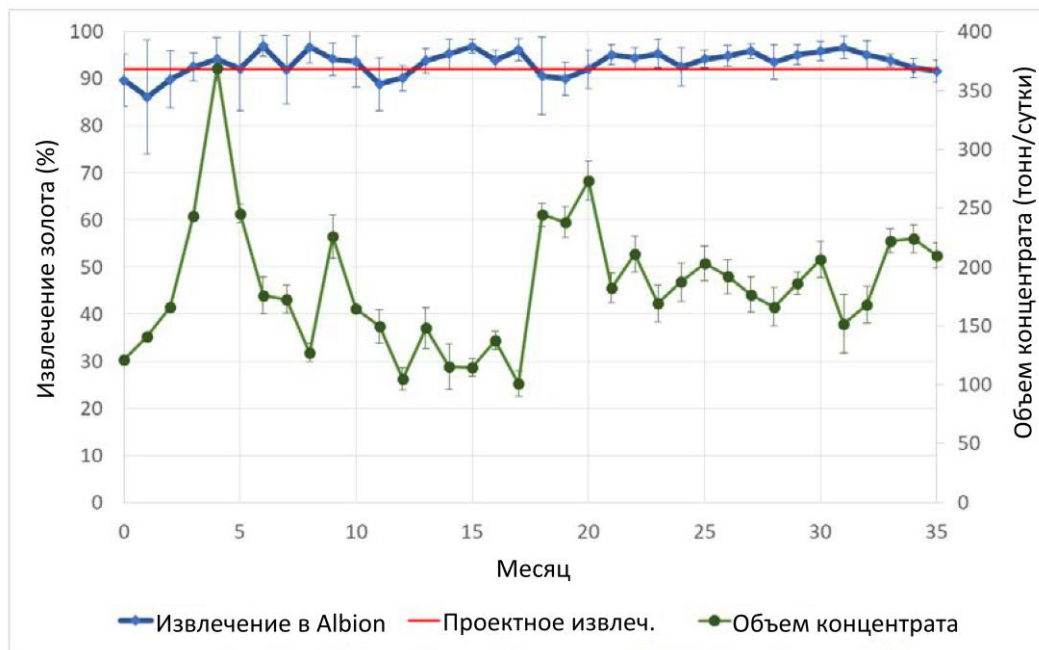


Рисунок 4 - Зависимость извлечения золота от производительности.

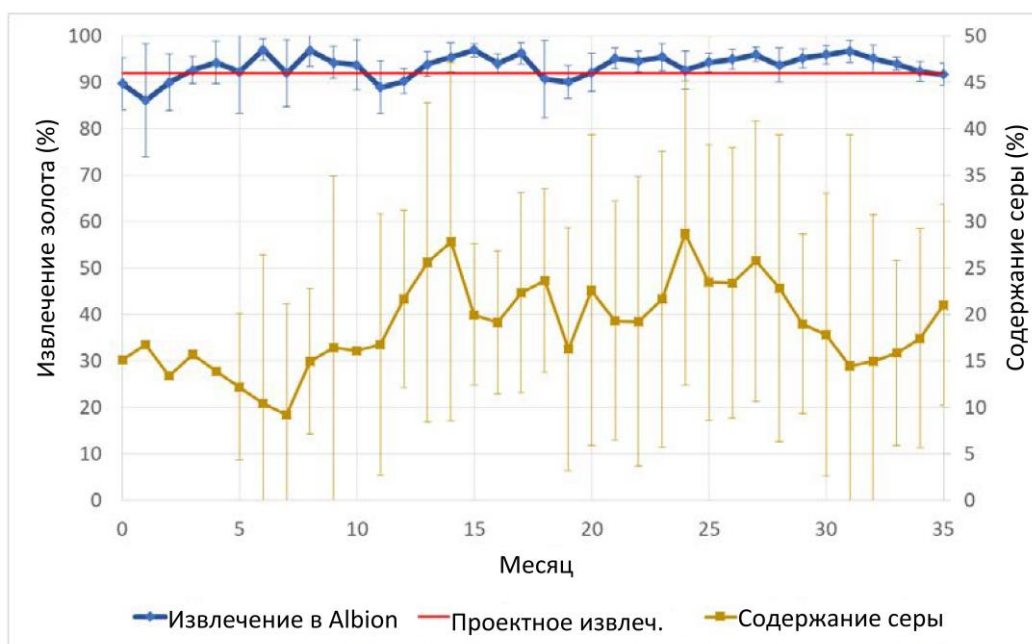


Рисунок 5 - Зависимость извлечения золота от содержания серы в концентрате.

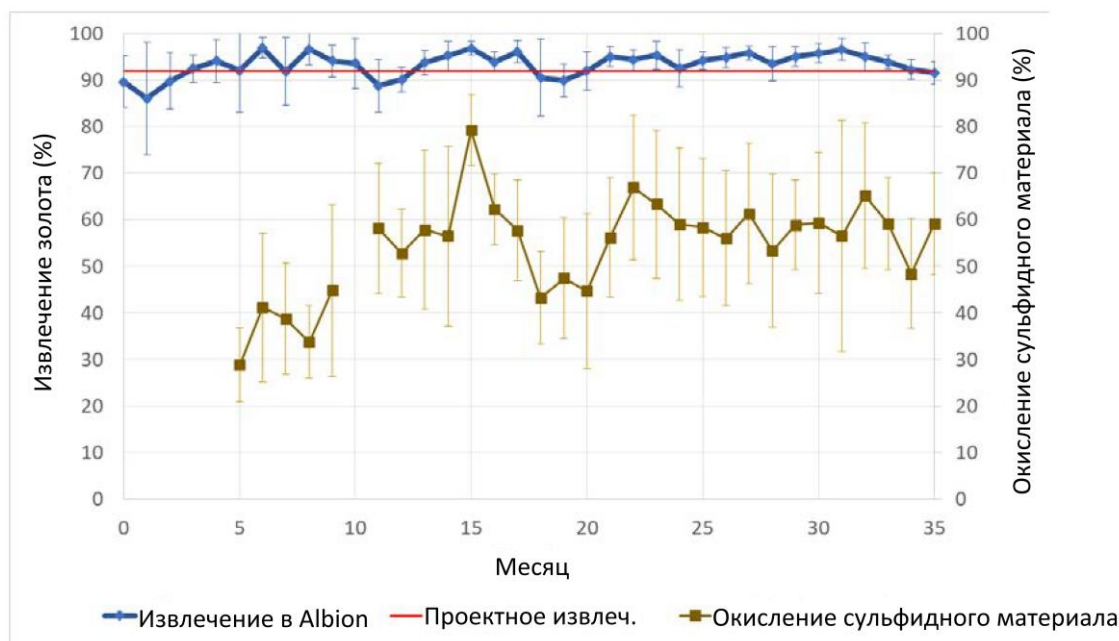


Рисунок 6 - Зависимость извлечения золота от степени окисления сульфидов.

ГИБКОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ

Ключевой характеристикой данных является стабильность показателей процесса Albion Process™ при переработке широкого диапазона объемов и качества питания в плане содержания серы и золота. Показатели по извлечению золота оставались стабильными с момента запуска, преимущественно на уровне выше проектного.

Стабильные значения извлечения золота поддерживались невзирая на непредсказуемые колебания в объемах питания установки Albion Process™ и существенные колебания в содержании серы в питании. Показатели ниже служат графическим представлением постоянства показателей извлечения золота в процессе Albion Process™ относительно изменчивости данных параметров.

Колебания в объемах сократились по мере отработки производственного процесса. Тем не менее, извлечение золота оставалось на стабильном уровне даже в начале эксплуатации установки, что дает преимущество оператору установки, так как с ранних этапов ведется работа по совершенствованию управления технологическим процессом.

Способность установки Albion Process™ перерабатывать сырье с непостоянным содержанием серы на производстве ГЕОПРОМАЙНИНГ обусловлена автотермическими свойствами реакторов Albion.

При работе с сырьем с минимальным содержанием сульфидной серы, рабочая температура реакторов находится в диапазоне 85-98°C. Если на установку подается питание с низким содержанием сульфидов, обычно существует возможность несколько часов отработать без существенных последствий по причине большой тепловой инерции в процессе.

К этому времени проблемы, вызвавшие низкое содержание серы на обогатительной фабрике, обычно решаются. При сохранении низкого уровня серы и падении температуры в первых нескольких реакторах, первый реактор может быть частично опустошен за счет слива пульпы в обвалованный участок под сгустителем, после чего она возвращается в технологическую схему насосами пролива. Это позволяет заполнить реакторы материалом с более высоким содержанием с повышением температуры для восстановления нормального режима работы. Реакторы на ГЕОПРОМАЙНИНГ открытого исполнения, поэтому при повышении подачи сульфидной загрузки, дополнительное экзотермическое тепло, вырабатываемое в ходе окисления, приводит к повышению давления пара пульпы, что в свою очередь способствует повышению скорости испарения, снимая излишки тепла. Реакторы на ГЕОПРОМАЙНИНГ функционируют при температуре воды, близкой к точке кипения.

В этом состоит отличие от циклов автоклавного окисления, которые обычно чувствительны к колебаниям в содержании серы ввиду необходимости регулировать тепловой эффект реакции в автоклаве. На этапе разработки экологической части технико-экономического обоснования проекта были приняты более стабильные объемы и содержание серы для сравнения процессов автоклавного выщелачивания и Albion Process™. Выбор технологии Albion Process™ частично обусловлен этой способностью справляться с непредсказуемыми изменениями в питании, вытекающими из состояния рудного тела или показателей фабрики; выбор автоклавного цикла переработки мог привести к существенному снижению объемов для решения вопроса изменчивости руды, с которым производство столкнулось после запуска проекта.

Кроме того, при разработке проекта для разных рудных тел требовалось установить разные уровни окисления сульфидной серы. Выбор кислородной установки по технологии вакуумной короткоцикловой абсорбции (VPSA) позволяет понижать уровень производства кислорода для обеспечения необходимого уровня окисления и последующей потребности системы в кислороде. Так как потребность в кислороде ниже проектной, реакции выщелачивания обычно завершаются в реакторе выщелачивания Albion №6, без необходимости использовать все 9 реакторов.

Производительность по окислению

Следует также отметить, что пересмотрена степень окисления сульфидной серы для достижения и превышения проектного извлечения, которая обычно составляет примерно 55 процентов, намного ниже принятого проектного значения в 76 процентов. Установка Albion Process™ в целом более приспособлена для регулирования степени окисления, чем цикл автоклавного окисления. Наблюдается сокращение эксплуатационных расходов на кислород ввиду более низкого потребления кислорода.

Основной функцией процесса Albion Process™ является окисление серы для высвобождения золота, вкрапленного в сульфидную матрицу, с возможностью извлечения в следующем цикле цианидного выщелачивания. Окислительная способность установки Albion Process™ ограничивается либо временем пребывания в технологическом контуре, либо наличием кислорода, этот фактор отдельно учитывался при инженерно-техническом проектировании установки на этапе разработки. Номинальная и проектная производительность по окислению составляет 1,56 и 1,80 тонн сульфидной серы в час, соответственно, принимая коэффициент использования кислорода равный 80 процентам.

По проекту установка ГЕОПРОМАЙНИНГ Albion Process™ должна обеспечить 76 процентов окисления сульфидной серы при номинальном и проектном окислении серы в 37,6 и 43,2 тонны в сутки. Проектный расход кислорода принят на уровне 336 кг/тонну концентрата при 80% коэффициенте использования кислорода. Фактический расход составил 215 кг/тонну концентрата исходя из опыта эксплуатации установки, по причине более высокой степени использования кислорода и низкой степени окисления (Voigt, Hourn, Mallah and Turner, 2015). Судя по предоставленным технологическим данным установки, степень окисления регулировалась для обеспечения извлечения золота, что свидетельствует о гибкости процесса.

В 2016 и 2017 годах наблюдались периоды, когда степень окисления превысила проектные максимальные значения. Нереализованная производительность окисления в технологии Albion Process™ свидетельствует о том, что в проекте был заложен резерв, который достигается за счет превосходных показателей сверхзвуковых газовых эжекторов HyperSparge™. Сверхзвуковое введение газа позволяет максимально повысить механическое воздействие на пульпу, в результате снижается сопротивление массовому переносу кислорода из газа в жидкость, что в свою очередь повышает степень массового переноса кислорода. Фактический коэффициент использования кислорода был определен на уровне 90 процентов или выше, исходя из проведенных исследований,

эти данные описываются в работе Войта, Малла и Хорна (2017 год).

ИЗНАЧАЛЬНО БЕЗУПРЕЧНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Фундаментом быстрого наращивания мощности и достижения проектной производительности и извлечения служит успешно реализованный процесс инженерно-технического проектирования, от лабораторных испытаний до полномасштабной промышленной установки. Установка на заводе ГЕОПРОМАЙНИНГ была спроектирована и поставлена компанией Glencore Technology на основании результатов испытаний в периодическом и непрерывном режиме работы, проведенных в рамках банковского ТЭО под началом Core Resources в течение 2011 и 2012 годов. Цель проведения испытаний заключалась в получении следующих ключевых параметров проектирования, которые привели к определению критериев массового и энергетического баланса и технологического проектирования:

- оптимизация крупности измельчения для сокращения энергопотребления IsaMill™,
- составление графиков энергопотребления IsaMill™ для определения необходимой энергии измельчения для достижения определенной крупности частиц, чтобы рассчитать размер мельницы IsaMill™ (Проектная удельная энергия для обеспечения крупности 80% класса 10мкм составила 59,0 кВт.ч/тонну, по последним фактическим данным это значение составляет 59,7 кВт.ч/тонну, хотя крупность 10 мкм требуется не на постоянной основе),
- зависимость извлечения золота от степени окисления сульфидов для оптимизации извлечения золота и снижения потребности в окислении;
- измерение степени поглощения кислорода в пульпе при различных условиях для проектирования системы массового переноса кислорода,
- реологические измерения для определения типоразмеров насосов,
- определение чувствительности кинетики сульфидного выщелачивания к ключевым параметрам, таким как рабочая температура и плотность пульпы,
- данные по скорости осаждения для расчета типоразмера сгустителя, и
- испытание технологических показателей на образцах, которые являются представительными в отношении возможных колебаний в питании в течение срока службы установки.

Испытания строились на определении металлургических показателей типов руды и их смесей исходя из графика отработки рудника. При проведении испытаний были получены разные результаты по флотации разных типов руды, потребовалось отрегулировать окисление для обеспечения извлечения золота в 90 процентов в процессе цианирования.

Подход к проектированию заключался в принятии консервативного целевого значения окисления сульфидной серы в 76 процентов, чтобы предусмотреть возможность переработки различных сочетаний типов руды с достижением 90 процентов извлечения золота в процессе CIL. Объем чанов и типоразмер кислородной установки подбирались исходя из целевой степени окисления. Так как на кислород приходится существенная доля эксплуатационных затрат, для производства кислорода были выбраны две установки вакуумной короткоцикловой адсорбции (VPSA), с возможностью снижения выработки кислорода при отсутствии потребности и сокращения эксплуатационных затрат (как показано на Рисунке 6). Технология VPSA предпочтительнее технологии PSA (короткоцикловой адсорбции) ввиду более низкой стоимости энергии на единицу производимого кислорода. Степень чистоты кислорода составляет 93% (об.).

Важным элементом при проектировании окислительных процессов является массовый перенос кислорода в пульпе. Для успешного функционирования процесса особенно важно масштабирование массового переноса кислорода, этот аспект хорошо изучен и отработан посредством применения технологии сверхзвуковой подачи газа HyperSpargе™ (Voigt, 2017). Консервативный коэффициент использования кислорода принимается на уровне 80 процентов, однако измерения на установке свидетельствуют о том, что данный показатель приближается к 90 процентам (Voigt, 2015).

На Рисунках 2-6 можно увидеть, что в месячной перспективе не наблюдается падения в производительности. Стабильность производительности говорит о продуманном проектировании установки. К числу отдельных факторов, которые способствовали высокой эксплуатационной готовности установки, относятся:

1. Не потребовалось проведение крупных работ или технологических модификаций после запуска, деятельность направлена преимущественно на вывод процессов измельчения и флотации на полную производительность;
2. На обогатительной фабрике работает две линии, возможно сохранение производства

на одной линии на период перефутеровки мельницы; при проектировании технологии Albion Process™ предусматривалось исключение длительных простоев за счет следующих факторов:

- буферные емкости вокруг IsaMill™,
- возможность демонтировать, осматривать и устанавливать элементы HyperSpargе™ без необходимости остановки или опустошения реактора выщелачивания,
- возможность обхода секции выщелачивания, и
- использование изученного оборудования (реакторы, насосы, сгустители, мешалки).

В результате подобного проектирования достигается очень высокая эксплуатационная готовность (более 95%) и стабильный выпуск продукции.

ПЕРЕДАЧА ТЕХНОЛОГИИ

Albion Process™ представляет собой зарекомендованную технологию, но ранее данный процесс не применялся в Армении или странах СНГ. Это означало необходимость обучения производственного персонала и инженеров по техническому обслуживанию для обеспечения безопасного и своевременного выхода на проектные показатели. Обучение проводилось в рамках аудиторных занятий на последних этапах строительства и впоследствии на установке при проведении пуско-наладки и ввода в эксплуатацию. Обучение проводилось экспертами Glencore Technology и представителями субпоставщиков.

Проведение обучения до ввода в эксплуатацию позволило Glencore Technology (GT) выполнять функции надзора за пуско-наладочными работами с минимальным присутствием персонала (три сотрудника), в то время как сотрудники ГЕОПРОМАЙНИНГ выполняли управление установкой. Благодаря этому достигнута передача ответственности за управление технологическим процессом владельцу проекта на самых ранних стадиях.

После запуска и выхода на проектную мощность, представители Core Resources и Glencore Technology посещали проект дважды в год, в результате обеспечено регулярное рассмотрение возникающих технических вопросов.

В рамках процесса передачи технологии и ответственности за технологический процесс, ГЕОПРОМАЙНИНГ внедрили несколько технологических модификаций и улучшений:

1. Перепуск в обход сгустителя

Осадок выщелачивания из процесса Albion Process™ направляется на сгуститель для повышения содержания твердого с 30 до 42 процентов, приемлемого для процесса CIL. Так как осадок установки Albion Process™ смешивается с хвостами флотации и направляется на процесс CIL, был предусмотрен обход сгустителя Albion Process™, а необходимые характеристики плотности питания CIL обеспечивались за счет повышения плотности песков сгустителя хвостов флотации.

2. Сокращение количества реагентов и замкнутый контур слива на реакторах

Конфигурация реакторов выщелачивания Albion Process™ включает связанные между собой желоба для переноса пульпы, каждый реактор оснащен системой перелива, в которой предусмотрен сливной порог для сохранения герметичности свободного пространства под крышкой, чтобы в вентиляционную трубу выводились только газы. В случае высокого содержания карбонатов в питании или скопления флотационных реагентов в технологической воде, возможны случаи перелива из реакторов по причине избыточного пенообразования. Предусматривается перенос перелива между реакторами по желобам, но зачастую он следует по пути наименьшего сопротивления через сливные патрубки реактора. Хотя материал возвращается в процесс за счет системы обвалования и сбора проливов, иногда это приводит к снижению скорости подачи кислорода в проблемном реакторе и повышению в другом реакторе, вызывает пульсацию газа и дополнительные проблемы с пенообразованием. Вторичная переработка пролива также вызывает технологические всплески.

Производственный персонал реализовал проект, который предполагает постепенное сокращение флотационных химических реагентов (преимущественно вспенивателей) и закрытие сливных порогов. Пенообразование существенно сократилось за счет уменьшения количества добавляемых реагентов на обогатительной фабрике. Сливные пороги также были заварены, таким образом вся пена направляется на соединенные желоба чанов. Внедрение этих двух мероприятий позволило устранить проблему перелива пены.

3. Система управления

Технология Albion Process™ поставлена с распределенной системой управления (PCY), управление установкой осуществляется из центральной диспетчерской. Существующие циклы измельчения и CIL управлялись при минимальной оснащенности КИП и полевыми пультами управления, поэтому переход к централизованной системе управления оказался новой концепцией. При реализации проекта Albion Process™, установки измельчения и флотации были интегрированы в PCY для полного централизованного управления начиная с подачи руды до выпуска продукции с установки Albion Process™.

4. Теллуриды

На начальных этапах испытаний было выявлено наличие золота, вкрапленного в теллуриды, и судя по данным разведочного бурения, через несколько лет добычи преимущественно сульфидов, золото будет встречаться в этой форме. В связи с этим, при проектировании технологии Albion Process™ GT заложили возможность повышения pH до 9,0 в последнем реакторе выщелачивания, что позволяет выполнять окисление при высоком pH с целью окисления и высвобождения золота, заключенного в теллуриды. Эта функция также имеет дополнительное преимущество, связанное с подготовкой продукта к процессу CIL, рабочий уровень pH которого составляет примерно 10,5. Так как процесс Albion Process™ функционирует при pH 5,5, подобное технологическое изменение выполняется просто. Кольцевая система подачи известняка от цикла CIL была расширена до реактора выщелачивания Albion Process™ №9, обеспечивая работу при более высоком pH и извлечение золота и серебра из теллуридов. В загружаемом концентрате наблюдается присутствие теллуридов в объеме от 80 частей/млн до 1200 частей/млн. Изначально на установке наблюдалось существенное понижение извлечения золота (примерно на 2-3 процента). Данная проблема была решена повышением уровня pH в последнем реакторе выщелачивания.

СОГЛАШЕНИЕ О СОВМЕСТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В 2017 году ГЕОПРОМАЙНИНГ и Glencore Technology подписали соглашение о совместной деятельности с целью продвижения технологии Albion Process™ на российском рынке. Это значимая веха в сотрудничестве двух компаний так как позволит новым компаниям, приобретающим технологию Albion Process™, эффективно использовать опыт сотрудничества по внедрению процесса Albion Process™ на заводе ГЕОПРОМАЙНИНГ. Положения соглашения предусматривают посещение сотрудниками новых проектов завода ГЕОПРОМАЙНИНГ для изучения технологии Albion Process™ и обучения персонала эксплуатации и техническому обслуживанию.

ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ

Авторы выражают благодарность владельцам ГЕОПРОМАЙНИНГ в Армении за предоставленные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hourn, M, and Turner, D, 2012. Commercialisation of the Albion Process, in *Proceedings ALTA Gold Conference 2012*, pp 231-248 (ALTA Metallurgical Services: Melbourne). [Промышленное внедрение технологии Albion]
- McNulty, T, 2014. Plant Ramp-Up Profiles: An update with emphasis on process development, in *COM2014 – Conference of Metallurgists Proceedings* (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum: Westmount) [Профили выхода установок на проектную мощность: Актуализация информации с упором на разработку технологии]
- Voigt, P, Hourn, M, Mallah, D and Turner, D, 2014. Development of the Albion Process plant to treat refractory concentrates from the ГЕОПРОМАЙНИНГ Gold Project, in *Proceedings – Hydroprocess Conference*, 2014, Chapter 5 (Gecamin: Santiago). [Разработка установки по технологии Albion для переработки упорных концентратов на золотодобывающем проекте ГЕОПРОМАЙНИНГ]
- Voigt, P, Hourn, M, Mallah D and Turner D, 2015. Commissioning and Ramp-Up of the Albion Process at the ГЕОПРОМАЙНИНГ Gold Project, in *Proceedings MetPlant 2015*, pp 207-219 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne). [Ввод в эксплуатацию и наращивание мощности установки Albion на золотодобывающем проекте ГЕОПРОМАЙНИНГ]
- Voigt, P, Mallah, D and Hourn, M, 2017. Oxygen Mass Transfer in the Albion Process™: From the Laboratory To The Plant, in *Proceedings ALTA 2017*, pp 135-144 (ALTA Metallurgical Services, Melbourne, Australia). [Массовый перенос кислорода в процессе Albion Process™: От лаборатории до промышленной установки]
- Voigt, P and Walker, D, 2017. The Albion Process™ at the ГЕОПРОМАЙНИНГ Gold Project – The Success of a Technology, in *Proceedings CIM Convention 2018*, (Canadian Institute of Mining, Vancouver, Canada). [Установка Albion Process™ на золотодобывающем проекте ГЕОПРОМАЙНИНГ – Успешное применение технологии]