

Наклонное самообрушение – жизнеспособная альтернатива горизонтальному обрушению

Ярек Якубек
SRK Consulting (Канада)
Деннис Х. Лабшер
Laubscher Consulting

Резюме

Несмотря на то, что добыча с самообрушением применяется в отрасли на протяжении около 70 лет, широкое распространение этого метода по странам мира наблюдается только в последнее время. В настоящее время существует около 40 проектов по добыче с обрушением, которые находятся в стадии выполнения или предварительных исследований. Практически на всех этих проектах используется горизонтальное расположение выработок, несмотря на то, что разработаны технологии наклонного расположения, более подходящего к условиям залегания рудного тела или условиям массива. В последние годы возможность наклонного расположения выработок рассматривалась для нескольких проектов, однако ни один из них не прошел этап проектных изысканий. Одним из аргументов против применения обрушения с наклонным расположением выработок является то, что обоснованность данного метода является "недоказанной". В данной статье кратко описывается подход к применению наклонного самообрушения, его преимущества и недостатки, а также опыт, полученный во время проектов с использованием наклонного обрушения.

Биография

Ярек Якубек, С.Eng. (профессиональный инженер), более 25 лет опыта производственной и консультационной деятельности в горном деле, геологии и механике горных пород. Имеет мировой опыт в области самообрушения и добычи алмазов, также активно занимается другими аспектами добычи полезных ископаемых, в частности механикой горных пород.

Опыт непосредственной работы на производстве в Ботсване, Канаде и Чехии. Возглавлял геомеханический департамент компании De Beers на алмазных предприятиях Орапа (Orapa) и Летлхакан (Letlhakane) в Ботсване, руководил отделом механики горных пород на руднике Кассиар (Cassiar) на севере провинции Британская Колумбия, Канада, где применялось наклонное самообрушение.

Как сотрудник компании SRK, за последние 15 лет в различных качествах участвовал в большинстве мировых проектов по добыче полезных ископаемых с использованием обрушения. В настоящее время специализируется на массовой разработке месторождений, в частности - выбор метода отработки, технический и комплексный аудит. Совместно с Др. Лаубшером участвовал в Международном исследовании по методам обрушения, выступал в качестве Квалифицированного Лица при оценке нескольких проектов с использованием обрушения и алмазных проектов по стандарту NI 43-101.

Доктор Деннис Лабшер работает в области добычи полезных ископаемых с применением технологий самообрушения почти полвека и лично разрабатывал и воплощал многие подходы, проекты и стандарты, которые использовались с тех пор, как методы наклонного самообрушения начали применяться. Получил степень бакалавра в геологии полезных ископаемых в 1952 г., защитил диссертацию в Университете г. Витвотерсранд (ЮАР) в 1964 г.

Опыт производственной деятельности с применением технологий обрушения получил в Родезии. С 1984 г. занимается консалтингом в горнодобывающей отрасли, сначала как сотрудник SRK в Йоханнесбурге, затем основал свою компанию.

За вклад в развитие отрасли награжден несколькими престижными наградами, в том числе золотой медалью Южноафриканского Института Горного Дела и Металлургии (SAIMM) в 1995 г.; Премией за прижизненные достижения от Южноафриканского Института Инженерной Геологии (South African Institute of Rock Engineering) в 1998 г.; Наградой компании De Beers в области массовой добычи – конференция MASSMIN 2000, а также платиновой медалью Brigadier Stokes Южноафриканского Института Горного Дела и Металлургии в 2007 г.

1. Введение

Термин *схема наклонного самообрушения* используется для обозначения конфигурации отработки, при которой ряды выпускных дучек располагаются на разных уровнях по вертикали, следуя наклонной плоскости отработки. В этой наклонной плоскости отдельные дучки в ряду и между подэтажами располагаются с возможностью полного взаимодействия, более или менее так же, как при горизонтальной схеме самообрушения. В схеме наклонного самообрушения взаимодействие дучек фундаментально отличается от метода подэтажного обрушения, где взаимодействие между отдельными дучками ограничено или отсутствует, несмотря на похожую схему подэтажей.

Конфигурация выработок при наклонном обрушении в значительной степени зависит от геометрии рудного тела и факторов устойчивости массива. Конфигурация будет отличаться, например, для цилиндрической вертикальной кимберлитовой трубки и для крутопадающего пластообразного рудного тела (например, см. одностороннюю схему для лежачего бока и двухстороннюю схему для ложного лежачего бока, 360° вокруг трубки или трога).

В настоящее время наблюдается тенденция к рассмотрению только горизонтального обрушения. Однако, если геометрия рудного тела или распределение полезного компонента является неблагоприятным для горизонтального обрушения, а условия массива и пригодность дучек к эксплуатации вызывают вопросы, наклонная схема может оказаться целесообразным и экономически обоснованным вариантом.

2. Система наклонного обрушения

Система наклонного расположения дучек была впервые применена на руднике Кинг, Зимбабве, ввиду невозможности использования горизонтальной схемы при наличии крупной внутренней зоны сдвижения. Данная схема была основана на успешном применении наклонной схемы с установкой колосникового грохота на участке Нил, рудник Шабани в Зимбабве, а также на системе подэтажного обрушения. Ниже описаны варианты схем наклонного самообрушения, каждый из которых был разработан под определенные условия месторождения.

Геометрия выпускных дучек

По строению и форме, существуют дучки двух типов:

- Наклонная схема расположения дучек в виде ячеек коробки для яиц;
- Усеченная схема подэтажного обрушения.

Схема наклонного расположения дучек в виде ячеек (Рисунок 1) была спроектирована с целью получить более прочную структуру, ровную плоскость наклона и возможность выполнять опережающую подсечку. Данная схема с определенным успехом применялась на руднике Белл (Bell Mine): через некоторые дучки выпускалось более 100 000 т, однако в некоторых дучках работа была затруднена из-за клиновидных обрушений вдоль основных зон сдвижения. Устойчивость лежачего бока является важнейшим фактором при проектировании любой схемы в лежачем боку, не только в период подсечки, но и во время добычных работ.

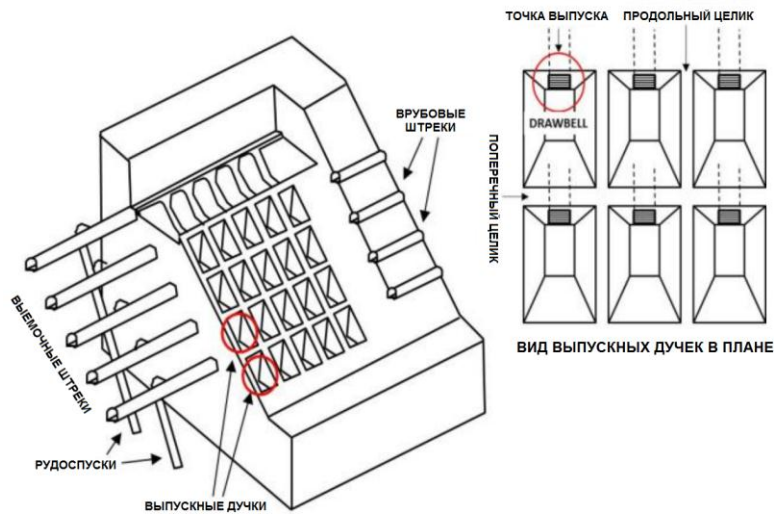


Рисунок 1. Пример схемы расположения дучек в виде ячеек, рудник Белл.

Усеченная схема подэтажного обрушения – это схема, которая применяется при подэтажном обрушении с корректным расположением доставочных и выемочных штреков для достижения устойчивости и взаимодействия между дучками.

Метод выемки руды

Как и при горизонтальном самообрушении, применяется доставка руды самотеком через колосниковый грохот и доставка с помощью погрузочно-доставочных машин.

Схема расположения дучек в зависимости от формы рудного тела

В зависимости от геометрии рудного тела применяется два варианта расположения дучек. При первом варианте, который применяется для крутопадающих рудных тел, плоскость дучек более или менее следует форме рудного тела. Второй вариант, "схема для ложного лежачего бока", применялся на руднике Кинг (King Mine) и был назван так потому, что плоскость выпускных дучек имеет меньший угол наклона, чем угол падения лежачего бока.

Чередующееся или линейное расположение

Существуют проекты наклонного обрушения с чередующимся расположением дучек (см. рис. 2). Кроме того, заслуживает внимания предложенный недавно вариант линейного расположения дучек (см. рис. 3), который следует проанализировать дополнительно.

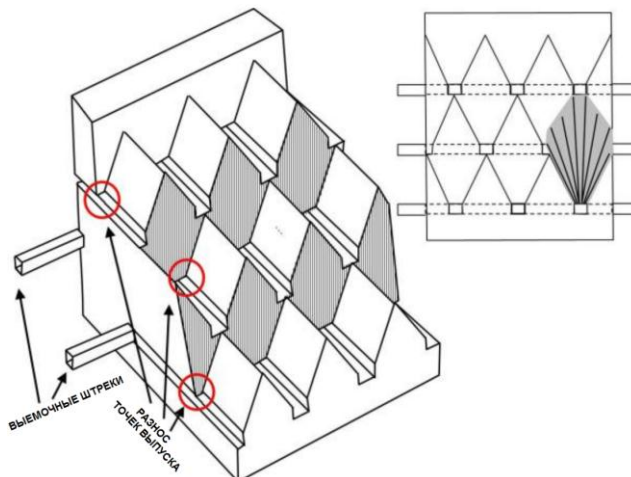


Рисунок 2. Схема чередующегося расположения дучек.

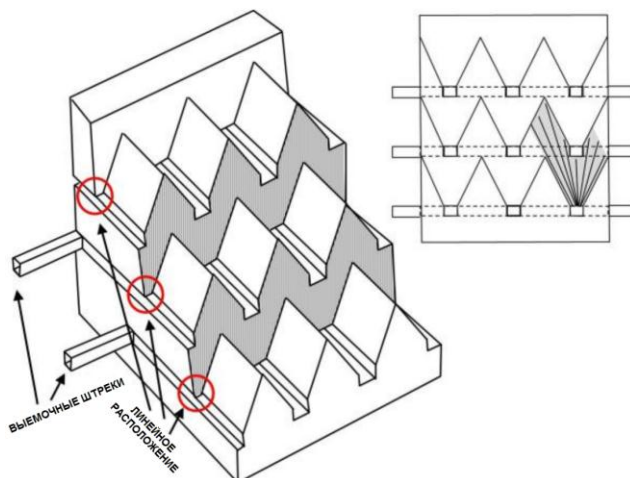


Рисунок 3. Схема линейного расположения дучек.

Основные преимущества линейного расположения:

- Линейные апексы между дучками увеличивают устойчивость системы.
- Высота дучек меньше, чем при чередующемся расположении, благодаря чему улучшается их взаимодействие по падению.

Возможность более эффективного крепления выпускного отверстия: анкерное крепление может быть эффективно выполнено из вышележащего подсечного штрека.

Направление обрушения

Оба направления проходки, снизу вверх и сверху вниз, могут использоваться в зависимости от обстоятельств. Например, проходка снизу вверх применялась на руднике Кинг с целью добиться выпуска с нижней частью зоны выпуска для ускорения формирования угловой зоны выпуска, которая создавалась за счет проседания склона холма. Также, следующий выше горизонт подсекался на коротком расстоянии от нижележащего выпускного отверстия для уменьшения нагрузки на целик. Предпочтительной является проходка сверху вниз.

3. Схема фронтального самообрушения

Технология фронтального обрушения была разработана на основе системы выпуска руды, примененной на двух нижних горизонтах подэтажного обрушения на руднике Шабани (Shabanie Mine), Зимбабве. Технология предусматривает отступление горных работ от начальной отрезной щели на одном или нескольких горизонтах. Щель может располагаться в центре рудного тела или у его края. При расположении в центре уменьшается расстояние откатки и удваивается количество полупостоянных выпускных дучек (SPD). Нижний горизонт является эксплуатационным, верхний – подсечным. При использовании трех горизонтов, эксплуатационными являются два нижних горизонта. Необходимое количество горизонтов зависит от обрушаемости пород; к моменту достижения следующей дучки вышележащий массив обрушается, и выпуск руды может быть выполнен с высокой скоростью. Важно располагать полупостоянные дучки на прямой линии для достижения взаимодействия между штреками.

Последовательность буровых, взрывных и погрузочных работ достаточно сложна, особенно в начале. Можно применить общие правила для данного массива, однако помимо этого следует отдельно анализировать каждый веер. При фронтальном самообрушении необходимо строить разрезы вдоль каждого штрека с нанесением литологической и структурной геологической информации, а также рабочего забоя. Следует анализировать объемы выпуска и привязывать их к конкретным буровым веерам. Требования по вентиляции – такие же, как при подэтажном обрушении.

Большой проблемой при фронтальном обрушении может стать формирование выступов или крупных клиньев, которые могут серьезно повредить эксплуатационный горизонт. Фронтальное обрушение может применяться, только если обрушение следует за проходкой подрезного штрека. При использовании одного горизонта, обрушение должно быть практически мгновенным.

Технология фронтального обрушения требует соблюдения строгой дисциплины при погрузочных и взрывных операциях.

4. Преимущества и недостатки наклонного обрушения

Преимущества

Основными преимуществами наклонной схемы являются:

1. Возможность ускорения процесса самообрушения. Благодаря простой, прямой проходке дучек, без сложного сдвоенного подсечного горизонта и без взрывных работ в дучках дают возможность быстрее приступить к добыче, что может иметь серьезный экономический эффект и повлечет меньше проблем в процессе самообрушения. Данная информация была подтверждена последним технико-экономическим сравнением горизонтальной и наклонной схем на руднике Финч (Finsch).
2. Более эффективное извлечение руды и контроль выпуска. Независимые дучки позволяют выполнять уборку руды, повторное взрывание и ремонт, не затрагивая соседние дучки или погрузочный горизонт. Также, изменение формы дучки на более плавную (в форме впадины) позволяет уменьшить количество высоких необрушившихся козырьков, а прямое расположение дучек позволяет использовать буровые станки для бурения козырьков.
3. Более устойчивая схема и эффективное крепление массива. Простая форма дучек и погрузочного горизонта, меньшая площадь пересечений и расположение выемочных выработок "за пределами" зоны обрушения позволяют организовать более устойчивую систему и более эффективное крепление выработок, так как возникает меньше проблем при установке крепления, а скорость крепления возрастает. Существует мнение, что при равной прочности массива организация крепления для наклонного обрушения обходится дешевле, чем для горизонтального. Пример такого сравнения приведен в Разделе 4. Прямые дучки позволяют легко выполнять предварительное отделение дучек, а при линейном расположении дучек возможно выполнить качественное анкерное крепление выпускного отверстия.
4. Гибкость схемы. В отличие от горизонтальной схемы, ремонт выпускного отверстия или организация нового отверстия возможны без помех для погрузочно-доставочной машины, так как длина дучки не является критически важной. Также, наклонная схема позволяет изменить расстояние между дучками для достижения более крупного или мелкого дробления и улучшения извлечения руды.
5. Увеличение объема добываемых запасов. В случае наклонного рудного тела, наклонная схема естественно снижает потери руды и может значительно увеличить срок отработки путем включения в отработку тех выпускных камер, которые при горизонтальной схеме содержали бы породные клинья.
6. Достижение больших производственных объемов на начальном этапе отработки. Увеличения объема выпускаемой руды можно добиться путем взрывных работ из расширенных подрезных штреков. Этот метод требует увеличения капитальных затрат, однако позволяет перейти с поэтажного обрушения на наклонное самообрушение при добыче больших объемов. Данное преимущество особенно важно в случае, если породы рудного тела обладают хорошей крепостью, для добычи требуются большие подрезные выработки, а обрушение происходит медленно. В таких случаях выпуск крупнообломочной горной массы лучше контролировать при наклонном расположении дучек.

Прочие преимущества:

- Высокая производительность при небольших расстояниях между дучками.
- изнашивание выпускных отверстий происходит медленнее, чем при горизонтальной схеме.
- При усеченной схеме поэтажного обрушения, подсечной штрек может быть пройден на любом расстоянии от дучки.
- Полная подсечка легко достижима.
- Наклонное расположение дучек в виде ячеек (описывается ниже) позволяет выполнять опережающую подсечку.
- Выемочный горизонт поддерживается ненарушенным массивом. На падающих рудных телах и при возможности наклонного выпуска возможно увеличение извлечения руды.
- Имеются хорошие возможности для повторного бурения.
- Возможность более эффективно контролировать водоприток и обводненные остатки породы, более равномерный выпуск.
- Устойчивость дучки при наклонном обрушении можно сравнить с устойчивостью борта карьера.
- Водоотвод и водопонижение из дучек и горизонта более эффективно, чем при горизонтальной схеме.

- "Выступы" и "козырьки" обваливаются с меньшей вероятностью, чем при горизонтальной схеме.

Недостатки

В сравнении с горизонтальной схемой, наклонное обрушение имеет следующие недостатки:

1. Более высокие капитальные затраты.
2. Необходимо использование системы рудоспусков. Прямая подача руды на дробилку невозможна.
3. Более сложный контроль при работе на нескольких горизонтах.
4. Наклонное расположение выработок менее благоприятно для электрической погрузочно-доставочной машины.
5. Система более подвержена ущербу от клиновидных обрушений, в случае неправильной подсечки и недостаточного анализа воздействия выработок на массив.
6. Кроме рудника Кинг в Зимбабве, в мире сейчас нет проектов, работающих с использованием наклонного самообрушения.

5. Опыт применения наклонного обрушения

Рудник Гатс (Gaths Mine), Зимбабве

Отработка методом наклонного самообрушения при мощности рудного тела до 100 м, угол падения около 70°. Породы умеренной крепости (прочность на одноосное сжатие 30-70 МПа, рейтинг IRMR для 80% ненарушенной породы – 40-60), наличие небольших зон сдвижения пород. Крупные зоны сдвижения присутствовали, но находились за пределами рабочего участка.

Рудник обрабатывался снизу вверх для выпуска руды в нижнюю часть зоны выпуска и ускорения формирования угловой зоны выпуска за счет проседания склона холма. Вышележащий горизонт подсекался на коротком расстоянии от нижележащего горизонта для уменьшения нагрузки на целик. В противном случае предпочтительной была бы отработка сверху вниз.

Основными причинами выбора наклонного обрушения были наклонный лежащий бок рудного тела и неблагоприятное состояние массива. Также наклонная схема позволила производить наклонный выпуск из выпускных камер по направлению к проседающему склону. Наклонное самообрушение было успешно введено вместо горизонтального самообрушения, которое в данных условиях оказалось несостоятельным. Объем производства составил 2 тыс. т/сутки на протяжении более 40 лет.

Рудник Белл (Bell Mine), Зимбабве

Наклонное самообрушение с расположением дучек в виде ячеек было применено на руднике Белл на участке, где падение рудного тела составляло 45°. Породы рудного тела умеренной крепости, рейтинг массива IRMR – 45-65, наличие небольших зон сдвижения пород.

Основной причиной применения наклонного обрушения был наклонный характер залегания рудного тела. Отработанное горизонтальным самообрушением пространство и верхний горизонт системы наклонного самообрушения разделяла зона пустых пород мощностью 30 м. Верхний горизонт системы наклонного самообрушения подсекал данную зону, которая таким образом влияла на его устойчивость. Объем производства составлял около 5 тыс. т/сутки, на нижних дучках до 240 тыс. т. В сильно дробленых зонах, однако, выпускалось только 60% объема. Увеличение целиков, опережающая проходка подсекающих выработок и улучшение последовательности операций привели к более устойчивым условиям добычи.

Рудник Шабани (Shabanie Mine), Зимбабве

На руднике Шабани два нижних подэтажа выпускались вместе для извлечения пустой породы, разбавленной рудным материалом. В результате подэтажного обрушения прожилки асбеста накапливались в конце выпуска, повышая разубоживание.

Более подробное описание опыта применения наклонной схемы в Зимбабве с чертежами было выполнено в Международном руководстве по оценке систем добычи с обрушением (Лабшер и Якубек, 2000 г.).

Рудник Кассиар (Cassiar Mine), Канада

Система с наклонным самообрушением в лежащем боку применялась на руднике Кассиар в 1990-92 г.г. Добыча велась в суровых условиях на глубине около 500 м в очень слабых породах с крепостью массива 1-5 МПа и

рейтингом массива IRMR от 15 до 25. Угол падения лежачего бока составлял около 45° с мощностью около 100 м на горизонте 1350 м. Подробно проект описан в работах Якубека (1992 г.) и Кэрю (1992 г.).

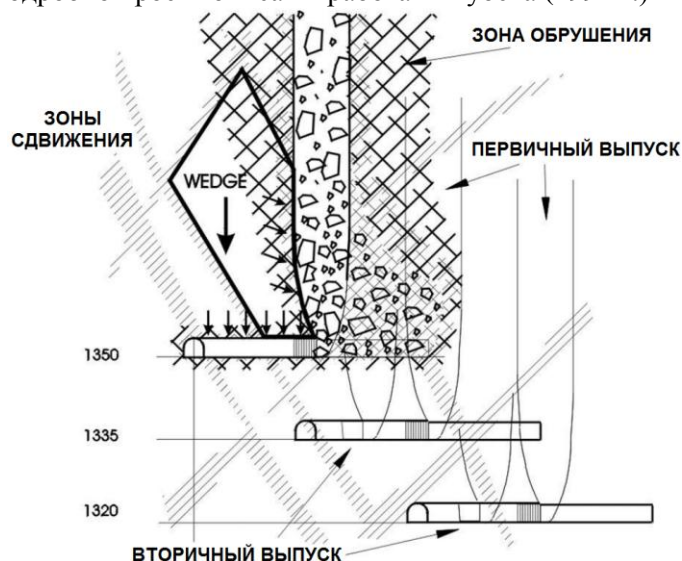


Рисунок 4. Пример расположения выработок в лежачем боку рудного тела, рудник Кассиар (Якубек, 1992 г.)

Основными причинами применения наклонного обрушения были наклонный характер залегания рудного тела, обеспечение устойчивости эксплуатационного горизонта и озабоченность по поводу изнашивания выпускных отверстий. Несмотря на закрытие рудника в 1992 г., выбор данной системы разработки был признан успешным для эксплуатации массивного рудного тела в крайне сложных горно-геологических условиях. Объем добычи составлял около 3 тыс. т/сутки, в работе находились 10-12 дучек одновременно. Если бы верхний подэтаж над очистным блоком был сдан в эксплуатацию как планировалось в первоначальном исследовании, многих проблем с устойчивостью массива можно было избежать.

За последние 10 лет изучалось около 6 проектов по наклонному обрушению, и только один из них был доведен до уровня Feasibility Study (ТЭО проекта). Данная работа для рудника Финч (Finsch Mine) была опубликована Паукаром (Paucar) и Мтомбени (Mthombeni) в 2004 г.; общая информация приводится ниже.

Блок №5, алмазный рудник Финч, ЮАР

Исследование уровня Feasibility (ТЭО) на основе "ложного лежачего бока" (Рисунок 5) с двухсторонним наклонным обрушением и выпускными камерами высотой 250 м было выполнено в 2004 г. для объема добычи 5 млн.т/год. Вертикальное рудное тело (кимберлитовая трубка) с гидравлическим радиусом 60 было расположено на глубине 900 м. Рудное тело в основном состоит из пород средней и слабой крепости (прочность на одноосное сжатие 40-60 МПа, рейтинг ненарушенной породы IRMR 40-60).

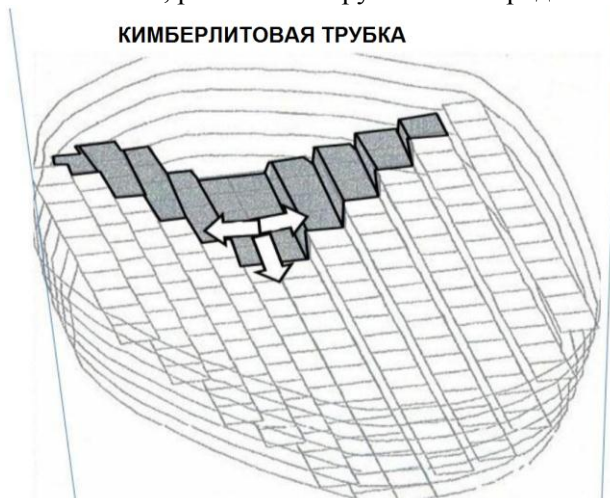


Рисунок 5. На руднике Финч рассматривалась проходка выработок снизу вверх.

Основными причинами применения наклонного самообрушения были: устойчивость эксплуатационного горизонта и изнашиваемость нижнего края выдачного отверстия. Несмотря на то, что проект был доведен до уровня Feasibility (ТЭО), в настоящее время его выполнение не планируется по экономическим причинам и из-за вероятных рисков.

Рудник Эрнест Генри (Ernest Henry Mine), Австралия

В 2008 г. было выполнено концептуальное исследование проекта наклонного самообрушения с низкими выпускными камерами (около 250 м). Затем было выполнено исследование уровня Pre-Feasibility (предварительное ТЭО), после чего от проекта отказались по причинам, изложенным ниже.

Рудное тело падает под углом 45°, продолжаясь ниже дна карьера до глубины около 1000 м. Очень крепкие и устойчивые породы рудного тела (рейтинг массива IRMR составляет 65-75); мощность рудного тела до 200 м.

Основными причинами применения наклонного самообрушения были: наклонное расположение рудного тела и ожидаемое высокое вторичное дробление. Из-за опасности высокой обрушаемости и дробления, был выбран метод отработки подэтажным обрушением.

Рудное тело №500, рудник Маунт Иса (Mt Isa Mine), Австралия

Исследование уровня Scoping Study выполнялось для рудного тела, падающего под углом 45° (с учетом минерализованных ореолов, при этом угол падения самого рудного тела 65°). В условиях очень слабых (рейтинг для массива IRMR 20-40) и высоко реакционных пород использование взрывчатых веществ было сведено к минимуму.

Основными причинами применения наклонного обрушения были: наклонное расположение лежачего бока, слабая крепость и реакционные свойства руд. По экономическим причинам и оцениваемым рискам, в настоящее время отработка рудного тела №500 не планируется.

На рудниках Квеста (Questa) и Коффифонтейн (Koffiefontain) применялась система с фронтальным самообрушением. На обоих рудниках при отработке возникали сложности, эксплуатация системы на руднике Коффифонтейн описана в работе Ханнвега (Hannweg) и др. (2004 г.).

Рудник Коффифонтейн, ЮАР

Система с фронтальным самообрушением с высотой выпускных камер 90 м применялась на руднике в 1997-2003 г.г. Вертикальное рудное тело (кимберлитовая трубка) имела гидравлический радиус, больший чем минимальный гидравлический радиус, требуемый для самообрушения. Работы велись в условиях пород средней и слабой крепости (средняя прочность на одноосное сжатие 40-60 МПа, средний рейтинг для массива IRMR 40-60) на глубине около 500 м. Подэтажи располагались на расстоянии 12 м друг от друга, дучки через каждые 15 м.

Основной причиной применения фронтального обрушения была необходимость продолжить извлечение раздробленной руды, оставшейся после системы подэтажного обрушения. Производительность системы фронтального самообрушения время от времени превышала план (8000 т/сут.). По ряду причин (полная производственная нагрузка на дучки, форма контакта рудного тела) в системе развивалась значительная неустойчивость, что, в конце концов, привело к обрушению выработок. Обрушение подробно проанализировано в работе Ханнвега и др. (2004 г.). В заключении авторы пишут: *"Система разработки с фронтальным самообрушением требует строгого соблюдения многих правил. Если эти правила соблюдаются, эксплуатация данной системы не вызывает проблем"*.

6. Выводы

В горнодобывающей отрасли существует тенденция рассматривать только систему с горизонтальным самообрушением, без учета наклонного обрушения в качестве возможной альтернативы. В данной работе авторы выделили ряд причин, по которым наклонное самообрушение может оказаться оправданной и экономически обоснованной альтернативой горизонтальному самообрушению, указали на случаи, когда форма рудного тела или распределение оруденения неблагоприятны для горизонтальной системы, и на случаи, когда состояние пород и возможность эксплуатации дучек находятся под вопросом.

Часто приводимый довод о том, что технология наклонного самообрушения является "недоказанной", некорректен, а высокие начальные затраты на проходку частично компенсируются быстрым выходом на проектную производительность и более низкими затратами в дальнейшем. С точки зрения инфраструктурной

схемы, проходки выработок и контроля руды, технология мало отличается от подэтажного обрушения.

В случае с наклонными рудными телами, наклонное самообрушение может быть единственным применимым вариантом системы с обрушением. Как обсуждалось выше, успешные примеры применения наклонного и фронтального самообрушения показывают, что при правильном проектировании и эксплуатации наклонная система позволяет обрабатывать рудные тела в тех случаях, когда применение обычной горизонтальной схемы невозможно.

7. Список литературы

Carew, T.J. (1992). Footwall drawpoint caving at Cassiar Mine: In proceedings MASSMIN 92, Johannesburg, South Africa, pp. 295-301

Hannweg, L. et al. (2004). Koffiefontein mine front cave – Case History: In proceedings MASSMIN 2004, Santiago, Chile, pp 393-396.

Jakubec, J. (1992). Support at Cassiar underground mine: In proceedings MASSMIN 92, Johannesburg, South Africa, pp. 111-123

Laubscher, D. H. & Jakubec, J. (2000 г.). Block Caving Manual – Incline Cave, ICS 2000 internal document.

Paucar, M. & Mthombeni, C. (2004). Incline cave: A technical alternative method to mine kimberlite deposit at depth: In proceedings MASSMIN 2004, Santiago, Chile, pp 393-396.