

После сбора данных о направлениях трещиноватости, проводится разделение месторождений на структурные домены и определение параметров систем трещин и их разброса, что становится основой для последующего расчета устойчивости по специальным схемам [2]. Для расчета вероятности обрушений откосов на основе собранных данных проводится кинематический анализ с помощью программы Digger Slope, которая позволяет производить массовые расчеты устойчивости по всему карьере одновременно. Дополнительное преимущество программы Digger Slope - возможность объединения результатов расчета в сектора проектирования. В этих секторах определяются оптимальный угол откоса уступа и ширина бермы.

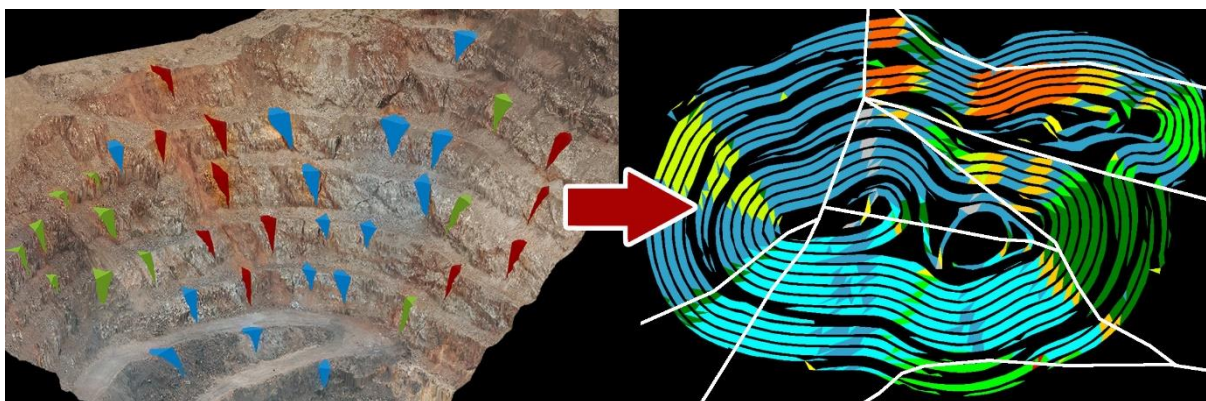


Рис. 2 – Визуализация клиновидных обрушений и районирование по их вероятности

Результаты анализа, проведенного для фактического контура карьера, позволяют спрогнозировать возможные обрушения при развитии горных работ, а также определить объемы этих обрушений. На основе полученных результатов можно подобрать такие параметры откосов, чтобы вероятность и параметры обрушений были приемлемыми.

Применение сочетания описанных методов позволяет подобрать оптимальный угол уступа, ширину бермы и генеральный угол борта, что позволяет снизить объемы вскрыши и обеспечить допустимую вероятность возможных обрушений.

1. Руководство по проектированию бортов карьера. Guidelines for open pit slope design: научное издание / под ред.: Д. Рид, П. Стейси; пер. с англ. А. С. Бенгхен; науч. ред. пер. А. Б. Макаров. Екатеринбург: Правовед, 2015. 528 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». М., 2020.

О НЕОБХОДИМОСТИ ЭКСПЛИЦИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ГЕОМЕХАНИКЕ НА ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕРАХ

Б.Т. Ильясов

УФ АО «ВНИМИ»

Email: bt.ilyasov@gmail.com

Известно, что распространенными на сегодня численными методами механики, такими как метод конечных элементов или метод конечных разностей, трещинообразование и разрушение материала не моделируется эксплицитно (т.е. в явном виде), и может учитываться только неявно, посредством изменения свойств материала. В то же время существуют методы дискретных элементов и комбинированные методы, которые эти процессы воспроизводят эксплицитно.

В последние годы с применением программы Prorock, реализующей комбинированный метод конечно-дискретных элементов [1], получены новые практические примеры, в которых эксплицитное моделирование процесса разрушения позволило получить результаты, которые невозможно получить иными способами. Перечислить данные применения можно следующим образом:

- Построение зон обрушения и трещин (разрыва сплошности) в подрабатываемом массиве горных пород;
- Определение коэффициента запаса устойчивости при деформировании уступа, сложенного тонкими слоями пород обратного падения (*англ. flexible toppling*);
- Определение параметров искусственного поля напряжений при отработке месторождения системами с обрушением [1];
- Расчёт параметров анкерного крепления при помощи численного моделирования при небольших запасах устойчивости [1];
- Прогнозирование обрушений, вызванных как структурами, так и напряжениями.

Построение зон обрушения и трещин в подрабатываемом массиве важно для недопущения опасного влияния на вышележащие подземные выработки и объекты земной поверхности. Наиболее актуальна данная задача при подработке водоносных горизонтов и гидрологических объектов поверхности. Так как в модели эксплицитно моделируется разрушение и фрагментация горных пород, имеется возможность оценки удельного объёма пустот в зоне обрушения и даже районирования по данному показателю. Кроме того, можно измерить на модели величины раскрытия трещин в зоне разрывов сплошности. Из этих показателей можно определить показатели фильтрации, необходимые для расчета водопритоков в выработки через подработанный массив.

Также установление границ зон обрушения и трещин требуется при комбинированной отработке месторождения, так как в данных зонах устойчивость уступов и бортов будет пониженной. Исходя из определения, в зоне обрушения сцепление должно быть околонулевым (например, согласно ФНиП «Правила обеспечения устойчивости...» [2] сцепление принимается равным 20 кПа) из-за чего уступы в этой зоне необходимо выполаживать для обеспечения устойчивости как собственно уступов, так и борта карьера. На рис. 1 показаны два конечных контура карьера, которые построены с применением двух подходов: численного МКДЭ-моделирования и углов сдвижения, определенных эмпирическим способом.

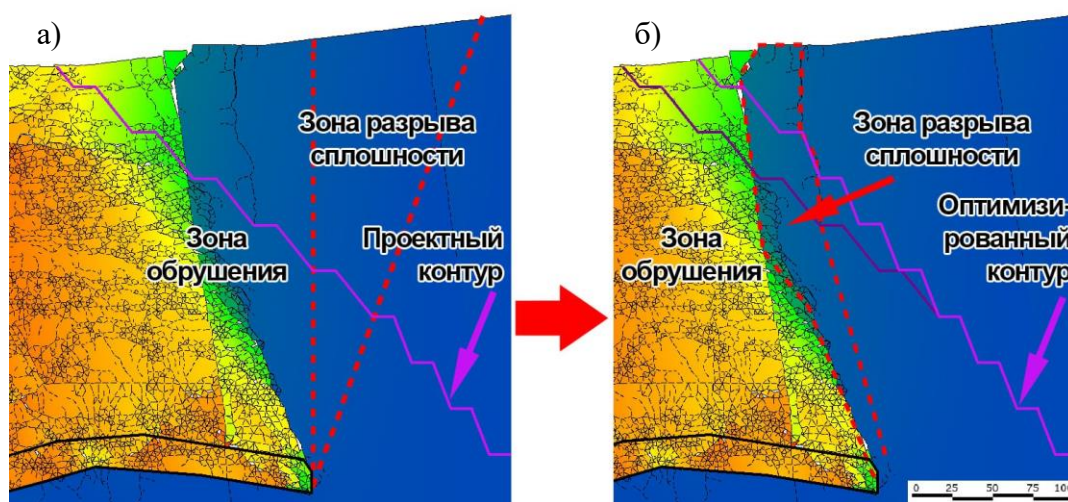


Рис. 1 – Сравнение контуров карьера в зонах обрушения и трещин, обоснованных с применением: а) эмпирических подходов и б) моделирования

Необходимо отметить, что представленные на рис. 1 результаты моделирования подтверждаются данными наблюдений на земной поверхности, а именно величиной оседаний поверхности, расположением воронок обрушения, величиной угла разрыва.

Из рис. 1 можно увидеть, что прогнозирование меньших по размеру зон обрушения и трещин позволяет рекомендовать более крутой борт карьера. Оба контура карьера, приведенных на рисунке 1, обоснованы расчетами устойчивости уступов и борта методом предельного равновесия, разница лишь в границах зон обрушения и уступов.

Определение коэффициента запаса устойчивости уступов при деформировании уступа, сложенного тонкими слоями пород обратного падения (*англ.* flexible toppling), является задачей, не решаемой существующими методами, что является общепризнанным фактом [3]. Стандартные методы предельного равновесия не позволяют учесть слоистость, круто падающую в борт. Для расчёта топплинга применяется метод Гудмана, однако он даёт заниженные результаты при небольшой мощности слоя. Например, для одного из карьеров северо-запада РФ методом Гудмана был получен равным $KЗУ=0,68$. При этом уступ является устойчивым (т.е. $KЗУ >1,3$), что известно по натурным наблюдениям. В результате расчёта при помощи МКДЭ-моделирования получен $KЗУ > 2,0$ и данный результат представляется наиболее реалистичным.

При прогнозировании устойчивости подземных выработок появление локальных разрушений в массиве приводит к локальным изменениям напряжений в массиве, что в свою очередь влияет на процесс дальнейшего развития процесса разрушения. В массиве могут образовываться небольшие трещины отрыва (*англ.* splitting), которые при накоплении могут вызывать формирование крупных поверхностей разрушения, опасных для устойчивости выработки [1]. Данный процесс сильно влияет на устойчивость подземных выработок при больших глубинах, при этом он может быть спрогнозирован только при эксплицитном моделировании разрушений.

1. Ильясов Б.Т., Кульсаитов Р.В., Неугомонов С.С., Солуянов Н.О. Оценка устойчивости закрепленной выработки на основе численного моделирования методом конечно-дискретных элементов // Горный журнал, 2023, №1. С. 118-123. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.20.
2. ФНИП «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Утв. приказом РТН №439. 2020.
3. Руководство по проектированию бортов карьера. Guidelines for open pit slope design: научное издание / под ред.: Д. Рид, П. Стейси; пер. с англ. А. С. Бентхен; науч. ред. пер. А. Б. Макаров. Екатеринбург: Правовед, 2015. 528 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ. ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ

Н. Н. Ефремовцев, В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва

Email: noee7@mail.ru

Аннотация. Усложнение геомеханических условий разработки месторождений с увеличением глубины и соответственно возрастанием горного