

## Численное моделирование обрушений бортов карьеров поможет избежать катастроф



Заглавное фото: [4]

Компания Rocscience, основанная в 1996 году на базе Университета Торонто в Канаде, является одним из мировых лидеров по разработке, усовершенствованию и распространению 2D и 3D программного обеспечения для инженеров-строителей, горных инженеров и инженеров-геологов. На сайте данной компании недавно появилась интересная заметка «Моделирование мультимодальных разрушений в карьерах с использованием метода предельного равновесия и метода конечных элементов» [5]. Она была написана на основе доклада сотрудников Rocscience из Торонто и Королевского университета из Кингстона (Канада) С. Джаванхошдела, Б. Ками, Т. Якуба, Т. Ма и Ю. Аболфазлзаде «Мультимодальные механизмы разрушений в карьерах с использованием метода предельного равновесия и метода конечных элементов» [3] на 55-м Симпозиуме по геомеханике (г. Хьюстон, США, 20–23 июня 2021 г.).

Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод указанной заметки [5] с привлечением некоторых дополнительных материалов [1, 2, 4, 6, 7].

Консультационную помощь редакции оказали сотрудники ООО «Современные Изыскательские Технологии» – официального представителя компании Rocscience в России.

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»**

[info@geoinfo.ru](mailto:info@geoinfo.ru)

**ООО «СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ADVANCED SURVEY TECHNOLOGIES) – ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЬ КОМПАНИИ ROCSCIENCE В РОССИИ**

info@geoast.pro

## Введение

Метод конечных элементов (FEM – Finite Element Method) и метод предельного равновесия (LEM – Limit Equilibrium Method) известны как два наиболее распространенных инструмента для анализа устойчивости склонов и откосов.

Метод предельного равновесия, традиционно используемый для анализа стабильности склонов и откосов, полезен для определения наиболее критической плоскости разрушения (скольжения), которая соответствует минимальному коэффициенту устойчивости. Однако при рассмотрении реальных проблем важно допускать и учитывать существование множества плоскостей разрушения при примерно одинаковых коэффициентах устойчивости.

Здесь будет представлен особый метод, который основан на алгоритме мультимодальной численной оптимизации локально (выборочно) информированного роя частиц с радиусным фильтром (locally informed particle swarm with radius filter – LIPS-R). Чтобы объяснить, как этот метод приводит к множеству видов разрушения, был смоделирован карьер с бортами, сложенными различными слоями грунтов для сравнения результатов анализа с помощью FEM и LEM. Результаты подтвердили хорошую пригодность обоих этих методов.

Был выполнен анализ для изучения плоскостей потенциального разрушения с самым низким коэффициентом устойчивости и возможных критических плоскостей скольжения с использованием программ RS3 и Slide3, после чего были сопоставлены полученные с их помощью результаты.

Отметим, что **RS3** – это универсальная программа от компании Rocscience для 3D-анализа методом конечных элементов, которая может использоваться для проектирования подземных горных работ, тоннелей, карьеров, фундаментов, для оценки устойчивости оползневых склонов и пр. **Slide3** – это удобная программа от Rocscience для 3D-расчетов методом предельного равновесия, предназначенная для анализа устойчивости склонов, сложенных любыми типами дисперсных и скальных грунтов, насыпей, земляных дамб и подпорных стенок (она использует метод конечных элементов, вероятностный анализ, разновариантное моделирование, возможности проектирования удерживающих сооружений и пр.).

## Метод снижения прочности на сдвиг

Метод снижения прочности на сдвиг (SSR – Shear Strength Reduction) для определения устойчивости склонов и откосов заключается в анализе методом конечных элементов для определения коэффициента уменьшения допускаемых напряжений на сжатие (SRF – Stress Reduction Factor) и/или коэффициента устойчивости  $K_y$  (FS – Factor of Safety), которые приводят к разрушению.

Отметим, что SRF представляет собой отношение действительных напряжений к пределу текучести при сжатии, а FS равен отношению всех сил, удерживающих откос в равновесии, к сумме всех сдвигающих сил, стремящихся вывести его из равновесия.

## Краткая информация о методе мультимодальной оптимизации



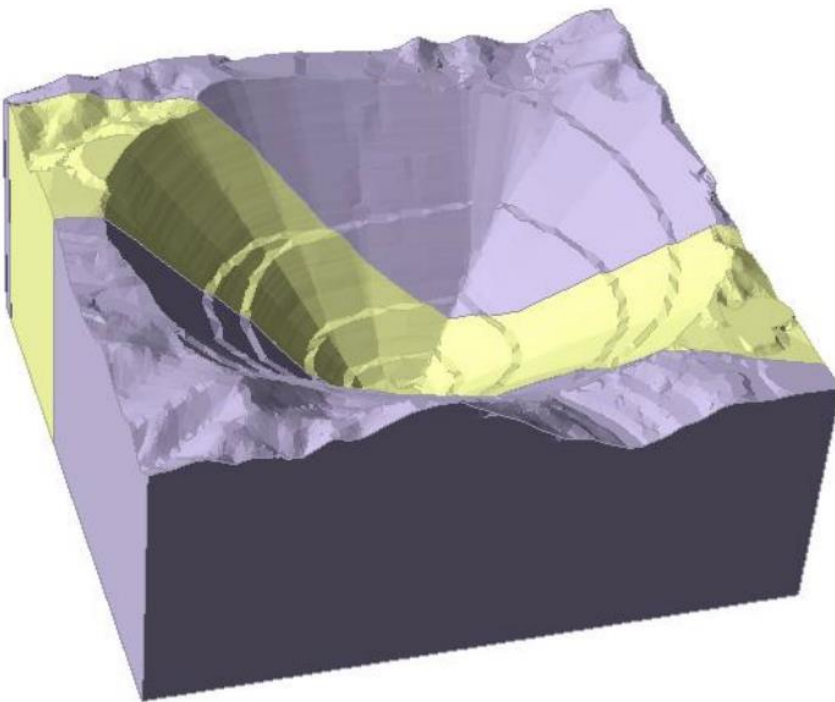
Реальные проблемы устойчивости склонов и откосов требуют сочетания методов унимодального и мультимодального метаэвристического поиска.

При использовании унимодального метода, такого как оптимизация роя частиц (PSO – particle swarm optimization), ищется единственная наиболее критическая поверхность (с глобальным минимумом устойчивости для всей области поиска).

В случае применения мультимодального метода численной оптимизации локально информированного роя частиц с радиусным фильтром (LIPS-R) ищется количество  $x$  наиболее критических плоскостей с минимальной устойчивостью (например, это число  $x$  может быть равно 3). Возможность мультимодальной оптимизации (ММО – Multi-Modal Optimization) имеется при использовании программы Slide3.

## Модель карьера

Полученная 3D-модель карьера включает два типа вмещающих его материалов. На рисунке 1 фиолетовым цветом показан материал 1, для которого используется обобщенный критерий разрушения Хёка – Брауна, а для более слабого материала 2 (в котором есть вероятность присутствия плоскостей разрушения), выделенного желтым цветом, применяется критерий разрушения Мора – Кулона. В таблице приведены свойства материалов в модели карьера.



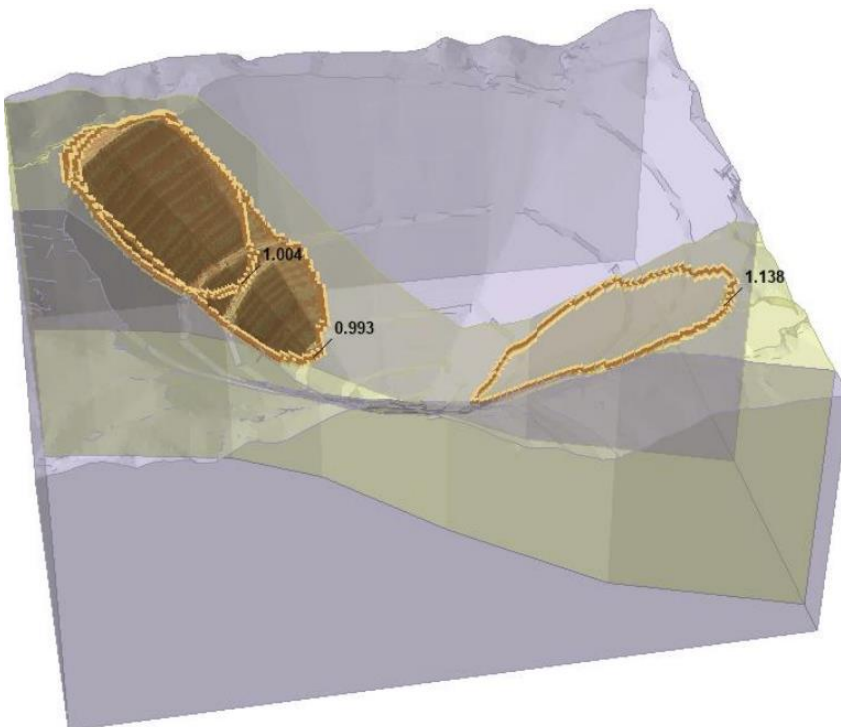
**Рис. 1.** Трехмерная модель карьера

**Таблица. Свойства материалов в модели карьера**

Материал	Критерий разрушения	Параметры					
		UCS, кПа	mb	s	a	E, кПа	$\nu$
1	Хэка – Брауна (обобщенный)	5 000	1,6767	0,0038	0,0506	50 000	0,4
2	Мора – Кулона	C, кПа	$\phi$ , °	E, кПа	$\nu$	-	-
		300	25	50 000	0,4	-	-

### Результаты анализа методом предельного равновесия с использованием метода мультимодальной оптимизации

На рисунке 2 показаны результаты анализа методом предельного равновесия с использованием метода мультимодальной оптимизации. С помощью этого подхода было обнаружено три минимальных значения коэффициента устойчивости, которые составили 0,99; 1,0 и 1,14. Хотя эти величины очень близки друг к другу, все же видно, что соответствующие им плоскости потенциального скольжения различаются по размеру, форме и даже по расположению. Это демонстрирует преимущество метода мультимодальной оптимизации (ведь, сосредоточив внимание только на глобальном минимуме, то есть на наименьшем коэффициенте устойчивости, можно было бы упустить из виду два других потенциальных обрушения).



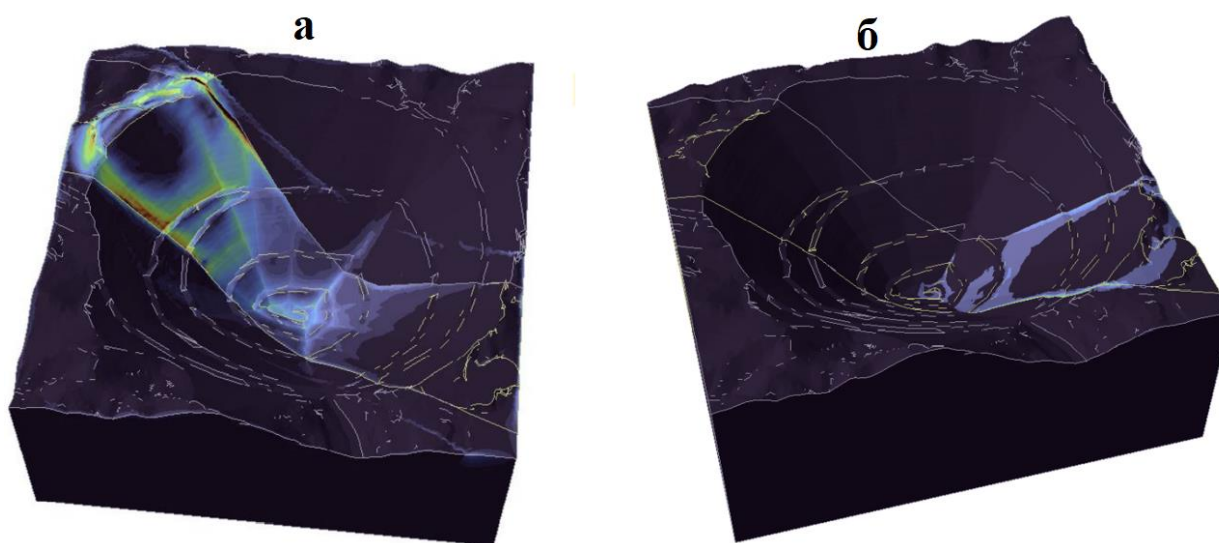
**Рис. 2.** Результаты анализа методом предельного равновесия с использованием подхода, основанного на мультимодальной оптимизации

### Результат анализа методом снижения прочности на сдвиг на основе метода конечных элементов

Значения коэффициентов устойчивости, полученные при анализе методом снижения прочности на сдвиг на основе метода конечных элементов, хорошо совпали с их величинами, рассчитанными с использованием метода предельного равновесия.

Рисунок 3, а показывает, что две области разрушения, обнаруженные при анализе методом снижения прочности на сдвиг, аналогичны обнаруженным с помощью мультимодальной оптимизации с минимальными значениями коэффициента устойчивости.

На рисунке 3, б продемонстрировано, что при анализе методом конечных элементов, когда исследование было сосредоточено на другой стороне модели (где метод предельного равновесия дал коэффициент устойчивости, равный 1,14), были обнаружены идентичные коэффициент устойчивости и плоскость разрушения.



**Рис. 3.** При поиске изолинии максимальной деформации сдвига при конечноэлементном анализе внимание было сосредоточено: а – на всей геометрии карьера (с коэффициентом уменьшения допускаемых напряжений на сжатие  $SRF = 1,03$ ); б – на одной конкретной области на стороне карьера с коэффициентом устойчивости  $FS = 1,14$  и коэффициентом уменьшения допускаемых напряжений на сжатие  $SRF = 1,13$  (по результатам использования метода предельного равновесия)

## Заключение

Трехмерный анализ устойчивости откосов бортов карьера на основе методов предельного равновесия (LEM) и конечных элементов (FEM) позволил сделать вывод, что использование таких двух подходов, как снижение прочности на сдвиг (SSR) и мультимодальная оптимизация (ММО), привело к выявлению идентичных областей развития критической плоскости скольжения и сходных значений коэффициента устойчивости.

Когда дело доходит до исследования поверхностей разрушения при разработке проектов, программа Rocscience RS3 в сочетании с программой Rocscience Slide3 позволяет эффективно выполнять анализ методами конечных элементов и предельного равновесия с использованием одной и той же 3D-модели и таким образом проверять достоверность получаемых значений коэффициента устойчивости. Если результаты покажут приемлемое совпадение, то в них можно быть уверенными (иначе при реализации проектов могут быть катастрофические нарушения устойчивости, например таких как гигантский оползень, сошедший 10 апреля 2013 года с борта крупнейшего карьера по добыче медной руды «Бингем» в США, рис. 4. – Ред.).



**Рис. 4.** Гигантский оползень, сошедший 10 апреля 2013 года с борта крупнейшего карьера по добыче медной руды «Бингем» в США [6]

Чтобы более детально ознакомиться с представленным исследованием, можно прочесть полную статью [3], на основе которой была написана заметка [5].

#### **Источники**

1. [geoast.pro/rs3](http://geoast.pro/rs3).
2. [geoast.pro/slide3](http://geoast.pro/slide3).
3. Javankhoshdel S., Cami B., Yacoub T., Ma T., Abolfazlzadeh Y. Multi modal failure mechanism in open pit mines using LEM and FEM approaches // Proceedings of the 55th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Houston, Texas, USA, 20–23 June 2021. URL: [researchgate.net/publication/352693454\\_Multi\\_Modal\\_failure\\_mechanism\\_in\\_open\\_pit\\_mines\\_using\\_LEM\\_and\\_FEM\\_approaches](https://researchgate.net/publication/352693454_Multi_Modal_failure_mechanism_in_open_pit_mines_using_LEM_and_FEM_approaches).
4. [pixabay.com/ru/photos/тоскана-карьер-мрамор-апуан-4240688/](https://pixabay.com/ru/photos/тоскана-карьер-мрамор-апуан-4240688/).
5. Simulating multi-modal failure in open pit mines using LEM & FEM // Rocscience. January 26, 2022. URL: [rocscience.com/learning/simulating-multi-modal-failure-in-open-pit-mines-using-lem-fem?utm\\_medium=email&utm\\_source=rocnews&utm\\_campaign=February2022](https://rocscience.com/learning/simulating-multi-modal-failure-in-open-pit-mines-using-lem-fem?utm_medium=email&utm_source=rocnews&utm_campaign=February2022).
6. [tourweek.ru/blogs/1136102](http://tourweek.ru/blogs/1136102).
7. [xn--c1aafj3aeacfk.xn--p1ai/?p=1712](http://xn--c1aafj3aeacfk.xn--p1ai/?p=1712).