

**Пример сравнения результатов 2D и 3D анализа устойчивости анизотропного откоса**

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»**  
info@geoinfo.ru

**ООО «СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ADVANCED SURVEY TECHNOLOGIES) – ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЬ КОМПАНИИ ROCSCIENCE В РОССИИ**  
info@geoast.pro

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, инженеров-геологов и геотехников. На сайте этой компании некоторое время назад появилась заметка «О сравнении результатов 2D и 3D анализа устойчивости анизотропного откоса» [4].

Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод вышеуказанной заметки [1] с привлечением дополнительных материалов [1–3, 5].

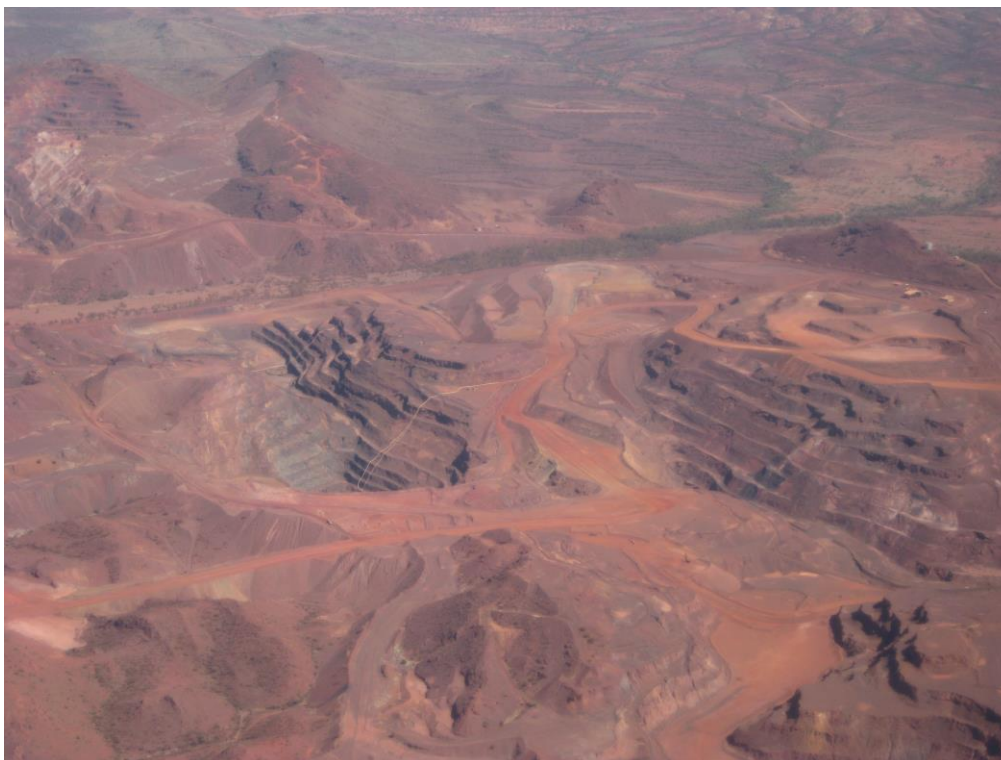
**Консультационную помощь редакции оказали сотрудники ООО «Современные Изыскательские Технологии» – официального представителя компании Rocscience в России.**

## **Введение**

Двумерный анализ методом предельного равновесия (МПР) является мощным инструментом для решения задач, связанных с однородной геометрией откосов или склонов. Трехмерное же моделирование с использованием МПР может очень хорошо подходить для случаев с более сложной геометрией, поскольку оно учитывает нормальные и горизонтальные (боковые) силы сопротивления вдоль сторон оползневой массы. И такое моделирование становится все более доступным для коммерческого применения и более удобным для пользователей, что позволяет инженерам-геологам лучше и детальнее оценивать устойчивость откосов и склонов.

## **Параметрический анализ при расчете устойчивости бортов карьера**

В этой статье обобщаются результаты параметрического исследования с использованием 2D и 3D анализа методом предельного равновесия для демонстрации изменчивости коэффициента запаса устойчивости откоса борта карьера во вмещающем массиве грунта с большим количеством слоев. В качестве примера рассматривается карьер по добыче железной руды, расположенный в горнопромышленном регионе Пилбара в Западной Австралии (рис. 1).



**Рис. 1.** Железорудные карьеры в регионе Пилбара в Западной Австралии [5]

Для расчетов коэффициента запаса устойчивости откоса  $K_y$  (FS, FOS) использовались программы Slide2 и Slide3 от компании Rocscience. Отметим, что эти программные продукты применяются соответственно для 2D и 3D анализа поведения всех типов склонов и откосов, сложенных дисперсными или скальными грунтами, а также насыпей, земляных дамб, подпорных стенок и многого другого. Они работают на основе метода предельного равновесия с использованием метода конечных элементов, вероятностного анализа, анализа фильтрации подземных вод, разновариантного моделирования, возможностей проектирования удерживающих сооружений и пр. Интеграция между этими двумя программами позволяет выполнять расширенный 2D и 3D анализ поведения откосов и склонов.

Чтобы найти силу, действующую на поверхность разрушения (то есть мобилизованное напряжение), Slide2 использует разрезы, Slide3 – определенные объемы грунтового массива, а полученные результаты сравниваются с доступным значением прочности на сдвиг для оценки коэффициента запаса устойчивости.

Чтобы найти разницу в значениях  $K_y$ , полученных путем 2D и 3D анализа на основе метода предельного равновесия применялись расчеты, для которых использовались следующие модели (их серии), параметры и методы.

1. 3D модели с использованием проекта карьера, естественного рельефа дневной поверхности и поверхностей (границ раздела) между слоями грунтов, экспортированных из геологической модели (рис. 2). Рассматриваемое месторождение железной руды находилось выше уровня грунтовых вод, поэтому поровое давление не учитывалось. В этих моделях были учтены анизотропия грунтового массива и истинный угол падения пластов.

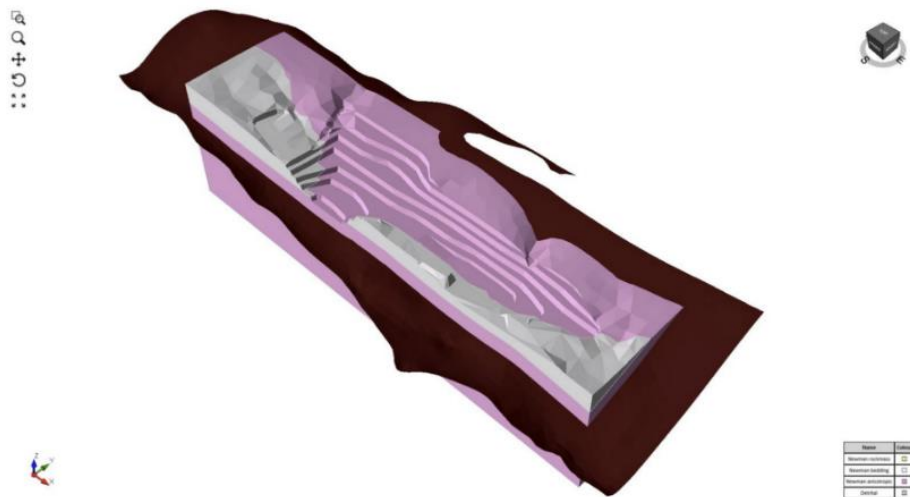
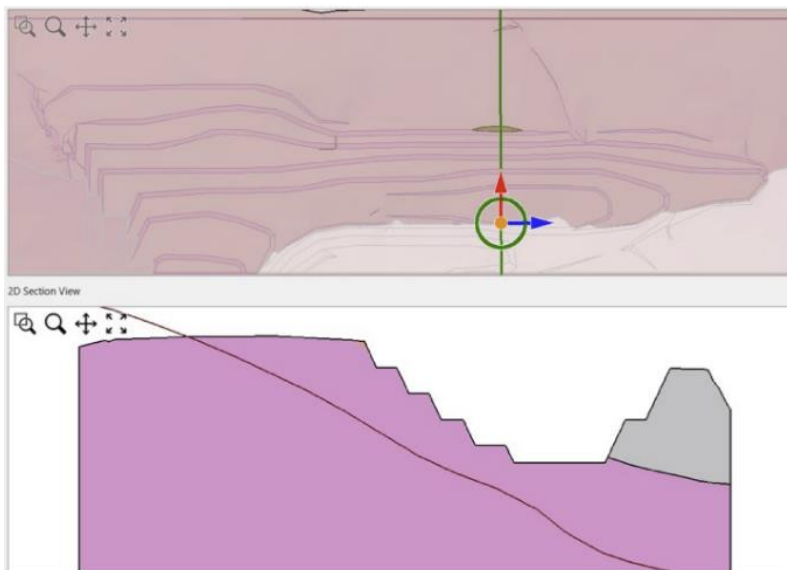


Рис. 2. Пример параметрической 3D модели рассматриваемого борта карьера

2. 2D модели с использованием 2D вертикальных разрезов, проходящих через середину критической поверхности скольжения, рассчитанной на основе 3D моделирования (рис. 3). В этих моделях был учтен кажущийся угол падения пластов.



**Рис. 3.** План рассматриваемого борта карьера, на котором зеленым цветом показана линия разреза и поперечный разрез по этой линии для анализа в программе Slide2 (разрез проходит через середину критической поверхности скольжения, рассчитанной на основе 3D моделирования)

3. 3D модели, полученные путем экструдирования 2D сечений при различной длине откосов борта карьера (50, 100, 150, 200, 400 м). Истинная анизотропия в экструдированных двумерных моделях не учитывается. Вместо этого треть измерение добавляется равномерным вытягиванием (выдавливанием, экструдированием, экструзией) 2D-сечения.

4. Методы поиска поверхности скольжения с помощью гибридного алгоритма численной оптимизации с использованием так называемого алгоритма кукушки (Cuckoo Search, CS) и метода роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) при различных параметрах поиска (то есть разных количествах поверхностей и пределов глубины).

5. Линейная (по модели Мора – Кулона) и нелинейная (нормальная к сдвигу, по моделям Хёка – Брауна и Бартон – Бандиса) прочность материалов.

### Полученные результаты

Были получены следующие результаты применения 2D и 3D методов.

Результаты полного 3D анализа (таблица 1) показали, что при использовании нелинейных критериев прочности рассчитанные значения коэффициента запаса прочности  $K_y$  были ниже по сравнению с полученными в случае применения линейных моделей. Полный трехмерный анализ также показал, что поиск с ограничением глубины обычно приводит к более высоким величинам  $K_y$  по сравнению с поиском без таких ограничений. Полученные значения коэффициента варьируют от 0,81 до 1,14.

**Таблица 1.** Результаты параметрического исследования – 3D анализа методом предельного равновесия

Модель материала	Метод поиска (алгоритм оптимизации)	Количество гнезд/частиц	Предел глубины откоса	Критическое значение коэффициента запаса устойчивости $K_y$
Нелинейная (Хёка – Брауна + Бартона – Бандиса)	кукушки	20	нет	0,90
		80		0,89
	роя частиц	20		0,90
		80		0,81
Нелинейная (Хёка – Брауна + Бартона – Бандиса)	кукушки	20	15 м	1,13
		80		1,00
	роя частиц	20		1,08
		80		1,06
Линейная (Мора – Кулона)	кукушки	20	нет	1,10
		80		1,11
	роя частиц	20		1,06
		80		1,11
Линейная (Мора – Кулона)	кукушки	20	15 м	1,12
		80		1,10
	роя частиц	20		1,14
		80		1,09

Значения коэффициента запаса прочности  $K_y$ , полученные с помощью 2D анализа (таблица 2) в целом были ниже по сравнению с результатами 3D анализа и варьировали от 0,73 до 0,88. Разница в значениях  $K_y$  также была более заметна при использовании линейных моделей. Это связано с тем, что прочность массива скального грунта по разные стороны от поверхности разрушения при 2D анализе не учитывается, но рассматривается при 3D анализе из-за трехмерной формы поверхности скольжения.

**Таблица 2. Результаты параметрического исследования – 2D анализа методом предельного равновесия**

Модель материала	Метод поиска (алгоритм оптимизации)	Предел глубины откоса	Критическое значение коэффициента запаса устойчивости $K_y$
Нелинейная (Хёка – Брауна + Бартона – Бандиса)	кукушки	нет	0,73
	роя частиц		0,84
Линейная (Мора – Кулона)	кукушки		0,84
	роя частиц		0,88
Нелинейная (Хёка – Брауна + Бартона – Бандиса)	кукушки	15 м	0,80
	роя частиц		0,80
Линейная (Мора – Кулона)	кукушки		0,85
	роя частиц		0,85

Полученные результаты показывают, что длина вытягивания (глубина выдавливания) при экструдировании двумерных разрезов также будет влиять на коэффициент запаса прочности  $K_y$ . Его величина будет больше при меньшей длине вытягивания и, соответственно, при более ограниченном уклоне (рис. 4).

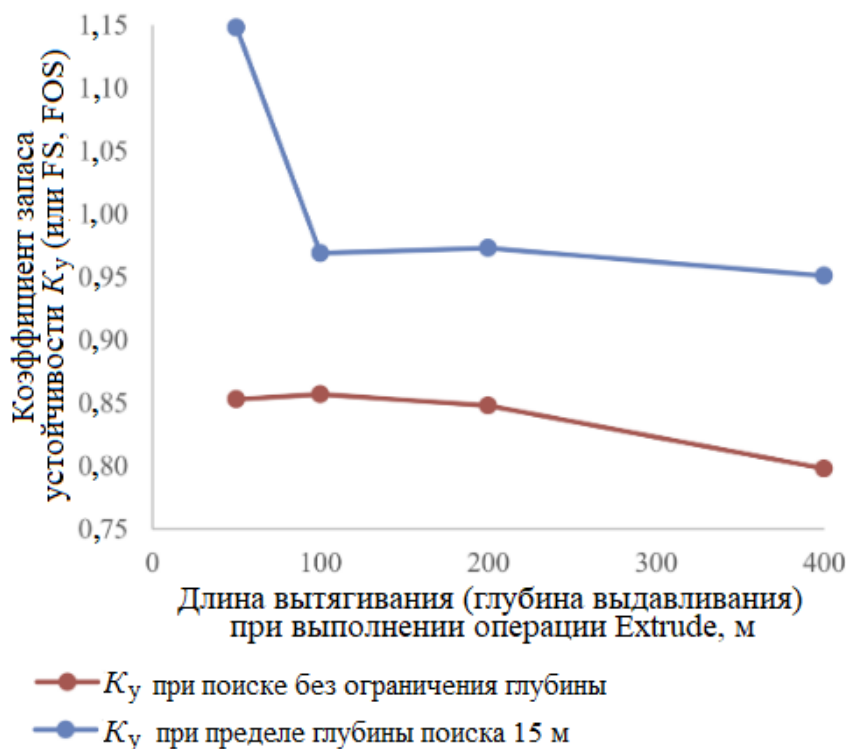


Рис. 3. Зависимости значений коэффициента запаса устойчивости  $K_y$  от длины вытягивания (глубины выдавливания) при экструдировании двумерных разрезов

## Заключение

Приведенные материалы продемонстрировали разницу между значениями коэффициента запаса устойчивости анизотропного откоса  $K_y$  (FS, FOS), полученными при 2D и 3D анализе методом предельного равновесия (МПР). Также было показано, что 3D анализ на основе МПР неизменно дает более высокие значения  $K_y$  для анизотропных массивов скальных грунтов за счет более реалистичного представления поверхности скольжения.

3D анализ методом предельного равновесия становится все более популярным для решения сложных инженерных задач. Желая убедиться в преимуществах такого 3D анализа могут запросить в компании Rocscience бесплатную двухнедельную пробную версию программы Slide3.

## Источники

1. [geoast.pro/slide2](http://geoast.pro/slide2).

2. [geoast.pro/slide3](http://geoast.pro/slide3).
3. [geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/integraciya-geotekhnicheskikh-programm-ot-kompanii-roscience-oblegchaet-proektno-izyskatelskie-raboty-46822.shtml](http://geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/integraciya-geotekhnicheskikh-programm-ot-kompanii-roscience-oblegchaet-proektno-izyskatelskie-raboty-46822.shtml).
4. On the comparison of 2D and 3D stability analyses of an anisotropic slope // Rocscience. 11.05.2022. URL: [rocscience.com/learning/on-the-comparison-of-2d-and-3d-stability-analyses-of-an-anisotropic-slope](http://rocscience.com/learning/on-the-comparison-of-2d-and-3d-stability-analyses-of-an-anisotropic-slope).
5. [ru.abcdef.wiki/wiki/Iron\\_Valley\\_mine](http://ru.abcdef.wiki/wiki/Iron_Valley_mine).