



# Digger Slope

Руководство пользователя

## Оглавление

Принятые сокращения и определения .....	3
Входные данные для расчёта .....	4
Свойства трещин.....	4
Параметры домена .....	5
Начало работы .....	6
Настройки проекта .....	7
Анализ .....	7
Матрица рисков .....	9
Входные параметры .....	9
Параметры домена .....	10
Условия.....	11
Ограничения .....	15
Берма .....	16
Вариации .....	18
Базовый расчёт.....	20
Отображение результатов.....	20
Сектора.....	21
Детали расчёта.....	23
Экспорт результатов.....	23
Контур карьера .....	24
Импорт каркаса .....	25
Экспорт каркаса .....	25
Кинематическая карта карьера.....	26
Обратный анализ.....	27
Принятые обозначения .....	29
Плоское обрушение.....	29
Плоское обрушение с трещиной отрыва .....	29
Клиновидное обрушение.....	30
Клиновидное обрушение с трещиной отрыва .....	31
Список источников .....	32

## **Принятые сокращения и определения**

ФНП №439 - Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Утверждены приказом Ростехнадзора № 439 от 13 ноября 2020 г.;

КЗУ – коэффициент запаса устойчивости;

ВО – вероятность обрушения;

ТО – трещина отрыва;

Экспозиция откоса – пара чисел (угол и азимут падения откоса), однозначно характеризующая пространственное положение откоса.

## Входные данные для расчёта

Исходные данные для базового расчёта в программе импортируются из файла в формате Excel, содержащего 2 листа:

- Joint Sets Properties — Свойства трещин;
- Domain Parameters — Параметры домена.

Структурный домен	Система трещин	Масштаб системы	Ориентация		Разброс		Прочность по трещине	
Название домена	Название системы трещин	Система трещин в масштабе борта	Угол падения, °	Азимут падения, °	Разброс по углу падения, °	Разброс по азимуту падения, °	Сцепление, τ	Угол внутреннего трения, °
DOMAIN	SET	OSS	DIP	DDIR	S_DIP	S_DDIR	COH_J	PHI_J
D_1	J1		76	200	22	44	5	22
D_1	J2		60	136	24	33	8	28
D_1	J3		30	170	30	50	7	29
D_1	BD	1	54	338	30	55	5	24
D_2	J1		74	8	30	50	6	22
D_2	J2		38	143	24	60	5	26
D_2	J3		28	230	20	80	7	27
D_2	BD	1	65	250	24	40	6	26

Рисунок 1 Исходные данные - Свойства трещин

Структурный домен	Выборка азимута падения			Геометрия откоса			Уровень ответственности			Свойства породного массива					Свойства развала	
	Наименьшее, °	Наибольшее, °	Шаг, °	Проектная высота откоса, м	Проектная ширина бермы, м	Угол наклона бермы, °	Наличие ответственных сооружений	Безлюдная технология	Тяжесть последствий	Объемный вес, т/м <sup>3</sup>	Размер блока, м	Коэффициент размягчения	Сцепление в образце, МПа	Угол внутреннего трения в образце, °	Коэффициент развала	Угол ест. откоса, °
DOMAIN	FROM	TO	STEP	BH	BW	UFA	PEC	UMT	CSF	G	BS	Ksof	COH_S	PHI_S	SF	AR
D_1	270	150	20	30	10	0	0	0	1	2.70	0.40	0.67	15.7	34	1.5	38
D_2	150	270	10	30	10	0	0	0	1	2.80	0.35	0.85	14.1	37	1.5	38

Рисунок 2 Исходные данные - Параметры домена

Важно соблюдать названия листов и последовательность столбцов, а также не допускать пустых ячеек (кроме столбца масштаба системы трещин OSS), строк и столбцов (при нажатии комбинации клавиш Ctrl+End должна выделиться заполненная правая нижняя ячейка таблицы).

### Свойства трещин

На этом листе задаются следующие величины:

- Структурный домен;
- Системы трещин в домене:
  - Название системы;
  - Масштаб системы (1 – распространяется на весь борт, «» - нет);
- Ориентация трещин системы (средние значения):
  - Угол падения, °;
  - Азимут падения, °;

- Ширина интервала разброса трещин системы:
  - По углу падения, °;
  - По азимуту падения, °;
- Сдвиговая прочность по трещинам:
  - Сцепление, т/м<sup>2</sup>;
  - Угол внутреннего трения, °.

### **Параметры домена**

На этом листе задаются следующие величины:

- Структурный домен;
- Расчётная сетка азимута падения откосов в домене:
  - Наименьший азимут в домене, °;
  - Наибольший азимут в домене, °;
  - Шаг, с которым будет выбираться азимут для расчёта, °;
- Геометрия откосов:
  - Проектная высота откоса, м;
  - Проектная ширина бермы, м;
  - Угол наклона бермы, °;
- Степень ответственности домена (для формирования критерия приемлемости и уровней риска в соответствии с ФНП №439 [1]):
  - Наличие ответственных сооружений (1 – да, 0 - нет),
  - Безлюдная технология отработки (1 – да, 0 - нет),
  - Тяжесть последствий обрушения (от 1 до 5);
- Свойства массива:
  - Объемный вес, т/м<sup>3</sup>;
  - Размер блока, м;
  - Коэффициент размягчения;
  - Сцепление в образце, МПа;
  - Угол внутреннего трения в образце, °;
- Характеристики развала породы после обрушения:
  - Коэффициент развала;
  - Угол естественного откоса, °.

## Начало работы

Для начала работы в программе необходимо загрузить исходные данные для расчёта из меню Файл → Импорт входных данных.

При выполнении этого действия данные отобразятся в главном окне на вкладке «Базовый расчёт» в таблице исходных данных и на стереограмме. В таблице можно редактировать параметры системы трещин.

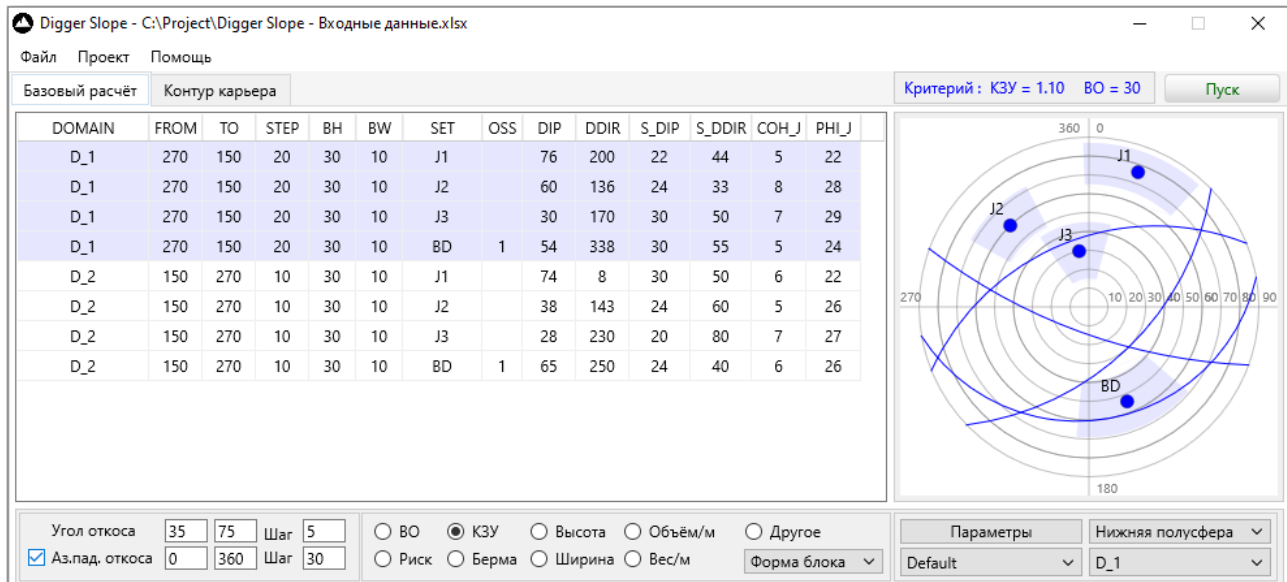


Рисунок 3 Главное окно – исходные данные

Ниже области отображения исходных данных располагается панель управления.

В левом блоке панели задаётся интервал значений угла откоса и шаг расчёта.

Интервал и шаг для значений азимута падения откоса при расчёте берётся из таблицы исходных данных, но также есть возможность провести расчёт на альтернативной сетке азимутов для всех доменов, установив галочку «Аз.пад. откоса» и задав в соответствующих полях ввода свои значения начального и конечного азимута и шаг расчётной сетки.

Величины углов и азимутов падения и шаг сетки задаются с точностью до 1°.

В правом блоке панели производятся настройки отображения – выбор домена, полусферы на стереограмме и легенды для тепловых карт результатов. Здесь же располагается кнопка вызова окна [Входные параметры](#).

В центральном блоке располагается панель выбора расчётных величин для их отображения в [таблице результатов](#).

Выборанный критерий приемлемости отображается над стереограммой трещиноватости.

Запуск расчёта производится нажатием на кнопку «Пуск».

## Настройки проекта

Настройки проекта находятся в меню Проект → Настройки проекта.

### Анализ

На вкладке «Анализ» осуществляется выбор стадии проектирования, типа анализа, масштаб откоса, вид обрушения и дополнительной выходной информации.

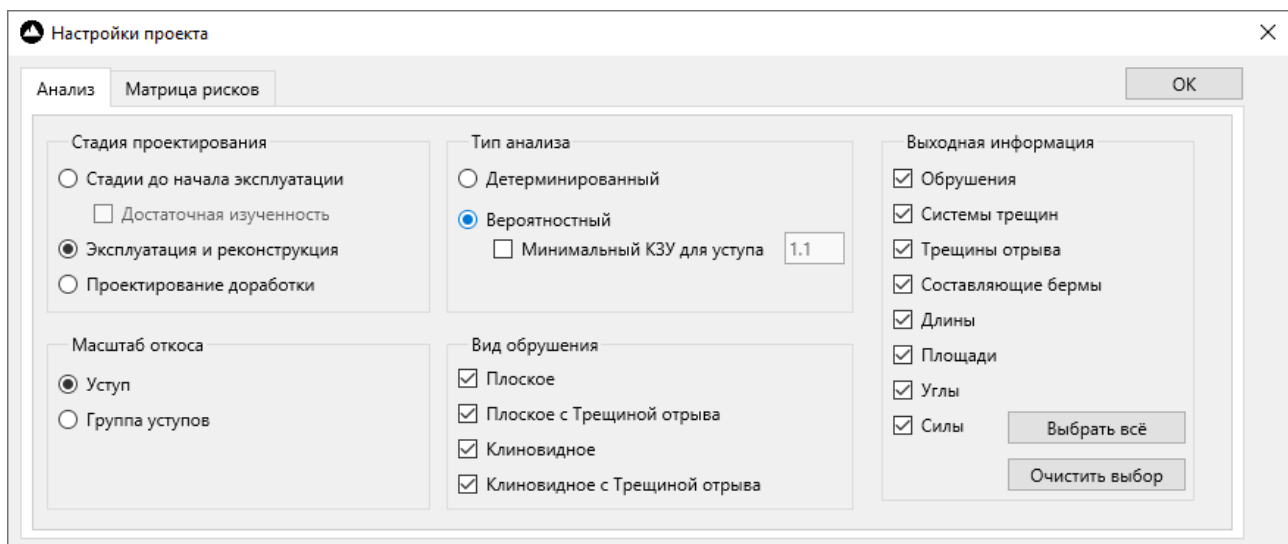


Рисунок 4 Настройки анализа

В зависимости от выбора стадии проектирования и масштаба расчётного откоса автоматически формируется критерий приемлемости согласно ФНП №439 [1].

Стадия проектирования:

- Проектирование до начала эксплуатации (возможен учёт условий достаточной геомеханической изученности месторождения по данным бурения скважин);
- Эксплуатация и техническое перевооружение рудника;
- Доработка карьера с проведением обязательного инструментального мониторинга в режиме реального времени с покрытием рабочей зоны (не более 3 лет отработки).

Масштаб откоса:

- Уступ;
- Группа уступов (участок борта между съездами).

Тип анализа:

- Детерминированный;
- Вероятностный.

При детерминированном подходе критерием устойчивости является коэффициент запаса устойчивости, который должен быть не меньше нормативного. При вероятностном подходе критерием устойчивости является коэффициент запаса устойчивости и допустимая вероятность развития деформаций, которые определяются проектной документацией с учётом размещения элементов инфраструктуры объекта пользования недрами (ведения горных работ).

ФНП №439 [1] не регламентирует выбор коэффициента запаса устойчивости при вероятностном подходе для масштаба уступа. В настройках проекта есть возможность задания нормативного КЗУ для этого вида анализа.

Вид обрушения:

- Плоское;
- Плоское с трещиной отрыва;
- Клиновидное;
- Клиновидное с трещиной отрыва.

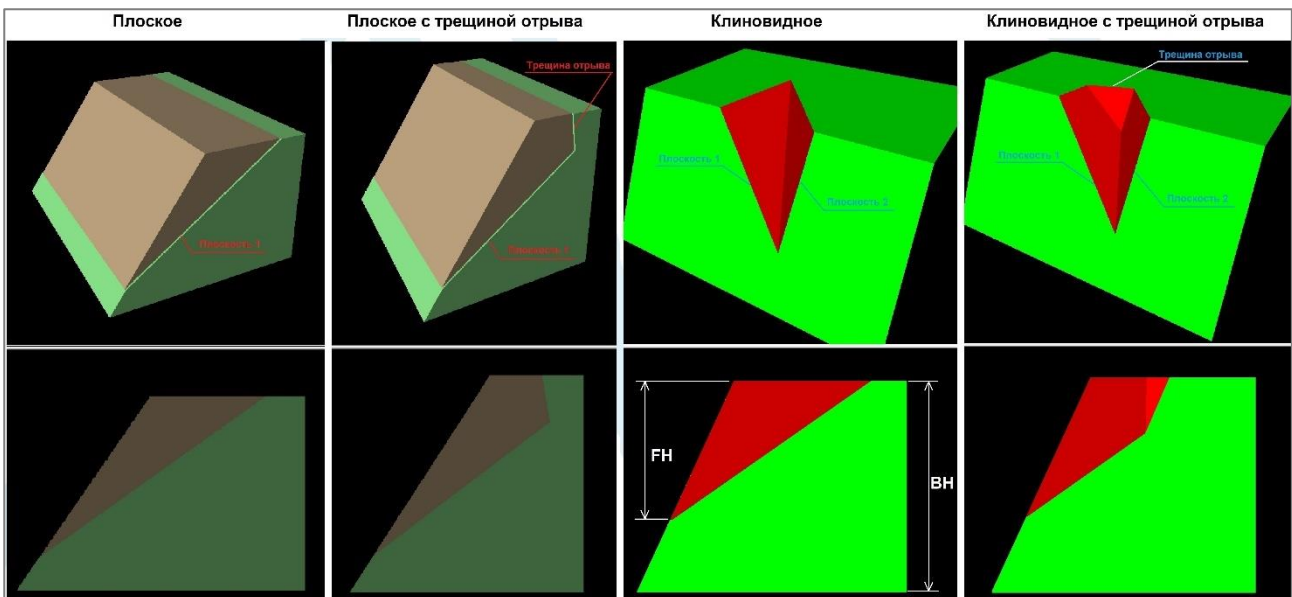


Рисунок 5 Виды обрушения

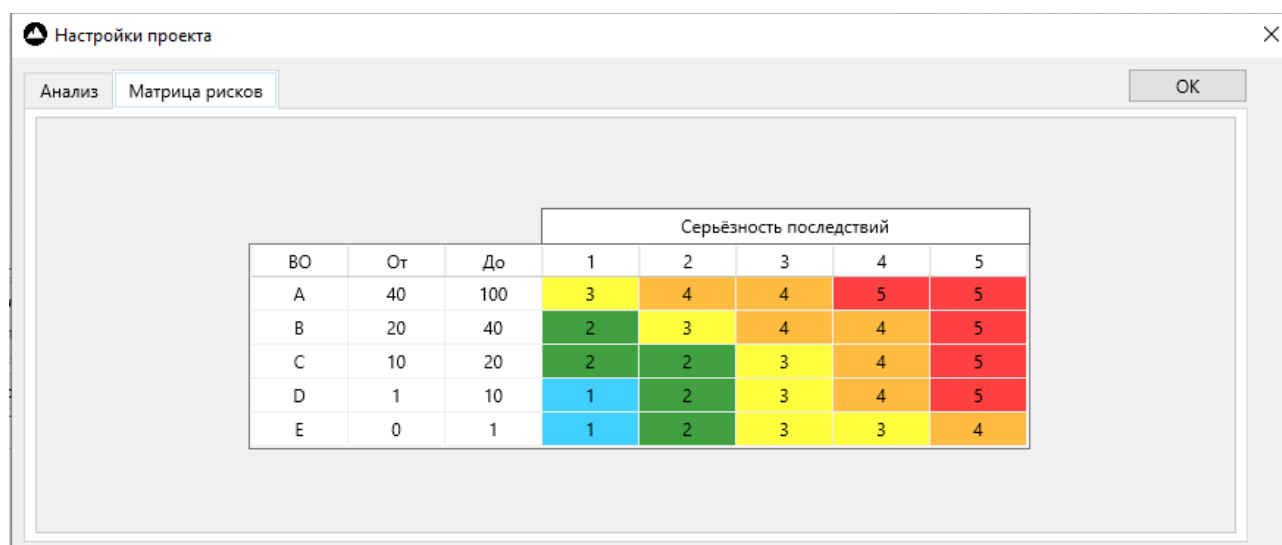


Выбор расчётных величин для отображения:

- Количество и режим обрушений;
- Системы трещин, образующие обрушение;
- Параметры трещин отрыва;
- Расчётные составляющие ширины бермы;
- Линейные размеры обрушения;
- Площади, образованные обрушением;
- Углы пересечения плоскостей, образующих обрушение;
- Действующие нагрузки.

### Матрица рисков

На вкладке «Матрица рисков» задаётся специфичная для проекта матрица определения уровня риска по совокупности вероятности обрушений и тяжести последствий.



VO	От	До	Серьёзность последствий				
			1	2	3	4	5
A	40	100	3	4	4	5	5
B	20	40	2	3	4	4	5
C	10	20	2	2	3	4	5
D	1	10	1	2	3	4	5
E	0	1	1	2	3	3	4

Рисунок 6 Матрица рисков

### Входные параметры

Окно настройки входных параметров для расчёта отображается при нажатии на кнопку «Параметры» на панели управления вкладки «Базовый расчёт» главного окна программы.

Все настройки, которые могут быть приняты в соответствии с ФНП №439 [1], подписаны соответствующим образом.

## Параметры домена

На вкладке «Параметры домена» отображаются загруженные входные данные и критерий приемлемости для каждого домена.

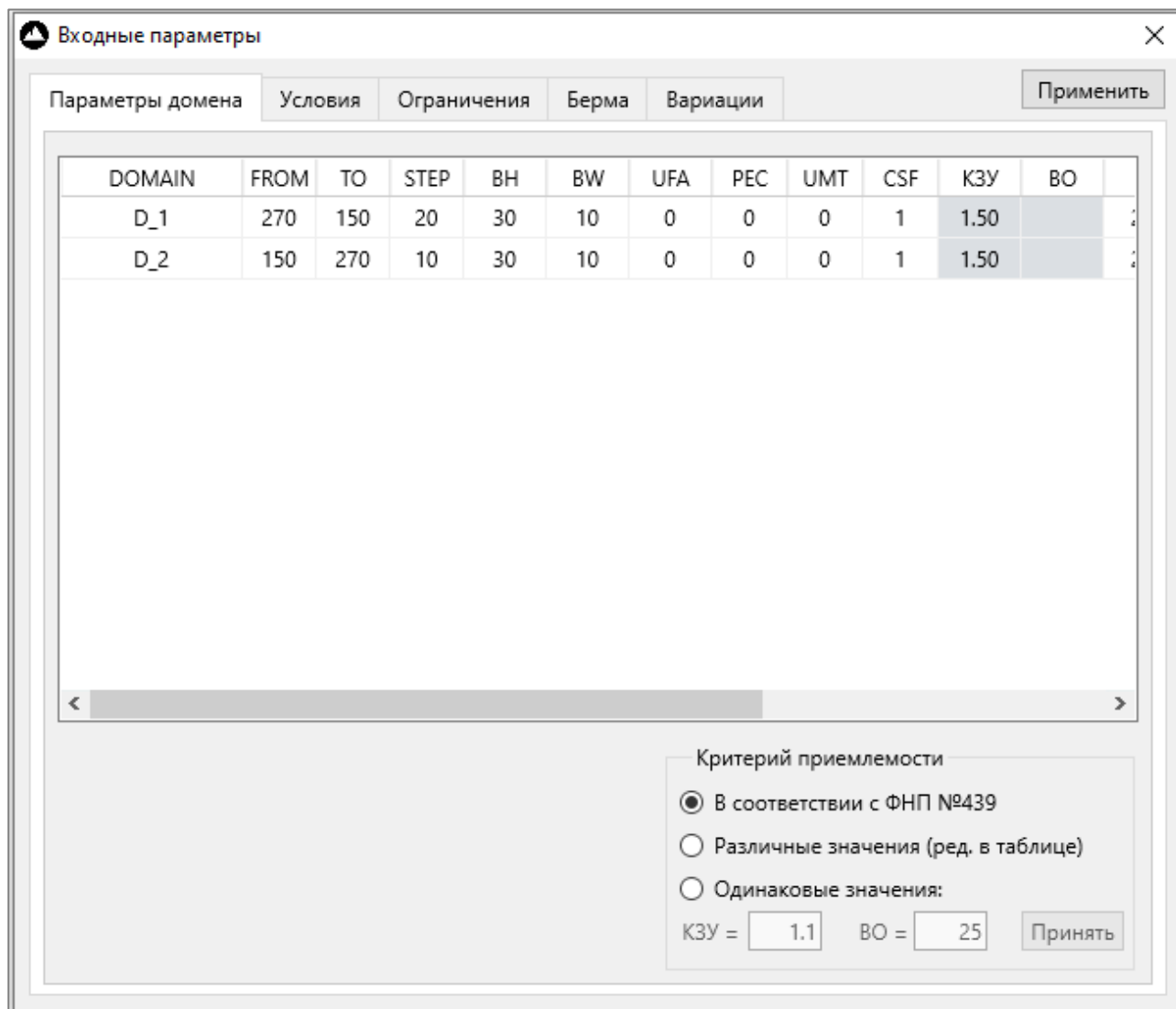


Рисунок 7 Параметры домена

На вкладке имеется 3 режима задания критерия приемлемости:

- *В соответствии с ФНП №439* – автоматический выбор критерия с учётом входных данных согласно указаниям Приложения 5 к ФНП №439 [1].
- *Различные значения* – позволяет редактировать критерий прямо в таблице доменов;
- *Одинаковые значения* – назначает для всех доменов единый критерий, указанный в полях ввода «КЗУ = » и «ВО = » при нажатии кнопки «Принять».

Последние два режима позволяют задать альтернативные критерии приемлемости, например, из международной практики, представленной в Руководстве по проектированию бортов карьера [2].

## Условия

На вкладке «Условия» задаются критерии образования кинематически подвижных блоков, параметры трещины отрыва, обводнённости откоса, сейсмические и внешние нагрузки.

**Входные параметры**

Параметры домена | **Условия** | Ограничения | Берма | Вариации | Применить

Боковые пределы для плоского обрушения, °

Только для трещин круче угла внутреннего трения

**Трещина отрыва**

Ориентация

Автопоиск трещины с минимальным КЗУ

Если ни одна система не подходит для ТО использовать ориентацию по умолчанию:

Угол падения, °

Азимут падения, °  Относительно

Фиксированная:

Угол падения, °

Азимут падения, °  Относительно

Положение

Автопоиск по минимизации КЗУ

Фиксированная дистанция от бровки, м

Ортогонально откосу, м

Вдоль 1й системы на берме, м

Обводнённость

Уд. вес, т/м<sup>3</sup>  Заполнение, %

Модель  ▼

на сист.1  на сист.2  на ТО

Сейсмика  Без учёта нагрузки

Балльность по шкале MSK-64  ▼

Коэффициент сейсмичности

Направление

▼

Угол, °

Тренд, °  Относительно

Внешние нагрузки

№	Сила, т	Абс. Угол	Отн. Тренд
1	10	90	0
2	20	60	0

Рисунок 8 Условия

Критерии образования кинематических блоков:

- *Боковые пределы для плоского обрушения* – допустимая разница между азимутами падения откоса и плоскости трещины для применения расчётной схемы плоского обрушения;
- *Только для трещин круче угла внутреннего трения* – условие оставляет для анализа только кинематические блоки, для которых угол падения трещины (для плоского обрушения) и угол линии пересечения плоскостей трещин (для клиновидного обрушения) больше угла внутреннего трения по этим трещинам.

Параметры трещин отрыва:

- Ориентация
  - Автопоиск системы трещин с минимальным КЗУ – при выборе этой опции все трещины в домене, незадействованные в формировании кинематического блока, будут рассматриваться как потенциальные трещины отрыва и из них будет выбрана та, которая предоставляет блоку наименьший запас устойчивости;
    - Если ни одна система не подходит для трещины отрыва использовать ориентацию по умолчанию – при выборе этой опции трещина отрыва для блока после процедуры автопоиска будет реализована по плоскости, заданной в полях ввода угла и азимута падения (при выборе опции «относительно» азимут падения плоскости будет отсчитываться от азимута падения откоса);
  - Фиксированная – при выборе этой опции трещина отрыва для блока будет реализована только по плоскости, заданной в полях ввода угла и азимута падения (при выборе опции «относительно» азимут падения плоскости будет отсчитываться от азимута падения откоса);
- Положение
  - Автопоиск по минимизации КЗУ – при выборе этой опции методом оптимизации будет автоматически определено расстояние от бровки откоса до трещины отрыва, которое предоставляет блоку наименьший запас устойчивости;
  - Фиксированная дистанция от бровки – указывается конкретное расстояние от бровки откоса до трещины отрыва в заданном направлении:
    - Ортогонально откосу – максимальное расстояние в направлении, перпендикулярном простиранию откоса (здесь наряду с числами возможно употребление буквенного обозначения проектной ширины бермы «BW»);
    - Вдоль 1й системы на берме – в случае клиновидного блока из двух образующих его трещин указывается расстояние вдоль первой системы в плоскости бермы.

Параметры обводнённости откоса:

- Удельный вес жидкости – по умолчанию 0,981 т/м<sup>3</sup>
- Процент заполнения водой трещин, образующих блок;
- Модель обводнённости:
  - *Заполненные трещины* – способ распределения давления воды на трещинах, при котором в случае отсутствия трещины отрыва давление распределяется линейно от нулевого значения на верхней и нижней бровках откоса до максимума на середине высоты откоса (рис. 8.а), а в случае блока с трещиной отрыва – до максимума на высоте пересечения трещины отрыва и трещин, образующих кинематический блок (рис. 8.б);
  - *Пиковое давление на нижней бровке* – модель линейного увеличения давления от нулевого значения на верхней бровке откоса до максимума на нижней бровке (рис. 8.в);
  - *Определённое давление* – задаются значения давления воды на плоскостях кинематического блока:
    - на сист.1 – на первой системе трещин, образующих блок;
    - на сист.2 – на второй системе трещин, образующих блок;
    - на ТО – на трещине отрыва.

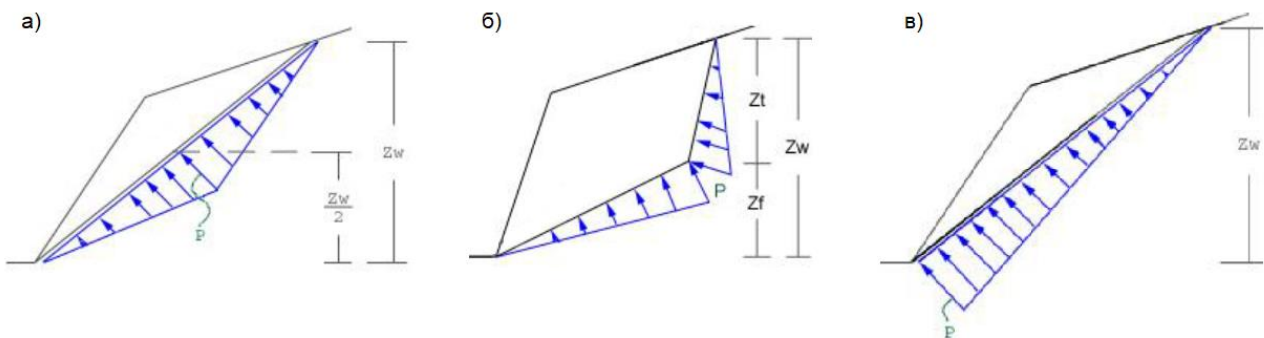


Рисунок 9 • Модели обводнённости

(здесь:  $P$  – максимальное давление воды,  $Z_w$  – высота откоса,  $Z_f$  – высота пересечения трещины отрыва и трещин, образующих кинематический блок,  $Z_t$  – глубина трещины отрыва)

Учёт сейсмической активности района в соответствии с ФНП №439 производится обоими способами:

1. С учётом сейсмической нагрузки. В этом случае КЗУ выбирается из специальной таблицы критериев приемлемости ФНП №439. Коэффициент сейсмичности может быть определён как в зависимости от балльности землетрясений по шкале MSK-64 в соответствии с ФНП №439, так и задан конкретным значением в поле ввода. Направление действия сейсмической нагрузки может быть выбрано из выпадающего списка:
  - Вдоль направления скольжения;
  - Горизонтально и по тренду скольжения (по азимуту падения плоскости скольжения блока или по азимуту линии пересечения, если скольжение происходит по двум плоскостям) – в соответствии с ФНП №439;
  - Горизонтально и ортогонально откосу (по азимуту падения плоскости откоса)
  - Определено пользователем – задаётся в полях ввода угла от горизонтали (положительный - вниз) и азимута падения (при выборе опции «относительно» азимут падения плоскости будет отсчитываться от азимута падения откоса);
2. Без учёта сейсмической нагрузки. В этом случае КЗУ выбирается из общей таблицы критериев приемлемости ФНП №439 и выбранное значение дополнительно увеличивается на соответствующий коэффициент.

Внешние нагрузки, моделирующие пригрузку бермы или крепление откоса задаются магнитудой и направлением силы в табличной форме. При этом, угол отсчитывается от горизонтали (положительный - вниз); нулевой азимут означает направление действия силы в массив.

## Ограничения

На вкладке «Ограничения» задаются условия масштабирования и фильтрации кинематических блоков (раздельно для плоских и клиновидных форм), а также выбираются режимы обрушений (срабатывания блоков).

**Входные параметры**

Параметры домена | Условия | **Ограничения** | Берма | Вариации | Применить

**Плоское обрушение**

По умолчанию | Очистить

Параметр	Мин.	Макс.
Высота	1	
Ширина	1	BW
Длина трещин		40
Объем/м		
Вес/м		
КЗУ		

**Клиновидное обрушение**

По умолчанию | Очистить

Параметр	Мин.	Макс.
Высота	1	
Ширина	1	BW
Длина трещин		40
Простираение		90
Объем		
Вес		
КЗУ		

**Режим обрушения**

Выталкивание (0)

Скольжение по одной плоскости (1 или 2)

Скольжение по обеим плоскостям (12)

Рисунок 10 Ограничения

Если тот или иной размер блока превышает указанную максимальную величину, то блок будет отмасштабирован с уменьшением размера до указанной величины.

Если тот или иной размер блока меньше указанной минимальной величины, то такой блок будет исключён из анализа. При ограничении КЗУ исключаются все блоки вне заданного диапазона.

Для ограничения максимальной ширины блока наряду с числами возможно употребление буквенного обозначения проектной ширины бермы «BW».

При нажатии на кнопку «По умолчанию», поверх существующих вводятся ограничения представленные на рисунке 10.

При нажатии на кнопку «Очистить» все ограничения снимаются.

## Берма

На вкладке «Берма» задаются параметры для расчёта ширины предохранительной бермы при детерминированном и вероятностном подходе.

**Входные параметры**

Параметры домена | Условия | Ограничения | **Берма** | Вариации | Применить

Ширина бермы для улавливания падающих камней (Bfall)

Поверхность уступа:

Поверхность откоса:

Поверхность бермы:

Свои значения:

Козф. восстановления	Скорости	Трения
Откос	0.40	0.10
Берма	0.22	0.20

Ширина осыпи (Btalus)

Рабочее время, лет:

Дополнительная ширина

Оборудования (Beq), м:

Эффективная (Beff), м:

Ширина призмы обрушения (Bsw)

Bsw = Ширина блока

Регулировка ширины развала породы (Bspill)

Обрезка объёмов обрушения

Расчитывать развал только обрушений с КЗУ <

Самых меньших, %:   Уменьшить вычисленный радиус развала

Самых больших, %:  на  %

Ширина бермы

Детерминированный подход =  Btalus +  Bfall +  Beq

Вероятностный подход =  Bsw +  Bspill +  Beff

Рисунок 11 Берма

Расчёт бермы производится по формулам, представленным в Методических рекомендациях к ФНП №439 [1].

### Детерминированный подход

Ширина предохранительной бермы при детерминированном подходе определяется исходя из следующего условия:

$$BW = \max \left\{ \begin{array}{l} B_{pro} \\ B_{talus} + B_{fall} \\ B_{talus} + B_{eq} \end{array} \right\}$$

где:  $B_{pro}$  – проектная ширина бермы,  $B_{talus}$  – ширина осыпи;  $B_{fall}$  – ширина бермы для задерживания падающих камней;  $B_{eq}$  – минимальная ширина рабочей части бермы, достаточная для безопасного размещения и работы оборудования по очистке берм от осыпей.



Здесь имеется возможность учёта степени нарушенности поверхности уступа согласно рекомендациям методических указаний [3].

А также выбора коэффициентов восстановления отдельно для поверхностей откоса и бермы согласно рекомендациям работы [4].

Есть возможность задания коэффициентов восстановления вручную (например, из других источников или по результатам собственных испытаний) для каждого домена отдельно, установив галочку «Свои значения».

Чтобы эти значения коэффициентов применить к определённому домену нужно выбрать его из выпадающего списка и нажать на кнопку «Для домена». Чтобы применить значения ко всем доменам нужно выбрать из выпадающего списка «All» и нажать на кнопку «Для домена».

### **Вероятностный подход**

При вероятностном подходе ширина предохранительной бермы определяется по формуле:

$$BW = \max \left\{ \begin{array}{l} B_{pro} \\ B_{sw} + B_{spill} + B_{eff} \end{array} \right\}$$

где:  $B_{sw}$  – ширина призмы возможного обрушения (в данном случае ширина сработки бермы за счет влияния трещиноватости;  $B_{spill}$  – ширина развала после деформации с вышележащего уступа;  $B_{eff}$  – эффективная ширина бермы (оставшаяся часть бермы после осыпи и развала вышележащего уступа).

Здесь имеется возможность регулировки ширины развала породы после обрушения согласно результатам исследований [5, 6] двумя способами:

- *Обрезка объёмов обрушения* – позволяет исключить из выборки ураганные значения объёмов (выбивающиеся из общей закономерности очень маленькие и очень большие значения) для более достоверного определения среднего значения объёма блока при статистической обработке результатов вероятностных расчётов [5];
- *Уменьшить вычисленный радиус развала* – позволяет адаптировать аналитическую формулу вычисления ширины развала породы на берме к практическим результатам [6]. Эта опция даёт возможность калибровки вычисления ширины бермы по фактическим данным обрушений откосов.

Поля ввода данных сгруппированы по тем расчётным составляющим ширины бермы, в которых участвуют.

## Вариации

На вкладке «Вариации» задаются характеристики случайных величин для проведения вероятностных расчётов.

Входные параметры

Параметры домена | Условия | Ограничения | Берма | **Вариации** | Применить

Случайные числа

Объём выборки:

Граничный КЗУ:

Псевдослучайная выборка  Зерно

Общие значения

Величина	Распределение	Ст. отклонение	Отн. Минимум	Отн. Максимум
Угол падения	Равномерное			
Азимут падения	Нормальное			
Сцепление	Логнормальное	0.7	2	2
Угол вн. трения	Экспоненциальное	1	3	3

Правило 3-х сигм для Угла падения  
 Граничные значения Угла падения по разбросу систем трещин  
 Правило 3-х сигм для Азимута падения  
 Граничные значения Азимута падения по разбросу систем трещин

Рисунок 12 Вариации

Объём выборки – общее количество расчётов для вероятностного анализа.

Вероятность обрушения блока вычисляется как отношение числа блоков с КЗУ меньше заданного граничного значения (по умолчанию задано 1) к общему объёму выборки.

Использование псевдослучайной выборки позволяет зафиксировать определённую случайную выборку всех входящих величин для последующих вероятностных расчётов так, что их результаты не будут меняться раз от раза.

Использование опции «Зерно», при его изменении в поле ввода позволяет получать разные псевдослучайные выборки.

Для генерации случайных величин ориентации и сдвиговой прочности трещин доступны следующие законы распределения:

- Равномерный;
- Нормальный;
- Логнормальный;
- Экспоненциальный.

Опция «Правило 3-х сигм ...» позволяет по заданным в исходных данных диапазонам изменения угла и азимута падения трещин в системе определить стандартное отклонение, необходимое для использования того или иного закона распределения.

Опция «Граничные значения ...» позволяет по тем же диапазонам определить относительные минимальные и максимальные значения угла и азимута падения трещин в системе при их вариации по заданному закону распределения.

## Базовый расчёт

### Отображение результатов

Результаты расчёта отображаются в виде таблиц и стереограмм в нижней части главного окна программы на вкладке «Базовый расчёт».

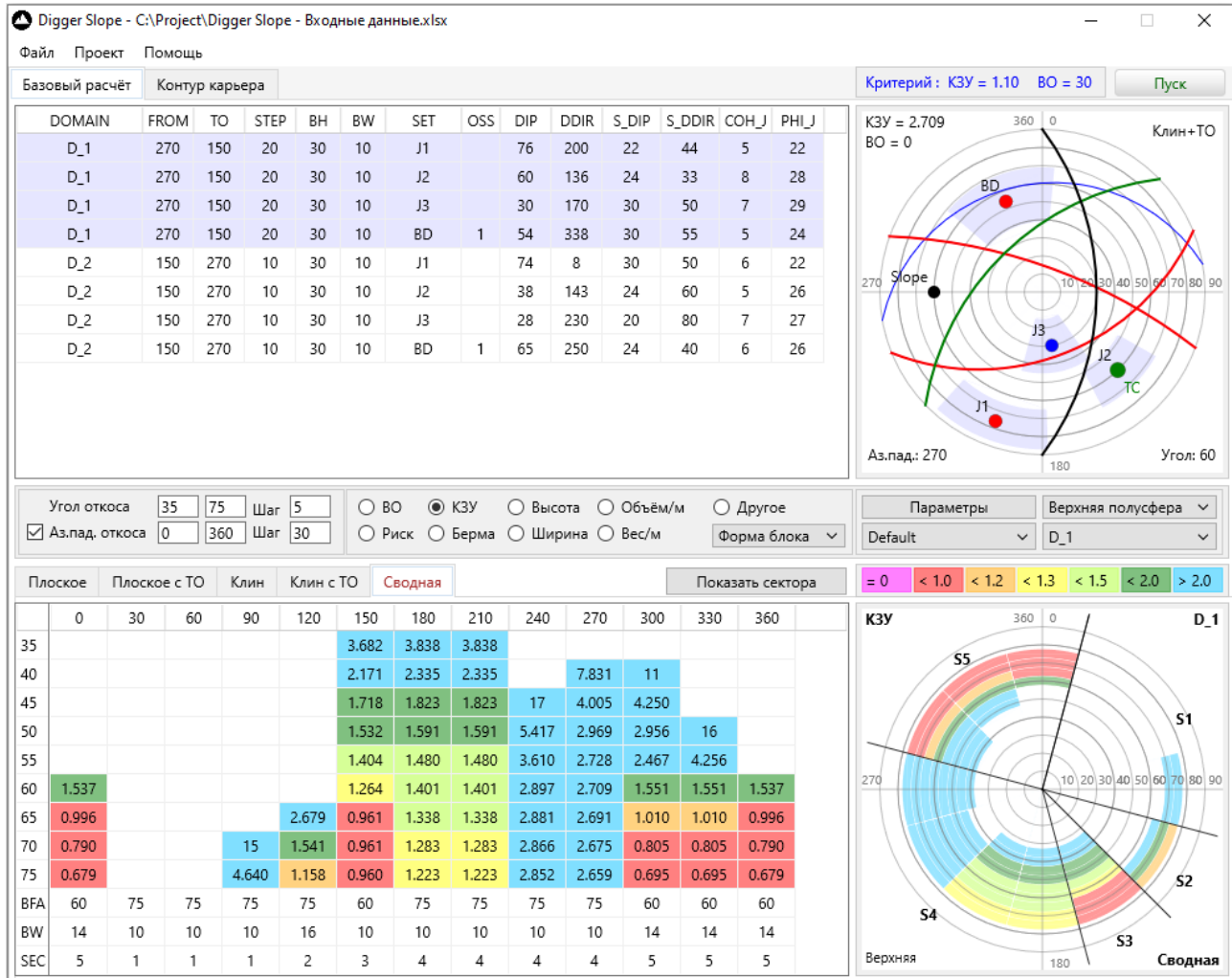


Рисунок 13 Результаты расчёта

Таблица результатов представляет собой сетку расчётных экспозиций откоса: по горизонтали представлены расчётные азимуты падения откоса, по вертикали – расчётные углы падения. Например, на рисунке выше, в ячейке на пересечении строки «65» и столбца «330» представлены результаты расчёта для откоса с углом падения 65° и азимутом падения 330°.

При нажатии на ячейку таблицы результатов на стереограмме трещиноватости подсвечиваются системы, образующие кинематический блок и отображаются расчётные величины коэффициента запаса устойчивости и вероятности обрушения. Также указывается экспозиция выбранного откоса (угол и азимут падения) и вид обрушения, контролирующей устойчивостью на выбранной экспозиции откоса.

При двойном щелчке на ячейке таблицы результатов открывается [окно «Детали расчёта»](#) на котором отображаются подробные сведения о произведённых

расчётах в выбранной экспозиции откоса.

В центральном блоке панели управления располагается панель выбора величины для отображения её расчётных значений в таблице и на стереограмме.

При выборе «Другое» отображение дополнительных величин доступно в выпадающем списке.

Для каждого вида обрушения результаты отображаются на вкладке с соответствующим названием. На вкладке «Сводная» отображаются результаты для блоков с наименьшей устойчивостью из всех видов обрушения. Таким образом, при выборе на панели управления «Другое» и «Форма блока» можно увидеть какой вид обрушения наименее устойчив на каждой рассчитанной экспозиции откоса.

После выполнения базового расчёта программа автоматически выдаёт рекомендованную конфигурацию уступов для каждого расчётного азимута откоса. И объединяет соседние азимуты с одинаковой конфигурацией уступов в [сектора](#).

Эти результаты представлены в сводной таблице в виде дополнительных столбцов:

- BFA – рекомендованный угол уступа;
- BW – рекомендованная ширина бермы;
- SEC – Сектор.

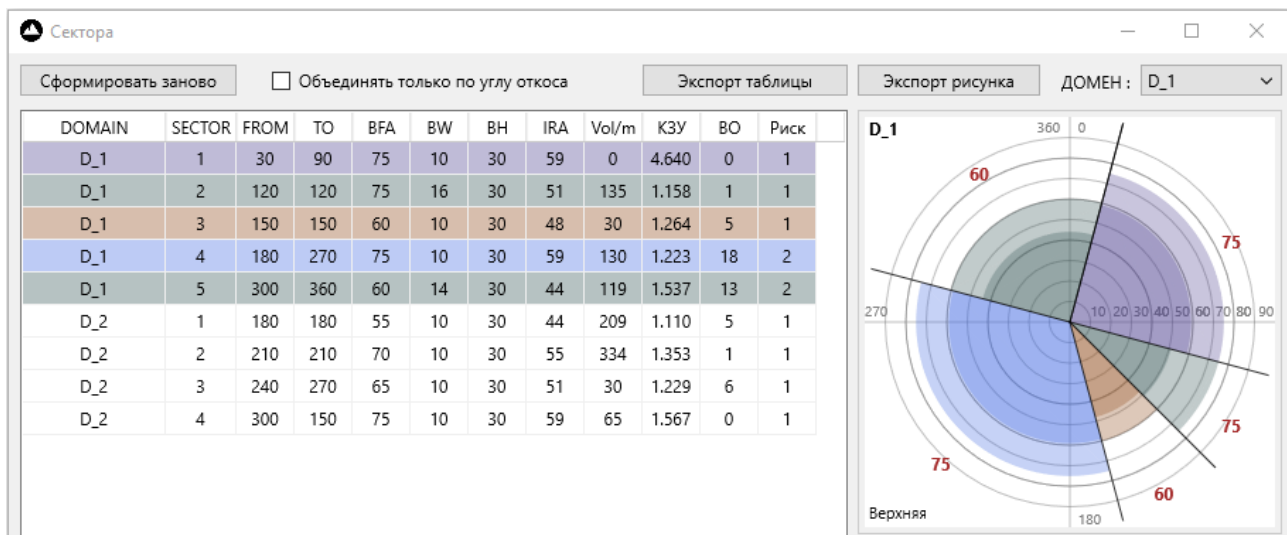
На стереограмме отображаются линии границ секторов с их нумерацией.

Отдельное окно для развёрнутого отображения секторов открывается нажатием кнопки «Сектора».

### Сектора

После выполнения базового расчёта программа автоматически формирует сектора, объединяя соседние азимуты откосов, если на них рекомендованная конфигурация уступов одинаковая.

При нажатии на кнопку «Показать сектора» открывается окно «Сектора», на котором отображаются сектора карьера для каждого домена.



Сектора карьера отображаются для каждого домена в виде таблицы и стереограммы с возможностью экспорта в формат Excel и PNG соответственно.

На стереограмме отображаются углы откосов уступа и подписи их значений в секторе. Углы откосов группы уступов отображаются более плотным цветом.

Для компактности отображения таблицы приняты следующие обозначения:

Domain	Домен
Sector	Сектор
From	Начальный азимут падения откоса, град.
To	Конечный азимут падения откоса, град.
BFA	Угол откоса, град.
BW	Ширина бермы, м
BH	Высота откоса, м
IRA	Угол откоса группы уступов (участка борта между съездами), град.
Vol/m	Прогнозный объём обрушения, м <sup>3</sup> /м
FoS	Коэффициент запаса устойчивости
PoF	Вероятность обрушения
Risk	Уровень риска

Здесь имеется возможность редактирования секторов задавая свои значения угла откоса (столбец BFA) и ширины бермы (столбец BW). При этом, если введённое значение угла откоса не совпадает ни с одним значением из расчётной сетки углов, оно округляется до ближайшего из сетки. Значение ширины бермы принимается только если оно больше либо равно рекомендованного значения для данного угла откоса.

По умолчанию сектора объединяются по двойному условию равенства рекомендованных углов откоса и берм. Выбор опции «Объединять только по углу откоса» позволяет использовать только одно условие объединения секторов – по равенству углов откоса, тогда ширина бермы для всего сектора будет назначена как максимальная из рекомендованных берм для всех азимутов в секторе.

При смене условия объединения секторов для получения результата необходимо нажать на кнопку «Сформировать заново».

## Детали расчёта

При двойном щелчке на ячейке таблицы результатов открывается окно «Детали расчёта» на котором отображаются подробные сведения о произведённых расчётах в выбранной экспозиции откоса.

Домен	Аз. пад.	Угол откоса	N трещин	N пар	N блоков	Мин. КЗУ	ВО
D1	120	70	5	10	4	0.904	83
Блок	1	2	3	4			
Домен	0	0	0	0			
Система 1	JT1	JT1	JT3	JT4			
Система 2	JT4	JT5	JT5	JT5			
Трещ. отрыва	JT5	JT4	JT2	JT2			
КЗУ	0.904	2.348	1.589	1.828			
ВО	83	0	0	0			
Высота	15	15	15	15			
Ширина	0.01...	7.95...	7.08...	7.57...			
Объём	0.24...	463...	396...	458...			
Вес	0.66...	125...	107...	124...			
Sliding Mode	2	12	2	12			
Trend	50.5...	66.3...	134...	82.0...			
Plunge	42.3...	32.9...	48.3...	41.3...			
Btalus	1.29...	1.29...	1.29...	1.29...			
Bfall	3.99...	3.99...	3.99...	3.99...			
Berm Det.	5.79...	5.79...	5.79...	5.79...			
N all	56	45	190	138			
N volume	54	0	0	0			
Mean Volume	0.16...	0	0	0			
Bspill	0.75...	0	0	0			
Berm Prob.	2.76...	9.95...	9.08...	9.57...			
Lint	21.4...	0.28...	14.8...	18.2...			
Lw	0.32...	232...	214...	232...			

Рисунок 14 Детали расчёта (Клин+ТО)

Для каждого вида обрушения отображается свой набор выходных параметров (см. раздел [Принятые обозначения](#)).

## Экспорт результатов

Таблицы результатов могут быть экспортированы в формат Excel из меню Файл → Экспорт результатов. При этом, будут выгружены данные расчётных значений величины, которая в данный момент выбрана для отображения на панели управления.

Стереограмму результатов можно выгрузить в файл формата PNG двойным щелчком мышки по стереограмме.

## Контур карьера

Программа позволяет импортировать каркас карьера в формате текстового файла с разделителями (расширения .csv, .txt) или таблицы Excel и произвести расчёт непосредственно на геометрии откосов, заданных элементами триангуляции.

После импорта файла каркаса в таблице появится информация о количестве доменов карьера, числе треугольников и диапазонах изменения угла и азимута откосов карьера.

Запуск расчёта производится нажатием на кнопку «Пуск». Стоит отметить, что перед расчётом каркаса карьера необходимо выполнить базовый расчёт с полным охватом по азимуту, т.е. с расчётной сеткой по азимуту падения откоса от 0° до 360°.

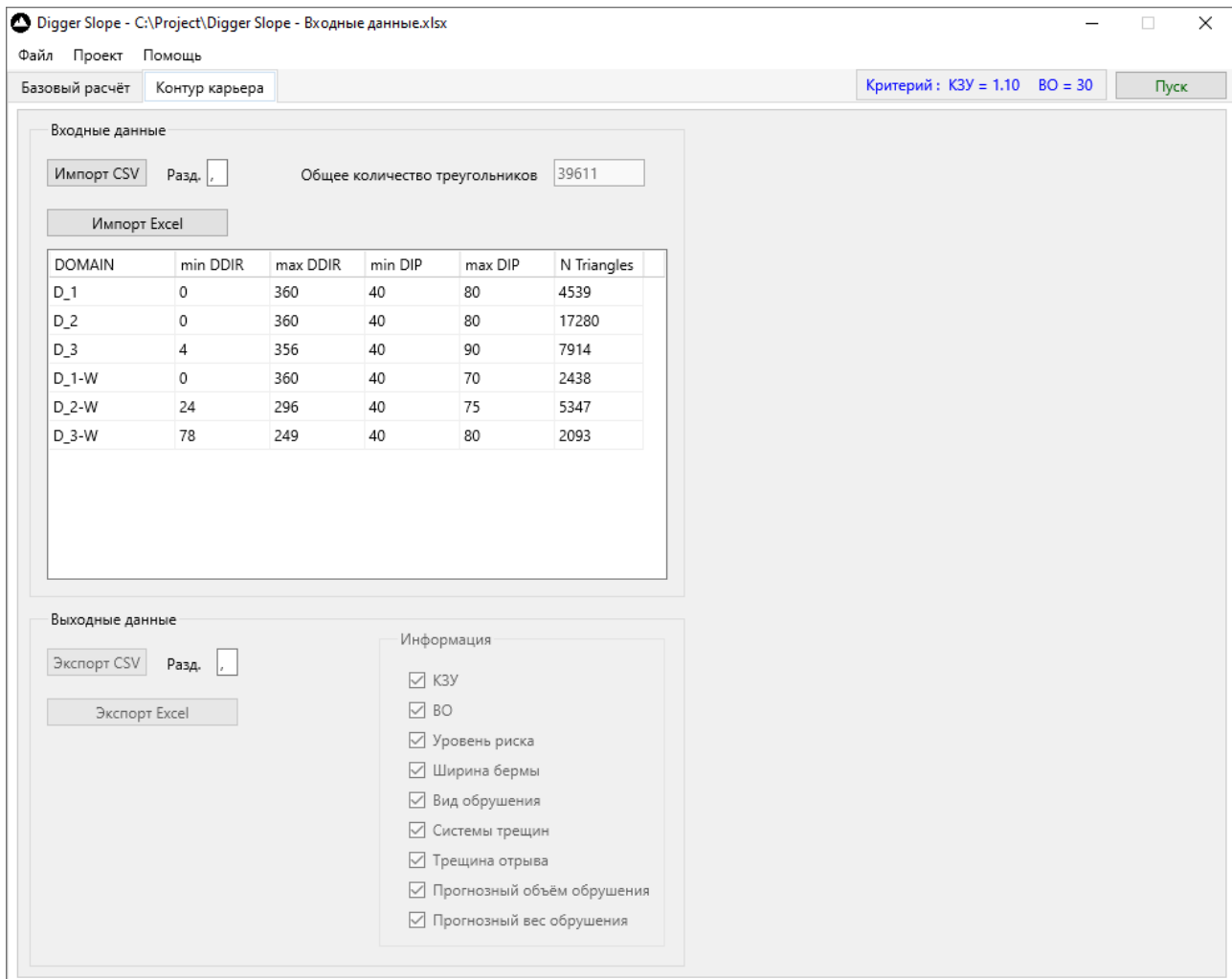


Рисунок 15 Контур карьера

После выполнения расчёта программа позволяет выгрузить расчётные данные в виде дополнительных столбцов к файлу импортированного каркаса карьера. Таким образом, все рассчитанные характеристики кинематического анализа можно посмотреть в исходной 3D среде каркаса прямо на контуре карьера в виде тепловых карт с соответствующими легендами (например, в средах Datamine, Micromine, Leapfrog и т.п.).



### Импорт каркаса

Для корректного импорта файла треугольников каркаса карьера необходимо чтобы в файле содержались поля с *обязательными* именами заголовков:

TRIANGLE	Номер треугольника
DOMAIN	Домен карьера
SDIP	Угол падения треугольника, град.
DIPDIRN	Азимут падения треугольника, град.

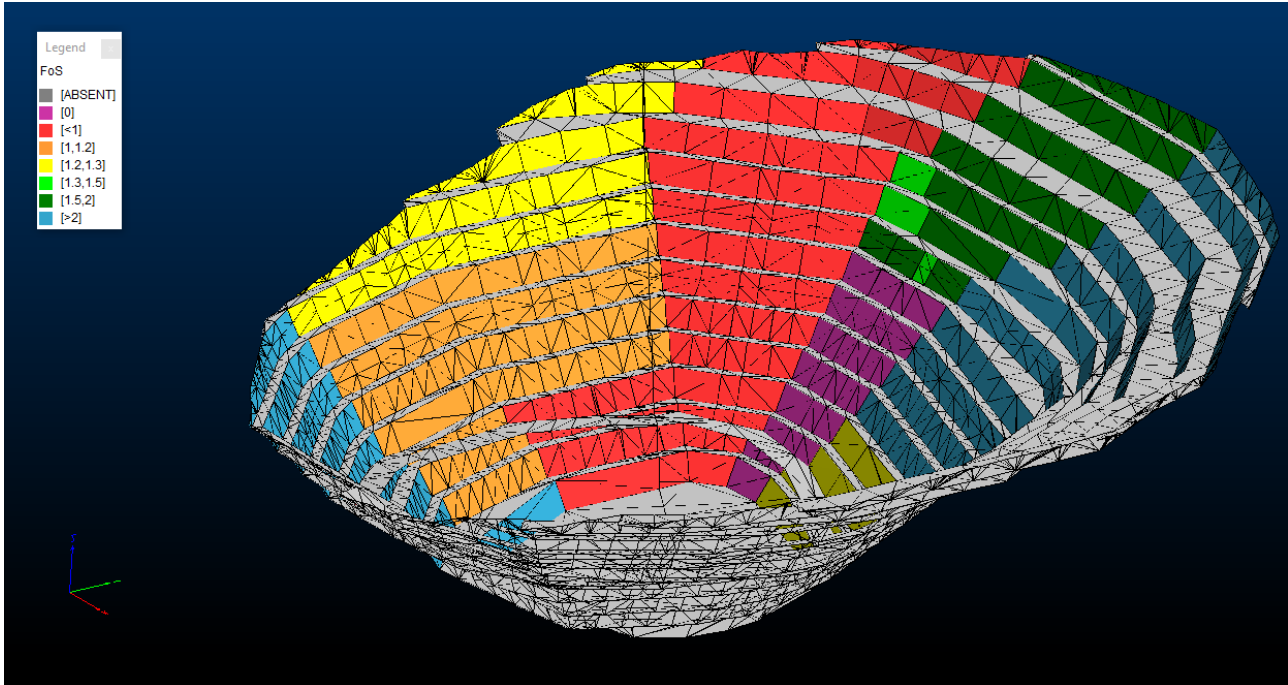
### Экспорт каркаса

При экспорте результатов программа дописывает к имеющимся в файле импортированного каркаса следующие поля:

Группа экспорта	Поле	Описание
Коэффициент запаса устойчивости	FoS_p	Для плоского блока
	FoS_pTC	Для плоского блока с трещиной отрыва
	FoS_w	Для клиновидного блока
	FoS_wTC	Для клиновидного блока с трещиной отрыва
	FoS_Total	Для наименее устойчивого блока
Вероятность обрушения	PoF_p	Для плоского блока
	PoF_pTC	Для плоского блока с трещиной отрыва
	PoF_w	Для клиновидного блока
	PoF_wTC	Для клиновидного блока с трещиной отрыва
	PoF_Total	Для наименее устойчивого блока
Уровень риска	Risk	Уровень риска
Системы трещин, образующие кинематический блок	Type	Форма наименее устойчивого блока
	Set_1	1-я система трещин, образующая блок
	Set_2	2-я система трещин, образующая блок
	TC	Трещина отрыва
Потенциальный объем обрушения	V_p	Для плоского блока, м <sup>3</sup> /м
	V_pTC	Для плоского блока с трещиной отрыва, м <sup>3</sup> /м
	V_w	Для клиновидного блока, м <sup>3</sup> /м
	V_wTC	Для клиновидного блока с трещиной отрыва, м <sup>3</sup> /м
	V/m	Для наименее устойчивого блока, м <sup>3</sup> /м
Вес обрушения	W/m	Вес блока, т
Размеры кинематического блока	FH	Высота блока, м
	FW	Ширина блока, м
	FL	Длина блока, м
Рекомендуемая конфигурация уступа	SECTOR	Сектор
	BFA	Рекомендованный угол уступа, град.
	BW	Рекомендованная ширина бермы, м
	IRA	Угол откоса группы уступов, град.
	Vol/m	Прогнозный объем обрушения, м <sup>2</sup> /м
	d_PRO	Разница рекомендованного и проектного угла откоса, град.

### *Кинематическая карта карьера*

Результат 3D-моделирования на примере Datamine-каркаса карьера с легендой по расчётному коэффициенту запаса устойчивости откосов приведён на рисунке ниже.



*Рисунок 16 Кинематическая карта карьера*

## Обратный анализ

Программа позволяет производить обратный анализ фактических обрушений на откосах карьера с целью определения сдвиговых характеристик прочности по трещинам.

Для начала работы на вкладке «Обратный анализ» необходимо загрузить исходные данные для расчёта из меню Файл → Импорт входных данных.

Исходные данные для обратного анализа импортируются из файла в формате Excel, содержащего лист с названием «Back Analysis». Название листа является обязательным, также как и последовательность столбцов таблицы.

Домен	Обрушение			Откос		Система 1		Система 2		Трещина отрыва		
Название домена	Название обрушения	Объёмный вес, т/м <sup>3</sup>	Высота обрушения откоса, м	Угол падения, °	Азимут падения, °	Угол падения, °	Азимут падения, °	Угол падения, °	Азимут падения, °	Угол падения, °	Азимут падения, °	Расстояние от бровки, м
DOMAIN	COLLAPSE	G	FH	DIP	DDIR	J1_DIP	J1_DDIR	J2_DIP	J2_DDIR	TC_DIP	TC_DDIR	TC_DIST
D_1	101b	2.60	10	75	180	41.67	132.58					
D_1	99b	2.60	5	72	180	53.1	160					
D_2	1001	2.74	20	60	40	50.2	153.42			80	40	1.5
D_2	1002	2.74	20	60	40	50.2	153.42			80	220	2.8
D_1	79	2.60	20	60	180	58.58	153.42	59.5	270			
D_1	105	2.60	10	75	180	36.4	141.2	87.1	233.7			
D_3	110_100_90	2.78	10	75	120	60.5	73.75	82	151.67	90	120	3.7
D_3	108	2.78	20	60	120	69.17	85.67	38.67	174	75	300	5.5

Рисунок 17 Исходные данные - Обратный анализ

На этом листе задаются следующие величины:

- Структурный домен;
- Параметры обрушения:
  - Наименование;
  - Объёмный вес пород, т/м<sup>3</sup>;
  - Высота обрушения откоса, м;
- Ориентация откоса и систем трещин, образующих обрушение:
  - Угол падения, °;
  - Азимут падения, °;
- Для трещины отрыва дополнительно задаётся расстояние (в метрах) от бровки откоса по нормали до максимально удалённого угла блока на берме.

При загрузке данных программа автоматически определяет вид обрушения в зависимости от заполненности столбцов таблицы и вычисляет для каждого обрушения коэффициенты ( $A$  и  $B$ ) зависимости сцепления ( $Coh$ ) от угла внутреннего трения ( $Phi$ ):

$$Coh = B - A \cdot tg(Phi)$$

После этого программа выполняет статистический анализ коэффициентов ( $A$  и  $B$ ), а также вычисленных в точках пересечения графиков величин сцепления ( $Coh$ ) и угла внутреннего трения ( $Phi$ ) по методике [7].

Значения сцепления и угла внутреннего трения, связанные средней зависимостью (со средними значениями коэффициентов ( $A$  и  $B$ )) могут быть вычислены в отдельной таблице.

Значения сцепления и угла внутреннего трения для каждого отдельного обрушения могут быть вычислены в основной таблице, путём редактирования соответствующего столбца в режиме «Ручной ввод».

В режиме «Рассчитать для средних значений» сцепление и угол внутреннего трения в основной таблице принимаются для всех обрушений одинаковыми из таблицы для вычисления средних значений.

При этом программа определяет коэффициент запаса устойчивости для всех обрушений с выбранными значениями сцепления и угла внутреннего трения.

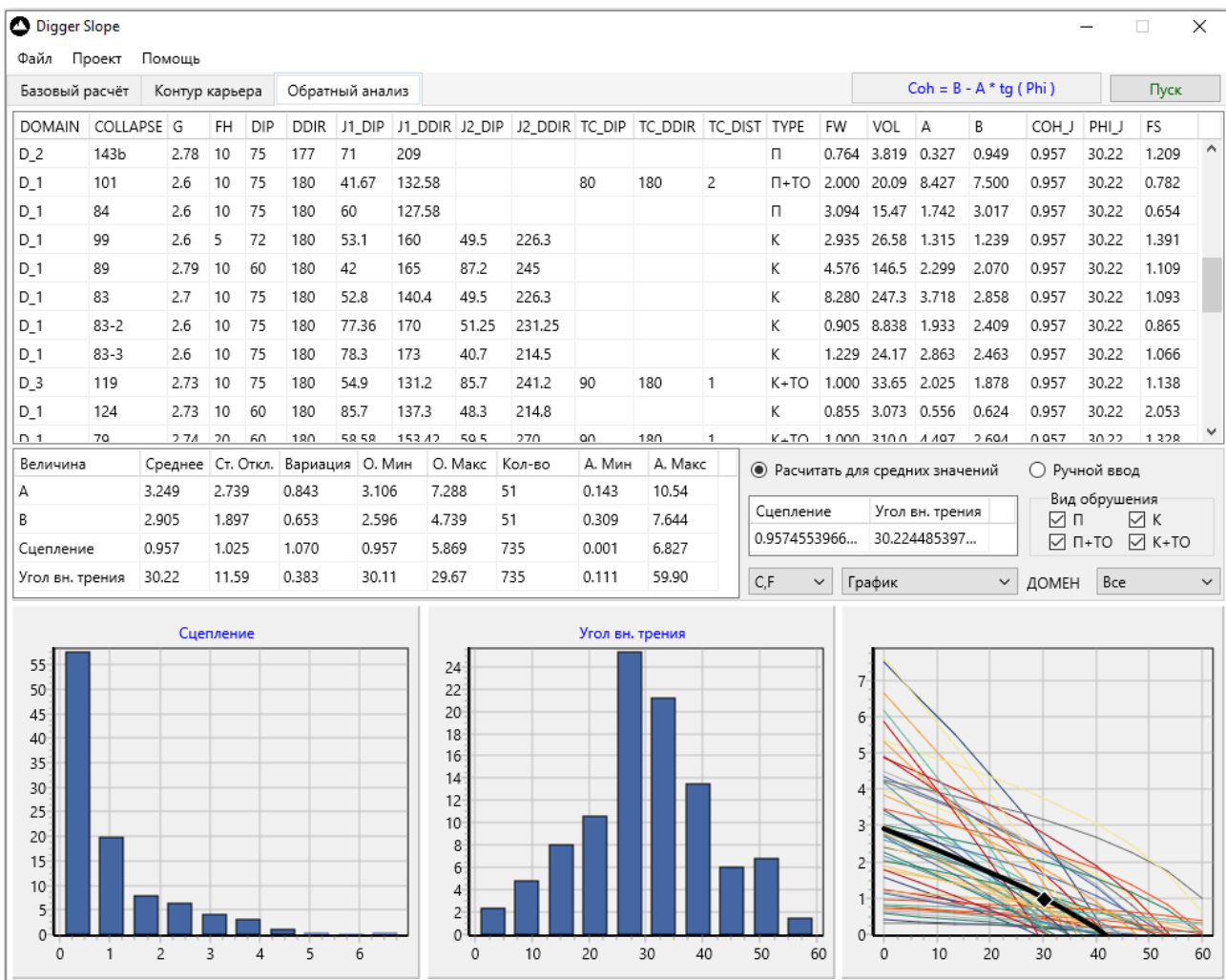


Рисунок 18 Обратный анализ

Результаты обратных расчётов могут быть отфильтрованы по видам обрушения, а также по принадлежности к доменам.

Экспорт результатов осуществляется из меню Файл → Экспорт результатов.

## Принятые обозначения

Для компактности отображения таблиц, содержащих [детали расчёта](#) приняты следующие обозначения выходных данных.

### Плоское обрушение

Величина	Описание
N failure	Количество блоков
Joint Set	Система трещин, образующая блок
Btalus	Ширина осыпи, м
Bfall	Ширина бермы для задерживания камнепада, м
Berm Det.	Ширина бермы, рассчитанная при детерминированном подходе
N all	Объём выборки для вероятностного расчёта
N volume	Количество блоков, удовлетворяющих критерию развала по КЗУ
Mean Volume	Средний объём обрушений, м <sup>3</sup> /м
Bspill	Ширина (радиус) развала породы, м
Berm Prob.	Ширина бермы, рассчитанная при вероятностном подходе
LengthJ	Длина блока по трещине
DF	Сдвигающая сила, т/м <sup>2</sup>
RF	Удерживающая сила, т/м <sup>2</sup>
NF	Нормальная сила, т/м <sup>2</sup>
Nu	Нагрузка от воды на плоскость трещины, т/м <sup>2</sup>
Ns	Сейсмическая нагрузка, т/м <sup>2</sup>
Ne	Равнодействующая внешних нагрузок, т/м <sup>2</sup>

### Плоское обрушение с трещиной отрыва

Величина	Описание
N failure	Количество блоков
Joint Set	Система трещин, образующая блок
setTC	Трещина отрыва
dipTC	Угол падения трещины отрыва, град.
aziTC	Азимут падения трещины отрыва, град.
locTC	Минимальная дистанция до трещины отрыва, м
Btalus	Ширина осыпи, м
Bfall	Ширина бермы для задерживания камнепада, м
Berm Det.	Ширина бермы, рассчитанная при детерминированном подходе, м
N all	Объём выборки для вероятностного расчёта
N volume	Количество блоков, удовлетворяющих критерию развала по КЗУ
Mean Volume	Средний объём обрушений, м <sup>3</sup> /м
Bspill	Ширина (радиус) развала породы, м
Berm Prob.	Ширина бермы, рассчитанная при вероятностном подходе, м
LengthJ	Длина блока по трещине
LengthTC	Длина трещины отрыва, м
DistanceTC	Дистанция до трещины отрыва, м
DF	Сдвигающая сила, т/м <sup>2</sup>
RF	Удерживающая сила, т/м <sup>2</sup>
NF	Нормальная сила, т/м <sup>2</sup>
Nu	Нагрузка от воды на плоскость трещины, т/м <sup>2</sup>
Nv	Нагрузка от воды на плоскость трещины отрыва, т/м <sup>2</sup>
Ns	Сейсмическая нагрузка, т/м <sup>2</sup>
Ne	Равнодействующая внешних нагрузок, т/м <sup>2</sup>

### Клиновидное обрушение

Величина	Описание
N failure	Количество блоков
Sliding Mode	Режим обрушения
Trend	Азимут линии пересечения трещин, образующая блок, град.
Plunge	Угол линии пересечения трещин, образующая блок, град.
Joint Set 1	1-я система трещин, образующая блок
Joint Set 2	2-я система трещин, образующая блок
Btalus	Ширина осыпи, м
Bfall	Ширина бермы для задерживания камнепада, м
Berm Det.	Ширина бермы, рассчитанная при детерминированном подходе
N all	Объём выборки для вероятностного расчёта
N volume	Количество блоков, удовлетворяющих критерию развала по КЗУ
Mean Volume	Средний объём обрушений, м <sup>3</sup> /м
Bspill	Ширина (радиус) развала породы, м
Berm Prob.	Ширина бермы, рассчитанная при вероятностном подходе
Lint	Длина линии пересечения трещин, образующая блок, м
Lw	Длина блока по бровке уступа, м
Lb1	Длина блока по 1-й трещине в плоскости откоса, м
Lb2	Длина блока по 2-й трещине в плоскости откоса, м
Lu1	Длина блока по 1-й трещине в плоскости бермы, м
Lu2	Длина блока по 2-й трещине в плоскости бермы, м
Sb	Площадь блока в плоскости откоса, м <sup>2</sup>
Su	Площадь блока в плоскости бермы, м <sup>2</sup>
S1	Площадь блока в плоскости 1-й системы трещин, м <sup>2</sup>
S2	Площадь блока в плоскости 2-й системы трещин, м <sup>2</sup>
bJ1J2	Угол между трещинами в плоскости откоса, град.
bJ1Crest	Угол между 1-й трещиной и бровкой в плоскости откоса, град.
bJ2Crest	Угол между 2-й трещиной и бровкой в плоскости откоса, град.
uJ1J2	Угол между трещинами в плоскости бермы, град.
uJ1Crest	Угол между 1-й трещиной и бровкой в плоскости бермы, град.
uJ2Crest	Угол между 2-й трещиной и бровкой в плоскости бермы, град.
DF	Сдвигающая сила, т/м <sup>2</sup>
RF	Удерживающая сила, т/м <sup>2</sup>
No1	Исходная сила на плоскость 1-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
No2	Исходная сила на плоскость 2-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
N1	Нормальная сила на плоскость 1-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
N2	Нормальная сила на плоскость 2-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
Na	Нормальная сила на плоскость 1-й трещины для режима 1, т/м <sup>2</sup>
Nb	Нормальная сила на плоскость 2-й трещины для режима 2, т/м <sup>2</sup>
Nu1	Нагрузка от воды на плоскость 1-й трещины, т/м <sup>2</sup>
Nu2	Нагрузка от воды на плоскость 2-й трещины, т/м <sup>2</sup>
Ns	Сейсмическая нагрузка, т/м <sup>2</sup>
Ne	Равнодействующая внешних нагрузок, т/м <sup>2</sup>



### Клиновидное обрушение с трещиной отрыва

Величина	Описание
N failure	Количество блоков
Sliding Mode	Режим обрушения
Trend	Азимут линии пересечения трещин, образующая блок, град.
Plunge	Угол линии пересечения трещин, образующая блок, град.
Joint Set 1	1-я система трещин, образующая блок
Joint Set 2	2-я система трещин, образующая блок
setTC	Трещина отрыва
aziTC	Угол падения трещины отрыва, град.
dipTC	Азимут падения трещины отрыва, град.
locTC	Минимальная дистанция до трещины отрыва, м
Btalus	Ширина осыпи, м
Bfall	Ширина бермы для задерживания камнепада, м
Berm Det.	Ширина бермы, рассчитанная при детерминированном подходе
N all	Объём выборки для вероятностного расчёта
N volume	Количество блоков, удовлетворяющих критерию развала по КЗУ
Mean Volume	Средний объём обрушений, м <sup>3</sup> /м
Bspill	Ширина (радиус) развала породы, м
Berm Prob.	Ширина бермы, рассчитанная при вероятностном подходе
Lint	Длина линии пересечения трещин, образующая блок, м
Lw	Длина блока по бровке уступа, м
LwTC	Длина блока по трещине отрыва, м
Lb1	Длина блока по 1-й трещине в плоскости откоса, м
Lb2	Длина блока по 2-й трещине в плоскости откоса, м
Lu1	Длина блока по 1-й трещине в плоскости бермы, м
Lu2	Длина блока по 2-й трещине в плоскости бермы, м
Sb	Площадь блока в плоскости откоса, м <sup>2</sup>
Su	Площадь блока в плоскости бермы, м <sup>2</sup>
S1	Площадь блока в плоскости 1-й системы трещин, м <sup>2</sup>
S2	Площадь блока в плоскости 2-й системы трещин, м <sup>2</sup>
STC	Площадь блока в плоскости трещины отрыва, м <sup>2</sup>
bJ1J2	Угол между трещинами в плоскости откоса, град.
bJ1Crest	Угол между 1-й трещиной и бровкой в плоскости откоса, град.
bJ2Crest	Угол между 2-й трещиной и бровкой в плоскости откоса, град.
uJ1J2	Угол между трещинами в плоскости бермы, град.
uJ1Crest	Угол между 1-й трещиной и бровкой в плоскости бермы, град.
uJ2Crest	Угол между 2-й трещиной и бровкой в плоскости бермы, град.
uJ1TC	Угол между 1-й трещиной и трещиной отрыва в плоскости бермы, град.
uJ2TC	Угол между 2-й трещиной и трещиной отрыва в плоскости бермы, град.
DF	Сдвигающая сила, т/м <sup>2</sup>
RF	Удерживающая сила, т/м <sup>2</sup>
No1	Исходная сила на плоскость 1-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
No2	Исходная сила на плоскость 2-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
N1	Нормальная сила на плоскость 1-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
N2	Нормальная сила на плоскость 2-й трещины для режима 12, т/м <sup>2</sup>
Na	Нормальная сила на плоскость 1-й трещины для режима 1, т/м <sup>2</sup>
Nb	Нормальная сила на плоскость 2-й трещины для режима 2, т/м <sup>2</sup>
Nu1	Нагрузка от воды на плоскость 1-й трещины, т/м <sup>2</sup>
Nu2	Нагрузка от воды на плоскость 2-й трещины, т/м <sup>2</sup>
Nv	Нагрузка от воды на плоскость трещины отрыва, т/м <sup>2</sup>
Ns	Сейсмическая нагрузка, т/м <sup>2</sup>
Ne	Равнодействующая внешних нагрузок, т/м <sup>2</sup>

### Список источников

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Утверждены приказом Ростехнадзора № 439 от 13 ноября 2020 г.
2. 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.
3. Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии / Министерство цветной металлургии, Унипромедь. М.: 1989 г.
4. Ройнишвили Н.М. Защита железнодорожного пути от горных обвалов и осыпей. Изд-во «Транспорт», 1973, с. 1-304.
5. Coetsee, S 2020, An overview of bench design for cut slopes with an example of an advanced dataset assessment technique, in PM Dight (ed.), Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 731-748.
6. Gibson, W & Paul, J 2016, Comparison for estimating volume of failed wedges, SRK Consulting (Australasia) Pty Ltd, Perth.
7. Макаров А. Б., Хормазабаль Э., Ливинский И. С., Спиринов В. И., Солюянов Н. О. Методика обратных расчетов сцепления и трения по трещинам по фактам вывалов с бортов карьеров // Маркшейдерия и недропользование. 2016. № 4(84). С. 44–48.