

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АППАРАТ

программного обеспечения

Digger Slope

Оглавление

1	Описание программного комплекса	3
2	Область применения.....	4
3	Кинематический анализ	6
4	Определение ширины бермы	12
5	Расчёт параметров откосов	13
5.1	Исходные данные.....	15
5.2	Базовый расчёт.....	18
	Список используемых источников.....	22

1 Описание программного комплекса

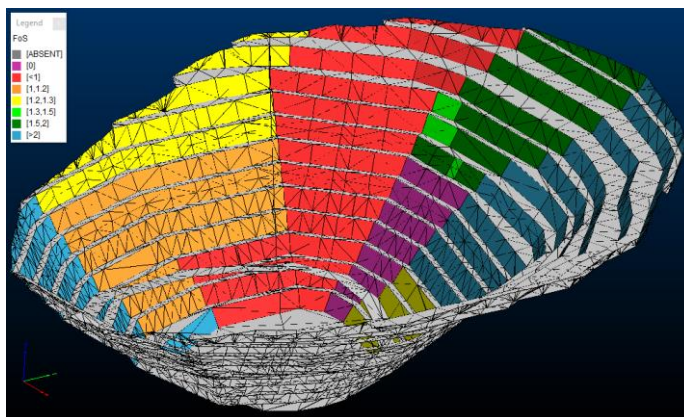
Программный комплекс Digger Slope предназначен для анализа устойчивости и оптимизации бортов карьера на всех этапах проектирования, позволяет оценить фактические риски и минимизировать технологические затраты при отработке месторождения.

Осуществляет импортозамещение и модернизацию целого ряда программ, использующихся для определения параметров откосов карьера:

- RocPlane, SWedge (Rocscience);
- SBlock (Gabriel S Esterhuizen);
- CAT (ITASCA);
- MWedge (SRK);

Сочетает в себе функционал комплексного кинематического анализа для расчёта устойчивости откосов карьера, ширины берм безопасности, анализа рисков и обратных расчётов прочности трещиноватого породного массива по фактическим данным отработки месторождения.

В автоматизированном режиме выполняет учёт горно-геологических условий на основе результатов литолого-структурного, геомеханического и гидрогеологического моделирования месторождения.



Производит построение Кинематической Карты Карьера (ЗК-моделирование), которая отражает полную картину устойчивости откосов прямо на контуре карьера.

Все расчёты в программе выполняются в строгом соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (приказ Ростехнадзора № 439 от 13 ноября 2020 г) [1].

Программа сертифицирована в РОССТАНДАРТе и включена в Реестр Российского программного обеспечения.

Digger Slope - победитель конкурса МайнДиджитал, Майнекс Россия 2022 г. (IV Конкурс кейсов цифровой трансформации предприятий горнодобывающей и горно-металлургической отраслей).

2 Область применения

Структура и этапы работ по обеспечению устойчивости бортов и уступов карьеров согласно Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (приказ Ростехнадзора № 439 от 13 ноября 2020 г) [1] представлены на рисунке (Рисунок 2.1).

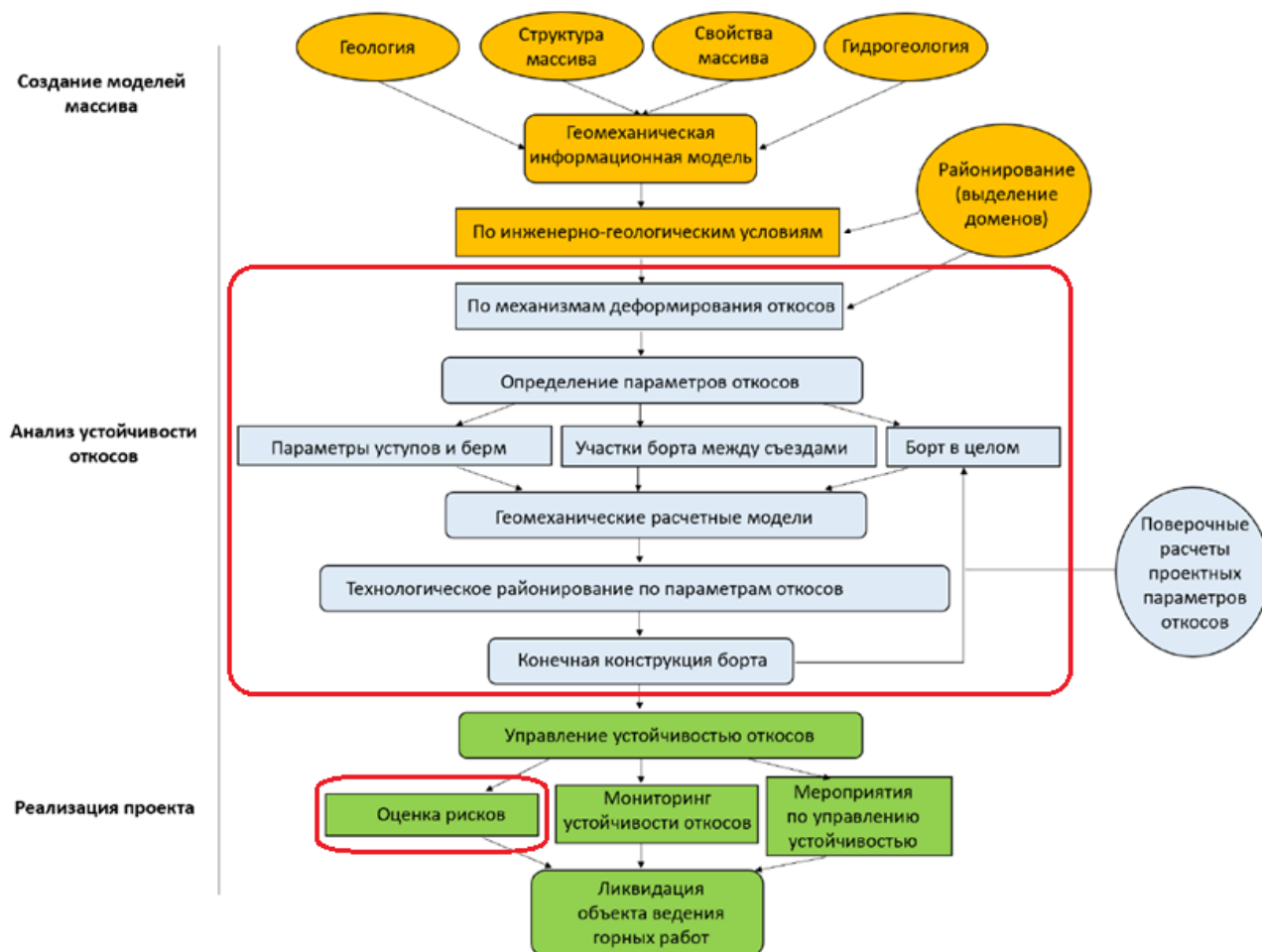


Рисунок 2.1 – Структура геомеханического обеспечения устойчивости бортов и уступов

На рисунке (Рисунок 2.1) красным отмечены области применения ПО Digger Slope в общем процессе проектирования бортов карьера. На этапе анализа устойчивости откосов карьера (после геомеханического моделирования и выделения структурных доменов и до выполнения расчётов устойчивости борта карьера, методами поиска критической поверхности скольжения, образующейся в сплошной среде) в ПО Digger Slope производится комплексный кинематический анализ для решения задач:

- Районирование карьерного поля по механизмам деформирования откосов;
- Расчёт устойчивости откосов:
 - Коэффициент запаса устойчивости,
 - Вероятность обрушения,
 - Уровень риска,
 - Прогнозный объём обрушений;
- Определение параметров откосов в масштабах уступа и участка борта:
 - Угол уступа,
 - Ширина бермы,
 - Угол стека (участка борта между съездами),
 - Количество уступов в стеке;
- Технологическое районирование по параметрам откосов;
- Районирование карьерного поля по оценке геомеханических рисков и выявление опасных с точки зрения обрушений участков борта карьера.

Таким образом, Digger Slope позволяет до выполнения поверочных расчётов устойчивости генерального борта карьера оптимизировать конечную конструкцию борта на этапе определения устойчивой конфигурации откосов в масштабах уступа и участка борта за счёт комплексного подхода с учётом:

- Инженерно-геологических условий месторождения,
- Технико-экономической матрицы рисков,
- Геомеханических свойств породного массива,
- Гидрогеологических условий,
- Сейсмической активности района,
- Действия внешних нагрузок, в том числе, моделирующих пригрузку от техники и анкерное крепление откосов.

На этапе реализации проекта Digger Slope позволяет оперативно оценивать риски на фактическом контуре карьера и выявлять критичные по устойчивости участки борта для организации мониторинга откосов и своевременного принятия мер реагирования на прогнозируемые обрушения откосов.

Также, в программе реализован обратный анализ фактических обрушений на откосах карьера для определения сдвиговых характеристик прочности по трещинам, что позволяет производить калибровку расчётных моделей по факту отработки.

3 Кинематический анализ

В соответствии с [1, 2] районирование по возможным механизмам деформирования прибортового массива (кинематический анализ) выполняется на основе доменов, выделенных по природным факторам с учетом расположения карьера. Один и тот же район, выделенный по природным факторам (структурный домен), для откосов с разным простиранием может деформироваться по различным схемам. В связи с этим природный домен разделяется на расчетные области, в которых предполагаются разные механизмы деформирования откосов (Рисунок 3.1). Выбор расчетных областей при проведении кинематического анализа производится в масштабе уступа (поверхности ослабления представлены структурами мелкого порядка – системами трещин, слоистостью).

Кинематический анализ определяет неблагоприятные системы трещин при разных направлениях падения откосов. Под неблагоприятностью систем трещин понимается такое их положение, при котором их плоскости образуют на откосе потенциально подвижные блоки, при этом удерживающие от обрушения (сдвигения блока) силы всецело зависят от сдвиговой прочности по трещинам. Такие механизмы обрушения возможны только в скальных массивах средней прочности и крепких пород, способных образовывать за счёт трещиноватости крупные твердотельные блоки. Основными схемами деформирования уступов в скальных трещиноватых породах являются: плоская, клиновидная, опрокидывания.

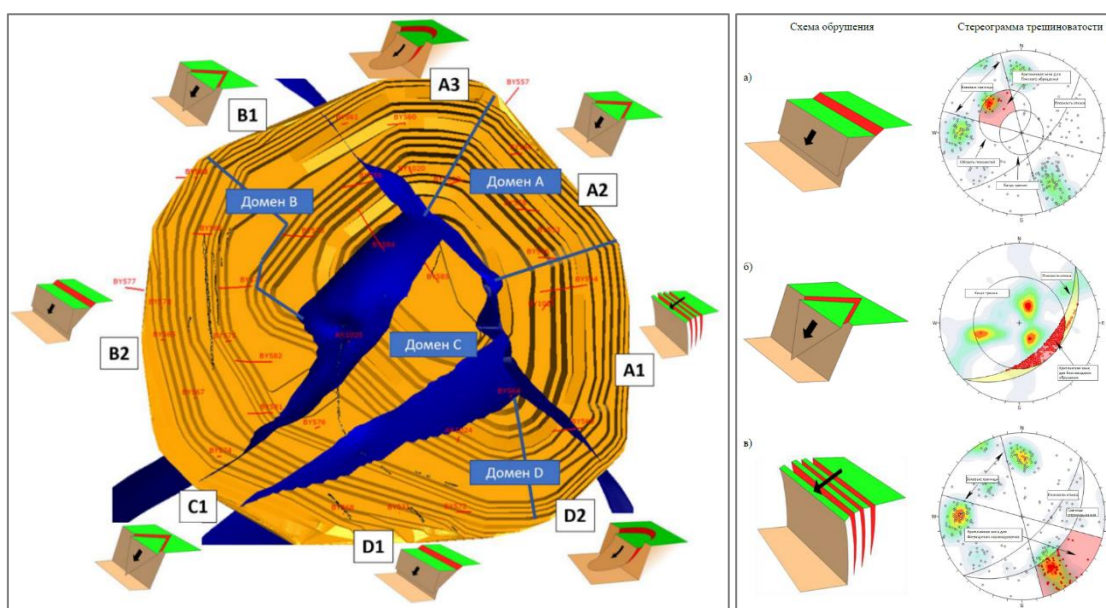


Рисунок 3.1 – Выделение расчетных областей и определение механизмов деформирования прибортового массива

Наиболее распространёнными видами обрушений скальных откосов являются плоская и клиновидная деформация с образованием трещины отрыва. При расчётах в ПО Digger Slope рассматриваются все комбинации плоскостей систем трещин и плоскости откоса, образующие кинематически подвижные блоки горной породы, соответствующие основным видам обрушений (Рисунок 3.2):

- Плоское (1 система трещин)
- Плоское с трещиной отрыва (2 системы трещин)
- Клиновидное (2 системы трещин)
- Клиновидное с трещиной отрыва (3 системы трещин)

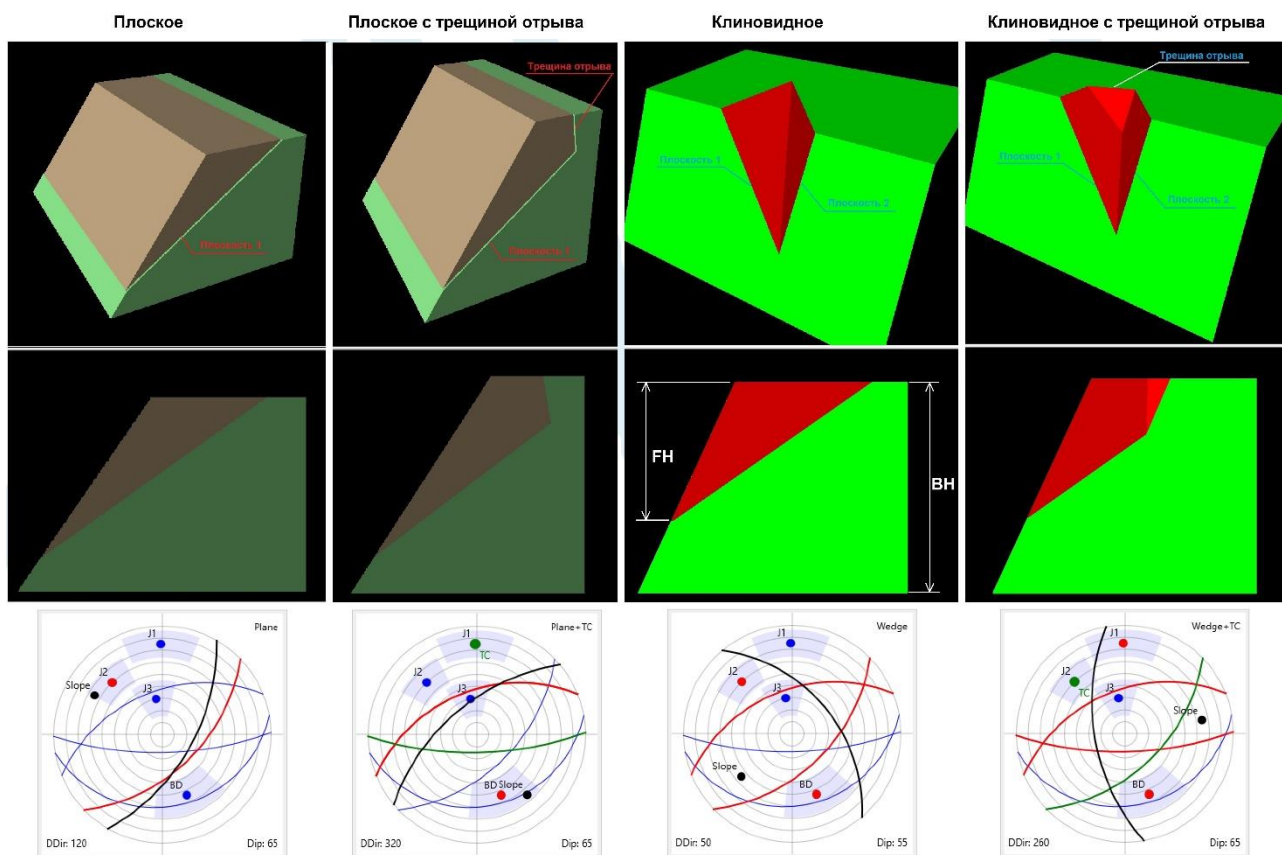


Рисунок 3.2 – Схемы деформирования откосов в ПО Digger Slope

(BH – высота откоса, FH – высота обрушения;

на стереограммах чёрным отмечена плоскость откоса; красным – системы трещин, образующие блок; зелёным – трещина отрыва, синим – оставшиеся системы трещин)

Оценка устойчивости откосов карьера в программе выполняется методами, основанными на теории предельного равновесия, в соответствии с которой устойчивость породных блоков на откосах обеспечивается при условиях, когда отношение удерживающих сил, действующих по поверхности ослабления в прибортовом массиве, к сдвигающим силам по этой поверхности составляет не менее величины нормативного коэффициента запаса устойчивости:

$$\text{Расчётный КЗУ} = \frac{\text{Удерживающие силы}}{\text{Сдвигающие силы}} \geq \text{Нормативный КЗУ}$$

Удерживающие и сдвигающие силы определяются из уравнений равновесия. Пример сил, действующих на уступе для схемы плоского обрушения приведен на рисунке (Рисунок 3.3).

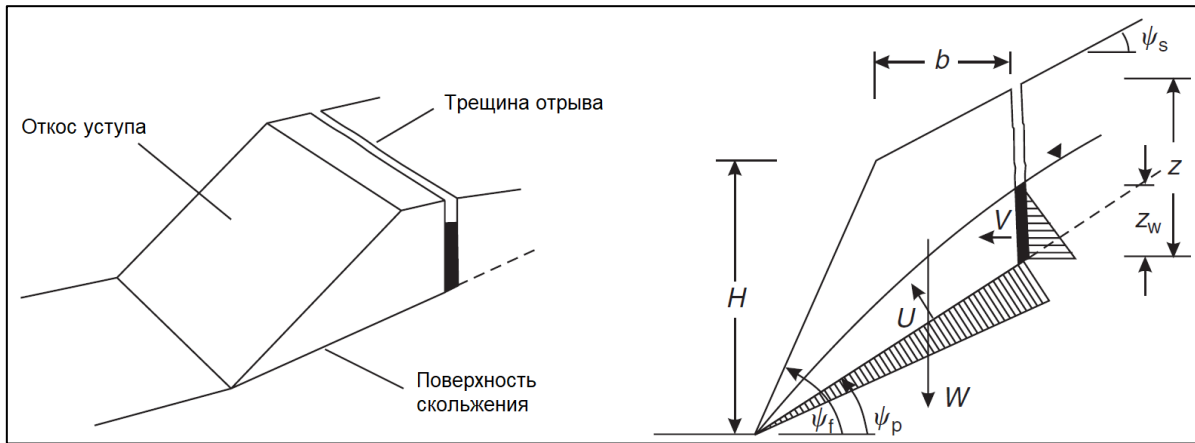


Рисунок 3.3 – Расчётная схема плоского обрушения

(H – высота откоса, ψ_f – угол откоса уступа, ψ_p – угол падения поверхности скольжения, ψ_s – угол наклона бермы, b – расстояние до трещины отрыва от бровки уступа, z – глубина трещины отрыва, z_w – уровень обводнённости уступа, U – давление воды на поверхности скольжения, V – давление воды в трещине отрыва)

При этом коэффициент запаса устойчивости вычисляется по формуле:

$$\text{КЗУ} = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \operatorname{tg} \varphi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p},$$

где: c – сцепление;
 φ – угол внутреннего трения;
 A – площадь поверхности скольжения;
 W – вес объёма обрушения.

Развернутые формулы для всех видов обрушений (схем деформирования) уступов приведены в работе [4].

Для оценки устойчивости откосов в ПО Digger Slope реализованы оба подхода – детерминированный (основанный на расчёте КЗУ при задании средних условий) и вероятностный.

Вероятностный метод используется для учета влияния изменчивости факторов. Оценка вероятности обрушения откоса основана на многовариантных расчетах его коэффициентов запаса устойчивости при различных сочетаниях исходных данных

(например, прочностные характеристики массива горных пород, параметры трещиноватости и т.д.) в пределах их изменчивости [10] (Рисунок 3.4).

При выполнении вероятностных расчётов в ПО Digger Slope имеется возможность задания исходных данных в виде статистических распределений ориентации систем трещин и параметров сдвиговой прочности породного массива.

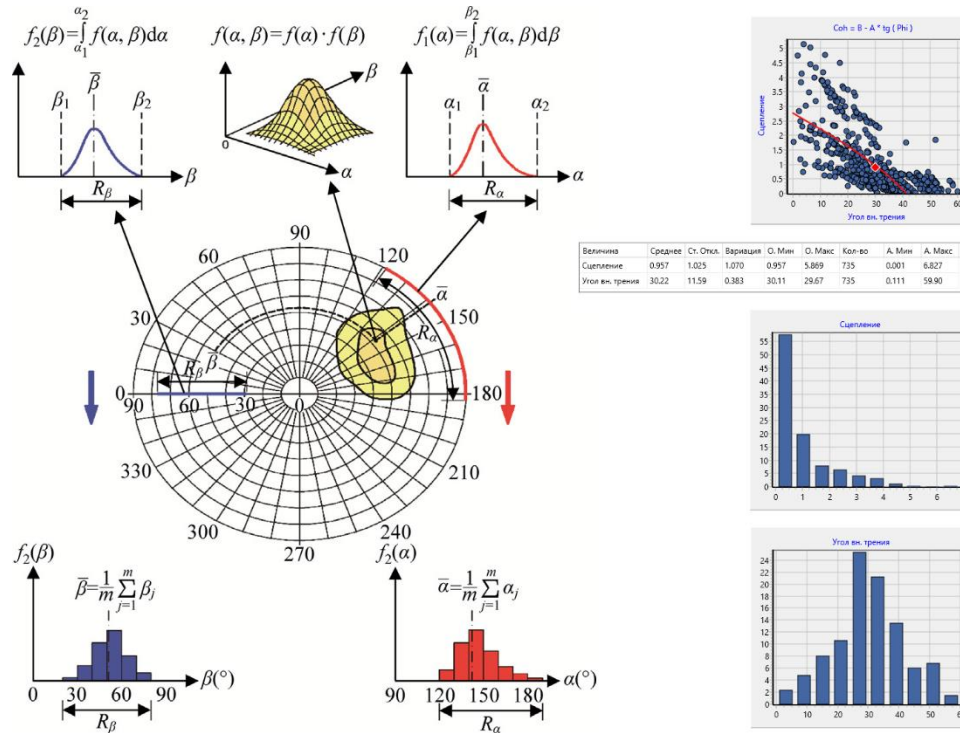


Рисунок 3.4 – Вариация исходных данных

Вероятность обрушения определяется как отношение количества вариантов с коэффициентом запаса менее единицы к общему количеству вариантов расчетов [1] (Рисунок 3.5):

$$BO = \frac{N_{KЗУ < 1}}{N}, \%$$

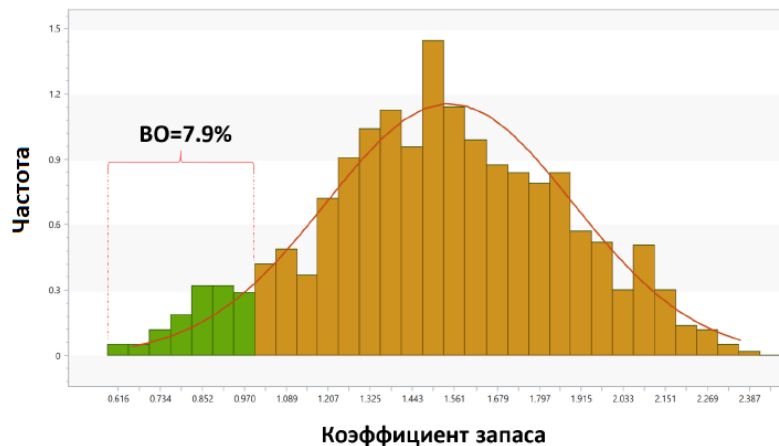


Рисунок 3.5 – Вероятность обрушения по результатам многовариантных расчетов коэффициентов запаса

Нормативные значения КЗУ и ВО принимаются в соответствии с ФНП №439

по таблицам 1, 3, 4 [1] (Рисунок 3.6):

Таблица 1 – Нормативные коэффициенты запаса устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов

Характеристика откоса	Стадии до начала эксплуатации	Эксплуатация и техническое перевооружение	Проектирование доработки карьера (менее 3 лет), лет	Для ответственных сооружений в чаше карьера	При безлюдной выемке
1	2	3	4	5	6
Полускальные и скальные породы					
Уступ*	1,50 (2,00)	1,50	1,30	2,00	1,20
Участок борта, борт	1,30 (1,50)	1,30	1,20	1,50	1,20
Песчаные и гравелистые породы					
Уступ, участок борта, борт	1,30	1,20	1,15	1,30	1,10
Глинистые породы					
Уступ	1,50	1,30	1,20	2,00	1,20
Участок борта, борт	1,40	1,30	1,20	1,50	1,20

Таблица 3 – Нормативные коэффициенты запаса устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов с учетом сейсмических сил от землетрясений

Характеристика откоса	Наличие ответственных сооружений	
	Отсутствуют	Присутствуют
Рабочий уступ	1,00	–
Уступ в конечном положении	1,10	1,15
Борт, участок борта, временно-нерабочий борт	1,05	1,10
Отвал (ярус)	1,05	1,10

Таблица 4 – Нормативные коэффициенты запаса устойчивости при вероятностном подходе

Масштаб	Область применения	Коэффициент запаса устойчивости	Допустимая вероятность обрушения, [КЗУ≤1], %
Уступы	Рабочий до 1 года. Доработка карьера с проведением обязательного инструментального мониторинга (в режиме реального времени с покрытием рабочей зоны). Безлюдная технология.	Не учитывается	40%
	Эксплуатация и техническое перевооружение. Проектирование до начала эксплуатации при условии достаточной геомеханической изученности месторождения по данным бурения скважин		30%
	Проектирование до начала эксплуатации. Наличие ответственных сооружений.		20%
Группа уступов между транспортными съездами	Доработка карьера. Безлюдная технология.	1,20	20%
	Эксплуатация и техническое перевооружение. Проектирование до начала эксплуатации при условии достаточной геомеханической изученности месторождения по данным бурения скважин	1,25	15%
Борт карьера в целом	Проектирование до начала эксплуатации. Наличие ответственных сооружений.	1,30	10%
	Доработка карьера. Безлюдная технология.	1,20	15%
	Эксплуатация и техническое перевооружение. Проектирование до начала эксплуатации при условии достаточной геомеханической изученности месторождения по данным бурения скважин	1,30	10%
	Проектирование до начала эксплуатации. Наличие ответственных сооружений.	1,50	5%

Рисунок 3.6 – Критерии приемлемости

Выбор критериев приемлемости в ПО Digger Slope осуществляется в автоматическом режиме при задании в настройках программы стадии проектирования и условий отработки для каждого расчётного домена карьерного поля, обеспечивая тем самым строгое выполнение предписаний Федеральных правил и норм проектирования [1] в сложных горно-геологических условиях месторождения.

При управлении устойчивостью откосов на основе оценки геомеханического риска (Р), оцениваются составляющие его факторы: вероятность обрушения откоса (ВО) и тяжесть последствий от обрушения (ТП) [1]:

$$P = VO \times TP$$

Последствия от обрушений могут выражаться как качественными характеристиками (незначительные - чрезвычайные), так и количественными (технико-экономические характеристики).

Оценка и управление рисками выполняются с помощью матрицы рисков, которая отображает качественные, полуколичественные или количественные показатели рисков (Рисунок 3.7). В соответствии с оцениваемым уровнем риска вырабатываются необходимые меры реагирования в соответствии с таблицей (Рисунок 3.8).

Оценка геомеханического риска в ПО Digger Slope производится в автоматическом режиме при задании в настройках программы специфичной для проекта матрицы рисков.

Матрица рисков		Последствия				
		Незначительные	Низкие	Средние	Высокие	Чрезвычайные
Вероятность риска		1	2	3	4	5
Качественная						
Количественная						
A	Очень высокая – Событие происходит постоянно с высокой степенью определенности. Произойдет с очень высокой степенью определенности.	>40%	Средний	Высокий	Высокий	Очень высокий
B	Высокая – Событие происходит часто с высокой степенью определенности. Произойдет с высокой степенью определенности	20÷40%	Низкий	Средний	Высокий	Высокий
C	Средняя – Событие может произойти. Происходило ранее.	10÷20%	Низкий	Низкий	Средний	Высокий
D	Низкая – Маловероятное событие. Может произойти в определенный момент.	1÷10%	Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий
E	Очень низкая – Разумная уверенность, что событие не произойдет. Может произойти в исключительных обстоятельствах.	<1%	Очень низкий	Низкий	Средний	Средний

Рисунок 3.7 – Матрица рисков

Тяжесть последствий				
Незначительные	Низкие	Средние	Высокие	Чрезвычайные
<ul style="list-style-type: none"> Обрушение на отдельном участке вне зоны ведения горных работ, не влияющее на технологический процесс 	<ul style="list-style-type: none"> Ликвидация обрушения требует несколько дней или не влияет на технологический процесс Обрушение откосов с коротким периодом эксплуатации Обрушения не оказывают влияние на внутрикарьерную инфраструктуру Повреждения оборудования отсутствуют 	<ul style="list-style-type: none"> Краткосрочная ликвидация обрушения Простои основного технологического оборудования Повреждение оборудования и инфраструктуры, требующее ремонта Восстановление съезда или ремонт путей откатки 	<ul style="list-style-type: none"> Потеря подготовленных к выемке запасов Среднесрочная ликвидация последствий обрушения Повреждение и длительные простои основного технологического оборудования и/или инфраструктуры, требующие капитального ремонта Потеря основного технологического оборудования и/или инфраструктуры Потеря транспортного съезда (при наличии резервного) 	<ul style="list-style-type: none"> Угроза жизни и здоровью людей Потеря транспортного съезда (при отсутствии резервного) Нарушение технологического цикла, требующее технического перевооружения

Рисунок 3.8 – Оценка тяжести последствий обрушений бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов

Помимо рисков, основанных на вероятности обрушения, Digger Slope производит оценку других характеристики обрушений, такие как:

- Прогнозный объём обрушений,
- Критические экспозиции (азимуты) откосов на участках борта,
- Наиболее неблагоприятные геологические структуры,

что позволяет применять дополнительные инструменты для управления устойчивостью откосов при оценке геомеханических рисков.

4 Определение ширины бермы

Ширина бермы в ПО Digger Slope рассчитывается в соответствии с ФНП [1].

При детерминированном способе расчета устойчивости уступов ширина предохранительной бермы (Рисунок 4.1) определяется исходя из следующего условия:

$$BW = \max \left\{ \begin{array}{l} B_{pro} \\ B_o + B_n \\ B_o + B_{об} \end{array} \right\}$$

где: B_{pro} – проектная ширина бермы, м; B_o – ширина осыпи, м; B_n – ширина бермы для задерживания падающих камней, м; $B_{об}$ – минимальная ширина рабочей части бермы, достаточная для безопасного размещения и работы оборудования по очистке берм от осыпей, м. Величины B_o , B_n рассчитываются согласно [1, 5].

При вероятностной оценке устойчивости уступов ширина предохранительной бермы определяется по формуле:

$$BW = \max \left\{ \begin{array}{l} B_{pro} \\ B_{по} + B_p + B_{эф} \end{array} \right\}$$

где: $B_{по}$ – ширина призмы возможного обрушения, м; B_p – ширина развала после деформации с вышележащего уступа (рассчитывается в зависимости от вида обрушения согласно работам [6, 7, 8, 9]), м; $B_{эф}$ – эффективная ширина бермы (оставшаяся часть бермы после осыпи и развала вышележащего уступа), которая принимается:

- не менее 2 м для любых уступов карьера;
- 0 м для нижних уступов при доработке карьера при условии инструментального мониторинга в режиме реального времени со сплошной зоной покрытия рабочей зоны или при безлюдной выемке.

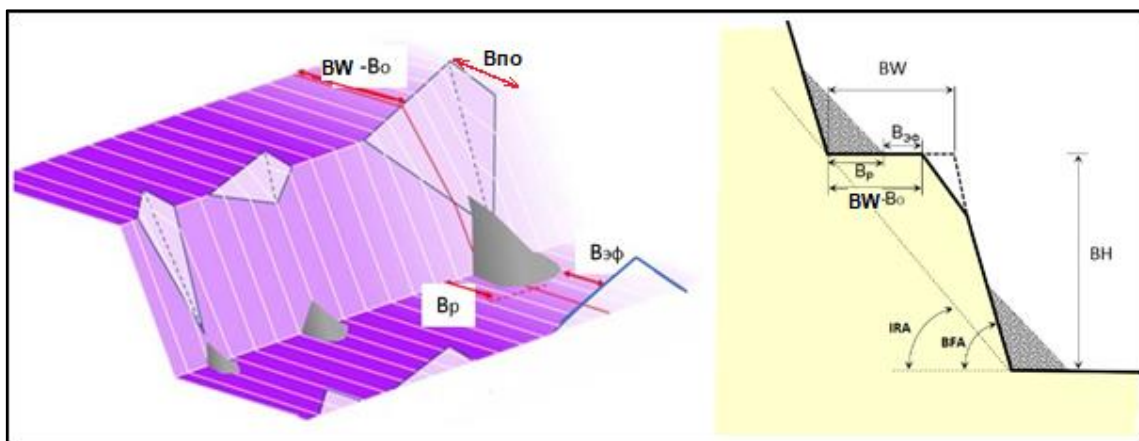


Рисунок 4.1 – Схема определения ширины предохранительной бермы при вероятностной оценке устойчивости уступов

5 Расчёт параметров откосов

В международной практике [2] и в соответствии с ФНП №439 [1] проектирование бортов карьера в скальных массивах средней прочности и крепких пород осуществляется по схеме:

Уступ → Группа уступов → Борт в целом

Для оценки устойчивости откосов на первых двух масштабах применяется метод кинематического анализа породных блоков, образовавшихся по плоскостям систем трещин, слоистости, напластованию и тектонических разломов низшего ранга.

Определение устойчивых параметров откосов карьера в ПО Digger Slope производится на основе построения Кинематической Карты Карьера (ЗК-моделирование) с выполнением расчётов устойчивости откосов в масштабе уступа и группы уступов (участок борта между съездами). Основные элементы конструкции борта карьера изображены на рисунке (Рисунок 5.1).

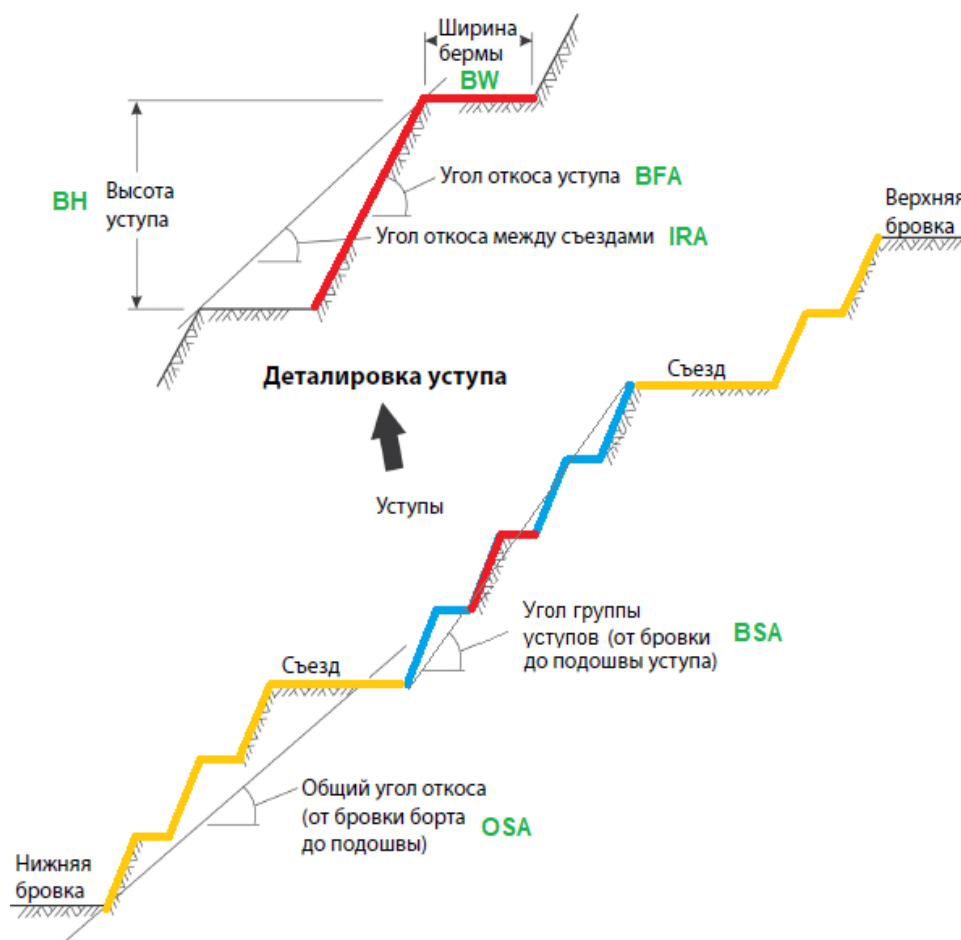


Рисунок 5.1 – Элементы конструкции борта карьера

(масштаб откоса выделен цветом:

красный – уступ, синий – группа уступа, жёлтый – борт в целом)

Расчёт устойчивости откосов в ПО Digger Slope производится автоматизировано по всем основным схемам деформирования откосов, при этом все возможные экспозиции откосов в границах структурных доменов карьерного поля задаются расчётной сеткой значений азимута и угла падения откосов с шагом до 1 градуса.

Система 3К-моделирования осуществляется последовательным выполнением следующих видов расчёта:

1. Производится совместный расчёт в масштабе уступа:

- Устойчивости откосов уступов,
- Ширины предохранительных берм.

2. На основании оценки устойчивости откосов по:

- Коэффициенту запаса устойчивости,
- Вероятности обрушения,
- Уровню риска,
- Прогнозному объёму обрушений

Выбирается оптимальная конфигурация уступов

- Высота уступа (BH),
- Максимальный устойчивый угол уступа (BFA),
- Минимальная ширина предохранительной бермы (BW).

3. Производится расчёт в масштабе группы уступов (стека):

- Устойчивости откосов стека (IRA, BSA),
- Количества уступов в стеке (SH).

4. На основании результатов сравнительного анализа устойчивости откосов в масштабах уступа и группы уступов выбирается оптимальная конфигурация уступов и стеков (участок борта между съездами).

5. Осуществляется районирование карьерного поля по:

- Механизмам деформирования откосов,
- Параметрам откосов,
- Геомеханическим рискам,
- Потенциально опасным участкам на бортах карьера.

При наличии проектного контура все расчёты также выполняются на его откосах. Результаты анализа при этом отображаются на чаше проектного контура для конкретизации участков оптимизации и управления устойчивостью откосов карьера.

5.1 Исходные данные

Для разграничения областей породного массива с различными технологическими и горно-геологическими условиями вводится специальная зональность массива по характерным геологическим признакам и геомеханическим свойствам массива. В карьерном поле выделяются расчётные домены по данным литолого-структурного, геомеханического и гидрогеологического моделирования, а также по технологическим условиям отработки месторождения (Рисунок 5.2).

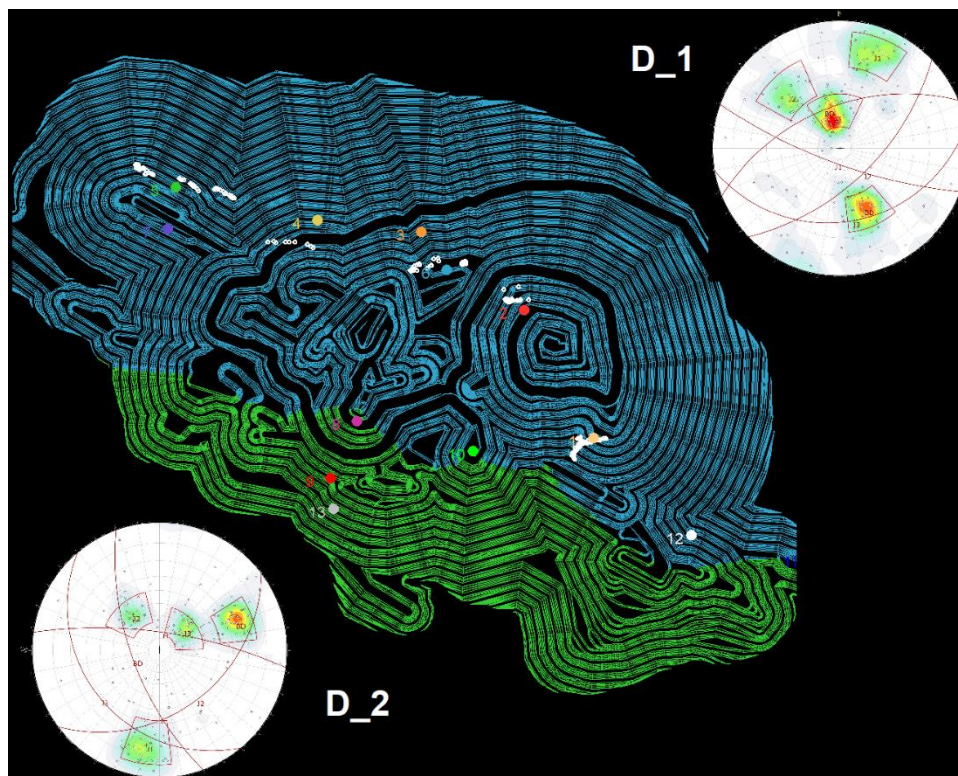


Рисунок 5.2 – Расчётные домены

Для каждого домена определяются характерные параметры, которые служат входными данными для выполнения расчётов устойчивости откосов карьера:

- Физико-механические свойства пород (объёмный вес, прочность),
- Характеристика трещиноватости (частота, плотность),
- Ориентация геологических структур (системы трещин, слоистость).

Исходные данные необходимые для проведения расчётов в ПО Digger Slope формируются в виде таблиц Excel и импортируются в программу. В качестве примера на рисунках (Рисунок 5.3, Рисунок 5.4) проиллюстрировано содержание файла исходных данных, состоящего из двух листов:

- Параметры доменов;
- Свойства систем трещин.

Структурный домен	Выборка азимута падения			Геометрия откоса			Степень ответственности				Свойства породного массива					Свойства развала		Параметры бермы		
	Наименьшее, °	Наибольшее, °	Шаг, °	Проектная высота откоса, м	Проектная ширина бермы, м	Угол наклона бермы, °	Проектирование доработки	Наличие ответственных сооружений	Безлюдная технология	Тяжесть последствий	Объемный вес, т/м ³	Размер блока, м	Коэффициент размягчения	Сцепление в образце, МПа	Угол внутреннего трения в образце, °	Коэффициент развала	Угол ест. откоса, °	Срок Службы Бермы, лет	Минимальная ширина для оборудования, м	Эффективная ширина, м
DOMAIN	FROM	TO	STEP	BH	BW	UFA	FIN	PEC	UMT	CSF	G	BS	Ksof	COH_S	PHI_S	SF	AR	Btime	Beq	Bef
D_1	270	150	20	30	10	0	0	0	0	1	2.70	0.21	0.67	15.7	34	1.5	38	18	4.5	2
D_2	150	270	10	30	10	0	1	0	0	1	2.80	0.15	0.85	14.1	37	1.5	38	3	4.5	0

Рисунок 5.3 – Параметры доменов

Структурный домен	Система трещин	Масштаб системы	Ориентация		Разброс		Прочность по трещине	
			Угол падения, °	Азимут падения, °	Разброс по углу падения, °	Разброс по азимуту падения, °	Сцепление, т/м ²	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 5.4 – Свойства систем трещин

Таблица *Параметры домена* содержит 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 критериев приемлемости и уровней риска в соответствии с ФНП №439 [1]):
 - Проектирование доработки (1 – да, 0 - нет);
 - 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/м³;
 - Размер породного блока, м;
 - Коэффициент размягчения;
 - Сцепление в образце, МПа;
 - Угол внутреннего трения в образце, °;
- Характеристики развала породы после обрушения:
 - Коэффициент развала;
 - Угол естественного откоса, °;
- Параметры бермы:
 - Срок службы бермы, лет;
 - Минимальная ширина для оборудования, м;
 - Эффективная ширина, м.

Таблица *Свойства систем трещин* содержит 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/м²;
 - Угол внутреннего трения, °.

Дополнительно в ПО Digger Slope осуществляется учёт обводнённости откосов, сейсмической активности района и действия внешних нагрузок, в том числе, моделирующих пригрузку от техники и анкерное крепление откосов.

5.2 Базовый расчёт

Совместный расчёт устойчивости откосов и предохранительных берм производится в границах доменов автоматизировано по сетке значений азимута и угла падения откосов с шагом до 1 градуса.

Из всех видов обрушений, сформировавшихся в узле расчётной сетки (на определённой экспозиции откоса), выбирается тот вид, который наиболее неустойчив (с минимальным коэффициентом запаса и/или максимальной вероятностью обрушения) и, следовательно, контролирует устойчивость уступа; по критериям приемлемости [1] выбирается максимальный устойчивый угол уступа на данной экспозиции откоса.

Результатом расчётов является Кинематическая Карта Карьера (ЗК), которая представима в виде таблиц и стереограмм с отображением всех расчётных величин. Пример результатов ЗК-моделирования приведён на рисунке (Рисунок 5.5)

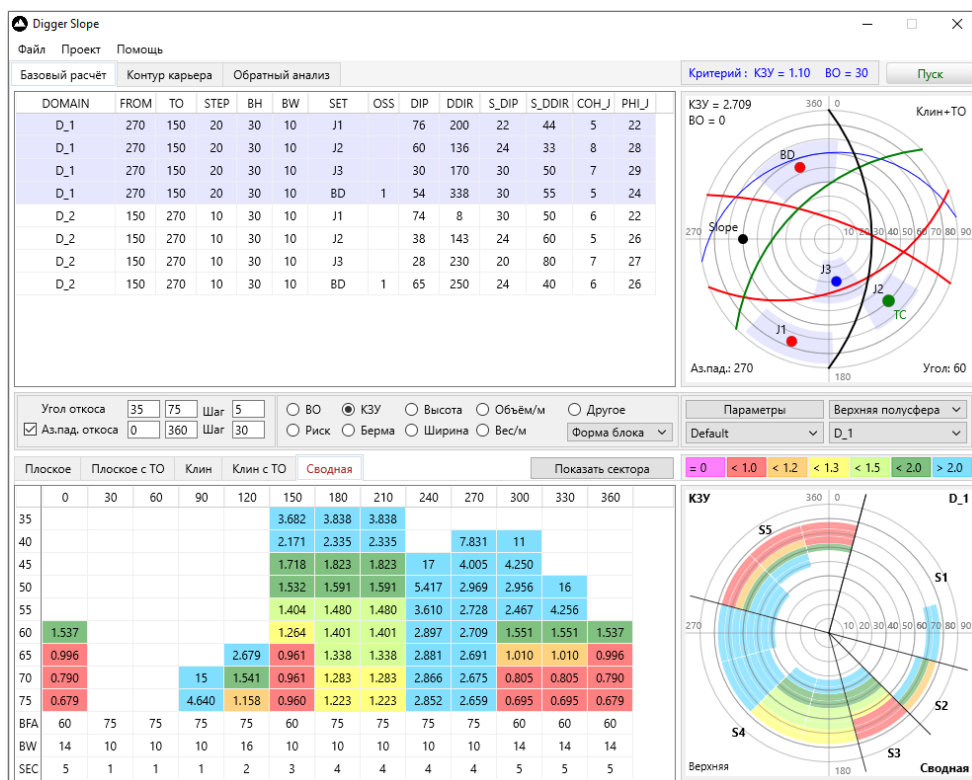


Рисунок 5.5 – Результат ЗК-моделирования

В результате расчётов Кинематическая Карта Карьера включает в себя:

- Оценку устойчивости откосов по:
 - Коэффициенту запаса устойчивости,
 - Вероятности обрушения,
 - Уровню риска,
 - Прогнозному объёму обрушений;

- Рекомендуемую конфигурацию уступов:
 - Высота уступа (BH),
 - Угол уступа (BFA),
 - Ширина бермы (BW),
 - Угол откоса группы уступов (IRA).

Для проектирования контура карьера выполняется районирование по параметрам конструкции бортов карьера (по параметрам уступов и берм). Для проведения районирования по конструктивным параметрам карьеров используются районы, выделенные по механизмам деформации откосов. Границы районирования по природным факторам и по механизмам деформации прибортового массива не всегда совпадают с границами районирования по конструктивным параметрам карьера. В одном и том же домене при различных азимутах простирания откосов могут быть получены различные конструктивные параметры откосов.

После проведения расчетов по всем данным районам осуществляется выбор и разграничения по параметрам откосов для всего карьерного поля. Для районирования по параметрам бортов карьера используется конструктивный генеральный угол борта карьера, рассчитанный по параметрам уступов и берм. Основными результатами районирования по конструктивным параметрам борта является выделение секторов карьерного поля с одинаковыми параметрами откосов. При работе в ПО Digger Slope после выполнения базового расчёта программа автоматически формирует сектора, объединяя соседние азимуты откосов, если на них рекомендованная конфигурация уступов одинаковая. Результаты формируются в виде таблиц с содержанием, представленным в таблице (Таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Поля вывода результатов кинематического анализа в ПО Digger Slope

Domain	Структурный домен
Sector	Сектор (участок борта карьера с одинаковой конфигурацией уступа*)
From	Начальный азимут падения откоса уступа в секторе, град.
To	Конечный азимут падения откоса уступа в секторе, град.
BFA	Максимальный устойчивый угол откоса уступа, град.
BW	Минимальная ширина бермы, м
BH	Высота уступа, м
IRA	Угол между съездами или геотехническими бермами, град.
Vol/m	Прогнозный объём вывалов на метр простирания борта, м ³ /м

КЗУ	Коэффициент запаса устойчивости
ВО	Вероятность обрушения
Риск	Уровень риска
*) Конфигурация уступа – Высота уступа (ВН), угол откоса уступа (ВФА) и ширина бермы (ВВ)	

Графически результат районирования представляется в виде стереограмм секторов проектирования; пример изображён на рисунке (Рисунок 5.6).

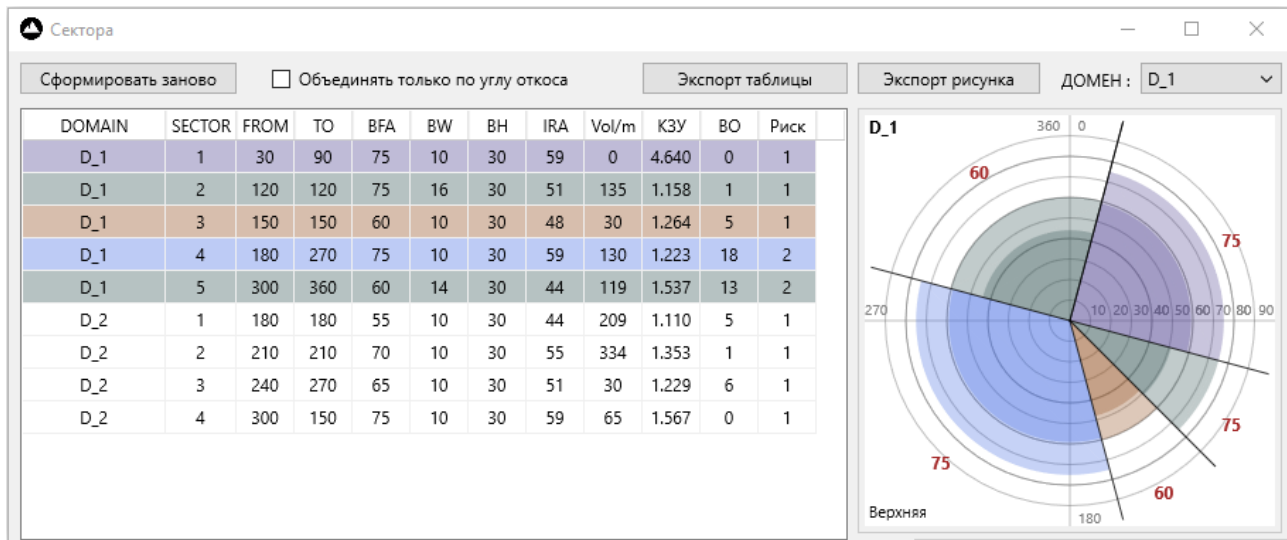


Рисунок 5.6 – Сектора проектирования

При наличии проектного контура карьера все расчёты также выполняются на его откосах и результаты отображаются сразу на чаше карьера (Рисунок 5.7).

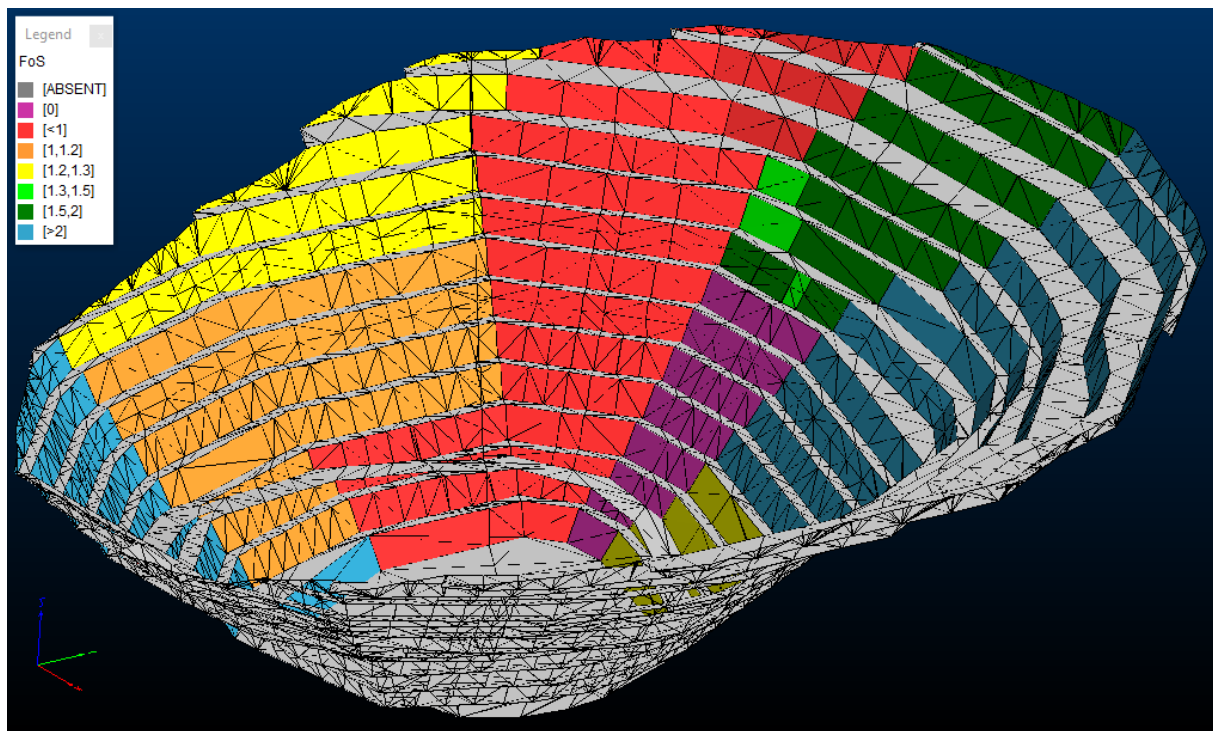


Рисунок 5.7 – Кинематическая карта карьера

По результатам расчётов оценивается потенциал для оптимизации бортов карьера на основе совместного анализа устойчивости в масштабе уступа и группы уступов (участков борта между съездами).

Все полученные результаты расчётов в процессе 3К-моделирования служат исходными данными для последующего этапа проектирования – построения конструктивного контура карьера и проведения поверочных расчётов устойчивости в масштабе генерального борта карьера в целом методами теории предельного равновесия (МТПР) или конечных (МКЭ) и конечно-дискретных элементов (МКДЭ) при моделировании приконтурного массива как сплошной среды, имеющей свойства трещиноватого породного массива.

Список используемых 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. Ильясов Б.Т., Солуянов Н.О., Садинов Ш.М., Содиков И.Ю. Оптимизация бортов карьера Бесапантау на основе 3К-моделирования в программном комплексе Digger Slope. // Горный вестник Узбекистана. 2023. № 1. С. 4-12
4. Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah. Rock Slope Engineering: Civil and mining. 4th edition. Taylor & Francis Group, 2004
5. Защита железнодорожного пути от горных обвалов и осыпей. Ройнишвили Н.М. Изд-во «Транспорт», 1973, с. 1-304
6. Persistence and Bench Design. RocPlane Theory Manual. Rocscience Inc., 2019.
7. Gibson, W, de Bruyn, I A and Walker, D J H, 2006. Considerations in the optimisation of bench face angle and berm width geometries for open pit mines, in Proceedings of The South African Institute of Mining and Metallurgy International Symposium on Stability of Rock Slopes, Symposium Series S44 Stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering situations, pp. 557 – 579.
8. Gibson, W & Paul, J 2016, Comparison for estimating volume of failed wedges, SRK Consulting (Australasia) Pty Ltd, Perth.
9. 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.
10. Obregon, C., & Mitri, H. (2019). Probabilistic approach for open pit bench slope stability analysis – A mine case study. International Journal of Mining Science and Technology, 29(4), 629-640