



# **Комплексный кинематический анализ для определения параметров уступов, берм и оптимизации бортов карьера в программном комплексе Digger Slope**

Никита Солуянов

Создатель



# Digger Slope

[digger-apps.xyz](https://digger-apps.xyz)

Программный комплекс Digger Slope предназначен для анализа устойчивости и оптимизации бортов карьера позволяющий оценить фактические риски и минимизировать технологические затраты при отработке месторождения.

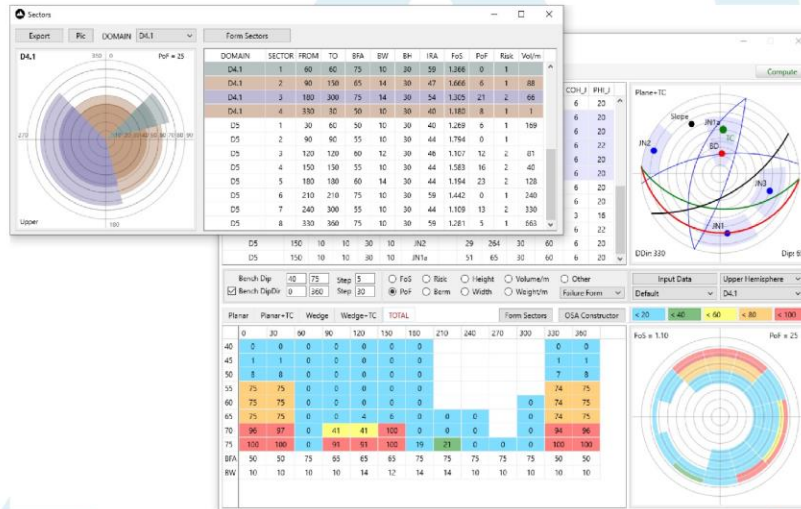
Осуществляет импортозамещение и модернизацию целого ряда программ:

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

Все расчёты в программе выполняются в соответствии с международными и российскими стандартами:

- 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. 2015 г.
- ФНП «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». 2020 г.

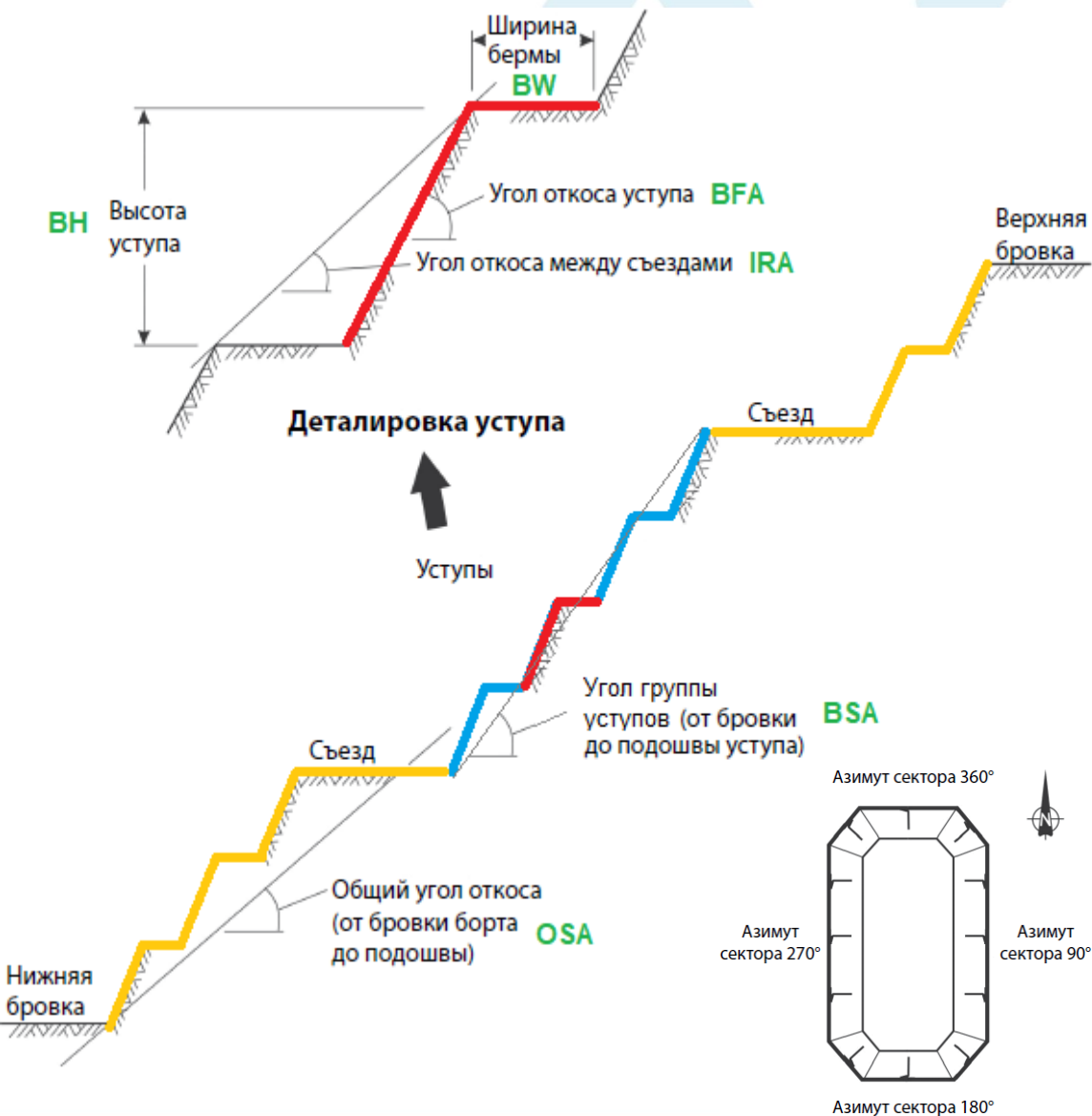
Программа сертифицирована в РОССТАНДАРТе.



The screenshot shows the 'Input Data' and 'Project Settings' windows. The 'Input Data' window has tabs for Domain Parameters, Conditions, Limits, Berm, and Variations. It includes fields for Bench Surface Condition, Slope Surface Cover, and Berm Surface Cover. The 'Project Settings' window shows a risk matrix table with columns for Risk Prob., min PoF, max PoF, and Consequence Severity. It also includes a section for Sliding Wedge (Bsw) and a section for Adjustment of Spill Width (Bspill).

# Общая схема расчёта бортов

От уступов к генеральному борту.



Слабые породы



Генеральный борт



Участок борта между съездами



Уступ

Породы средней прочности и крепкие



Уступ

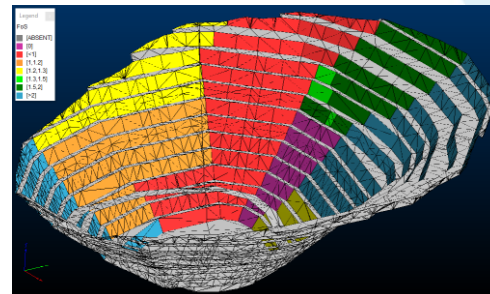
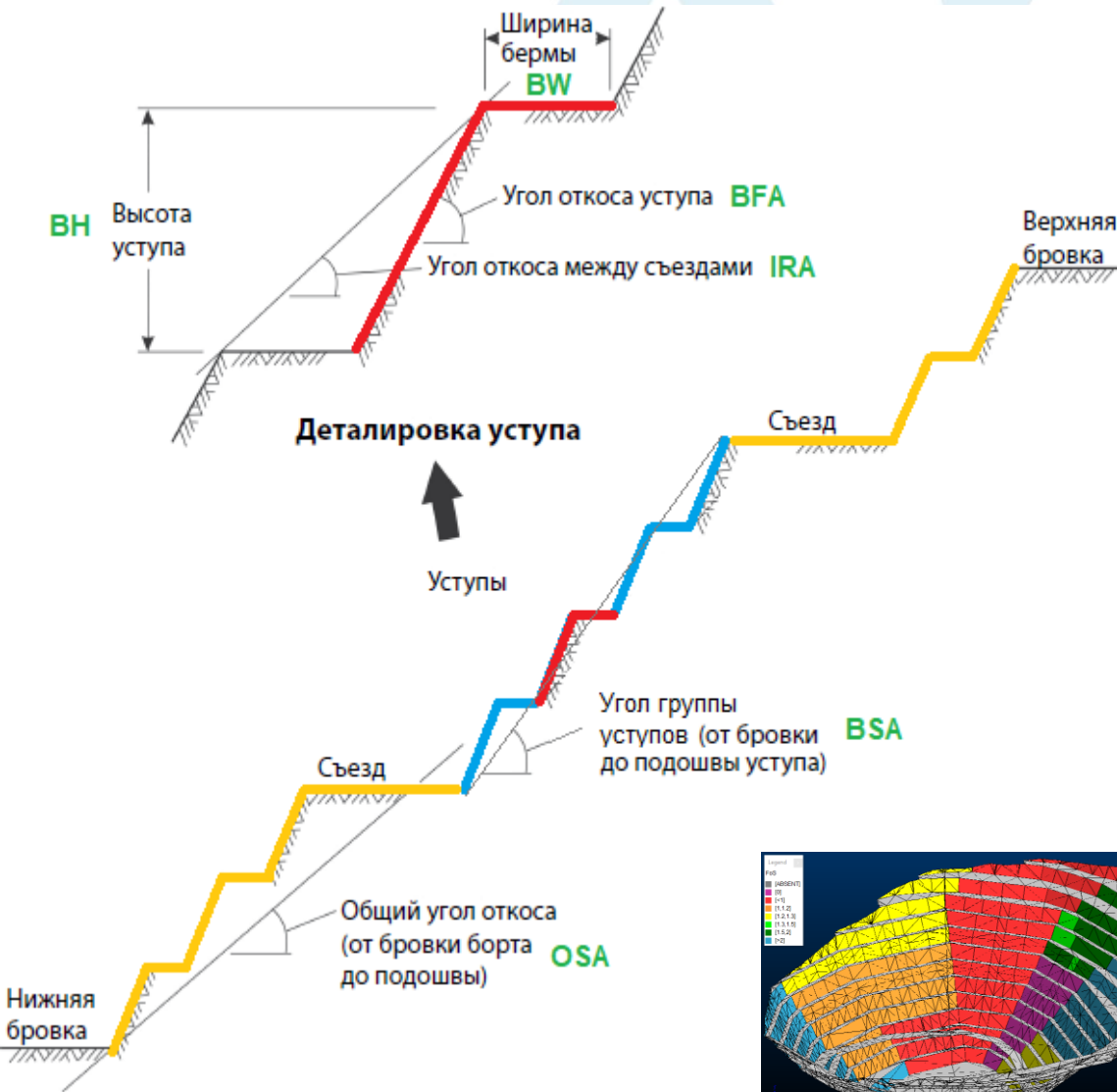


Участок борта между съездами



Генеральный борт

# Система 3К-моделирования



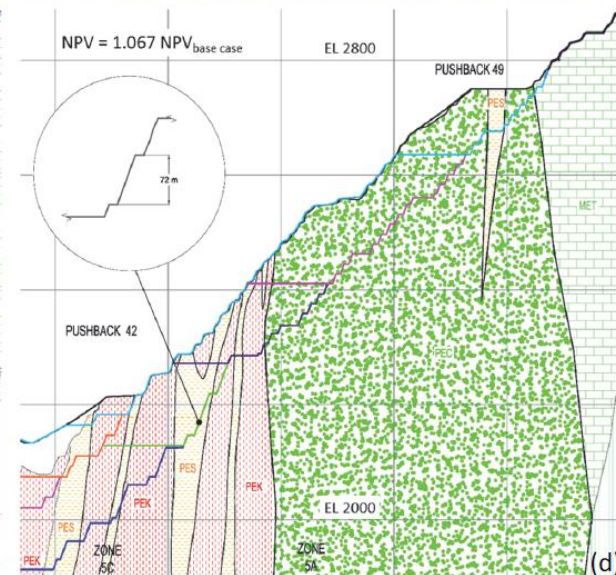
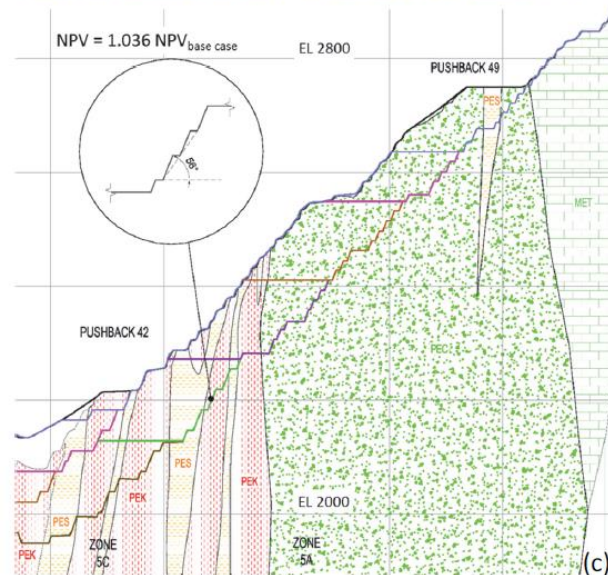
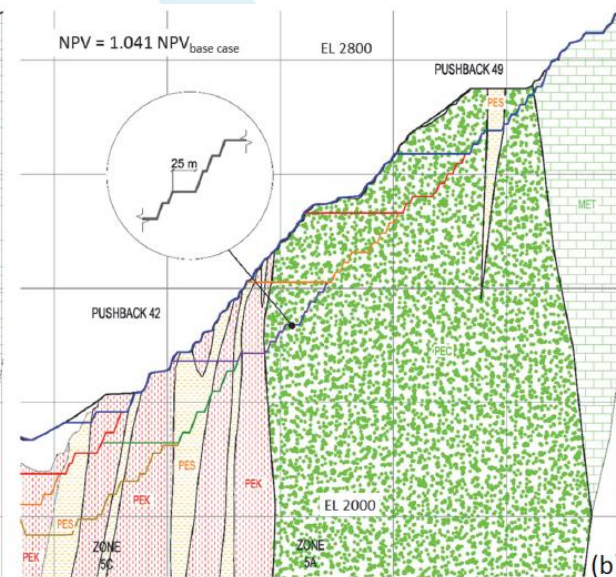
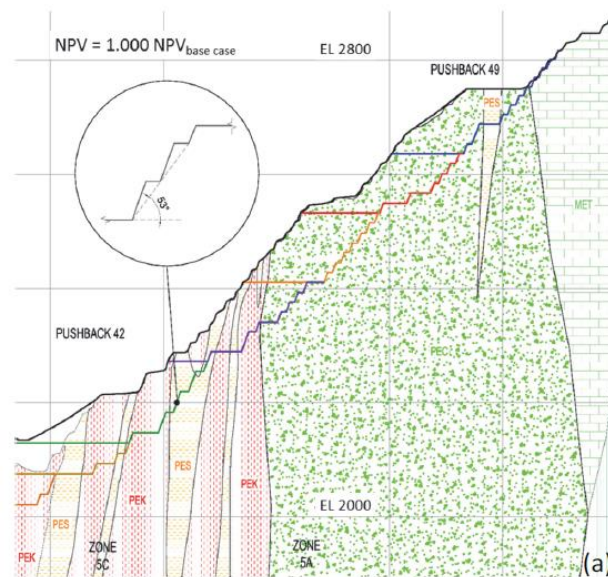
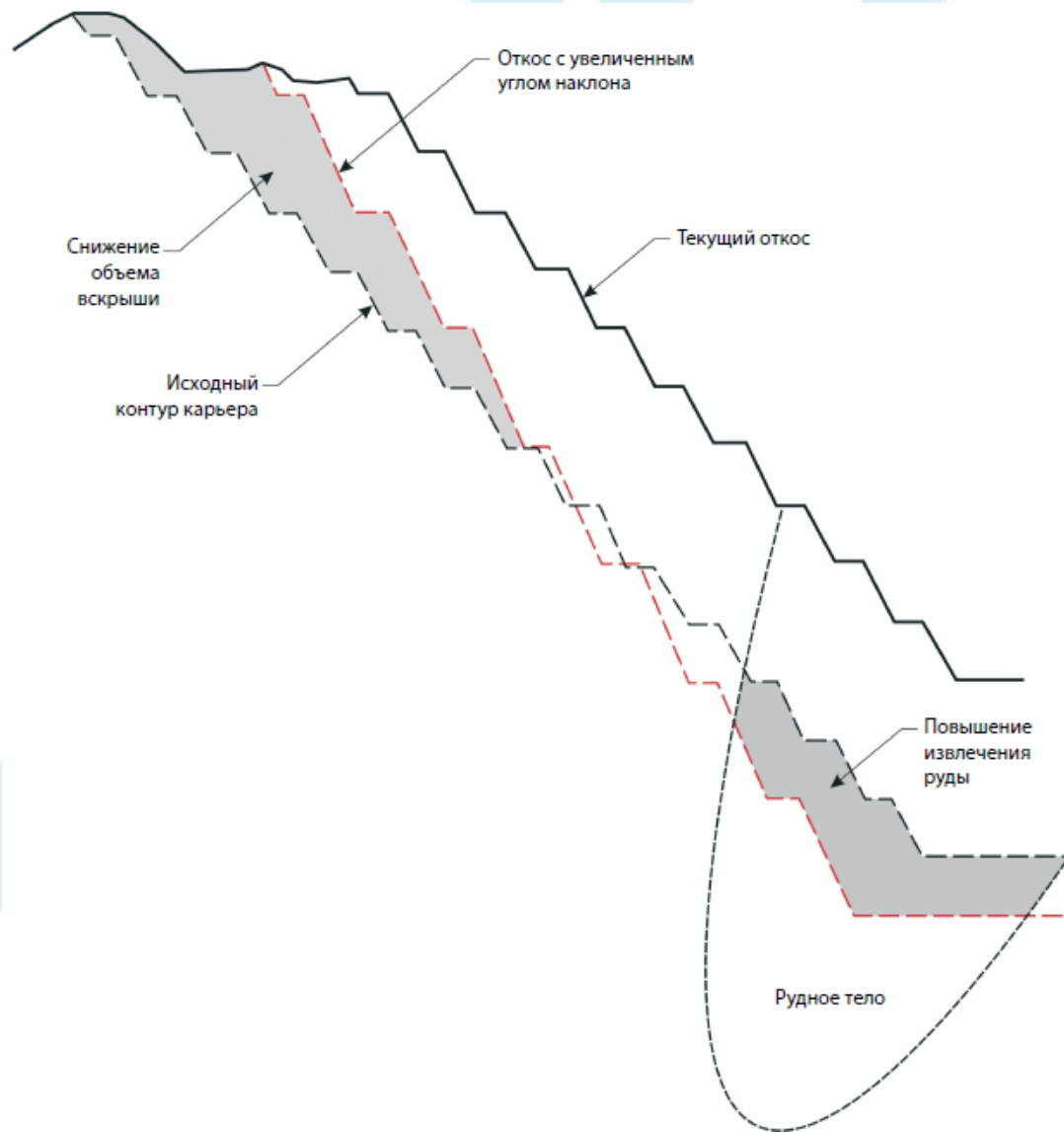
		Масштабный уровень		
		Уступ	Участок борта между съездами	Генеральный борт
1	Определение устойчивой конфигурации уступов	Комплексный кинематический анализ		
		BN, BFA, BW	IRA	
2	Оценка устойчивости группы уступов		С учётом влияния крупных геологических структур массива	
			BSA	
3	Эмпирический анализ устойчивости откосов	По рейтинговым классификациям, учитывающим свойства массива пород и горно-геологические условия		
		Qslope	SMR	MRMR
		BFA	BSA	COSA
4	Оценка предельного устойчивого генерального угла борта карьера			По методикам Фисенко и Хука, с учётом криволинейности контура в плане
				POSA
5	Построение кинематической карты карьера	1. Рекомендованная конфигурация откосов 2. Оценка устойчивости откосов - Коэффициент запаса устойчивости - Вероятность обрушения - Уровень риска 3. Прогнозный объём обрушений 4. Районирование по параметрам откосов 5. Прогноз потенциально опасных участков на бортах карьера		



# Основные задачи 3К-моделирования

Результаты 3К-моделирования	Green Field	Проектирование	Эксплуатация
1. Рекомендованная конфигурация откосов	Оценка рентабельности отработки месторождения	Построение чаши NPV с учётом инженерно-геологических условий месторождения	Оптимизация промежуточных контуров карьера (pushback)  Защита ПРГР
2. Оценка устойчивости откосов: - Коэффициент запаса устойчивости - Вероятность обрушения - Уровень риска	Оптимизация объёмов отработки запасов	Оптимизация объёмов вскрыши	Оптимизация буровзрывных работ
3. Прогнозный объём обрушений	Оценка рисков	Оптимизация постановки откосов в конечное положение	Оптимизация укрепления откосов
4. Районирование карьерного поля по параметрам откосов	Анализ стратегий отработки «агрессивно – консервативно»	Оценка достаточности исходных данных	Оценка степени достоверности моделирования
5. Выявление потенциально опасных участков на бортах карьера		Исключение неблагоприятных экспозиций откосов	Составление программы мониторинга устойчивости откосов
6. Проведение обратных расчётов			Уточнение исходных данных и калибровка результатов расчёта

# Оптимизация бортов карьера



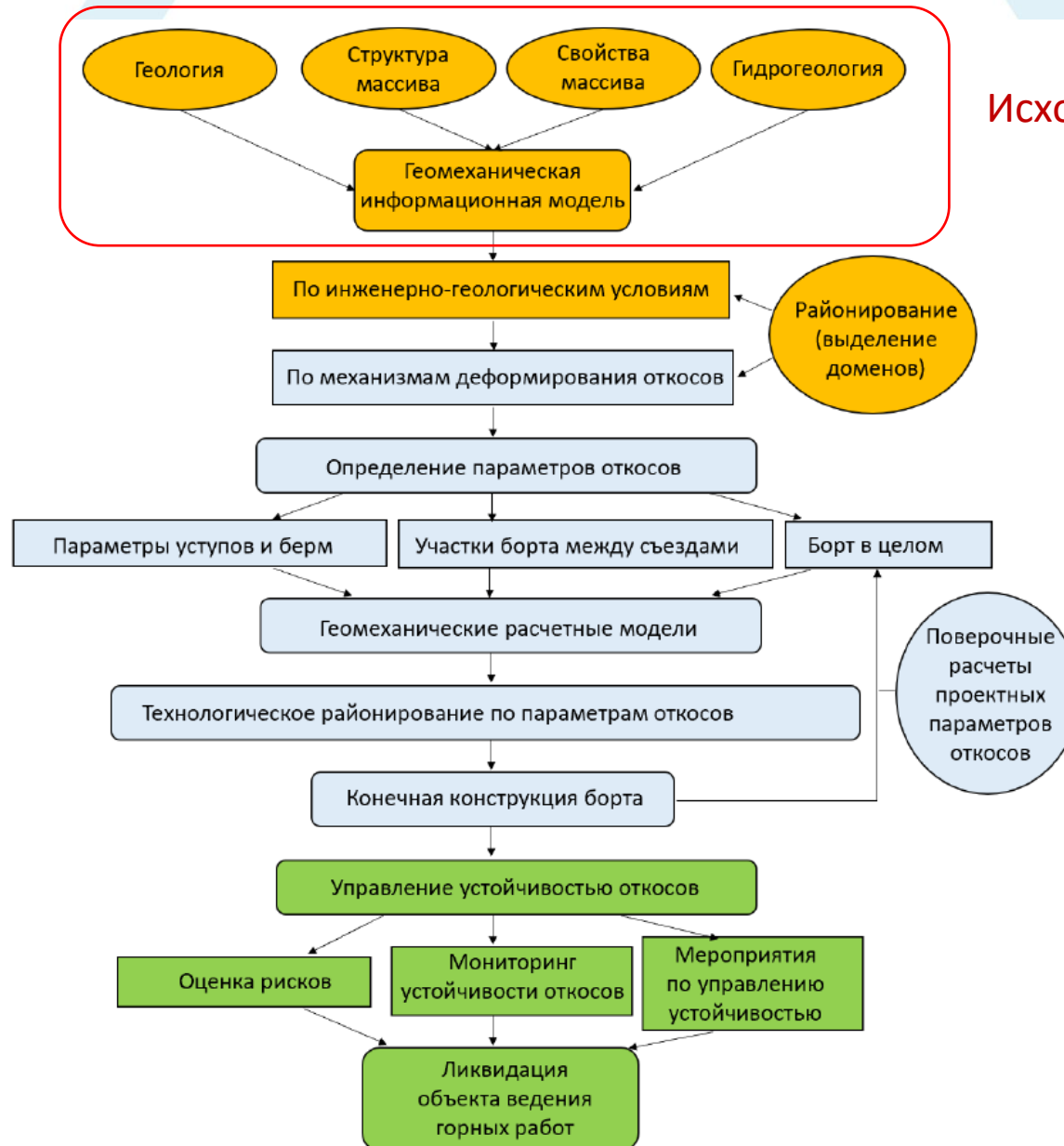
## Структура геомеханического обеспечения устойчивости бортов и уступов

Создание моделей  
массива

Исходные данные

Анализ устойчивости  
откосов

Реализация проекта



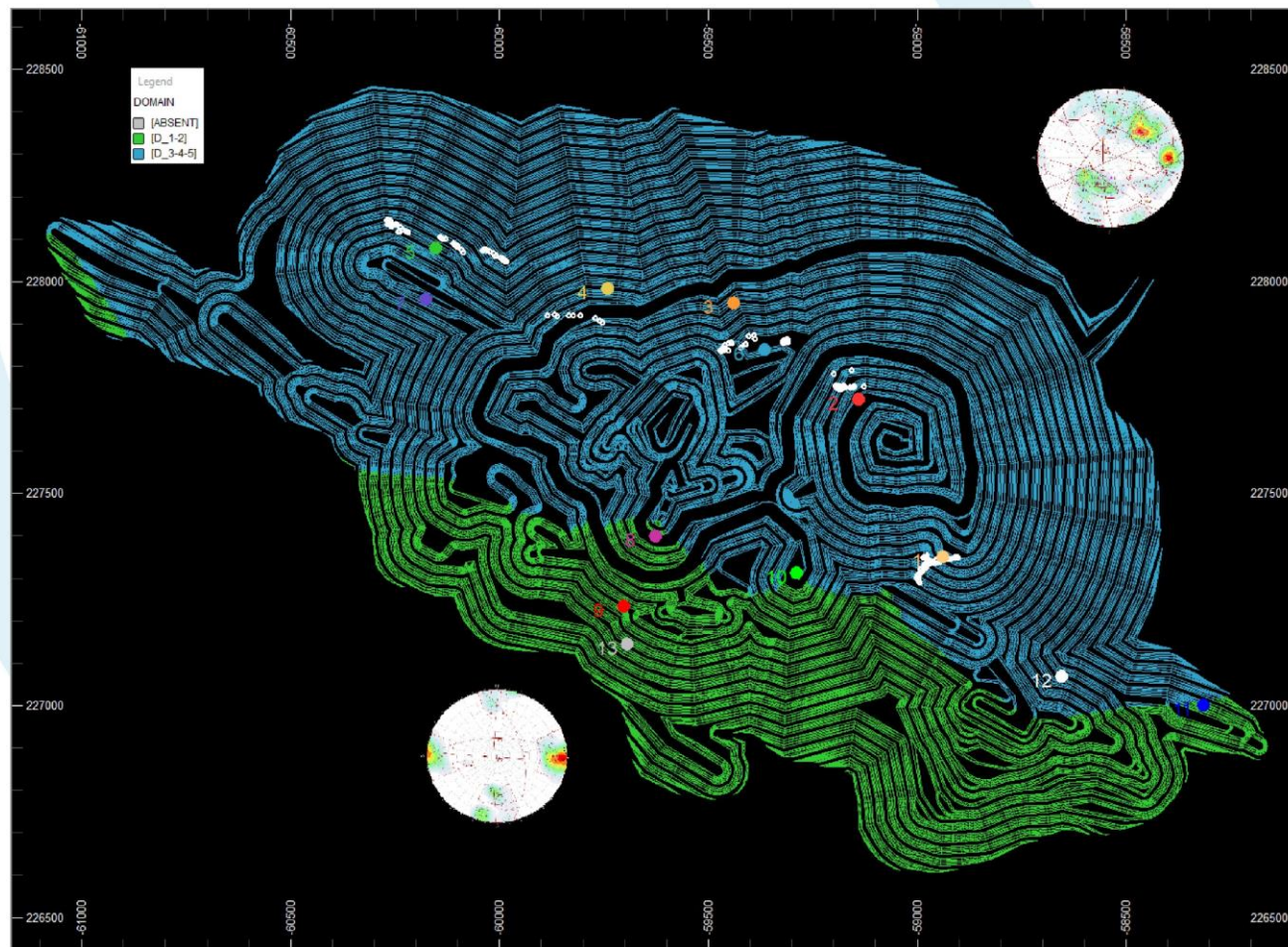
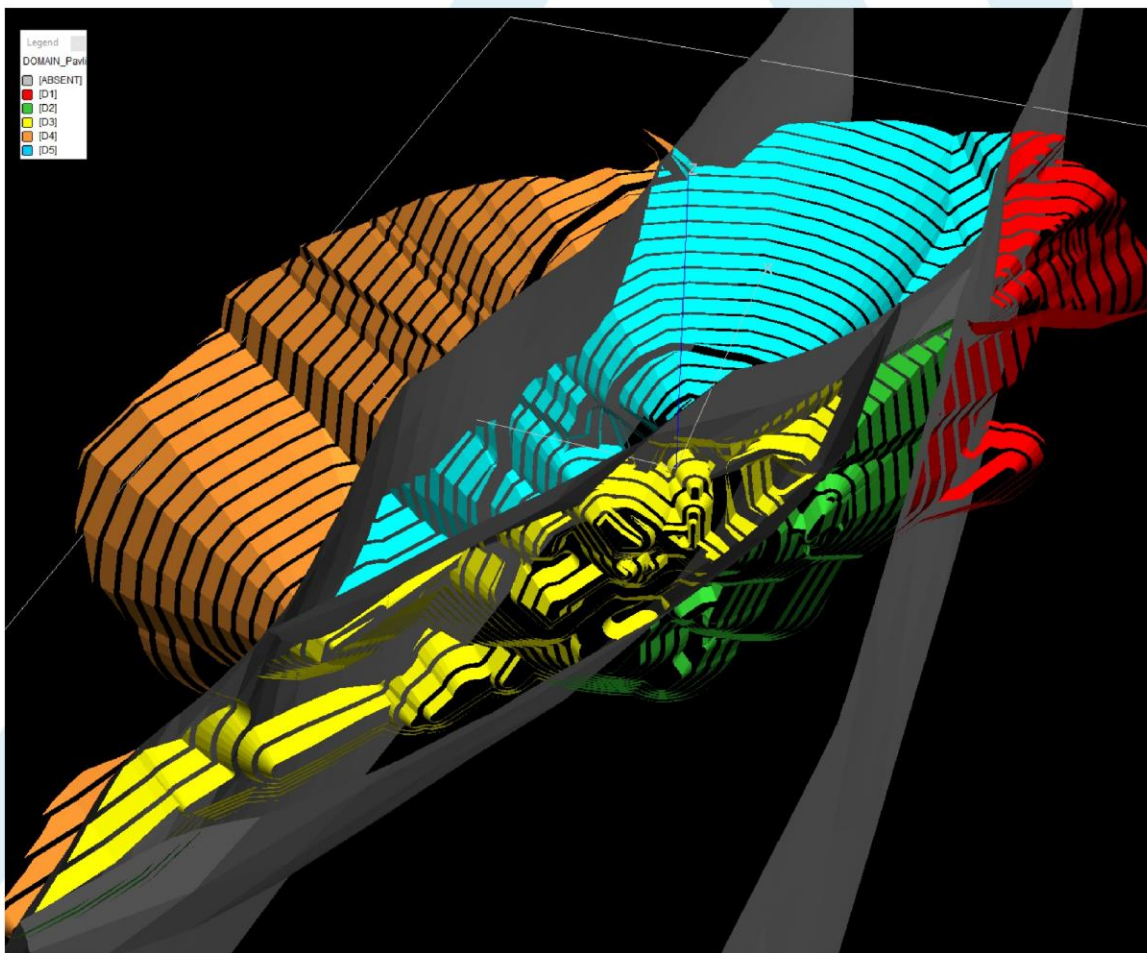
# Исходные данные

Система 3К-моделирования							
Исходные данные	Выделение структурных доменов	Определение устойчивой конфигурации уступов			Оценка предельного устойчивого генерального угла борта карьера	Построение оптимального контура карьера	
		Комплексный кинематический анализ		Эмпирический анализ устойчивости углов BFA, IRA, BSA			
		Высота уступа	Угол уступа				Ширина бермы
	DOMAIN	BH	BFA	BW	Qslope, SMR, MRMR	POSA	OSA
Литолого-структурная модель	Литология						
	Тектоника						
Картирование трещин		Угол и азимут падения			Количество систем трещин JN		
		Длина трещин					
		Свойства стенок JR, JA					
Лаборатория		C, Phi по трещинам		C, Phi пород	Прочность на сжатие		
		Объемный вес		Коэффициент размягчения	Коэффициент хрупкости		
Геомеханическое картирование				Размер блока RQD / FF / SD	Полное описание A1, A45, JCON, ...		
Гидрогеология		Обводнённость откосов			Фактор JW	УГВ	
Технико-экономические параметры						Глубина отработки	Каркас рудных тел
					Ширина дорог и т.п.		
Контур карьера						Криволинейность в плане	



# Исходные данные

Структурные домены выделяются по крупным тектоническим разломам и геологическому строению массива





# Исходные данные

Диаграмма трещиноватости для домена D\_1-2

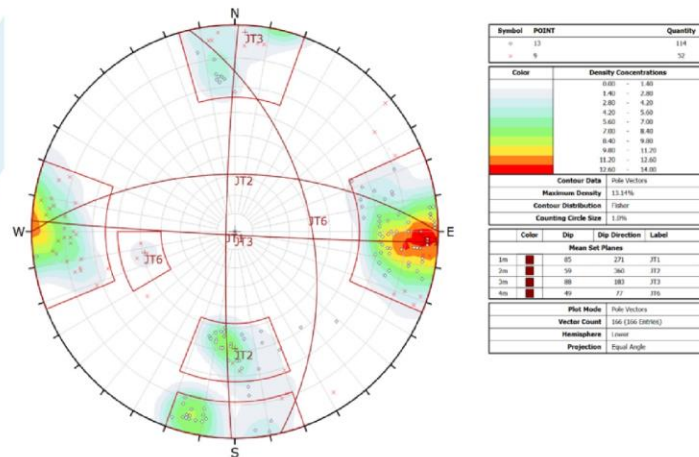
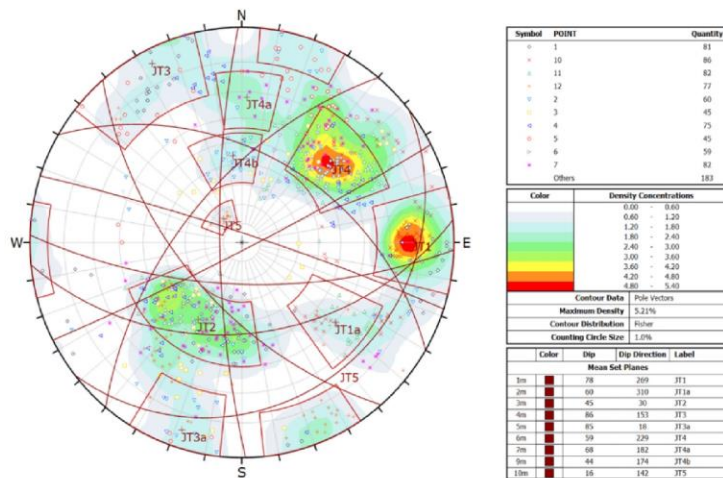


Диаграмма трещиноватости для домена D\_3-4-5



Свойства систем трещин по доменам

Домен	Система трещин	Ориентация системы трещин		Разброс		Свойства по трещинам	
Название	Название	Угол падения, °	Азимут падения, °	По углу падения, °	По азимуту падения, °	Сцепление, т/м <sup>2</sup>	Угол внутреннего трения, °
DOMAIN	SET	DIP	DIPDIR	S_DIP	S_DDIP	COH_J	PHI_J
D_1-2	JT1	85	271	25	45	7	23
D_1-2	JT2	59	360	25	45	7	23
D_1-2	JT3	88	183	45	40	7	23
D_1-2	JT6	49	77	20	30	7	23
D_3-4-5	JT1	78	269	25	25	7	23
D_3-4-5	JT1a	60	310	25	25	7	23
D_3-4-5	JT2	45	30	30	80	7	23
D_3-4-5	JT3	86	153	30	30	7	23
D_3-4-5	JT3a	85	18	30	25	7	23
D_3-4-5	JT4	59	229	30	40	7	23
D_3-4-5	JT4a	68	182	25	25	7	23
D_3-4-5	JT4b	44	174	25	40	7	23
D_3-4-5	JT5	16	142	15	60	7	23

Параметры доменов

Домен	Выборка азимута падения уступа			Свойства породного массива					Свойства развала	
Название	Наименьшее, °	Наибольшее, °	Шаг, °	Объемный вес, т/м <sup>3</sup>	Размер породного блока, м	Коэффициент размягчения	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °	Коэффициент развала	Угол естественного откоса, град.
DOMAIN	FROM	TO	STEP	G	BS	Ksof	COH_S	PHI_S	SF	AR
D_1-2	0	360	2	2.7	0.22	0.71	10.3	35	1.5	38
D_3-4-5	0	360	2	2.7	0.22	0.71	10.3	35	1.5	38

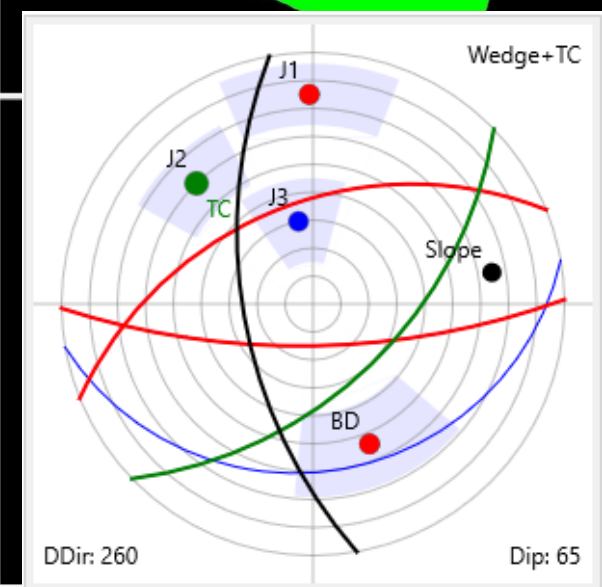
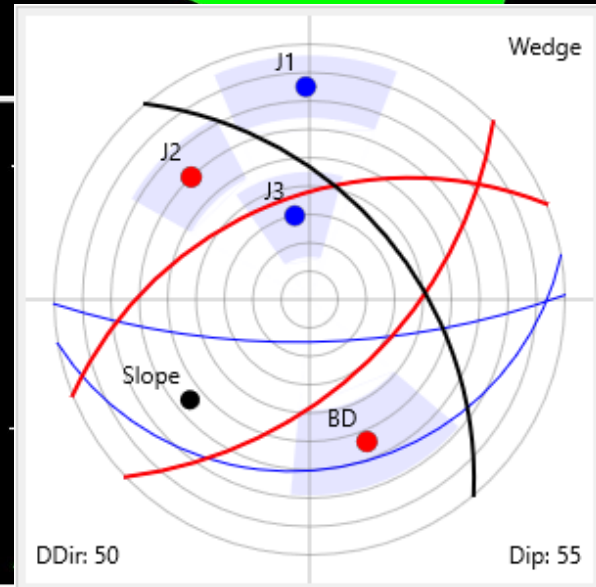
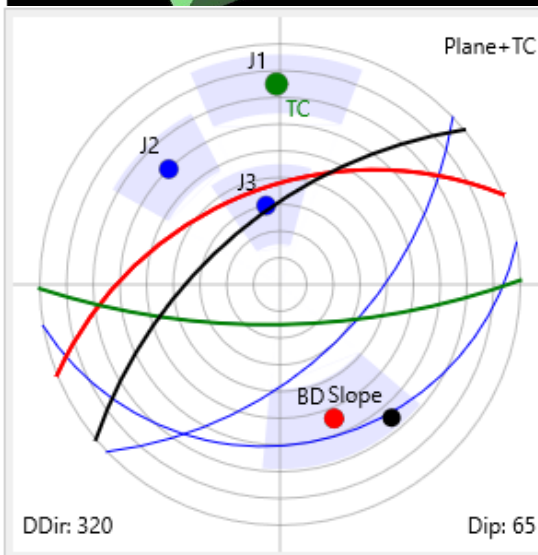
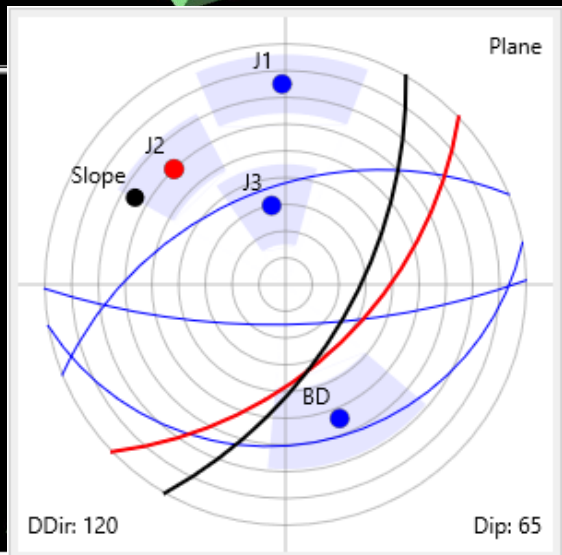
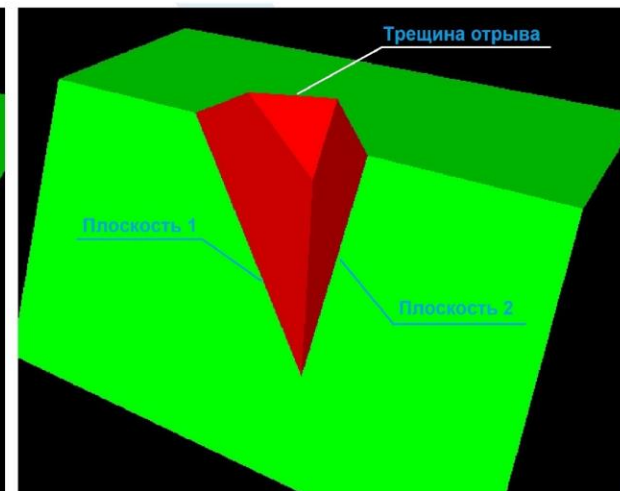
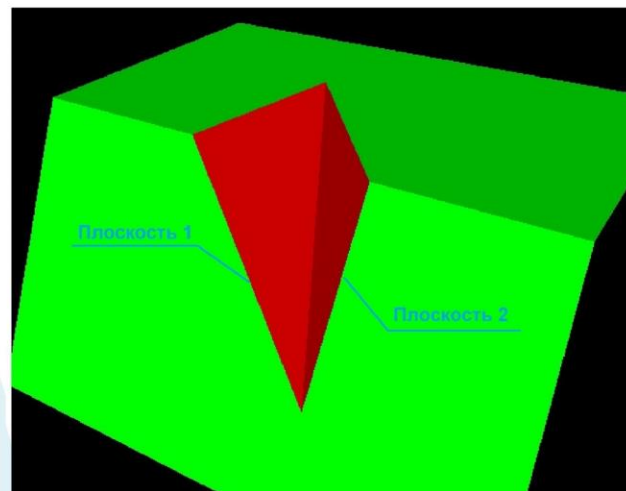
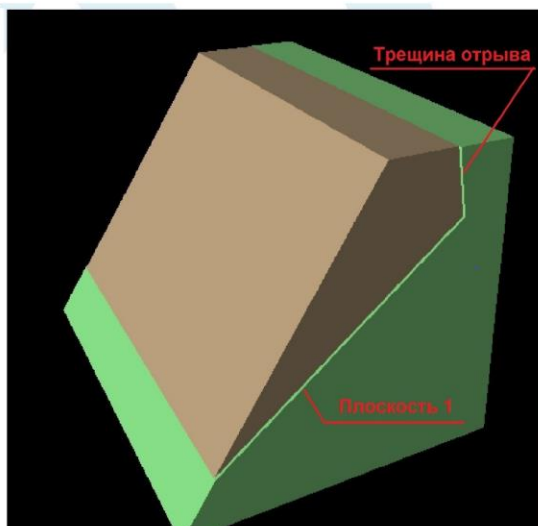
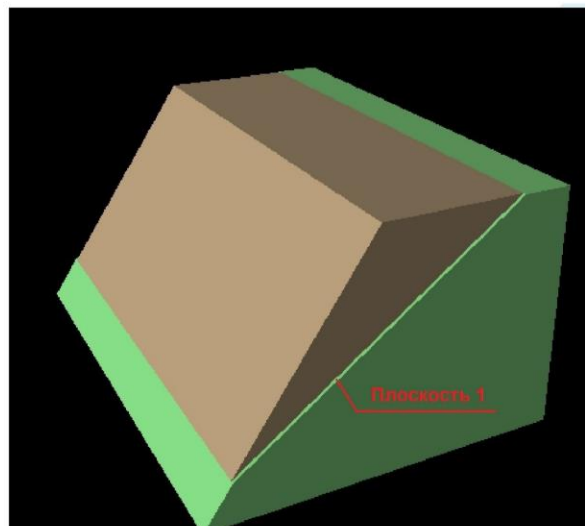
# Симуляция обрушений

Плоское

Плоское с трещиной отрыва

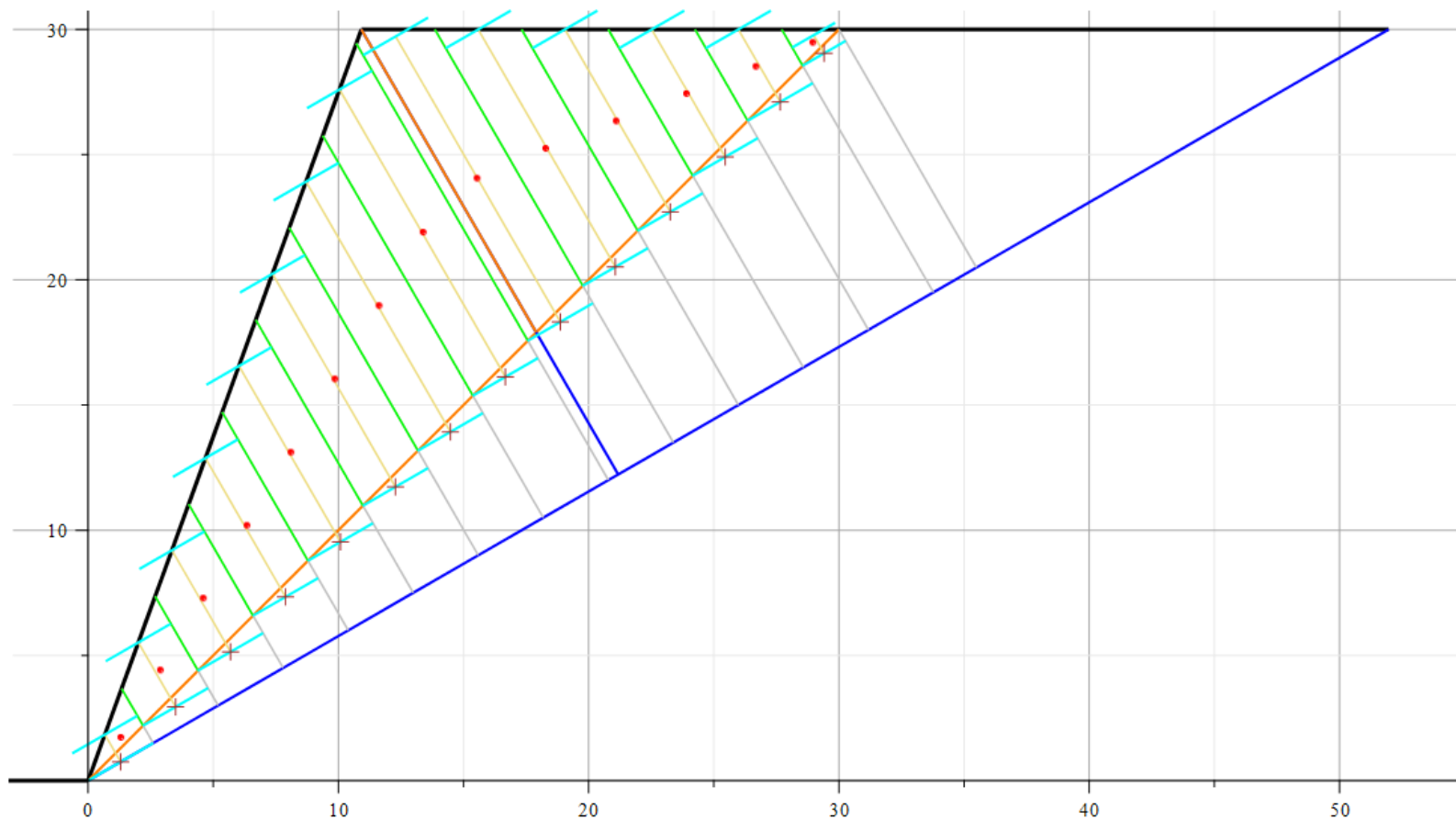
Клиновидное

Клиновидное с трещиной отрыва

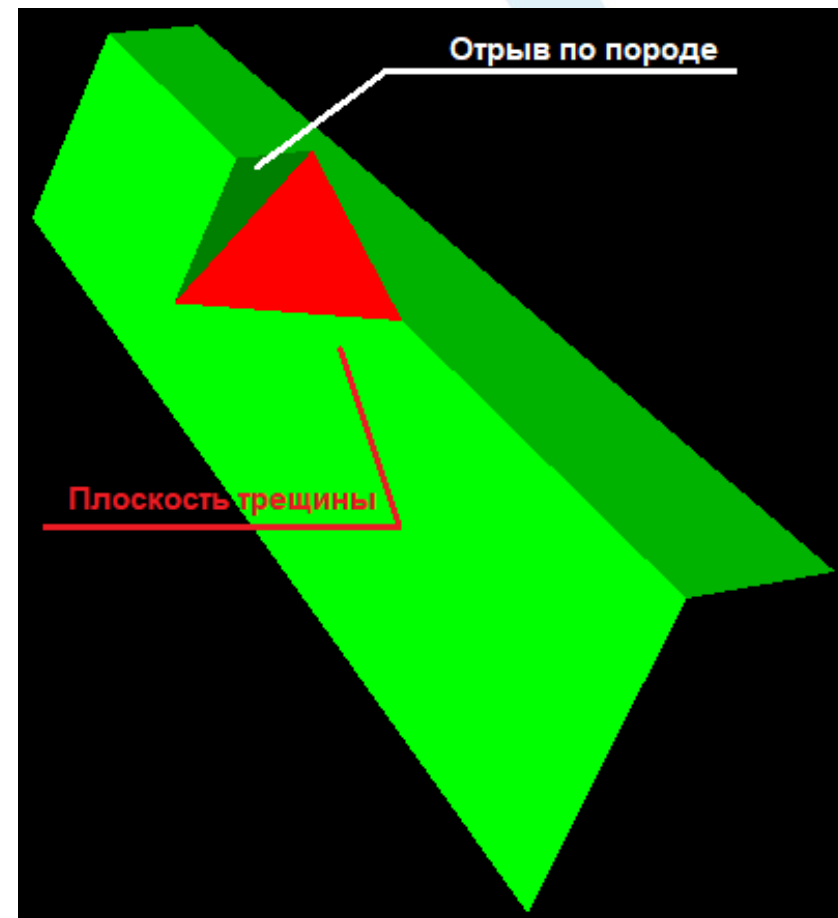


# Симуляция обрушений

Опрокидывание

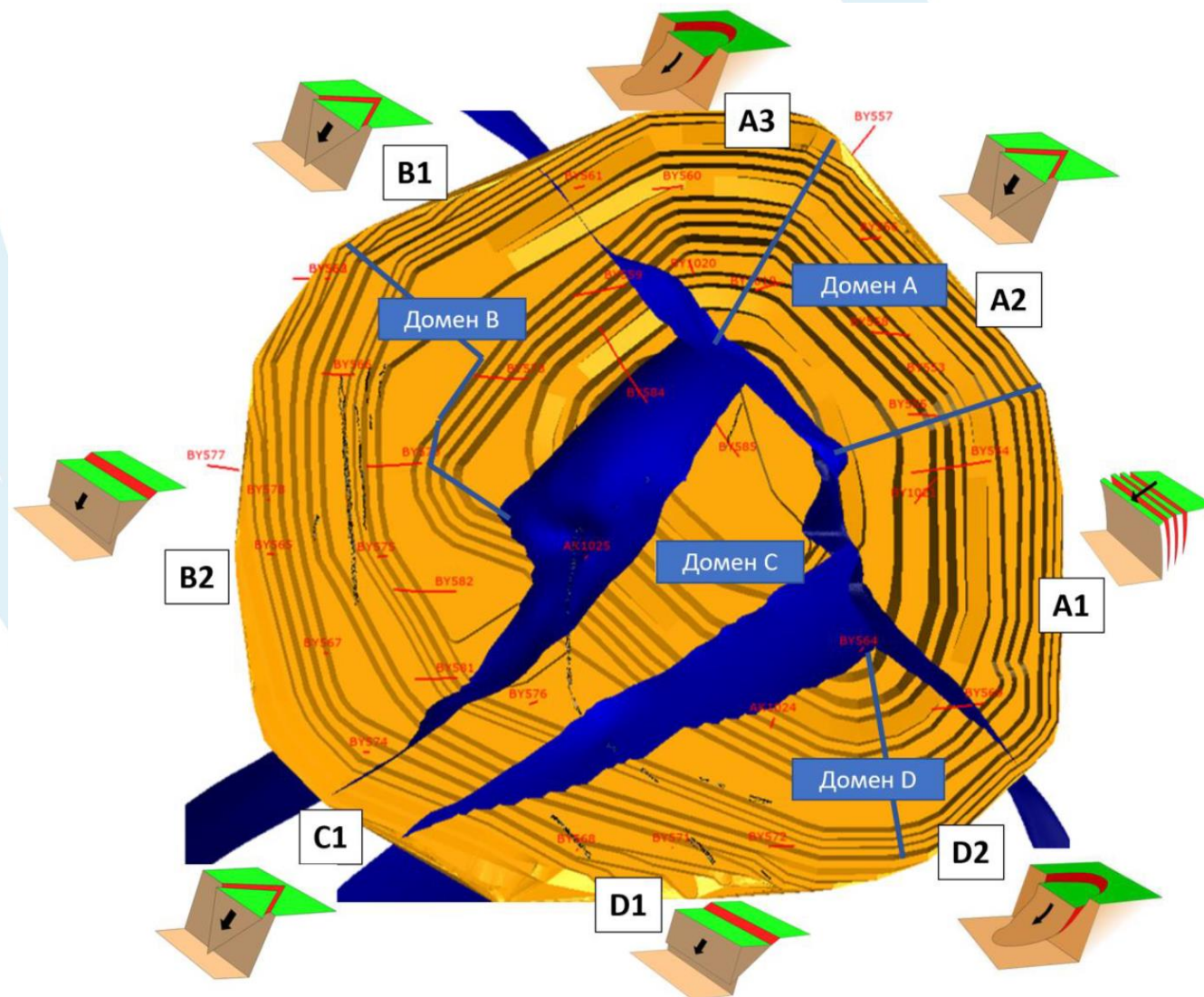
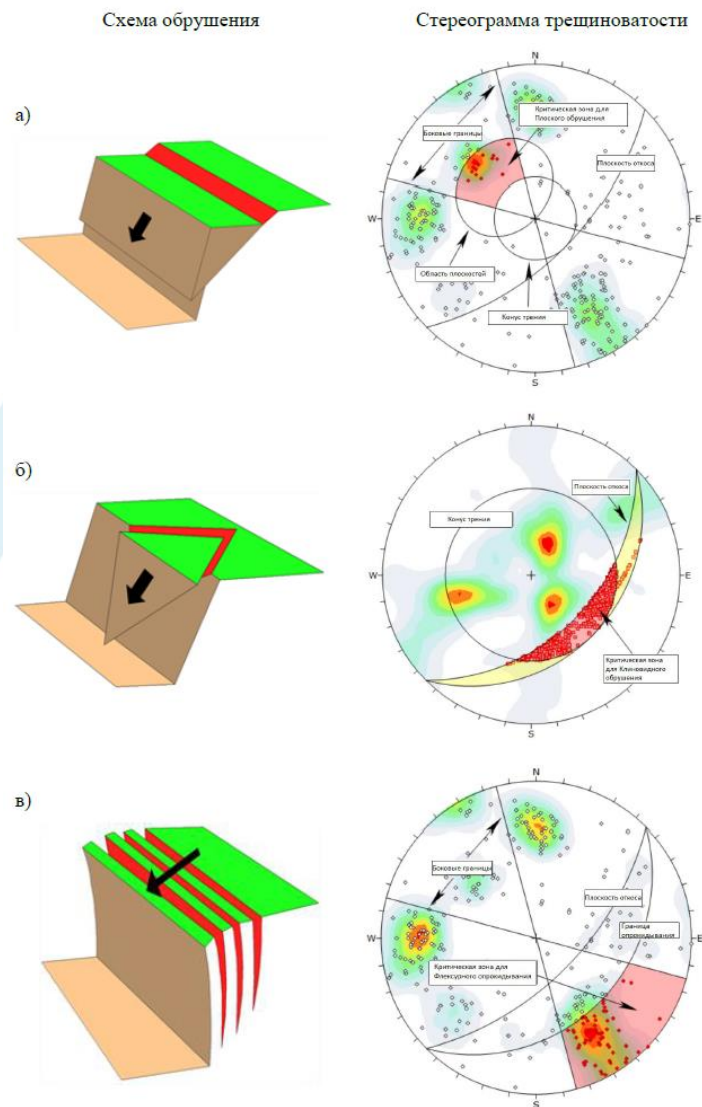


Консольное обрушение (в разработке)

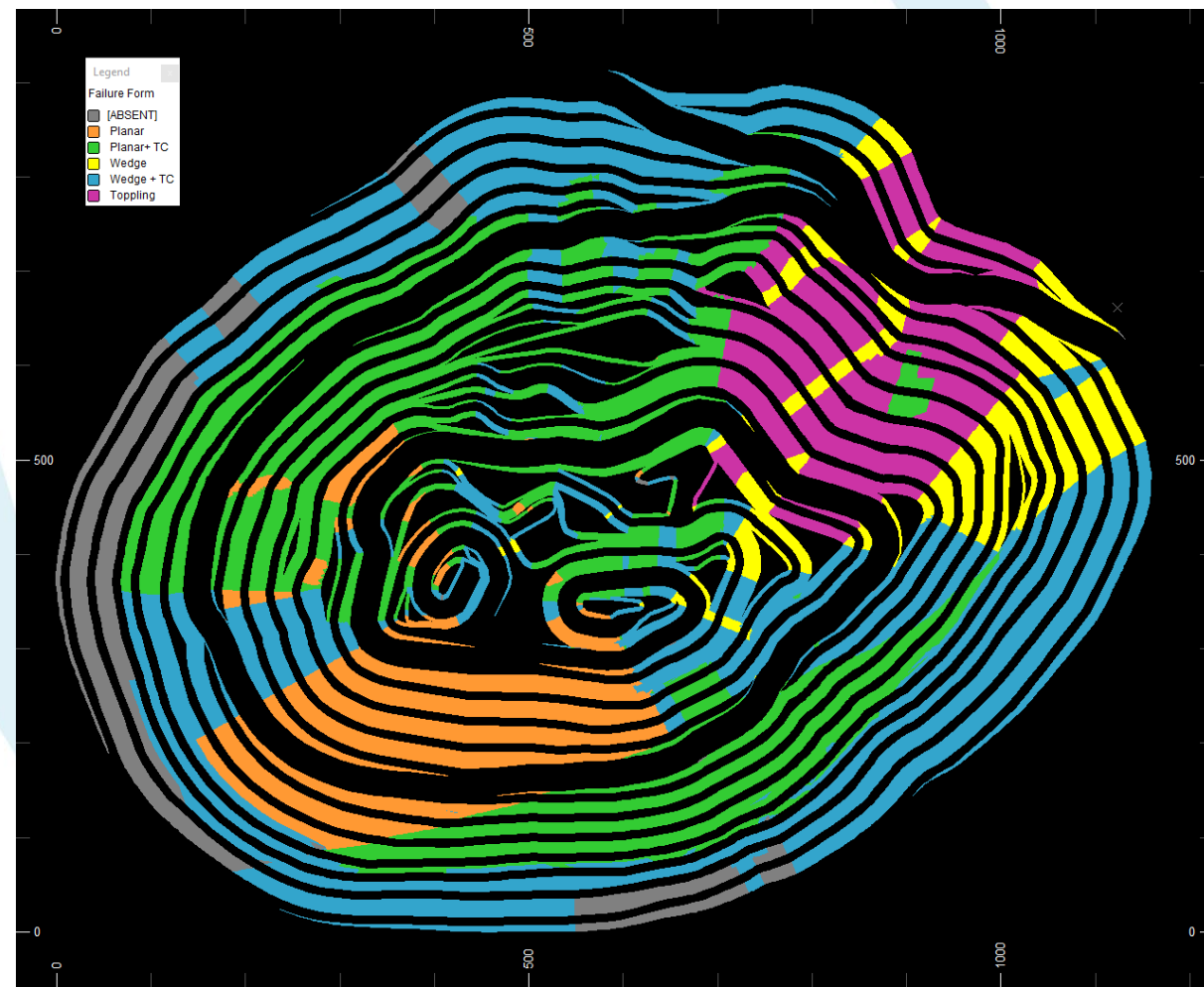
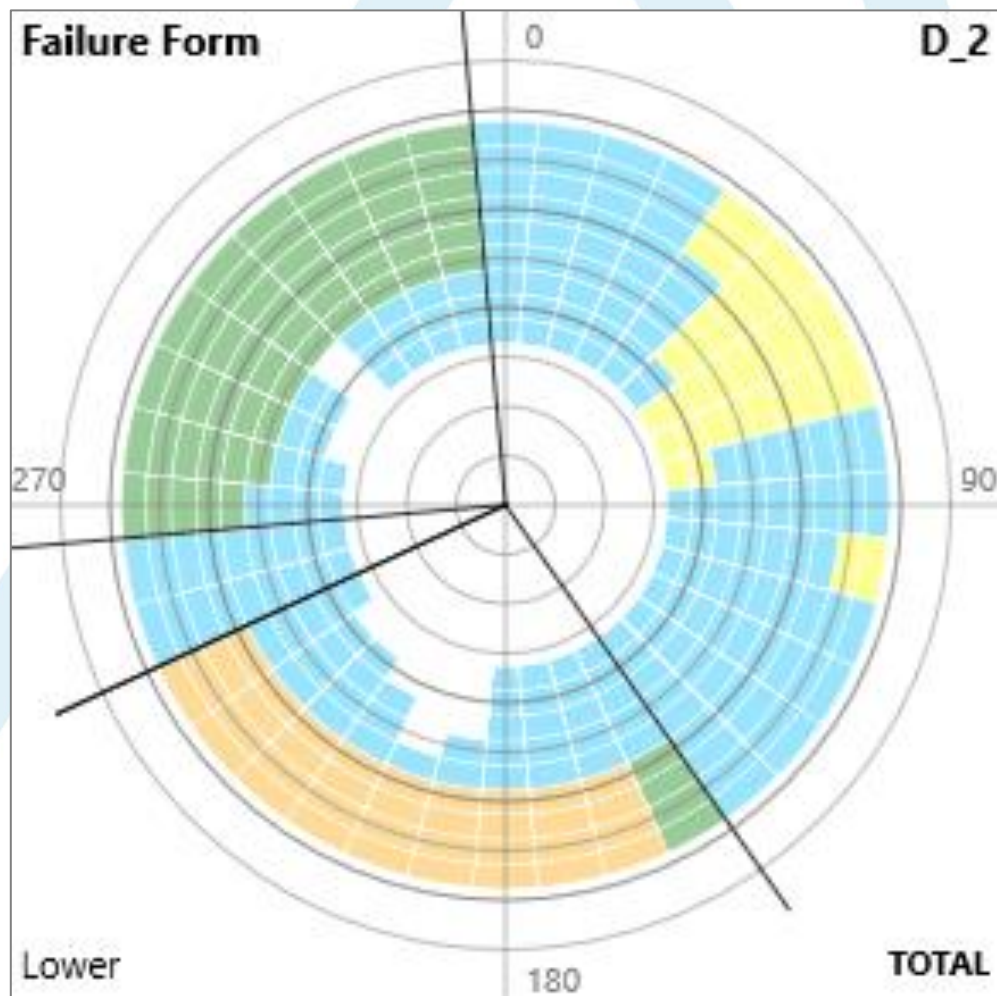




# Районирование по механизмам деформирования откосов



## Районирование по механизмам деформирования откосов



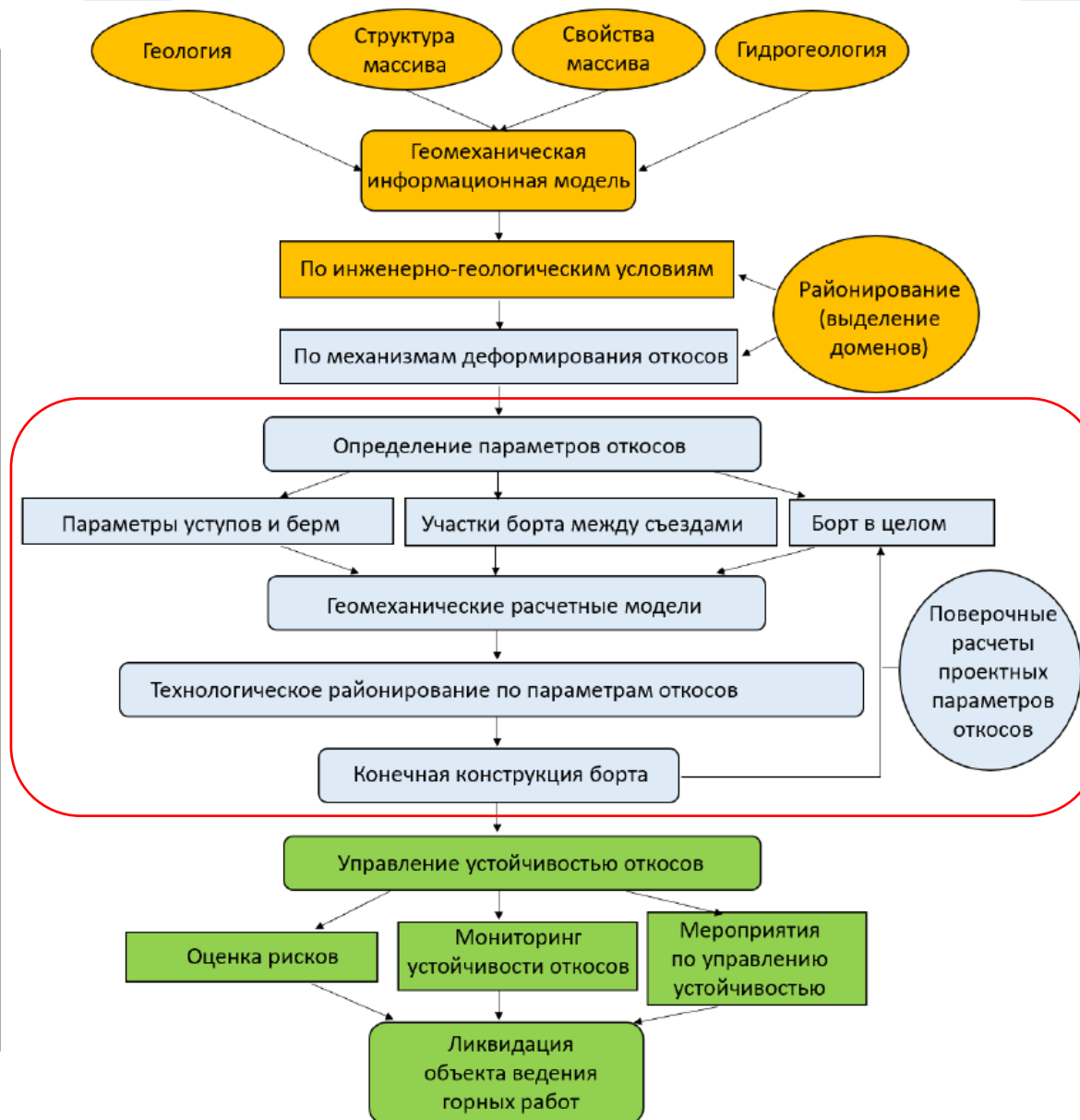


# Структура геомеханического обеспечения устойчивости бортов и уступов

Создание моделей массива

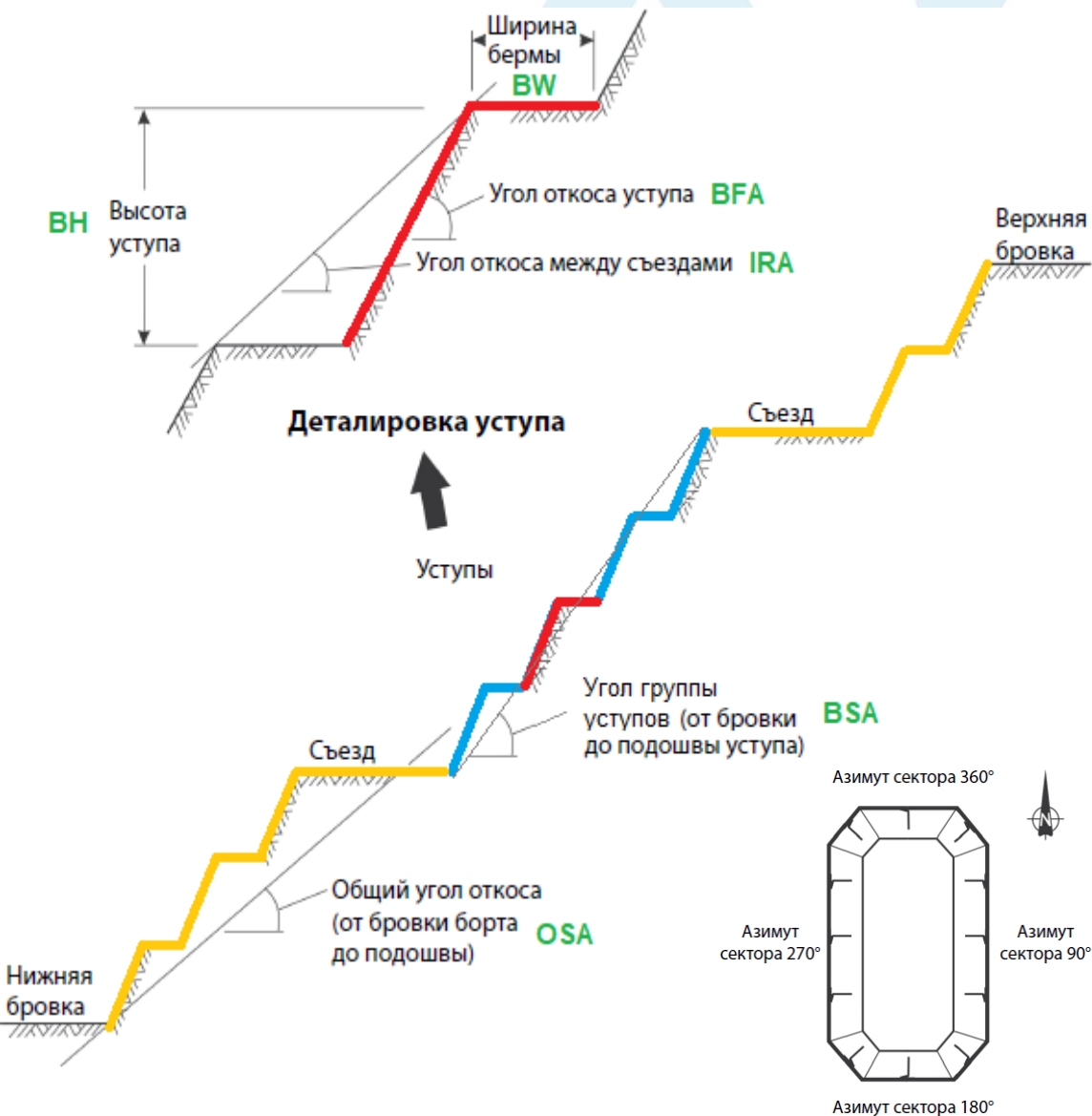
Анализ устойчивости откосов

Реализация проекта



Расчёты устойчивости

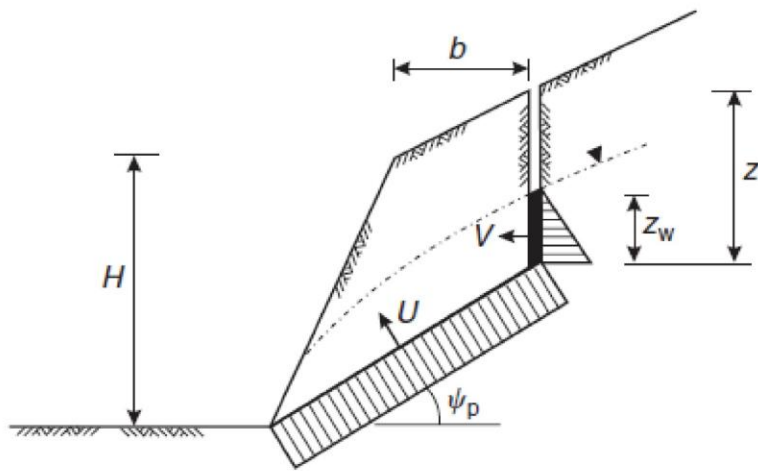
# Расчёты устойчивости



		Масштабный уровень		
		Уступ	Участок борта между съездами	Генеральный борт
1	Определение устойчивой конфигурации уступов	Комплексный кинематический анализ		
		BH, BFA, BW	IRA	
2	Оценка устойчивости группы уступов		С учётом влияния крупных геологических структур массива	
			BSA	
3	Эмпирический анализ устойчивости откосов	По рейтинговым классификациям, учитывающим свойства массива пород и горно-геологические условия		
		Qslope	SMR	MRMR
		BFA	BSA	COSA
4	Оценка предельного устойчивого генерального угла борта карьера			По методикам Фисенко и Хука, с учётом криволинейности контура в плане
				POSA
5	Построение кинематической карты карьера	1. Рекомендованная конфигурация откосов 2. Оценка устойчивости откосов - Коэффициент запаса устойчивости - Вероятность обрушения - Уровень риска 3. Прогнозный объём обрушений 4. Районирование по параметрам откосов 5. Прогноз потенциально опасных участков на бортах карьера		

# Кинематический анализ

Условия реализации основных форм неустойчивости уступов

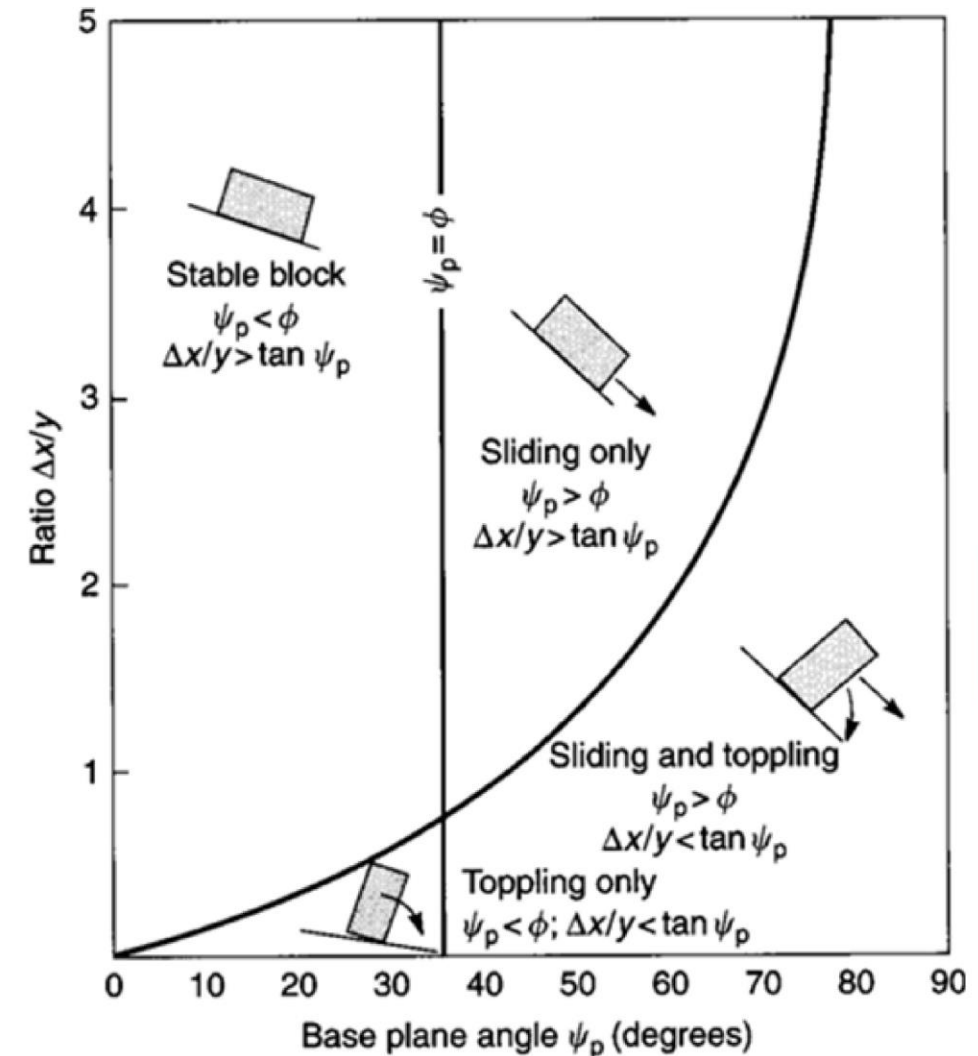
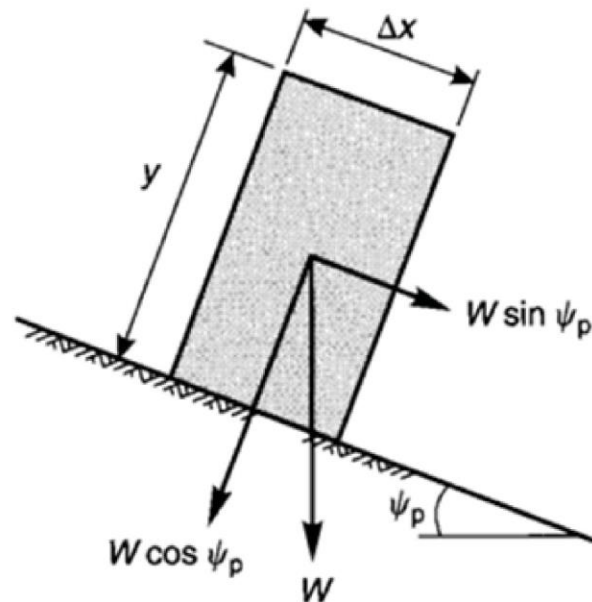


$$FS = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Driving force}} = \frac{cA + \sum N \tan \phi}{\sum S}$$

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p}$$

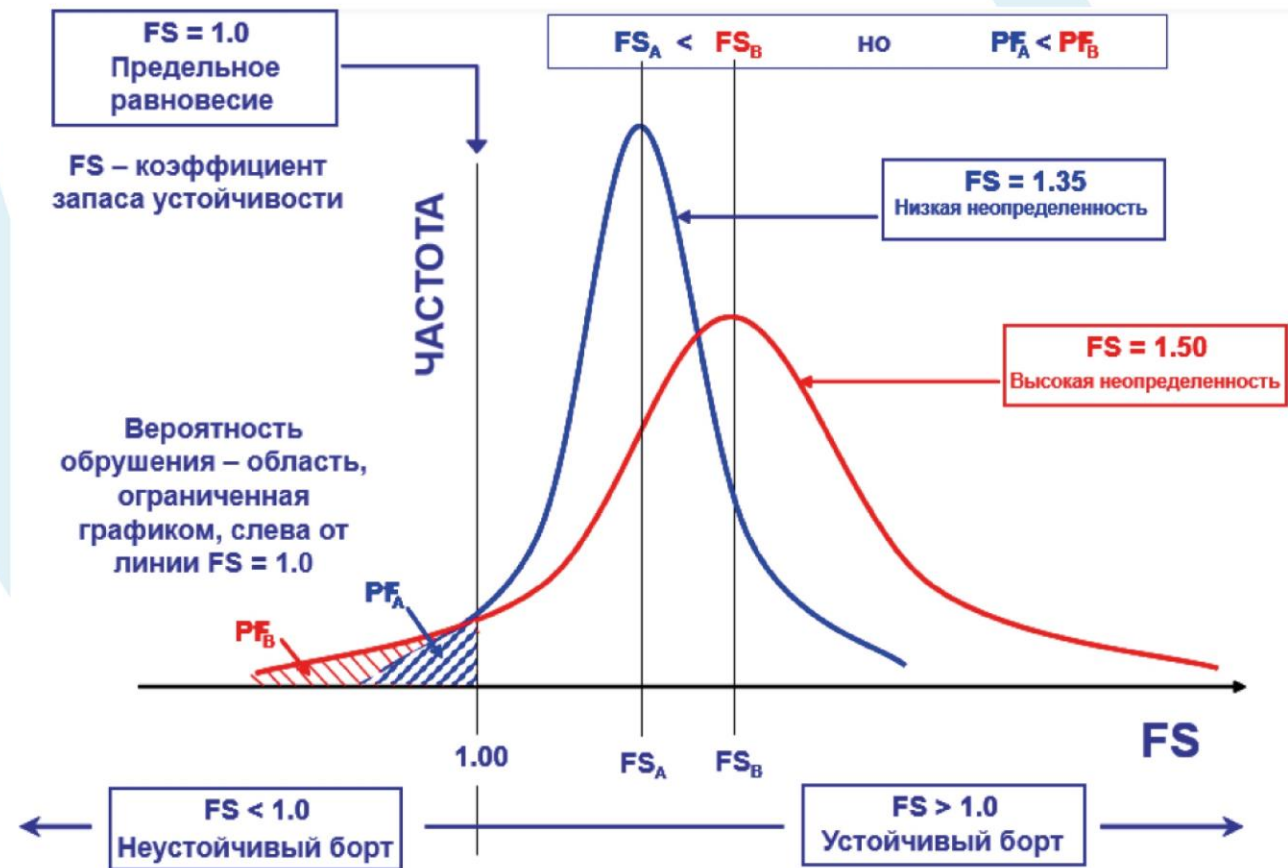
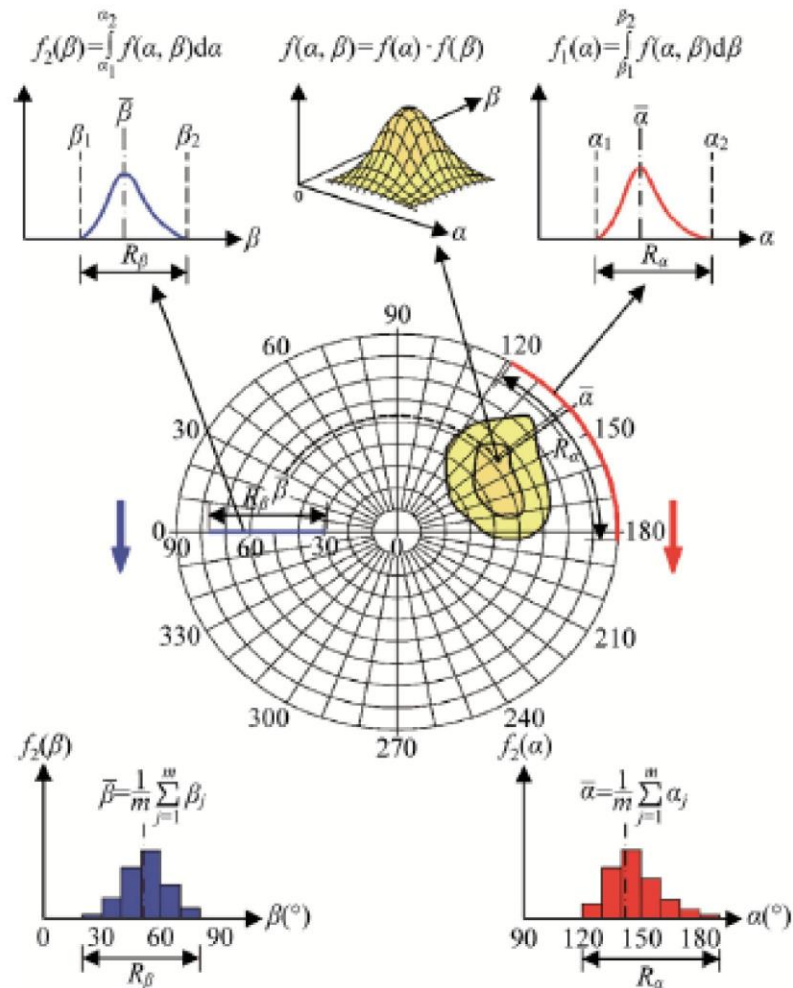
$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w (H + b \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2$$



# Кинематический анализ

Вероятностный подход для учёта вариации исходных данных





## Расчёт оптимальной ширины берм безопасности

### 7.6 Обоснование минимальной ширины предохранительных берм

7.6.1 Ширина предохранительной бермы определяется исходя из ее улавливающей способности камнепада, вывалов и возможности передвижения горного оборудования.

7.6.2 Ширина предохранительной бермы при детерминированном способе расчетов устойчивости уступов определяется исходя из следующего условия:

$$B_{пр} = \max \left\{ \begin{matrix} B_o + B_n \\ B_o + B_{об} \end{matrix} \right. \quad (7.7)$$

где  $B_o$  – ширина срабатывания бермы, 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.

7.6.3 Величина срабатывания бермы ( $B_o$ ) и ширина бермы для задерживания падающих камней ( $B_n$ ) определяются по результатам наблюдений (экспериментальных данных), месторождений аналогов, моделирования и использовании эмпирических формул.

7.6.4 При вероятностной оценке устойчивости уступов (раздел 6.5) ширина предохранительной бермы (Рисунок 7.6 а) определяется по формуле:

$$B = B_{но} + B_p + B_{эф}, \quad (7.8)$$

где:  $B_{но}$  – ширина призмы возможного обрушения (в данном случае ширина сработки бермы за счет влияния трещиноватости), м;  $B_p$  – ширина развала после деформации с вышележащего уступа, м (Рисунок 7.6 б);  $B_{эф}$  – эффективная ширина бермы (оставшаяся часть бермы после осыпи и развала вышележащего уступа), которая принимается:

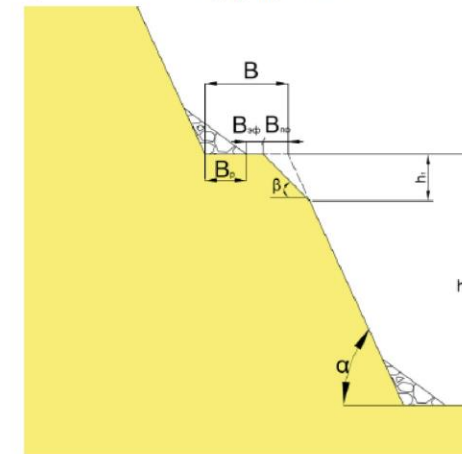
- не менее 2 м для любых уступов карьера;
- 0 м для нижних уступов при доработке карьера при условии инструментального мониторинга в режиме реального времени со сплошной зоной покрытия рабочей зоны или при безлюдной выемке.

$$V = \frac{h_1^3}{6} (ctg\psi' - ctg\alpha)^2 (ctg\delta_1 + ctg\delta_2)^2 \quad ctg\psi' = \frac{\sin\delta_1 ctg\beta_2 + \sin\delta_2 ctg\beta_1}{\sin(\delta_1 + \delta_2)}$$

$$B_{но} = h_1 \left( \frac{1}{tg\psi'} - \frac{1}{tg\alpha} \right)$$

$$B_p = \left( \frac{6Vk_p}{\pi} \left( \frac{1}{tg\alpha_{e.o.}} - \frac{1}{tg\alpha} \right) \right)^{1/3}$$

а) Плоская схема деформирования

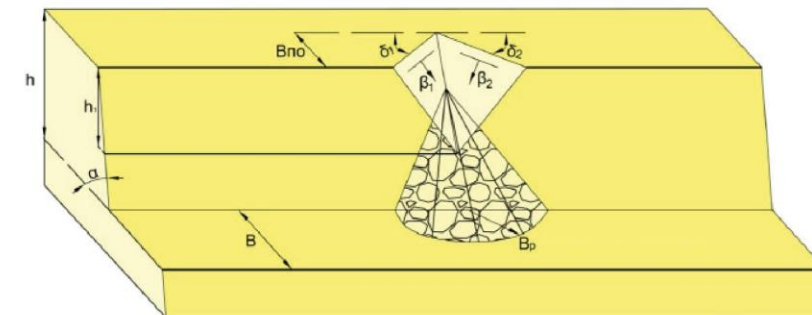


$$V = \frac{h_1^2}{2} \left( \frac{1}{tg\beta} - \frac{1}{tg\alpha} \right)$$

$$B_{но} = h_1 \left( \frac{1}{tg\beta} - \frac{1}{tg\alpha} \right)$$

$$B_p = \left( 2Vk_p \left( \frac{1}{tg\alpha_{e.o.}} - \frac{1}{tg\alpha} \right) \right)^{1/2}$$

б) Клиновидная схема деформирования



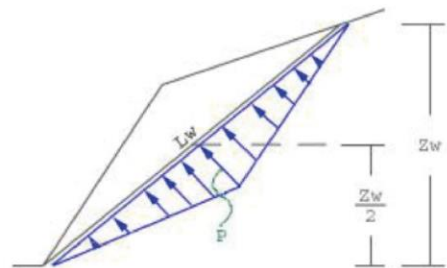
**Рисунок 7.6** – Схема определения ширины предохранительной бермы и ширины развала возможного обрушения при вероятностной оценке устойчивости уступов:  $V(S)$ , м<sup>3</sup> - объем дезинтегрированного породного блока;  $k_p$  – коэффициент разрыхления, д.ед.;  $\beta_i$  – угол падения  $i$ -ой поверхности ослабления массива, град.;  $\alpha_{e.o.}$  – угол естественного откоса дезинтегрированного материала, град.



## Моделирование обводнённости откосов карьера

### Water Force – No Tension Crack

#### Case 1: Maximum Pressure Mid Height



$$0 \leq Z_w \leq L \sin \alpha$$

$$L_w = \frac{Z_w}{\sin \alpha}$$

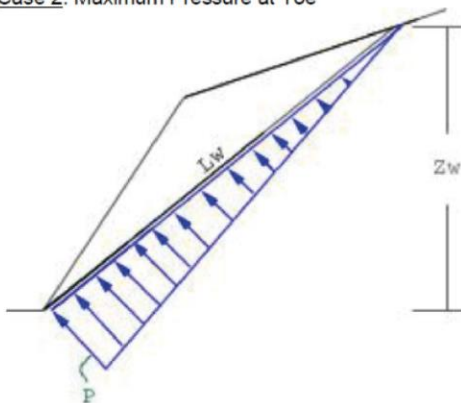
$$P = \frac{1}{2} Z_w \gamma_w$$

$$U = \frac{1}{2} P \cdot L_w = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} Z_w \cdot \gamma_w \right) \left( \frac{Z_w}{\sin \alpha} \right) = \frac{Z_w^2 \cdot \gamma_w}{4 \sin \alpha}$$

Where:

$Z_w$  is the height of water on the failure plane  
 $L_w$  is the wetted length  
 $P$  is the maximum water pressure  
 $U$  is the failure plane water force

#### Case 2: Maximum Pressure at Toe



$$L_w = \frac{Z_w}{\sin \alpha}$$

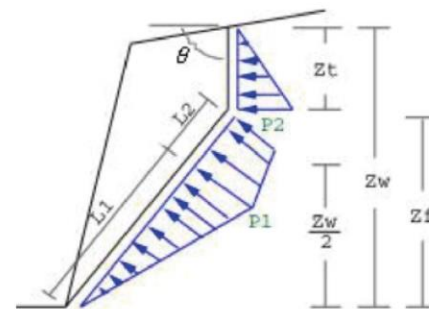
$$P = \gamma Z_w$$

$$U = \frac{1}{2} P \cdot L_w = \frac{1}{2} (\gamma \cdot Z_w) \left( \frac{Z_w}{\sin \alpha} \right)$$

$$U = \frac{Z_w^2 \cdot \gamma_w}{2 \sin \alpha}$$

### Water Force – Tension Crack

#### Case 1: Maximum Pressure Mid Height



Where:

$Z_t$  is the height of water on the tension crack  
 $Z_f$  is the height of water on the failure plane  
 $L$  is the failure plane length  
 $U$  is the failure plane water force  
 $V$  is the tension crack water force

$$Z_t = Z_w - Z_f$$

$$Z_f = D_y = L \sin \alpha$$

Type A: If  $Z_w \leq Z_f$

$$U = \frac{Z_w^2 \cdot \gamma_w}{4 \sin \alpha}$$

$$V = 0$$

Type B: If  $Z_w > Z_f$  and  $\frac{Z_w}{2} < Z_f$

$$L_1 = \frac{Z_w}{2 \sin \alpha}$$

$$L_2 = L - L_1$$

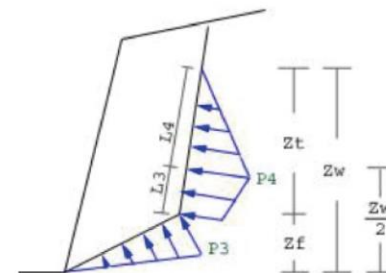
$$P_1 = \frac{1}{2} Z_w \cdot \gamma_w$$

$$P_2 = \gamma_w \cdot Z_t$$

$$U = \frac{1}{2} P_1 \cdot L_1 + \frac{1}{2} (P_1 + P_2) L_2$$

$$V = \frac{Z_t^2 \cdot \gamma_w}{2 \sin \theta}$$

Type C: If  $Z_w > Z_f$  and  $\frac{Z_w}{2} \geq Z_f$



$$P_3 = \gamma \cdot Z_f$$

$$P_4 = \frac{1}{2} \gamma \cdot Z_w$$

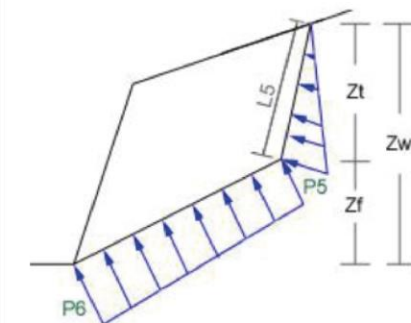
$$L_3 = \frac{\left( \frac{Z_w}{2} - Z_f \right) \sin \theta}{\frac{Z_w}{2 \sin \alpha}}$$

$$L_4 = \frac{Z_w}{2 \sin \alpha}$$

$$U = \frac{1}{2} L \cdot P_3$$

$$V = \frac{1}{2} (P_3 + P_4) L_3 + \frac{1}{2} P_4 L_4$$

#### Case 2: Maximum Pressure at Toe



$$P_5 = \gamma \cdot Z_t$$

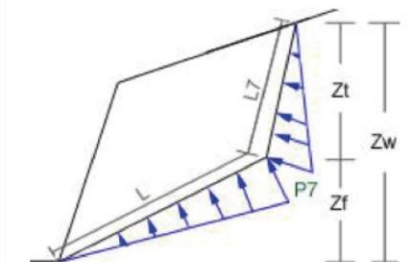
$$P_6 = \gamma \cdot Z_w$$

$$L_5 = \frac{Z_t}{\sin \theta}$$

$$U = \frac{1}{2} (P_5 + P_6) L$$

$$V = \frac{1}{2} P_5 \cdot L_5$$

#### Case 3: Maximum Pressure at Base of Tension Crack



$$Z_t = Z_w - Z_f$$

$$P_7 = \gamma \cdot Z_t$$

$$L_7 = \frac{Z_t}{\sin \theta}$$

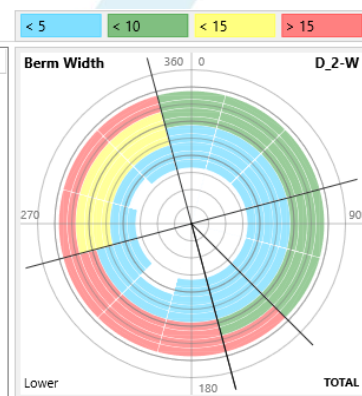
$$U = \frac{1}{2} P_7 \cdot L$$

$$V = \frac{1}{2} P_7 \cdot L_7$$

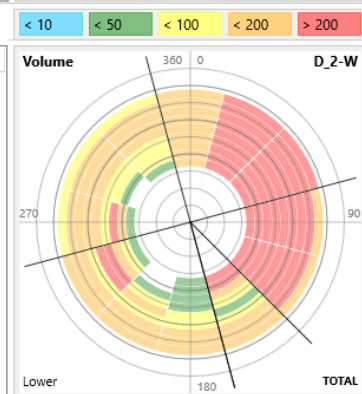


# Комплексный кинематический анализ

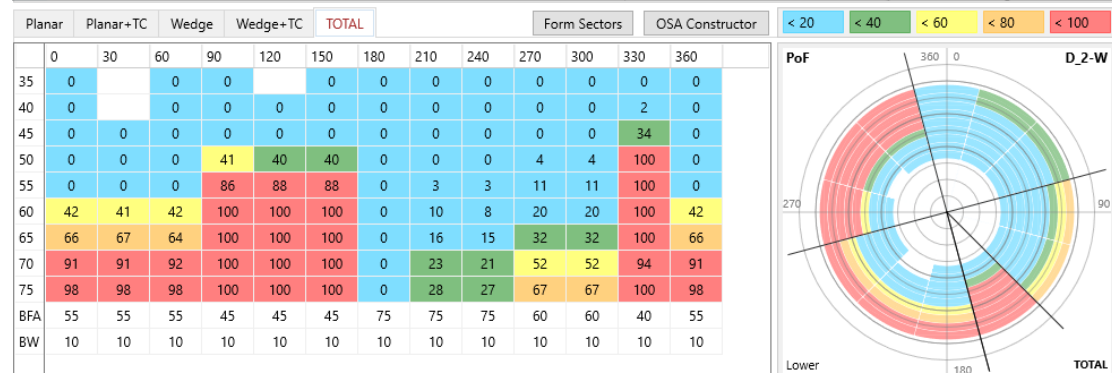
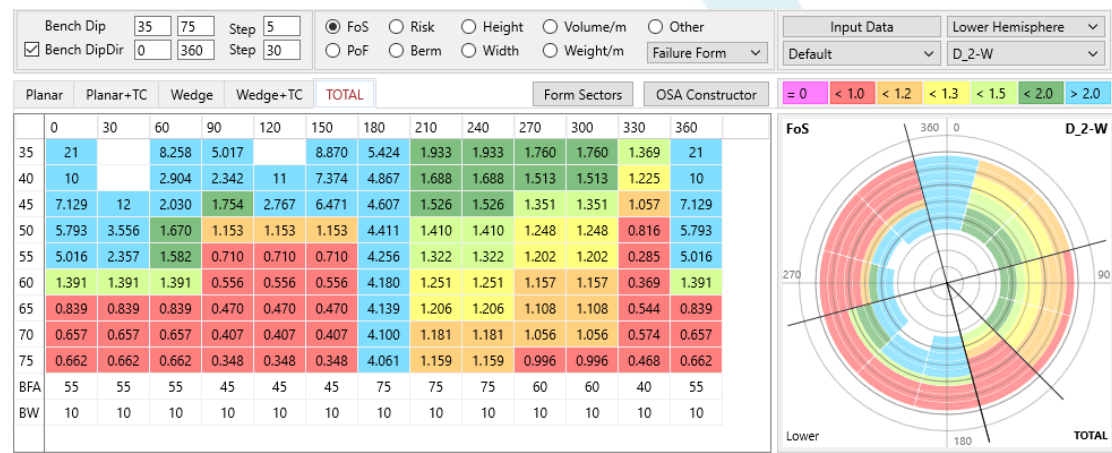
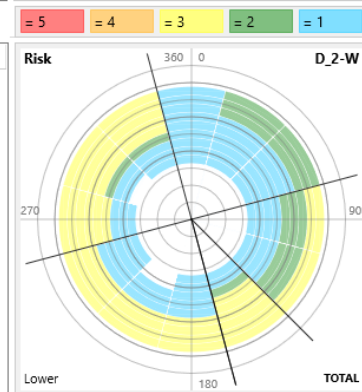
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
35	2.000		2.000	2.000		2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
40	2.289		2.289	2.289	2.289	2.289	2.289	2.289	2.289	2.289	2.289	2.289	2.289
45	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064	3.064
50	3.911	3.911	3.911	11.05	11.14	11.14	3.911	3.911	3.911	3.911	3.911	3.911	3.911
55	4.821	4.821	4.821	12.36	12.38	12.38	4.821	4.821	4.821	4.821	4.821	4.821	4.821
60	16.89	16.87	16.80	13.73	13.76	13.76	5.789	5.789	5.789	5.789	5.789	5.789	16.89
65	17.92	17.94	18.06	14.60	14.62	14.62	6.807	6.807	6.807	6.807	6.807	6.807	17.92
70	19.03	19.05	19.05	15.30	15.31	15.31	7.868	7.868	7.868	7.868	7.868	19.06	19.03
75	19.97	19.95	20.05	15.67	15.67	15.67	8.962	8.962	8.962	8.962	8.962	20.43	19.97
BFA	55	55	55	45	45	45	75	75	75	60	60	40	55
BW	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10



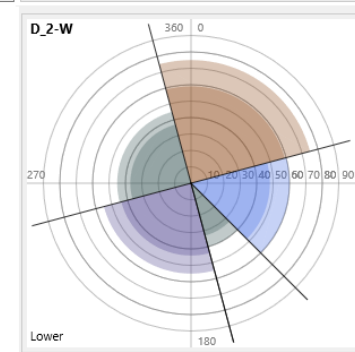
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
35	11.34		26.67	45.65		41.45	130.1	225.8	225.8	261.2	261.2	378.6	11.34
40	25.49		97.02	126.7	12.70	52.49	128.0	285.6	285.6	345.0	345.0	203.0	25.49
45	37.76	13.43	165.6	212.0	60.10	62.28	131.1	345.7	345.7	436.5	436.5	145.5	37.76
50	48.51	55.97	228.1	64.29	64.29	64.29	134.0	406.8	406.8	492.4	492.4	87.31	48.51
55	58.04	100.1	228.8	103.7	103.7	103.7	135.8	470.0	470.0	410.4	410.4	29.81	58.04
60	55.29	55.29	55.29	119.5	119.5	119.5	131.3	536.4	536.4	268.8	268.8	55.47	55.29
65	105.3	105.3	105.3	114.3	114.3	114.3	124.3	570.0	570.0	238.4	238.4	105.4	105.3
70	148.7	148.7	148.7	103.6	103.6	103.6	118.1	556.1	556.1	207.4	207.4	110.7	148.7
75	115.7	115.7	115.7	83.93	83.93	83.93	112.6	499.2	499.2	175.9	175.9	118.8	115.7
BFA	55	55	55	45	45	45	75	75	75	60	60	40	55
BW	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10



	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
35	1		1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
40	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
50	1	1	1	1	3	2	2	1	1	1	1	3	1
55	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1	2	2	3
60	3	3	3	3	3	3	1	1	1	2	2	3	3
65	3	3	3	3	3	3	1	2	2	2	2	3	3
70	3	3	3	3	3	3	1	2	2	3	3	3	3
75	3	3	3	3	3	3	1	2	2	3	3	3	3
BFA	55	55	55	45	45	45	75	75	75	60	60	40	55
BW	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10



DOMAIN	SECTOR	FROM	TO	BFA	BW	BH	IRA	FoS	PoF	Risk	Vol/m
D_1-W	2	120	120	60	10	30	48	3.355	0	1	
D_1-W	3	150	210	35	10	30	30	1.482	13	2	137
D_1-W	4	240	270	75	10	30	59	3.338	0	1	
D_1-W	5	300	360	55	10	30	44	2.569	0	1	
D_2-W	1	0	60	55	10	30	44	1.582	0	1	
D_2-W	2	90	150	45	10	30	37	1.754	0	1	
D_2-W	3	180	240	75	10	30	59	1.159	28	2	471
D_2-W	4	270	300	60	10	30	48	1.157	20	2	256
D_2-W	5	330	330	40	10	30	33	1.225	2	1	191
D_3-W	1	150	180	50	10	30	40	1.241	0	1	180
D_3-W	2	210	270	70	18	30	46	1.875	7	1	74
D_3-W	3	300	120	75	10	30	59	1.606	0	1	69



# Эмпирический анализ

Комплексный кинематический анализ  
устойчивости уступов



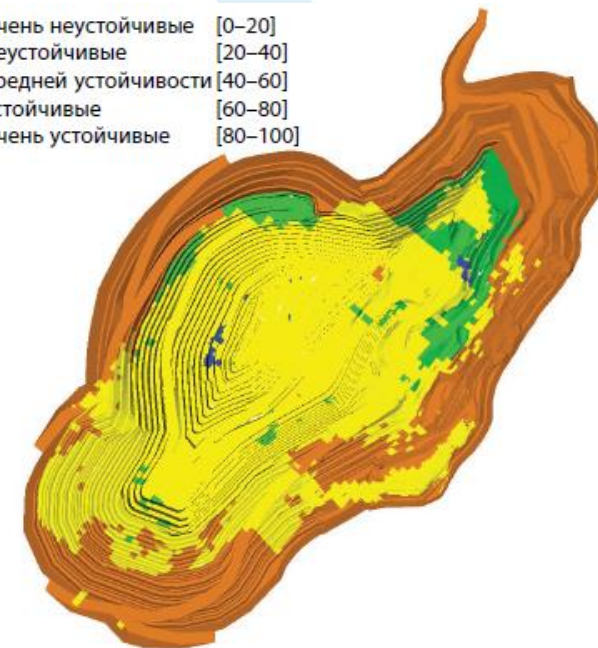
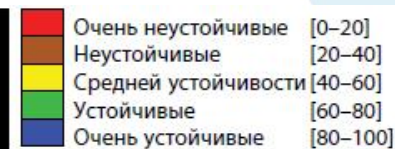
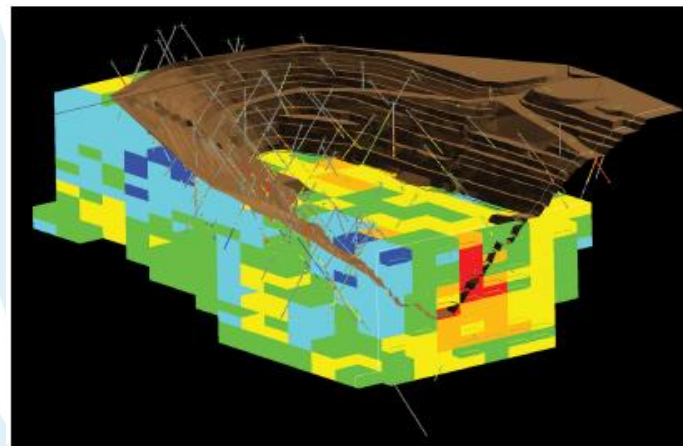
Выбор устойчивых параметров уступов  
(BFA, BH, BW → IRA, BSA).



Расчёт устойчивых параметров откосов  
на основе эмпирического анализа по  
рейтингам Qslope, CSMR, MRMR,  
учитывающих свойства массива пород и  
горно-геологические условия  
месторождения



Калибровка полученных  
результатов и выбор окончательных  
параметров уступов



Sector	From	To	BFA	BW	BH	FoS	IRA	BSA
1	35	95	50	10	30	1.696	40	43
2	95	165	55	10	30	1.741	44	47
3	165	235	75	10	30	1.665	59	64
4	235	315	65	10	30	1.591	51	55
5	315	35	55	10	30	2.041	44	47

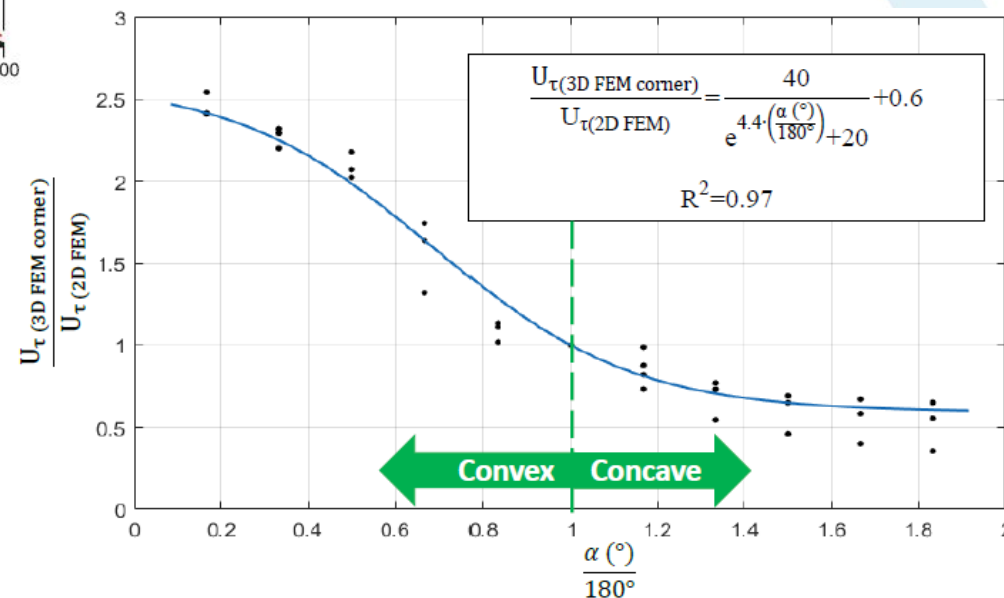
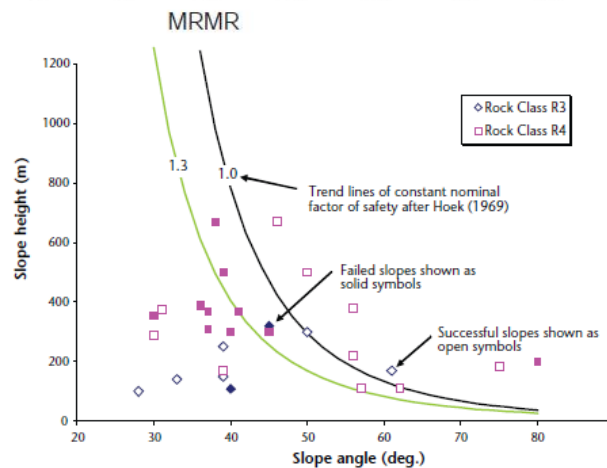
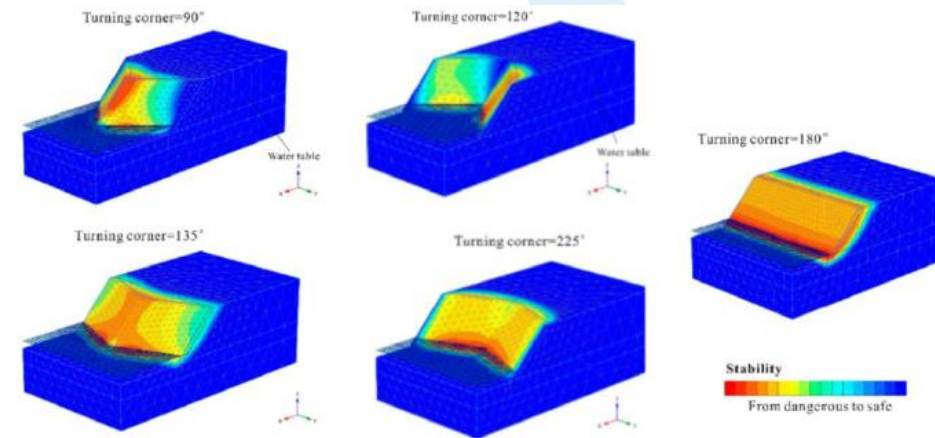
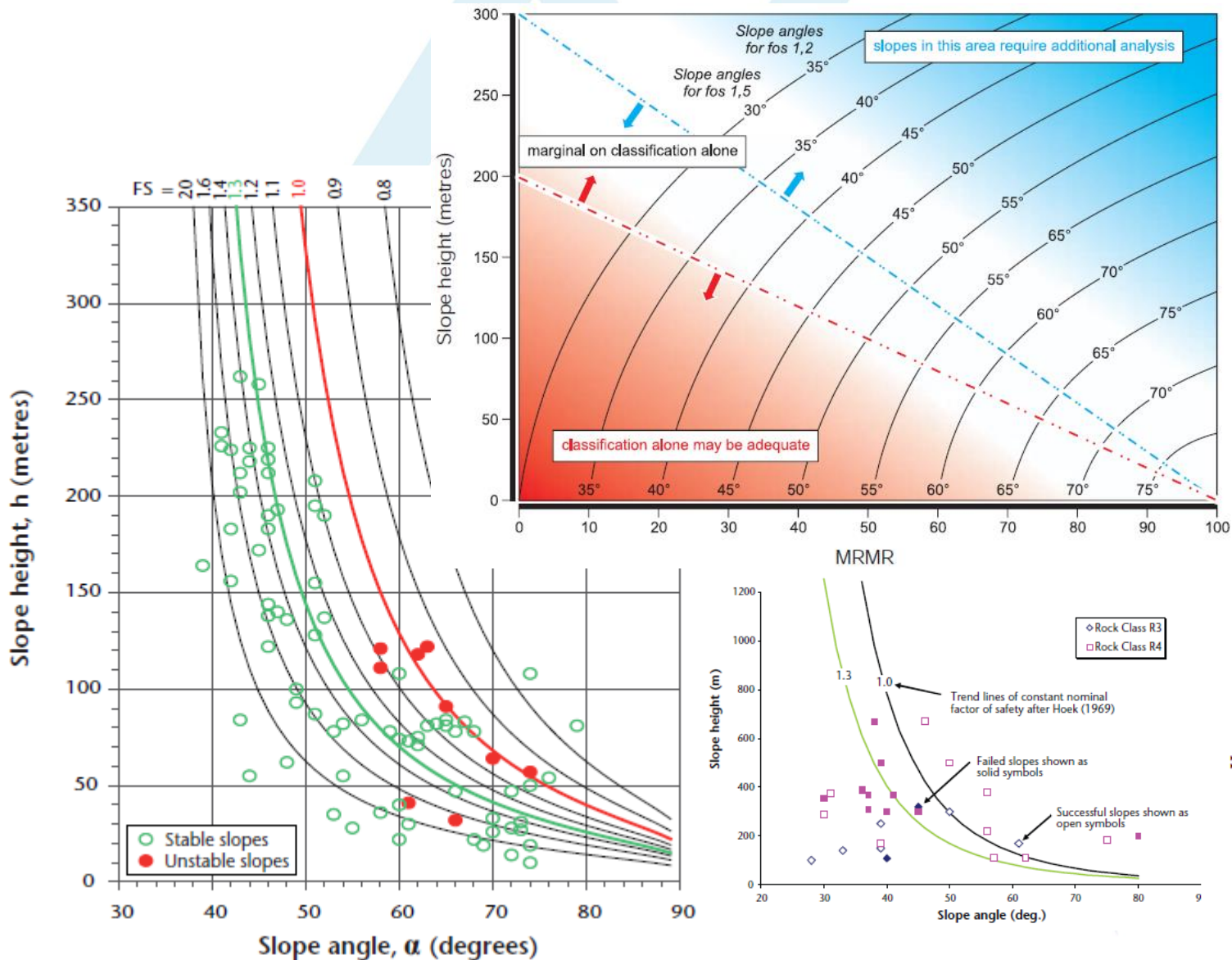
Sector	aziB	TYPE	j1	j2	AZI	DIP	A	B	C	F1	F2	F3	F123	F4	Set A	Set B	O
1	65	p	4		63	43	2	43	-7	1.00	0.85	-50	-43	8	0.75	1.50	1.13
2	130	p	5		122	49	8	49	-6	0.85	1.00	-50	-43	8	0.75	1.50	1.13
3	180	w	5	3	134	48	46	48	-27	0.15	1.00	-60	-9	8	2.00	0.90	1.80
4	275	p	2		275	59	0	59	-6	1.00	1.00	-50	-50	8	0.50	1.50	0.75
5	30	w	4	1	51	42	21	42	-13	0.40	0.85	-60	-20	8	2.00	0.90	1.80

Sector	Q	Qslope	BFA-r	BFA	Разница
1	0.24	0.27	54	50	4
2	0.24	0.27	54	55	-1
3	1.64	2.95	74	75	-1
4	1.64	1.23	67	65	2
5	0.24	0.43	58	55	3

Sector	RMRb	CSMR	BSA-r	BSA	Разница
1	67	41	46	43	3
2	67	41	46	47	-1
3	79	76	76	64	12
4	79	47	55	55	0
5	67	56	67	47	20

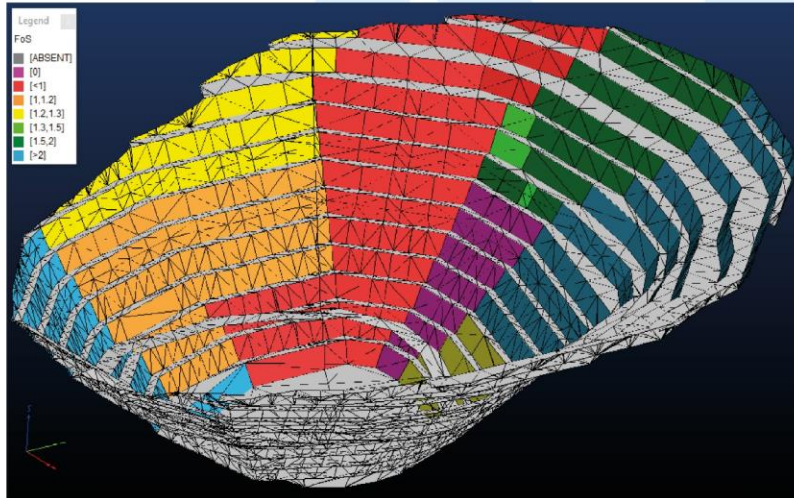


# Оценка предельного устойчивого генерального угла борта карьера



# Результат

**Кинематическая Карта Карьера (ЗК)** представима в виде 3D-каркаса карьера или таблицы по секторам ориентации откосов, содержащих результаты расчёта устойчивости откосов карьера.



Domain	Subdom	Sector	From	To	Vol/m			BW			BFA			IRA			BSA				
					FoS = 1.5	FoS = 1.5	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.5	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.5	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.5	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.5	PoF = 25		
D1	D1	1	157	222	59	94	88	10	10	10	55	65	65	44	51	51	47	55	55		
		D2_U	1	55	110	41	41	41	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D2_U	2	131	141	89	128	201	10	10	10	45	50	60	37	40	48	39	43	51	
		D2_U	3	142	142	93	144	157	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
		D2_U	4	143	177	94	106	157	10	10	10	60	65	65	48	51	51	51	55	55	
D2	D2	D2_S	5	178	178	86	127	157	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
		D2_S	6	1	54	54	54	90	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43	
		D2_U	7	102	251	83	83	83	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D2_U	8	252	278	47	66	86	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
		D2_U	9	285	311	48	69	89	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
		D2_U	10	312	319	62	82	98	10	10	10	50	55	60	40	44	48	43	47	51	
		D2_U	11	320	342	55	55	86	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43	
		D2_U	12	343	354	58	58	38	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D2_U	13	355	30	42	42	72	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43	
		D2_U	14	31	93	42	41	84	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
D3	D3	D3_U	1	154	161	24	24	49	10	10	10	12	50	50	60	40	40	46	43	50	
		D3_U	2	162	194	19	19	114	10	10	10	55	55	65	44	44	51	47	47	55	
		D3_U	3	195	195	19	15	114	10	10	10	55	60	65	44	48	51	47	51	55	
		D3_U	4	196	213	55	55	114	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D3_U	5	214	227	67	100	114	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
		D3_U	6	228	314	62	90	117	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
		D3_U	7	315	14	144	144	128	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D3_U	8	15	15	101	189	161	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
		D3_U	9	16	33	113	189	182	10	10	10	12	40	60	60	33	48	46	35	51	50
		D3_U	10	34	67	136	189	181	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
		D3_D	1	171	194	19	19	48	10	10	10	12	55	55	60	44	44	46	47	50	
		D3_D	2	185	195	19	35	48	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
		D3_D	3	196	213	55	55	111	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D3_D	4	214	227	67	100	111	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
		D3_D	5	228	314	62	90	115	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
D6	D6	D6_D	6	315	339	144	144	119	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D6	1	308	314	17	17	280	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
		D6	2	315	323	128	189	280	10	10	10	50	55	65	40	44	51	43	47	50	
		D6	3	324	329	106	169	50	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	50	

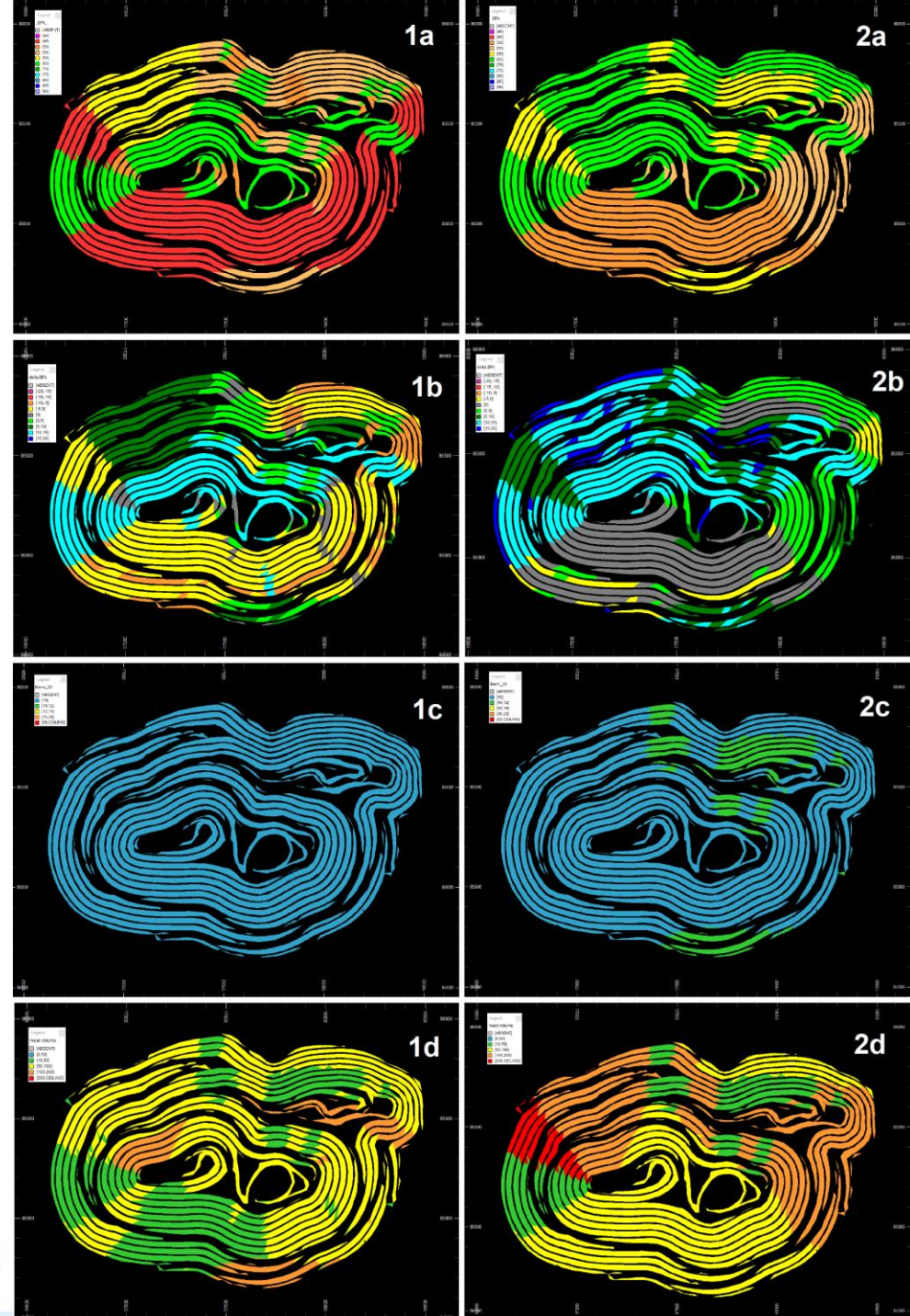
Данный инновационный подход позволяет увидеть и проанализировать **общую картину устойчивости** откосов карьера в имеющихся горно-геологических и гидрогеологических условиях месторождения с возможностью учёта сейсмических нагрузок.



# Кинематическая Карта Карьера

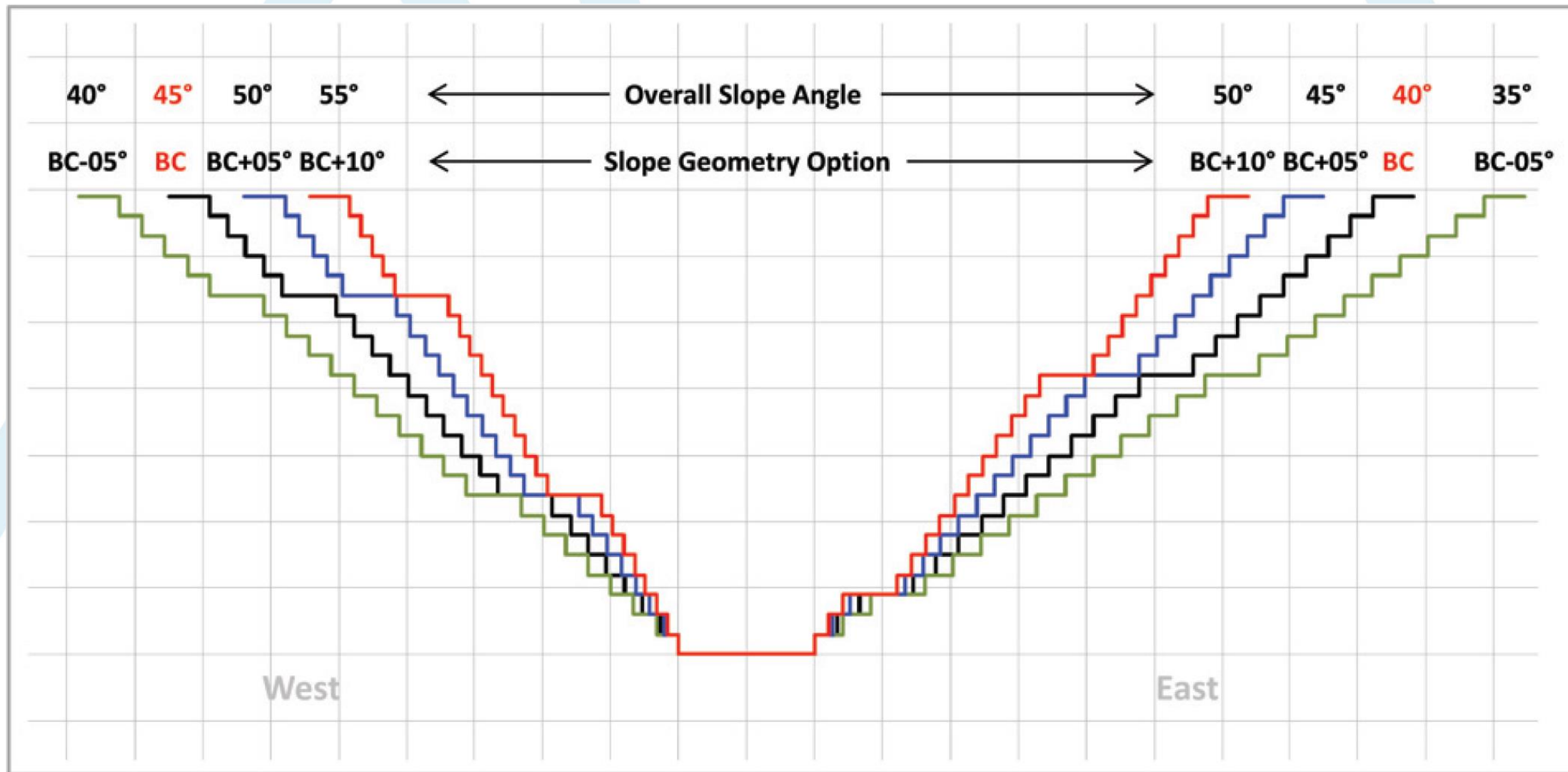
Domain	Subdom	Sector	From	To	Vol/m			BW			BFA			IRA			BSA		
					FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25
D1	D1	1	157	222	59	94	88	10	10	10	55	65	65	44	51	51	47	55	55
D2	D2_N	1	55	110	41	41	41	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
	D2_N	2	111	141	89	126	201	10	10	10	45	50	60	37	40	48	39	43	51
	D2_N	3	142	142	93	144	157	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55
	D2_N	4	143	177	94	106	157	10	10	10	60	65	65	48	51	51	51	55	55
	D2_N	5	178	178	86	127	157	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55
	D2_S	1	6	54	54	54	90	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43
D3	D3_N	1	102	251	83	83	83	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
	D3_N	2	252	278	47	66	86	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47
	D3_S	1	285	311	48	69	89	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47
	D3_S	2	312	319	62	82	98	10	10	10	50	55	60	40	44	48	43	47	51
	D3_S	3	320	342	55	55	86	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43
	D3_S	4	343	354	58	58	58	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
	D3_S	5	355	30	42	42	72	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43
D5	D3_S	6	31	93	42	61	84	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47
	D5_U	1	154	161	24	24	49	10	10	12	50	50	60	40	40	46	43	43	50
	D5_U	2	162	194	19	19	114	10	10	10	55	55	65	44	44	51	47	47	55
	D5_U	3	195	195	19	35	114	10	10	10	55	60	65	44	48	51	47	51	55
	D5_U	4	196	213	55	55	114	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
	D5_U	5	214	227	67	100	114	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55
	D5_U	6	228	314	62	90	117	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47
	D5_U	7	315	14	144	144	128	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
	D5_U	8	15	15	101	189	161	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
	D5_U	9	16	33	113	189	161	10	10	12	40	60	60	33	48	46	35	51	50
	D5_U	10	34	67	136	189	161	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
	D5_D	1	171	194	19	19	48	10	10	12	55	55	60	44	44	46	47	47	50
	D5_D	2	195	195	19	35	48	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
	D5_D	3	196	213	55	55	111	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
	D5_D	4	214	227	67	100	111	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55
	D5_D	5	228	314	62	90	115	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47
	D5_D	6	315	339	144	144	119	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
D6	D6	1	308	314	17	17	260	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55
	D6	2	315	323	128	169	260	10	10	10	50	55	65	40	44	51	43	47	55
	D6	3	324	329	106	169	50	10	10	12	40	55	60	33	44	46	35	47	50
	D6	4	330	30	116	37	50	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50

Треугольник	TRIANGLE	1	2	3	4
	PID1	2	1	2740	1
	PID2	2739	3	2739	4
	PID3	1	2	2	3
Домен	DOM	1	1	1	1
	DOMAIN	D_1	D_1	D_1	D_1
Ориентация откоса	SDIP	75	75	60	55
	DIPDIRN	60	90	120	150
Коэффициент запаса устойчивости	FoS_p	-	-	1.32	1.32
	FoS_pTC	-	-	-	1.17
	FoS_w	2.35	1.74	3.62	-
	FoS_wTC	1.39	1.95	3.80	-
	FoS_Total	1.39	1.74	1.32	1.17
Вероятность обрушения	PoF_p	-	-	15	15
	PoF_pTC	-	-	-	37
	PoF_w	12	8	1	-
	PoF_wTC	23	5	0	-
	PoF_Total	23	8	15	37
Уровень риска	Risk	2	1	2	3
Системы трещин, образующие кинематический блок	Type	4	3	1	2
	Set_1	J2	J1	J2	J2
	Set_2	J3	J2	-	-
	TC	J1	-	-	J1
Размеры кинематического блока	Lw	8.0	8.7	-	-
	BH	29.5	30.0	30.0	30.0
	BW	10.0	9.2	3.3	1.6
Потенциальный объём обрушения	V_p	-	-	50.0	50.0
	V_pTC	-	-	-	46.9
	V_w	112.8	137.9	104.0	3.0
	V_wTC	175.6	132.5	134.6	3.0
	V/m	175.6	137.9	50.0	46.9
	W/m	474.2	372.2	134.9	126.6
Рекомендуемая конфигурация уступа	SECTOR	1	1	2	3
	BH	30	30	30	30
	BFA	60	60	65	70
	BW	10	10	12	12
	IRA	51	51	49	53
	Vol/m	94	94	76	115



# Проработка вариантов конструкции борта

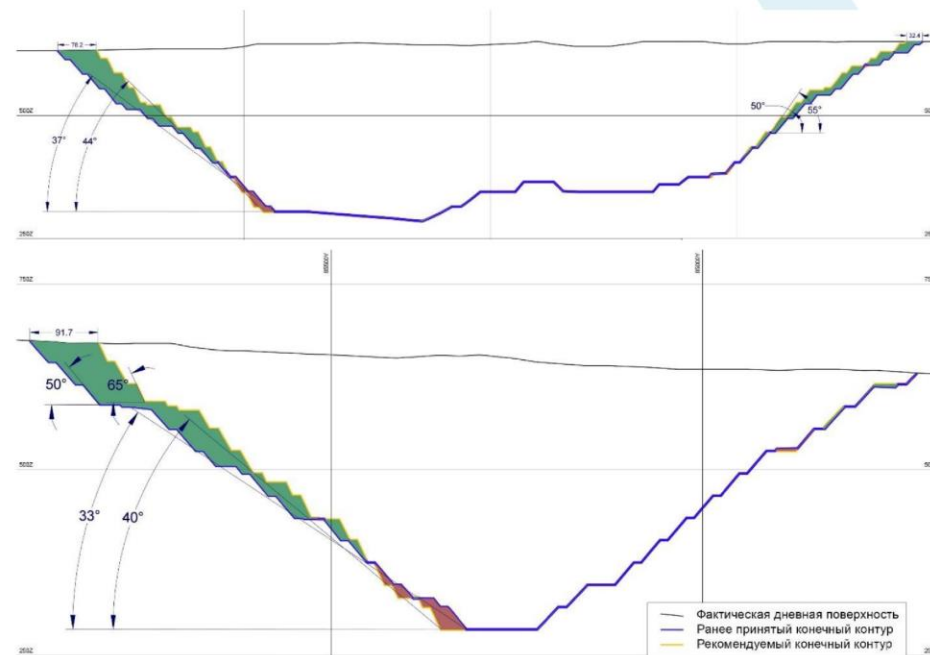
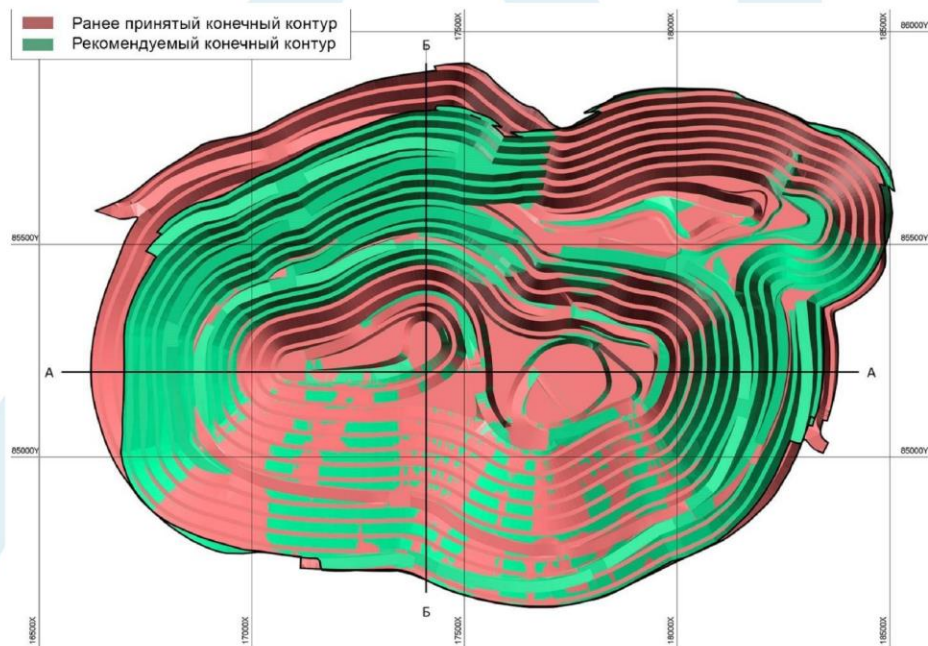
Агрессивный – Консервативный - Оптимальный





# Практическое применение

Внедрение системы **3К-моделирования** уже успешно реализовано на нескольких месторождениях России и Узбекистана.



Эффект от применения Digger Slope на примере одного карьера в Узбекистане:

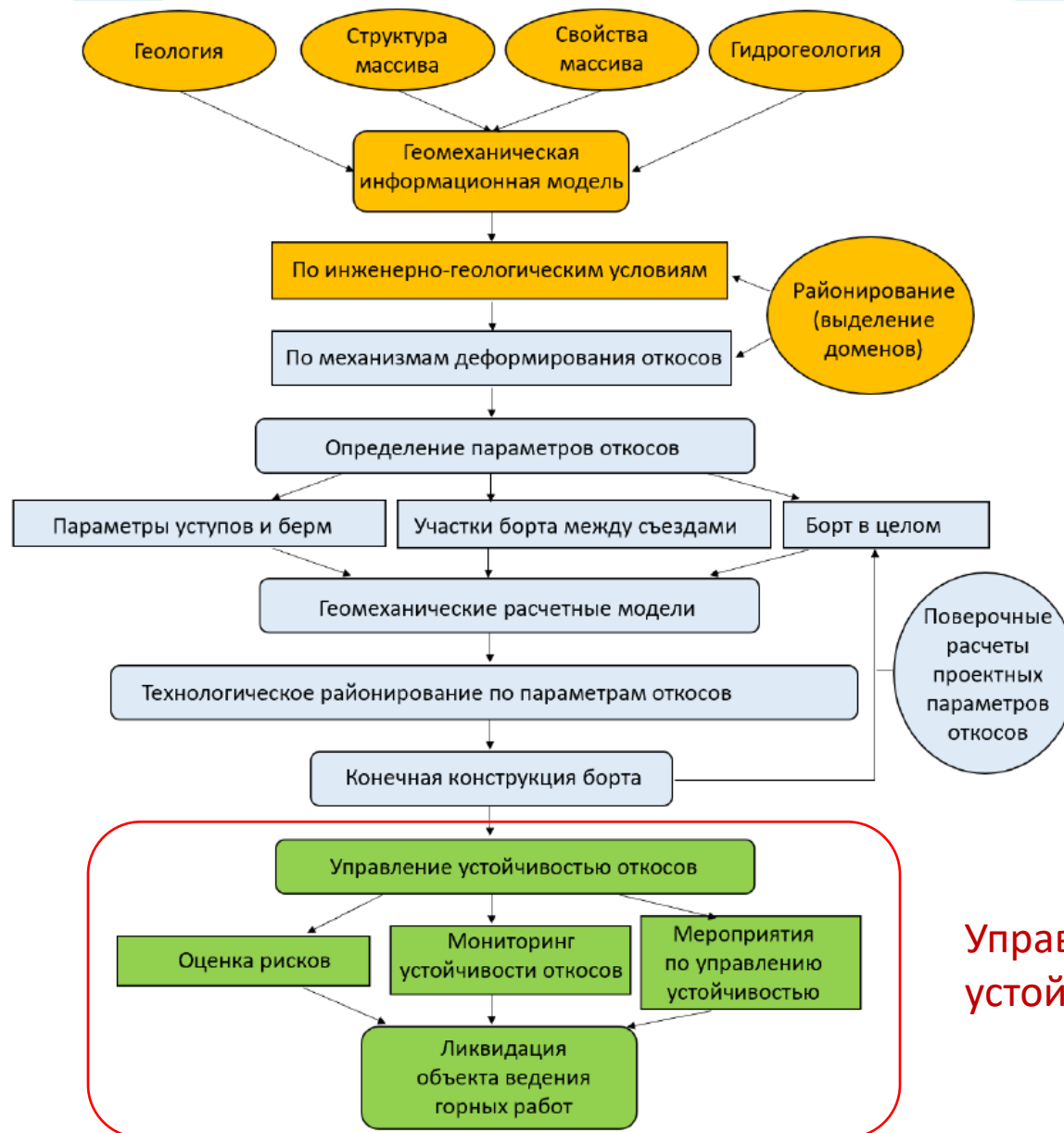
- Укрупнение генерального угла борта карьера на 7°;
- Уменьшение объёма вскрыши на 16 млн. м<sup>3</sup>;
- При себестоимости вскрышных работ на месторождении в среднем 230 руб./м<sup>3</sup>, экономия средств составила 3,68 млрд. руб.

# Структура геомеханического обеспечения устойчивости бортов и уступов

Создание моделей массива

Анализ устойчивости откосов

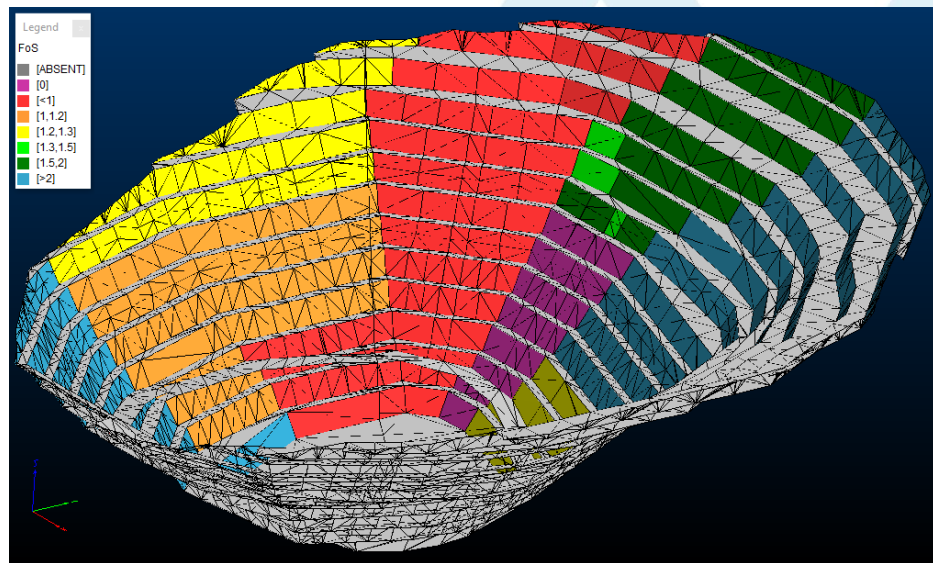
Реализация проекта



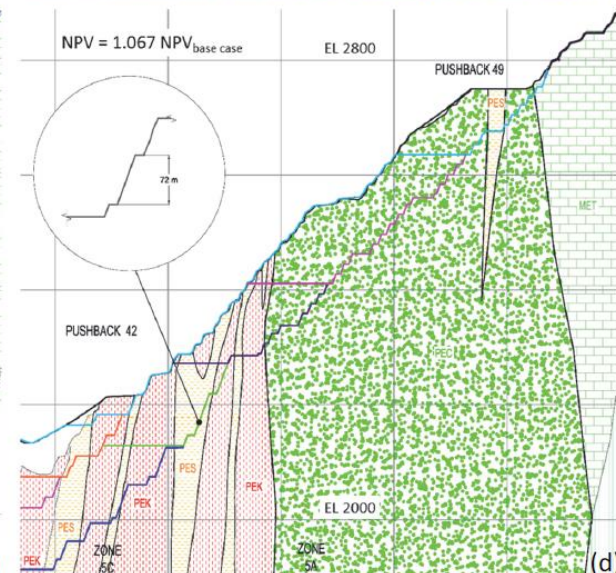
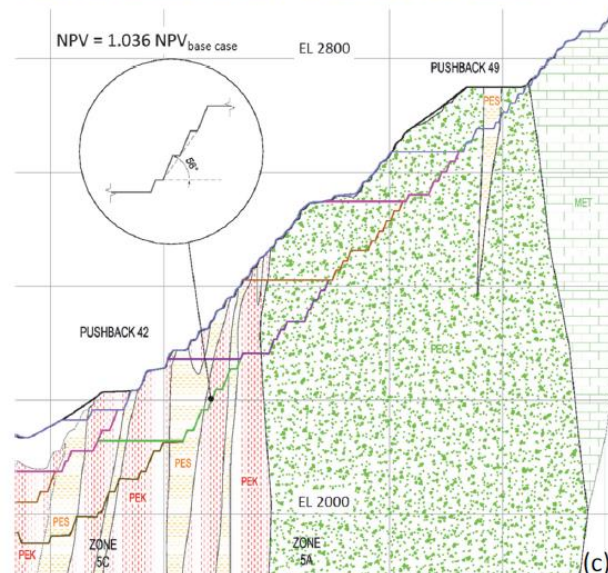
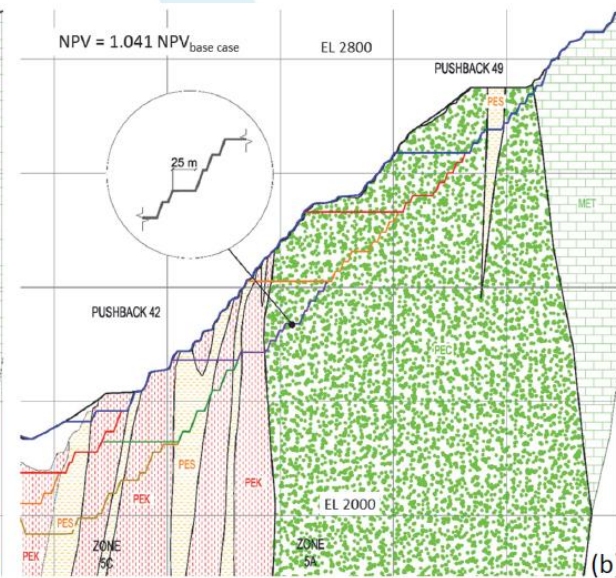
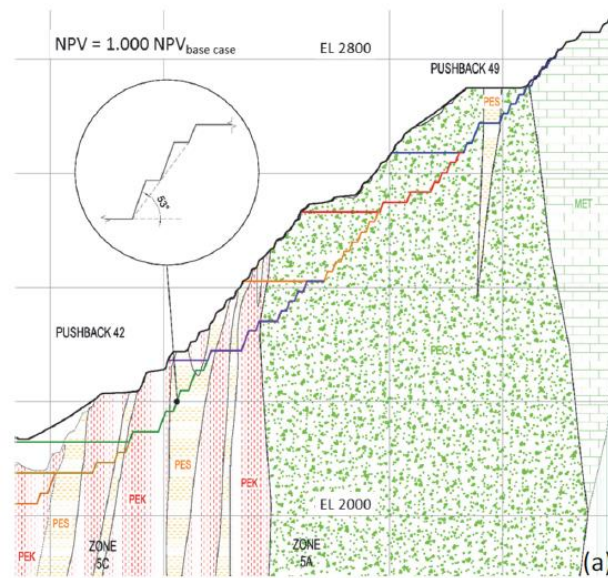
Управление устойчивостью



# Оптимизация промежуточных контуров карьера (pushback)



Domain	Subdom	Sector	From	To	Vol/m			BW			BFA			IRA			BSA			
					FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	FoS = 1.5	FoS = 1.3	PoF = 25	
D1	D1	1	157	222	59	94	88	10	10	10	55	65	65	44	51	51	47	55	55	
D2	D2_N	1	55	110	41	41	41	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D2_N	2	111	141	89	126	201	10	10	10	45	50	60	37	40	48	39	43	51	
	D2_N	3	142	142	93	144	157	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
	D2_N	4	143	177	94	106	157	10	10	10	60	65	65	48	51	51	51	55	55	
	D2_N	5	178	178	86	127	157	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
D3	D2_S	1	6	54	54	54	90	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	47	
	D3_N	1	102	251	83	83	83	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D3_N	2	252	278	47	66	86	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
	D3_S	1	285	311	48	69	89	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
	D3_S	2	312	319	62	82	98	10	10	10	50	55	60	40	44	48	43	47	51	
	D3_S	3	320	342	55	55	86	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43	
	D3_S	4	343	354	58	58	58	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D3_S	5	355	30	42	42	72	10	10	10	45	45	50	37	37	40	39	39	43	
	D3_S	6	31	93	42	61	84	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
	D5_U	1	154	161	24	24	49	10	10	10	12	50	50	60	40	40	46	43	43	50
D5	D5_U	2	162	194	19	19	114	10	10	10	55	55	65	44	44	51	47	47	55	
	D5_U	3	195	195	19	35	114	10	10	10	55	60	65	44	48	51	47	51	55	
	D5_U	4	196	213	55	55	114	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D5_U	5	214	227	67	100	114	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
	D5_U	6	228	314	62	90	117	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
	D5_U	7	315	14	144	144	128	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D5_U	8	15	15	101	189	161	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
	D5_U	9	16	33	113	189	161	10	10	10	12	40	60	60	33	48	46	35	51	50
	D5_U	10	34	67	136	189	161	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
	D5_D	1	171	194	19	19	48	10	10	10	12	55	55	60	44	44	46	47	47	50
D6	D5_D	2	195	195	19	35	48	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50
	D5_D	3	196	213	55	55	111	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D5_D	4	214	227	67	100	111	10	10	10	50	60	65	40	48	51	43	51	55	
	D5_D	5	228	314	62	90	115	10	10	10	45	50	55	37	40	44	39	43	47	
	D5_D	6	315	339	144	144	119	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D6	1	308	314	17	17	260	10	10	10	65	65	65	51	51	51	55	55	55	
	D6	2	315	323	128	169	260	10	10	10	50	55	65	40	44	51	43	47	55	
	D6	3	324	329	106	169	50	10	10	10	12	40	55	60	33	44	46	35	47	50
	D6	4	330	30	116	37	50	10	10	10	12	55	60	60	44	48	46	47	51	50



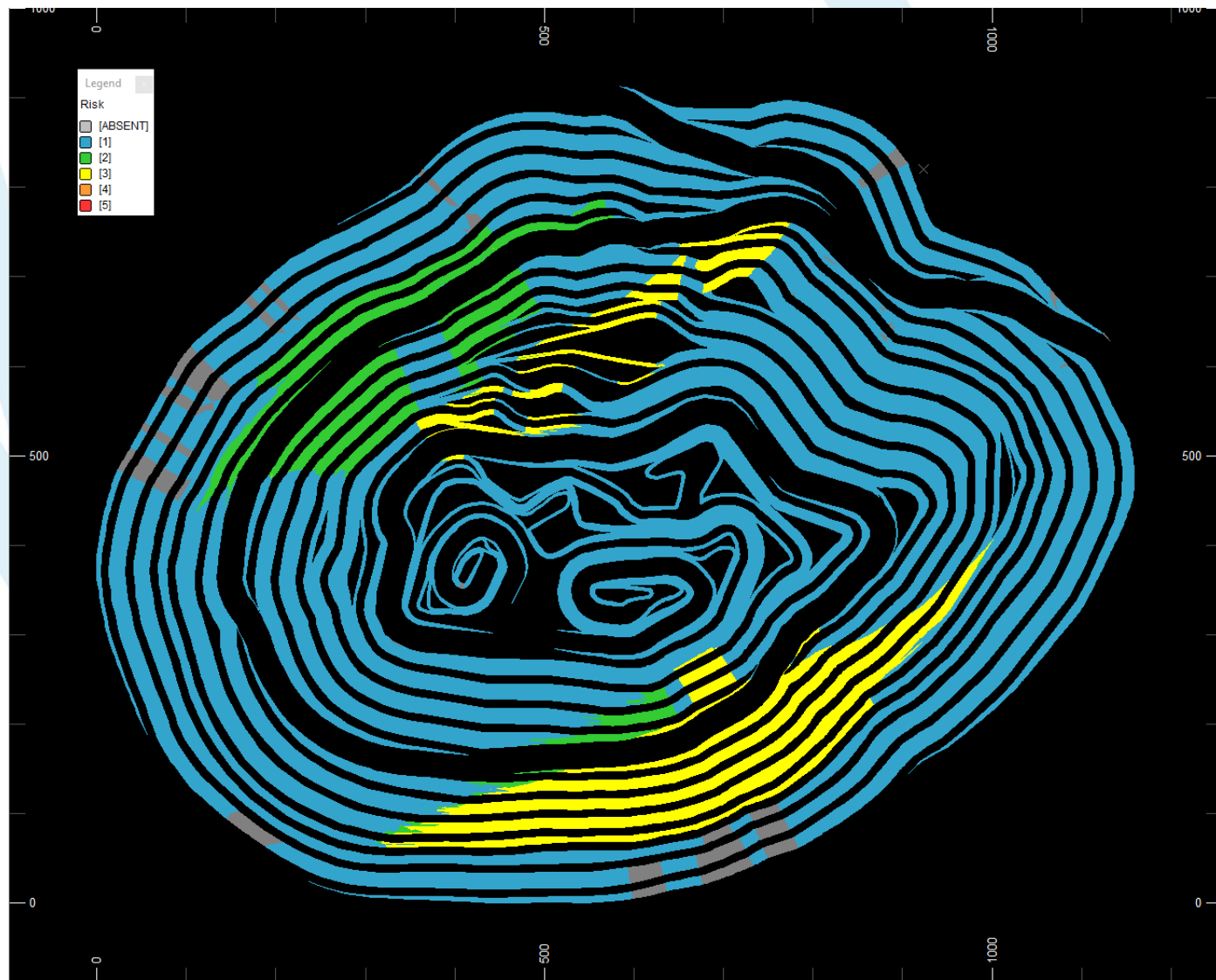


Project Settings

Analysis Risk Matrix OK

Risk Prob.	min PoF	max PoF	Consequence Severity				
			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

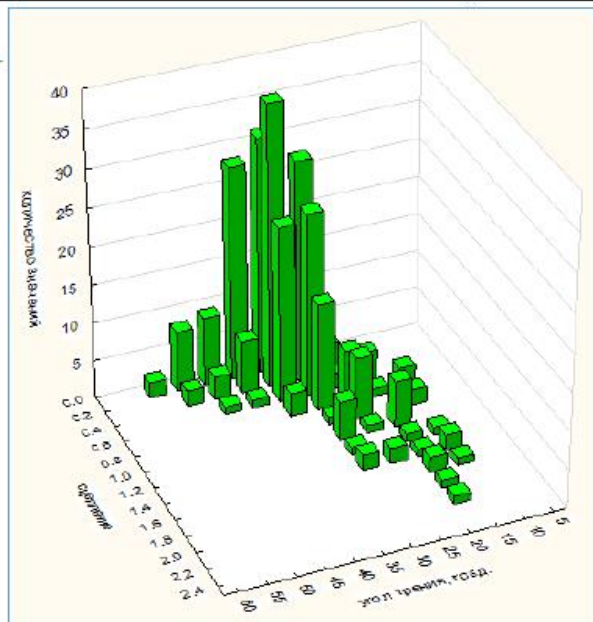
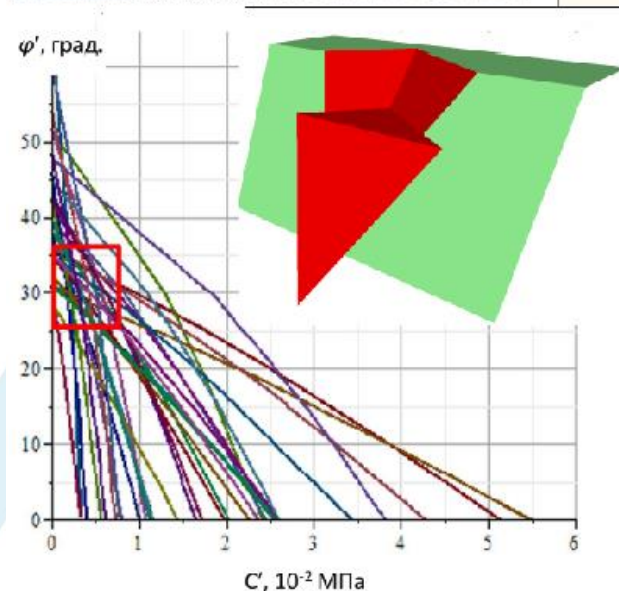
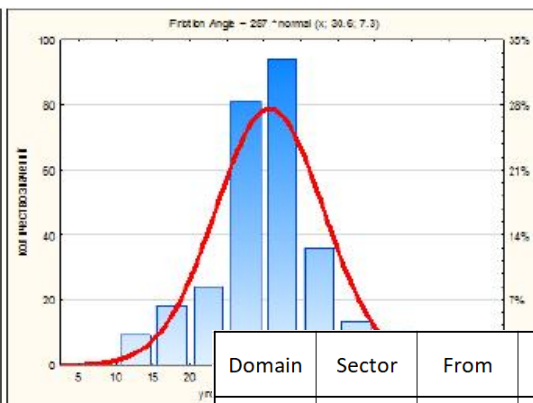
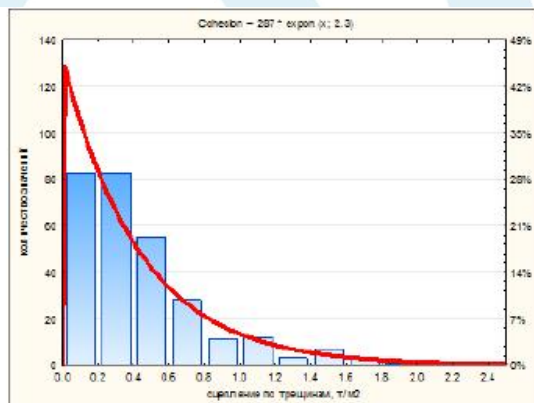
Кинематическая карта карьера содержит данные по вероятности обрушения и потенциальному уровню риска в доменах карьера, на основе которых можно выполнить прогноз потенциально опасных участков на бортах карьера и составить актуальную программу мониторинга устойчивости откосов карьера.



Макаров А. Б., Хормазабаль Э., Ливинский И. С., Спирин В. И., Солуянов 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.

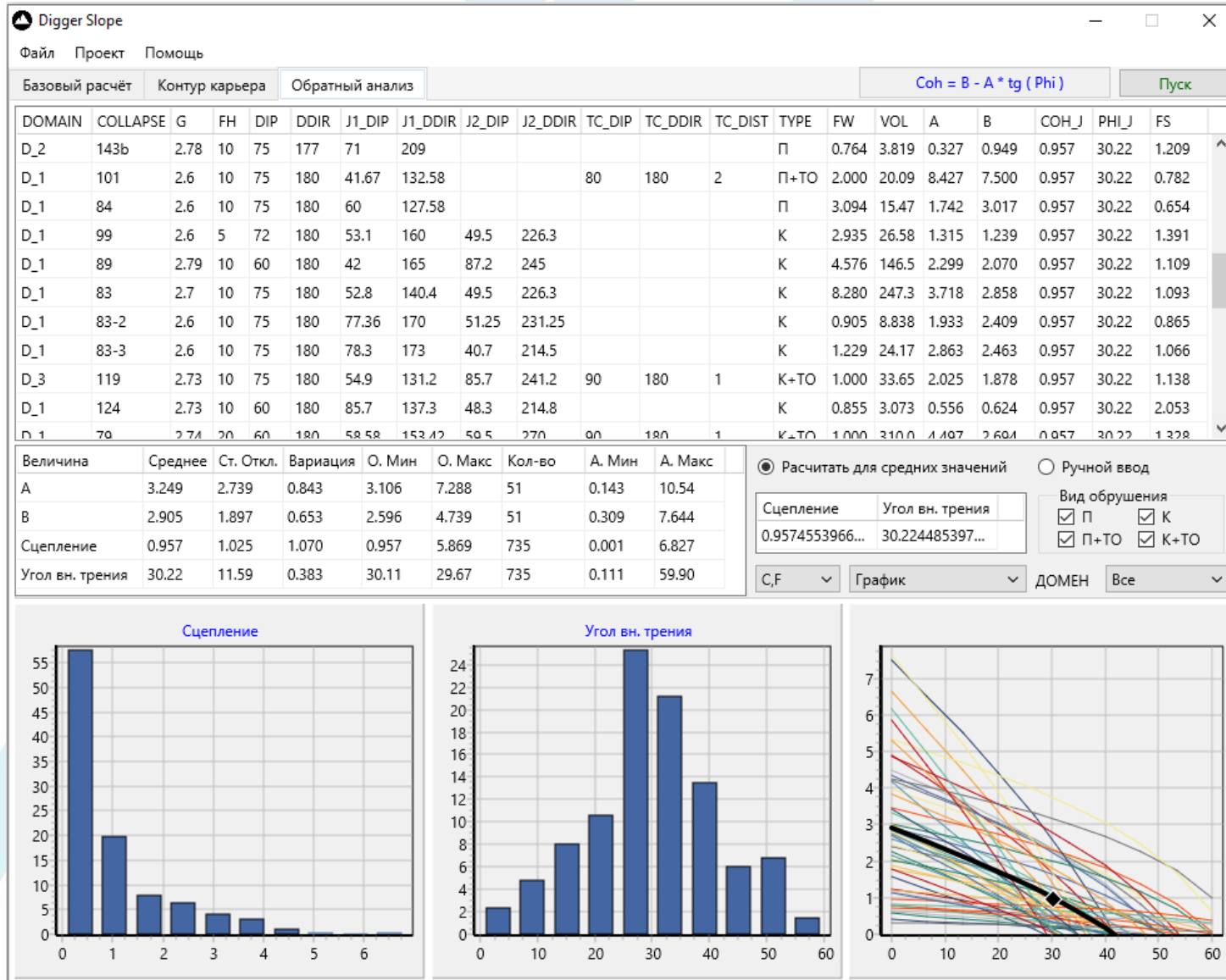
Калибровка исходных данных по факту отработки на основе обратных расчётов:

- Прочностные свойства по трещинам
- Параметры систем трещин (длина, плотность)



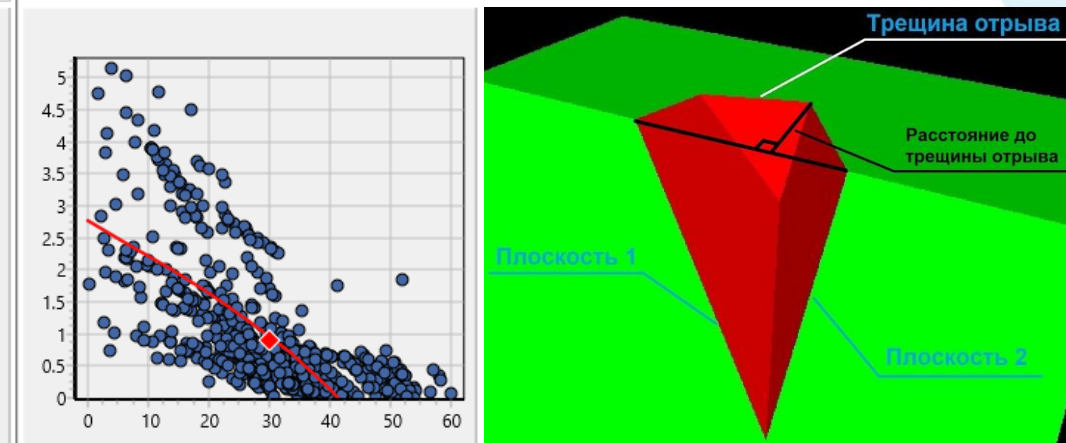
Domain	Sector	From	To	%	BFA	Type	Объём обрушений на метр при длине трещины				
							40	30	20	10	3
D1	1	14	134	6	55						
	2	135	215	76	55	Wedge	52	40	28	10	4
	3	216	262	17	75	Planar	19	19	19	19	4
	4	263	13	2	50	Planar+TC	244	137	61	16	4
D2	1	1	144	97	55						
	2	145	215	1	55	Wedge	75	56	38	11	4
	3	216	324	1	75	Planar	32	32	32	18	4
	4	325	360	1	55	Planar+TC	360	203	90	23	4
D3	1	1	119	48	55						
	2	120	220	46	55	Wedge	43	33	23	9	4
	3	221	299	2	75	Planar	35	35	35	19	4
	4	300	360	4	55	Planar+TC	328	185	82	21	4
D4	1	133	207	0	60	Wedge	59	45	31	10	4
	2	208	312	8	75	Planar	35	35	35	19	4
	3	313	350	35	55	Planar+TC	338	190	85	22	4
	4	351	132	58	55						
D5	1	11	139	6	55						
	2	140	260	7	50	Planar	98	55	25	7	4
	3	261	319	75	75	Planar	35	35	35	19	4
	4	320	10	12	50	Planar+TC	243	137	61	16	4

# Обратные расчёты



## Исходные данные для 4-х видов обрушения:

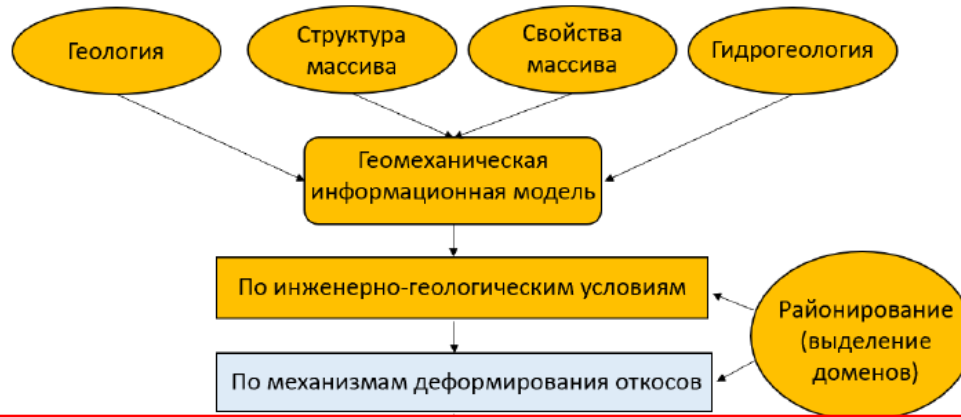
- Плоское (+ с Трещиной отрыва)
- Клиновидное (+ с Трещиной отрыва)
- Структурный домен;
- Параметры обрушения:
  - Объёмный вес пород, т/м<sup>3</sup>;
  - Высота обрушения откоса, м;
- Ориентация откоса и систем трещин, образующих обрушение:
  - Угол падения, °;
  - Азимут падения, °;
- Для трещины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





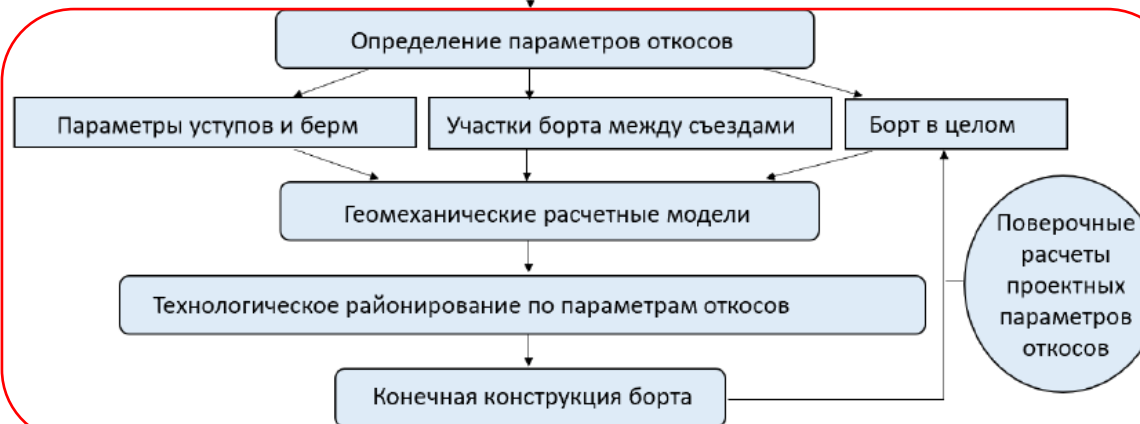
## Структура геомеханического обеспечения устойчивости бортов и уступов

Создание моделей  
массива



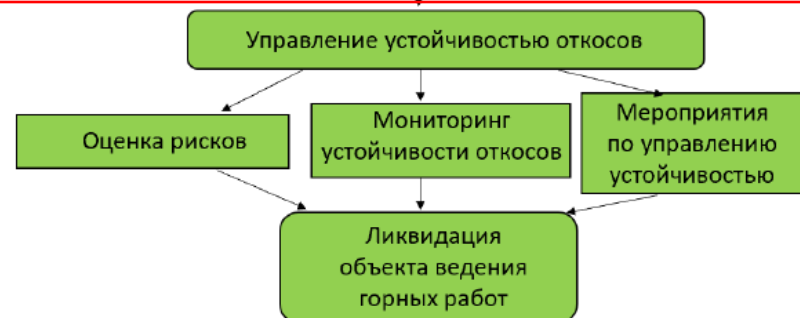
Корректировка  
исходных  
данных

Анализ устойчивости  
откосов



Калибровка  
расчётов  
устойчивости

Реализация проекта



на основе  
фактических  
данных  
отработки  
месторождения

# Основные задачи 3К-моделирования

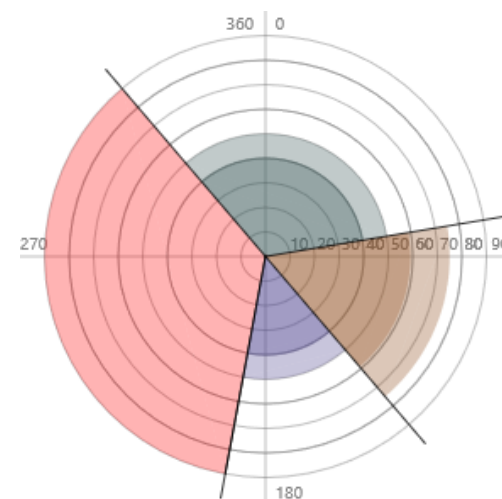
Результаты 3К-моделирования	Green Field	Проектирование	Эксплуатация
1. Рекомендованная конфигурация откосов	Оценка рентабельности отработки месторождения	Построение чаши NPV с учётом инженерно-геологических условий месторождения	Оптимизация промежуточных контуров карьера (pushback)  Защита ПРГР
2. Оценка устойчивости откосов: - Коэффициент запаса устойчивости - Вероятность обрушения - Уровень риска	Оптимизация объёмов отработки запасов	Оптимизация объёмов вскрыши	Оптимизация буровзрывных работ
3. Прогнозный объём обрушений	Оценка рисков	Оптимизация постановки откосов в конечное положение	Оптимизация укрепления откосов
4. Районирование карьерного поля по параметрам откосов	Анализ стратегий отработки «агрессивно – консервативно»	Оценка достаточности исходных данных	Оценка степени достоверности моделирования
5. Выявление потенциально опасных участков на бортах карьера		Исключение неблагоприятных экспозиций откосов	Составление программы мониторинга устойчивости откосов
6. Проведение обратных расчётов			Уточнение исходных данных и калибровка результатов расчёта



# Спасибо за внимание!



[digger-apps.xyz](https://digger-apps.xyz)



Peace. Love. Digger.