

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет**

**Научный центр геомеханики и проблем горного производства**

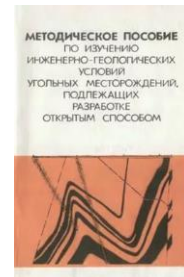
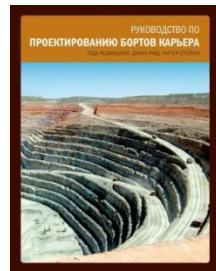
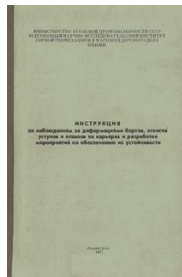
**Проблемы инженерно-геологического и  
геомеханического обеспечения устойчивости бортов  
карьеров и отвалов**

Павлович А.А. канд. техн. наук

Цирель С.В. д-р техн. наук

# Актуальные нормативные документы

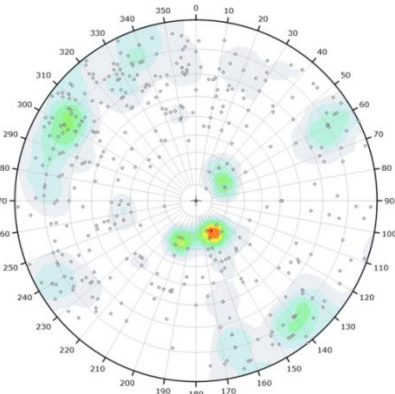
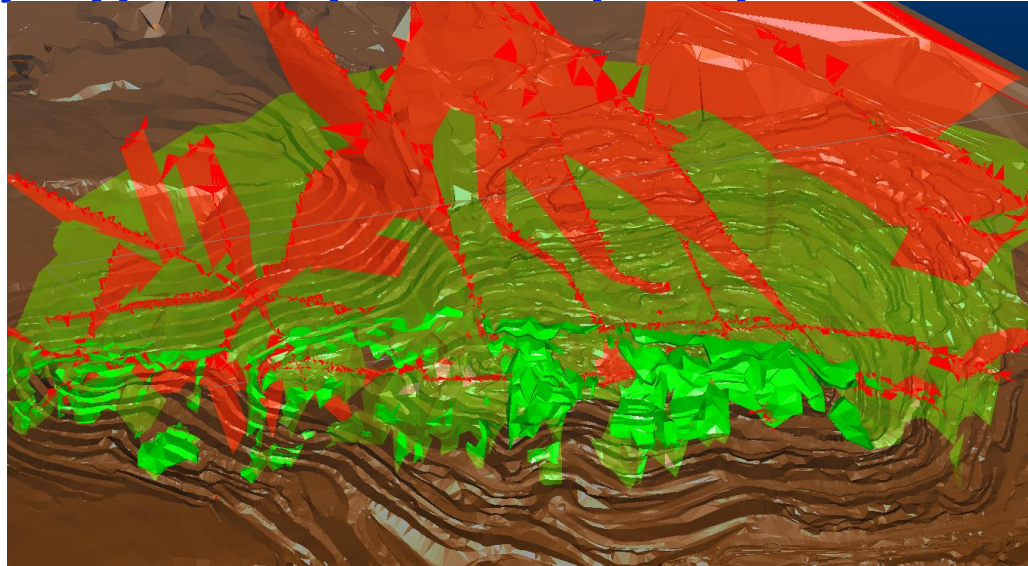
1. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб.: ВНИМИ, 1998
2. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Л.: ВНИМИ. – 1971. – 188 с.



## Важные документы

1. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом. Л.: ВНИМИ. 1986. 113 с.
2. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. - Л.: ВНИМИ, 1972
3. Методическое пособие по определению углов откосов уступов и углов наклона бортов карьера, сложенных многолетнемерзлыми породами. Л.: ВНИМИ. 1972. Якутск, 1975.
4. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Л.: ВНИМИ. –1987. – 118 с.
5. Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии. - М.: Унипромедь, 1989
6. Рекомендации по расчету устойчивости скальных откосов. П-8843-86. М.: Гидропроект .
7. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. Л.: ВНИМИ, 1987

# Структурное строение прибортового массива



Symbol	Feature
—	Plane Vectors

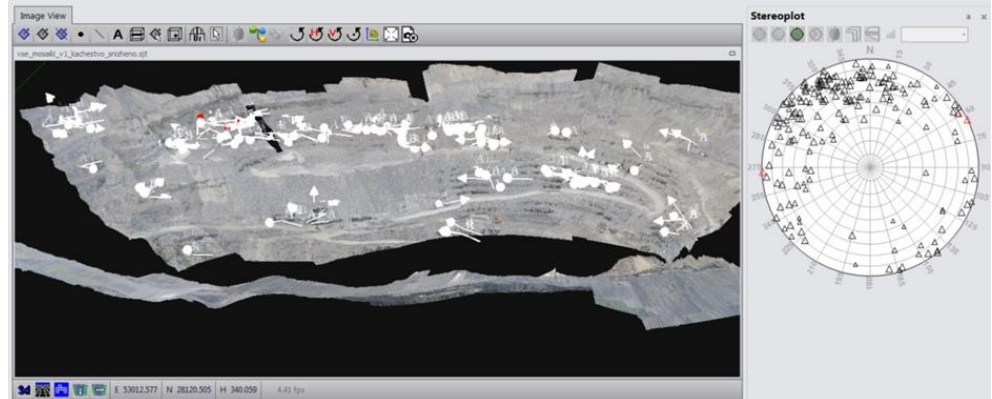
Color	Density Concentrations
0.00 - 1.00	0.00 - 1.00
1.00 - 2.00	1.00 - 2.00
2.00 - 3.00	2.00 - 3.00
3.00 - 4.00	3.00 - 4.00
4.00 - 5.00	4.00 - 5.00
5.00 - 6.00	5.00 - 6.00
6.00 - 7.00	6.00 - 7.00
7.00 - 8.00	7.00 - 8.00
8.00 - 9.00	8.00 - 9.00
9.00 - 10.00	9.00 - 10.00

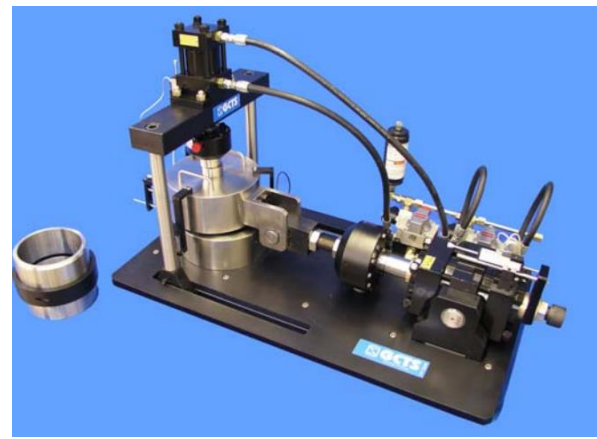
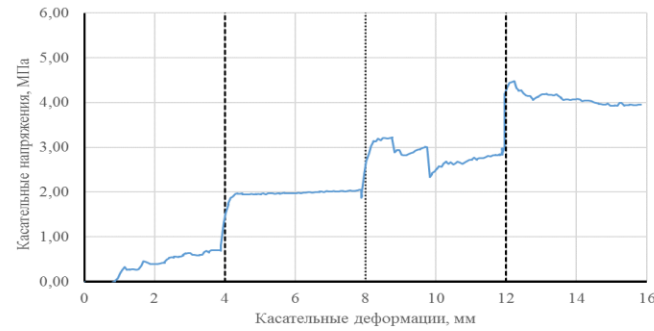
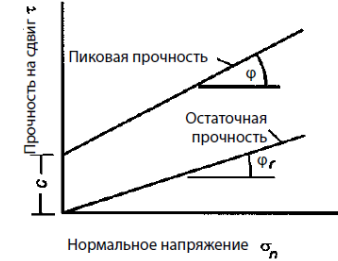
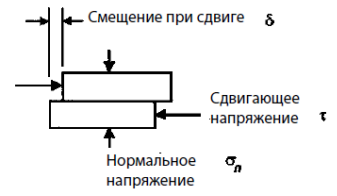
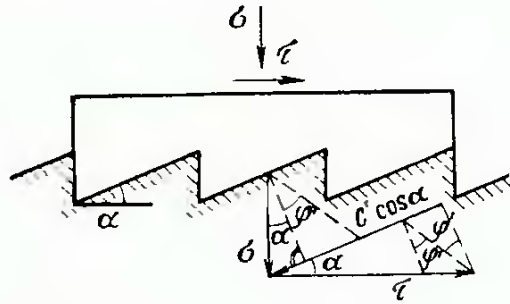
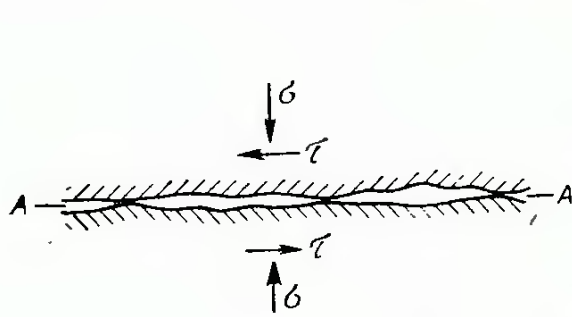
Parameter	Value
Contour Data	Plane Vectors
Maximum Density	9.15%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Parameter	Value
Plot Mode	Plane Vectors
Vector Count	1451 (389 Deleted)
Wavelength	Lower
Projection	Equal Angle



# Определение прочностных свойств по контактам горных пород



# Определение прочностных свойств массива горных пород

$$C_M = \frac{C_0 - C'}{1 + a' \ln \left( \frac{H}{\ell_\tau} \right)} + C'$$

H – высота прибортового массива, м;

l – средний размер элементарного структурного блока массива, ограниченного трещинами, м;

a – коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и степени и характера трещиноватости

Группа пород	Наименование пород и характер трещиноватости	Величина сцепления в монолите, МПа	Величина коэффициента
III	Слабоуплотненные и слаботрещиноватые песчано-глинистые отложения, сильно выветрелые полностью каолинизированные изверженные	0,4-0,9	0,5
	Уплотненные песчано-глинистые, в основном, нормальносекущей трещиноватости	0,1-2,0	2
II	Сильно каолинизированные изверженные	3,0-8,0	2
	Уплотненные песчано-глинистые с развитой косесекущей трещиноватостью, каолинизированные изверженные	3,0-8,0	3
	Средней крепости слоистые, нормальносекущей трещиноватости	10-15 15-17 17-20	3 4 5
I	Крепкие, преимущественно нормальносекущей трещиноватости	20-30 >30	6 7
	Крепкие изверженные с развитой косесекущей трещиноватостью.	>20	10



# Критерий Хука-Брауна

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left( m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right)^a$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

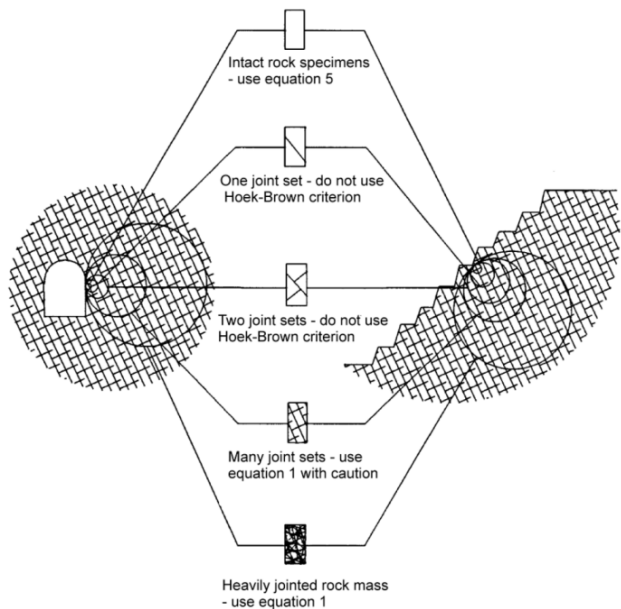
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20I}{3}} \right)$$

$$\sigma_{ci} \leq 100 \text{ МПа}$$

$$E_m \text{ (GPa)} = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$

$$\sigma_{ci} \geq 100 \text{ МПа}$$

$$E_m \text{ (GPa)} = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \cdot 10^{((GSI-10)/40)}$$

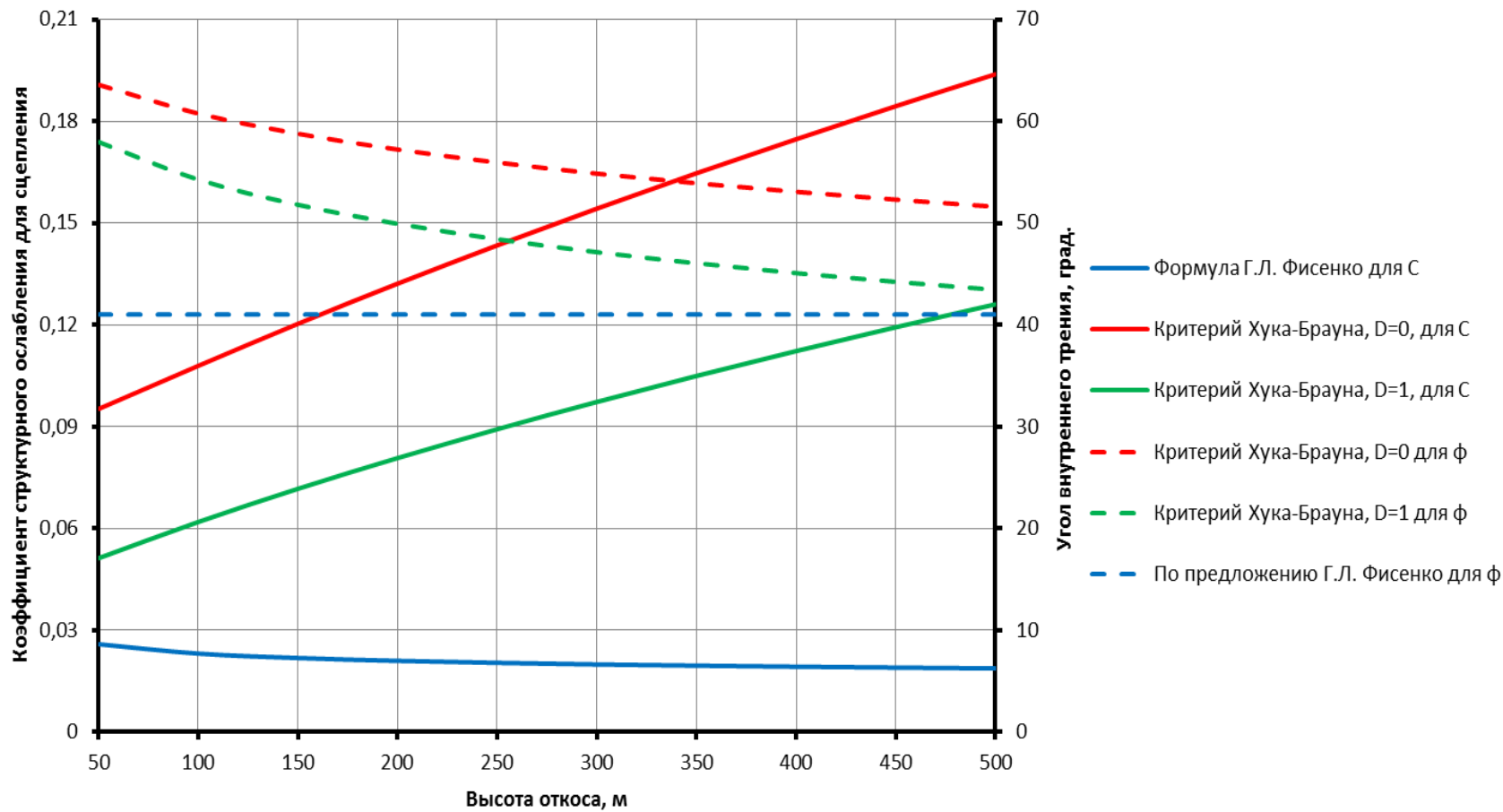


$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}}$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНДЕКС ПРОЧНОСТИ		СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ				
В этой таблице представлена классификация по описанию структуры и состояния поверхности горной массы. Оцените среднюю величину геологического индекса прочности (GSI) по линиям равных значений. Не старайтесь быть слишком точными. Назначение диапазона GSI от 36 до 42 является наиболее реалистичным, нежели утверждение, что GSI=38. Также важно осознавать, что критерий Хэка-Брауна должен быть применим только к горным массам, в которых размер отдельных блоков или обломков мал по сравнению с размером рассматриваемого котлована. Если размеры отдельных блоков больше, приблизительно, одной четверти размера котлована, разрушение будет в основном регулироваться конструктивно и критерий Хэка-Брауна использовать не следует.		ОЧЕНЬ ХОРОШИЕ Очень шероховатые, чистые выветрелые поверхности				
		ХОРОШИЕ Шероховатые, слегка выветрелые поверхности				
		ПОВЫШЕ Гладкие, умеренно выветрелые и измененные поверхности				
		ПЛОХОЕ Сплошности скопления, сильно выветрелые поверхности				
		ОЧЕНЬ ПЛОХОЕ Сплошности скопления, сильно выветрелые поверхности в состоянии слабости или заполнения				
СТРУКТУРА		СНИЖЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ←				
	<b>НЕНАРУШЕННАЯ ИЛИ МАССИВНАЯ</b> Ненарушенное горное пространство или массив скалы с очень малым количеством разрывов на значительном расстоянии	90	80	Н/Д	Н/Д	Н/Д
	<b>БЛОЧНАЯ</b> Очень хорошо соединенная ненарушенная горная масса, состоящая из кубических блоков, образованных тремя ортогональными системами разрывов	70	60	50	40	30
	<b>ОЧЕНЬ БЛОЧНАЯ</b> Соединенная, частично нарушенная горная масса с многогранными угловатыми блоками, образованными четырьмя (или более) системами разрывов	50	40	30	20	10
	<b>БЛОЧНАЯ/НАРУШЕННАЯ</b> Складчатая и/или нарушенная сбросами с угловатыми блоками, образованными множеством пересекающихся систем разрывов	30	20	10	5	0
	<b>РАЗДРОБЛЕННАЯ</b> Плохо соединенная, сильно раздробленная горная масса со смесью угловатых и окатанных горных обломков	10	5	0	0	0
	<b>СЛОИСТАЯ</b> Складчатая и тектонически расслоенная горная порода. Преобладание сланцеватости над другими системами разрывов, приводящей к полной потере блочности	Н/Д	Н/Д	Н/Д	Н/Д	Н/Д
		← СНИЖЕНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ГОРНЫХ ФРАГМЕНТОВ				

# Значения коэффициентов структурного ослабления для сцепления и угла внутреннего трения по критерию Хука-Брауна и формуле Г.Л. Фисенко



# Принятые на западе коэффициенты запаса устойчивости

Масштаб откоса	Последствия разрушений	Принятые критерии*		
		Статический минимальный коэффициент запаса	Динамический минимальный коэффициент запаса	Максимальная вероятность разрушения (при коэффициенте запаса $\leq 1,0$ )
Уступ	От небольших до крупных	1,1	–	25 % - 50 %
Участок между транспортными бермами	Небольшие	1,15-1,2	1,0	25 %
	Умеренные	1,2	1,0	20 %
	Крупные	1,2-1,3	1,1	10 %
Результирующий угол откоса	Небольшие	1,2-1,3	1,0	15 % - 20 %
	Умеренные	1,3	1,05	5 % - 10 %
	Крупные	1,3-1,5	1,1	$\leq 5$ %

## Рекомендуемые значения коэффициента запаса в «Методических указаниях, 1972 г.»

Общая характеристика откоса (или борта)	Величина коэффициента запаса в зависимости от срока службы откоса	
	до 5 лет	более 5 лет
Нерабочий борт, сложенный глинами или трещиноватыми породами	1,20	1,30
Нерабочий борт с преобладанием песчаных и гравелистых пород	1,15	1,20
Рабочий борт	1,20	-
Откосы рабочих уступов и отвалов	1,20	-
Откосы уступов нерабочего борта, сложенные глинистыми и трещиноватыми породами	1,50	2,00
Откосы уступов нерабочего борта, сложенные песчаными и гравелистыми породами	1,15	1,20

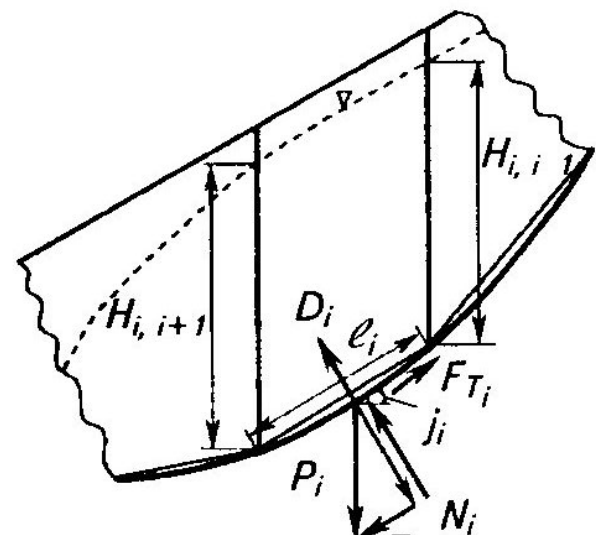
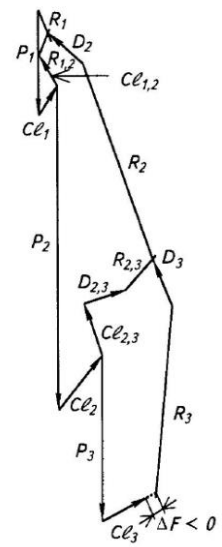
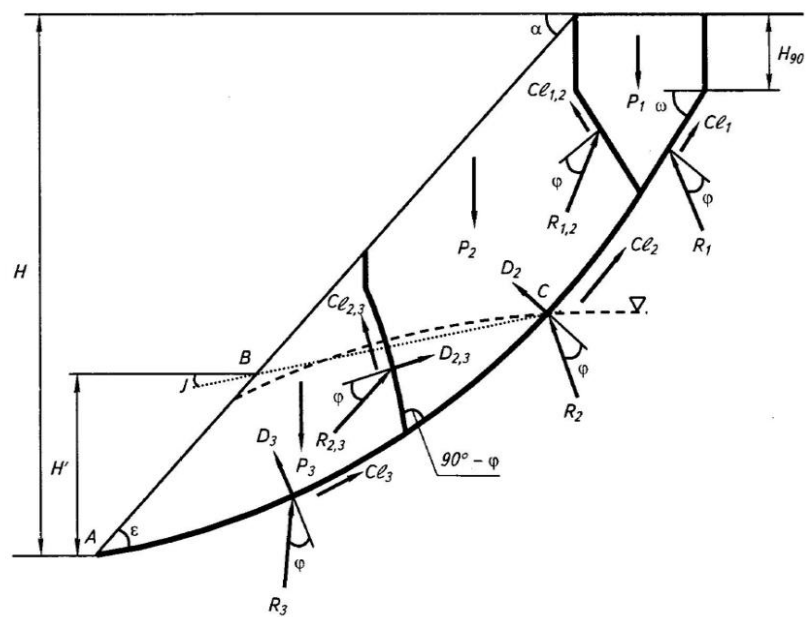


# Методы расчета устойчивости откосов и условия равновесия, которым они удовлетворяют

Верхняя часть таблицы – отечественные методы; нижняя часть - зарубежные

Метод	Равновесие сил		Равновесие моментов
	х	у	
Алгебраическое сложение сил	нет	нет	да
Векторное сложение сил	да	да	нет
Метод Феллениуса	нет	нет	да
Упрощенный метод Бишопа	да	нет	да
Упрощенный метод Янбу	да	да	нет
Метод корпорации инженеров	да	да	нет
Метод Лове-Карафиата	да	да	нет
Метод Моргенштерна и Прайса	да	да	да
Метод Спенсера	да	да	да
Метод Сарма	да	да	да

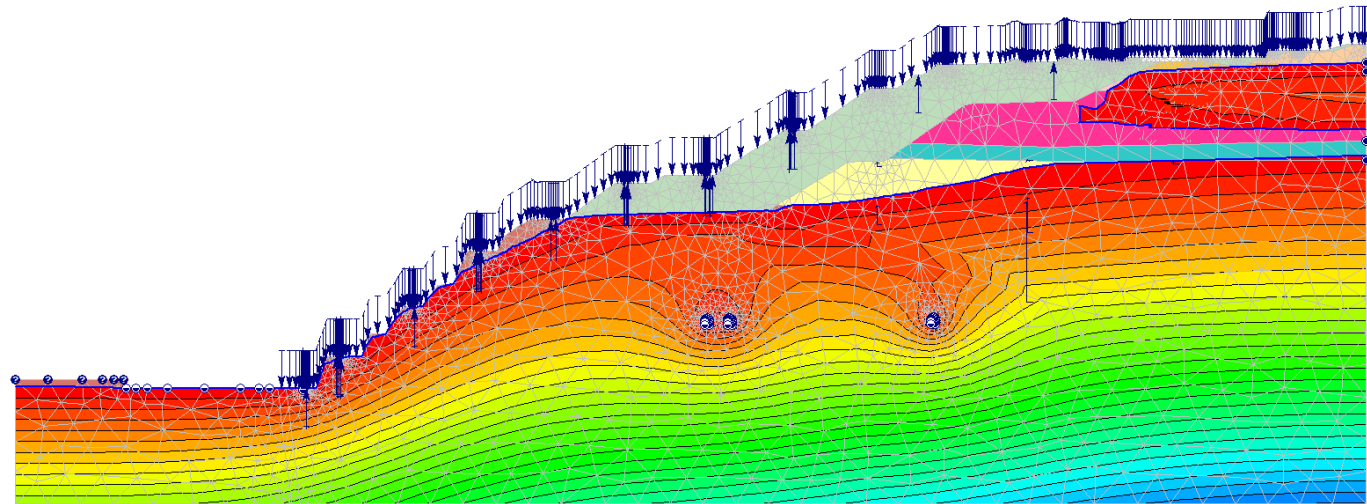
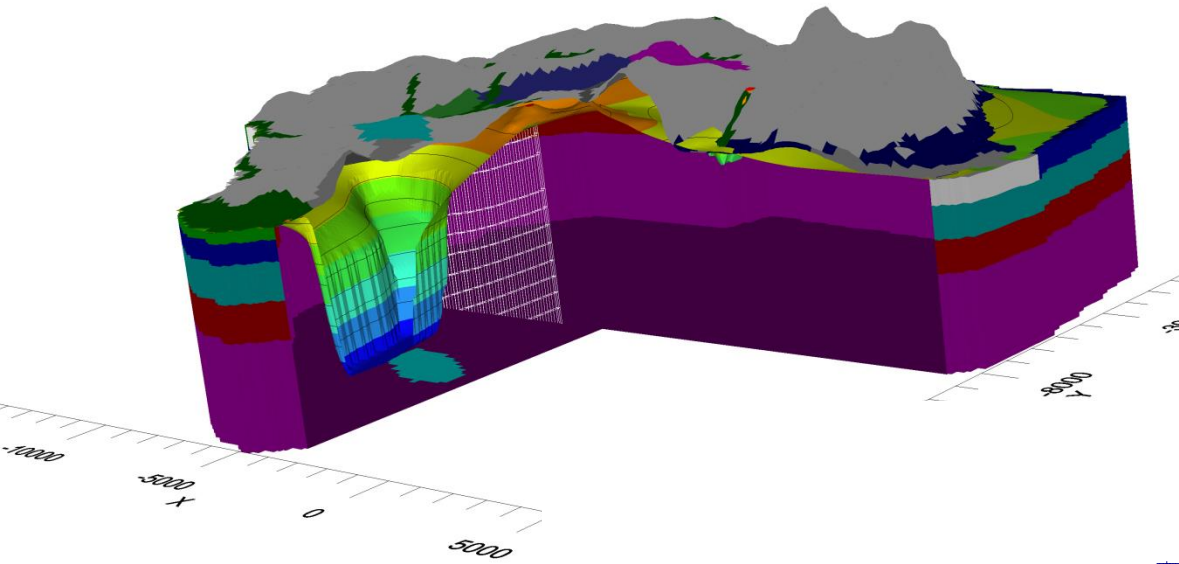
# Оценка влияния обводненности на устойчивость прибортового массива



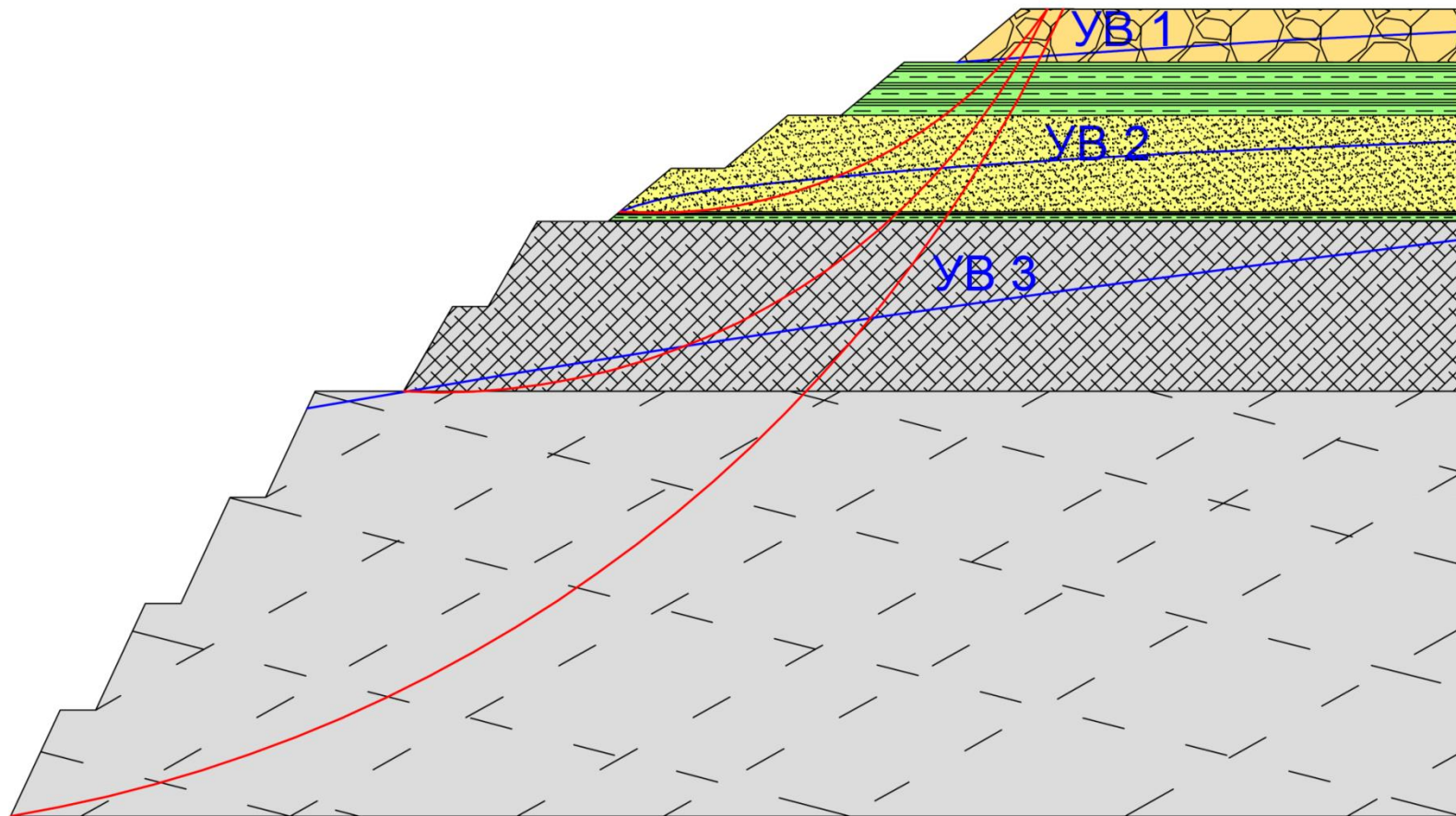
$$D_i = \gamma_B H_{cp_i} \ell'_i,$$

$$\gamma_B H_{cp_i} = \gamma_B \frac{H_{i,i-1} + H_{i,i+1}}{2};$$

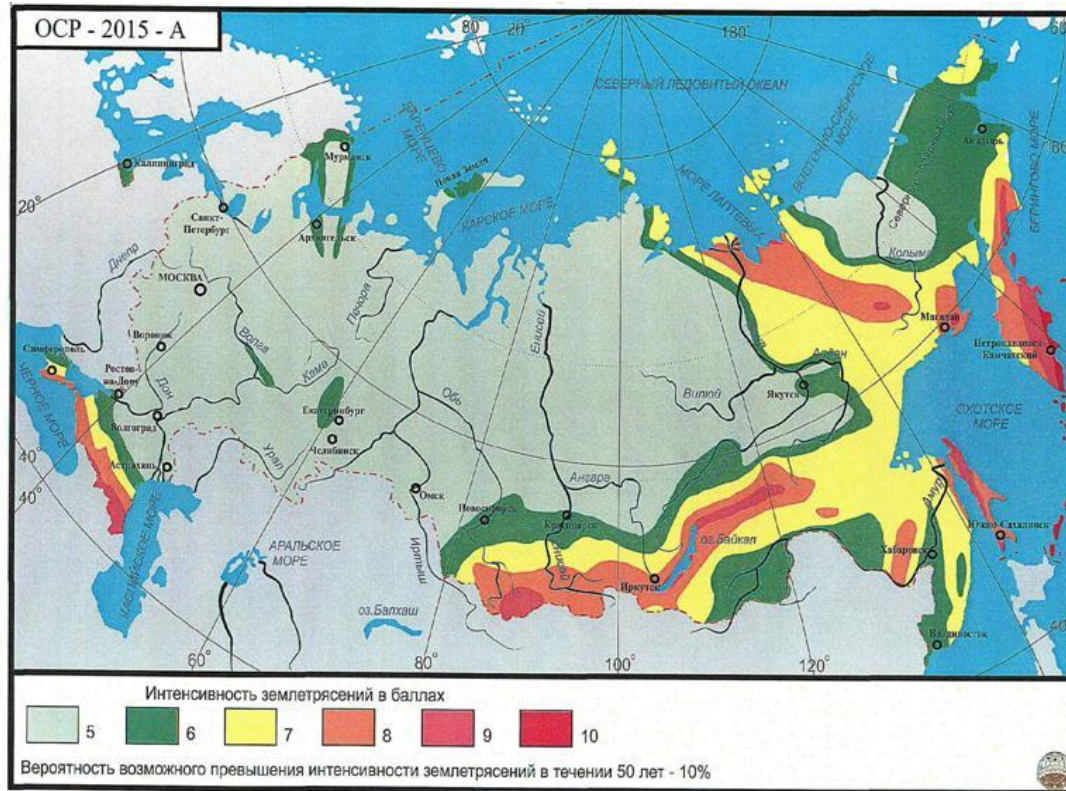
# Геофильтрационное моделирование



# Геофильтрационное моделирование

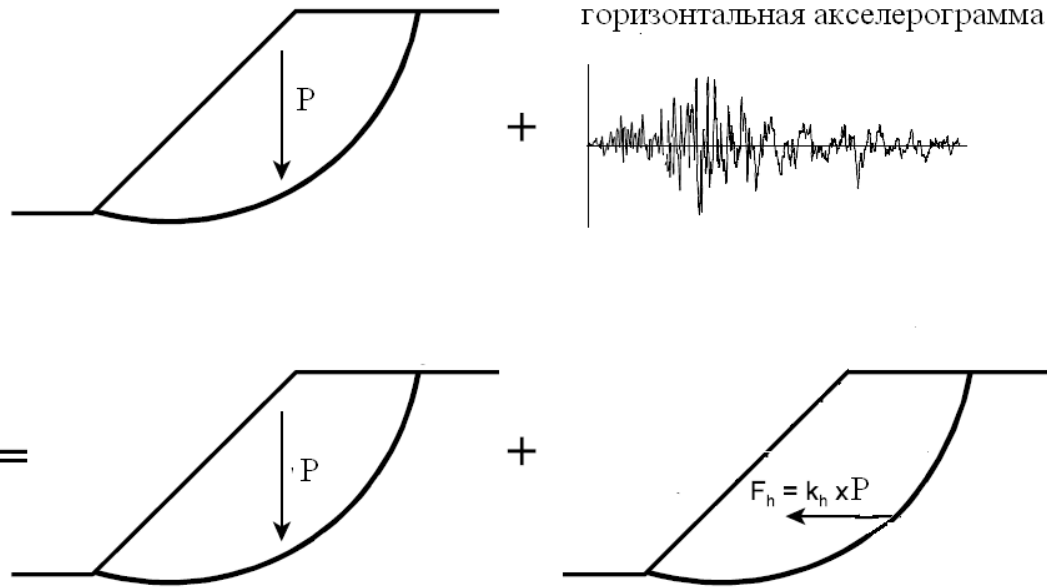


# Сейсмическое воздействие от землетрясений



Общее сейсмическое районирование. Карта А.

# Псевдостатический подход



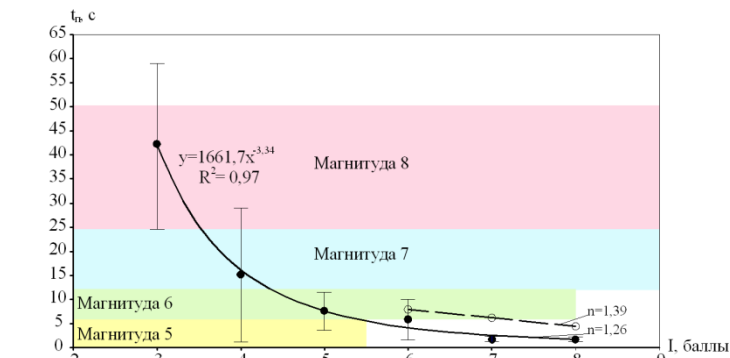
$$Q_c = (k_1 \cdot \dots \cdot k_n \cdot k_c) \cdot P = k'_c \cdot P$$

P - вес призмы возможного обрушения;  $k_c$  – коэффициент сейсмичности;  
 $k_1 \dots k_n$  – поправочные коэффициенты.

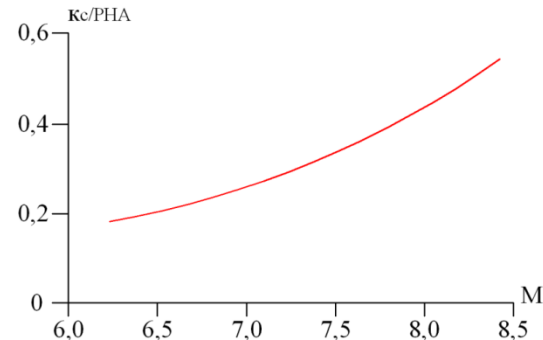


# Рекомендованные коэффициенты сейсмичности

Коэффициент сейсмичности	Описание	
0,0375-0,15	В России	
0,05-0,15	В США	
0,12-0,25	В Японии	
0,03-0,27 (1,2)	В Чили	
0,1	Сильное землетрясение	Терцаги
0,2	Сильное разрушительное землетрясение	
0,5	Катастрофическое землетрясение	
0,1-0,2	Seed,	
0,1	Крупное землетрясение	Корпорация инженеров
0,15	Великое землетрясение	
1/2 до 1/3 PHA	Marcuson,	
1/2 PHA	Hynes-Griffin,	
PHA – пиковое горизонтальное ускорение (в g)		



Зависимость между временем, необходимым на подготовку сползания призмы обрушения и интенсивностью землетрясений



Зависимость коэффициента сейсмичности отнесенного к пиковому горизонтальному ускорению от магнитуды землетрясения [по данным американского инженера Robert Pyke]

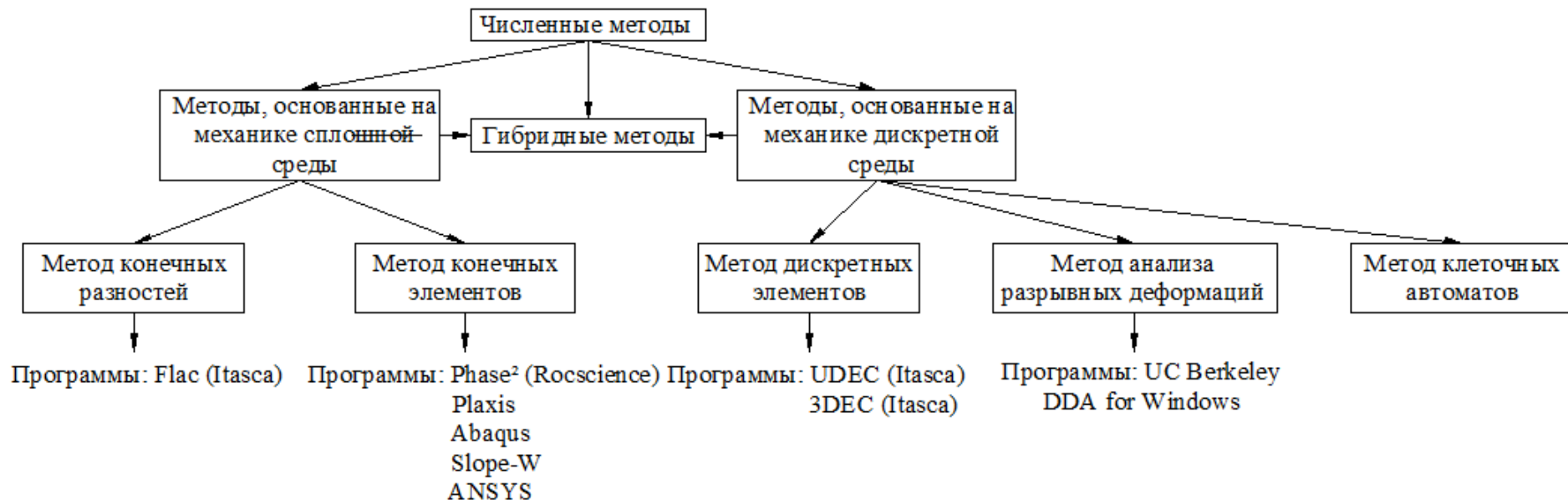
## Учет землетрясения при расчетах бортов карьеров

$$n_c = \frac{\sum T_{y\partial} - Q \cdot \sin \beta \cdot \operatorname{tg} \rho'}{T_{c\partial} + Q \cdot \cos \beta} \geq 1,02 - 1,05$$

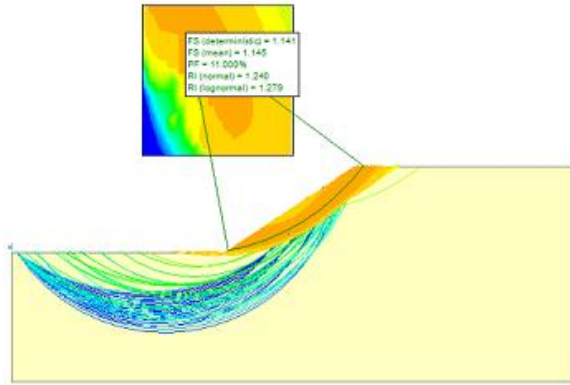
$$Q = K_0 \cdot K_1 \cdot P \cdot k_c$$

где:  $K_0$  – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность (т.е. для карьеров принимают 1,5, для отвалов – 1,0);  $K_1$  – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений ( $K_1=0,25$ );  $P$  – нагрузка, вызывающая инерционную силу (вес призмы возможного обрушения), т;  $k_c$  – коэффициент сейсмичности, который представляет собой значения ускорения колебаний в долях  $g$ .

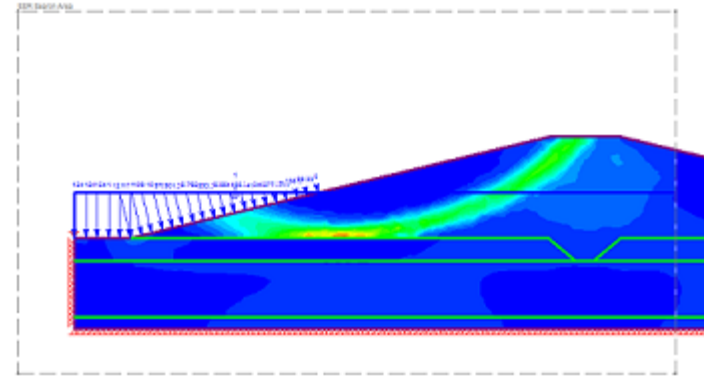
# Численное моделирование



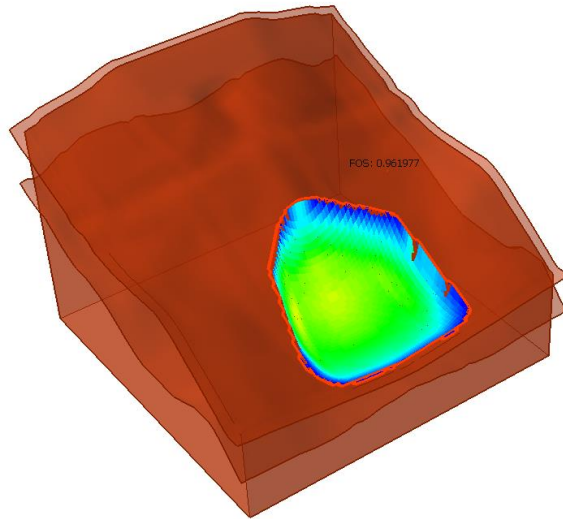
Slide



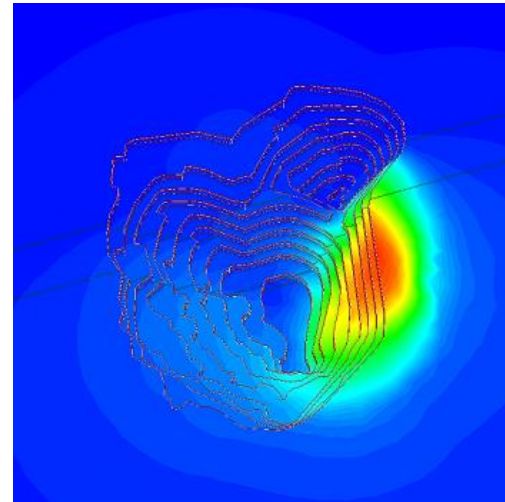
RS2



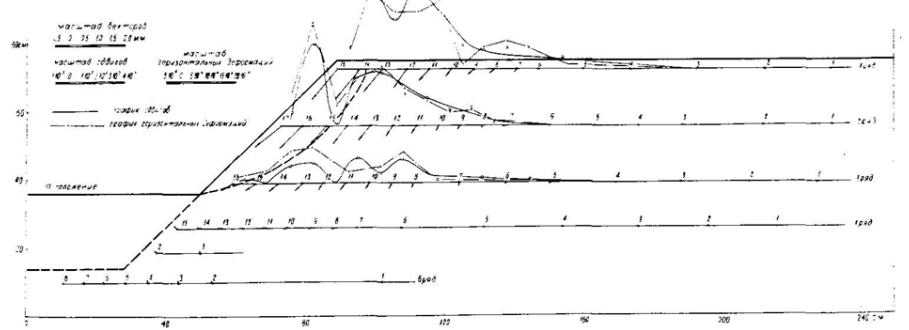
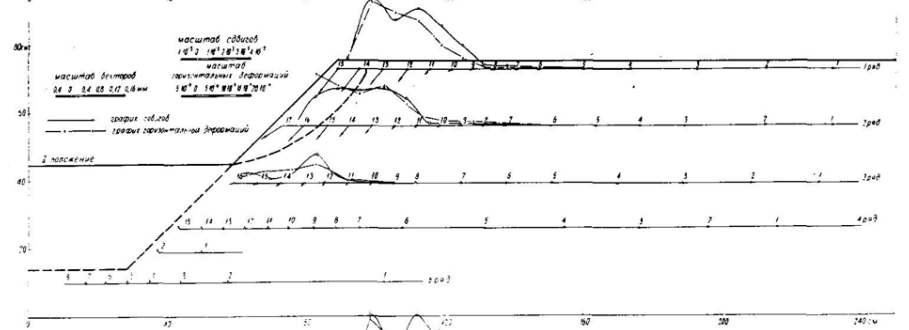
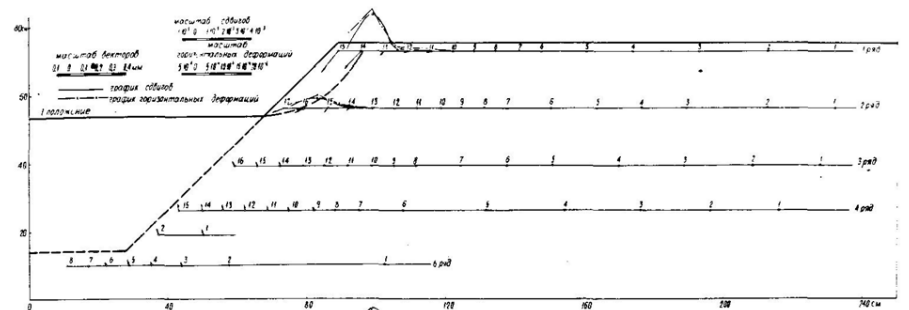
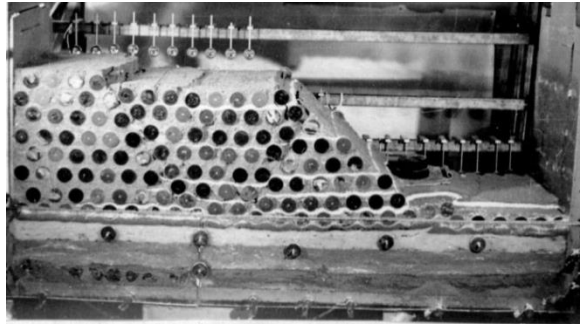
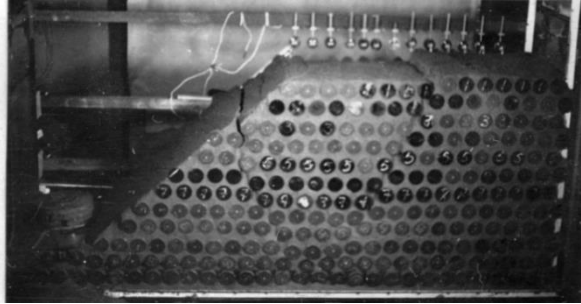
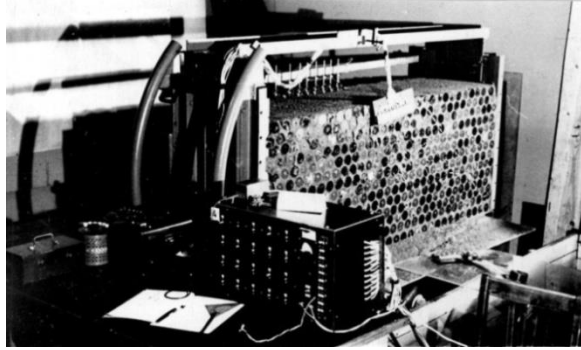
Slide 3D



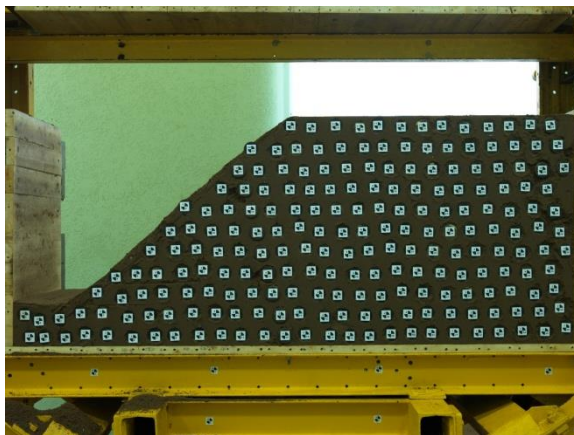
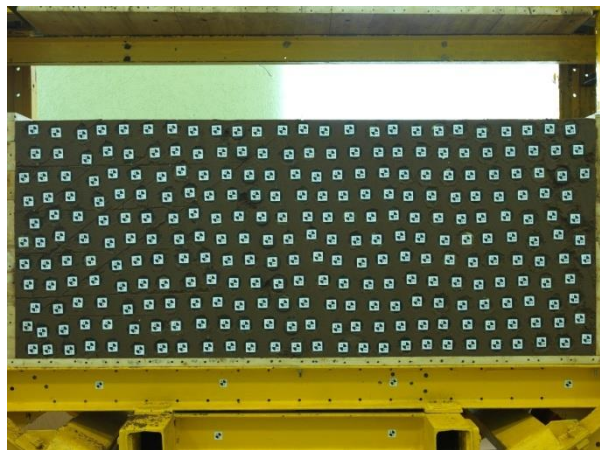
RS3



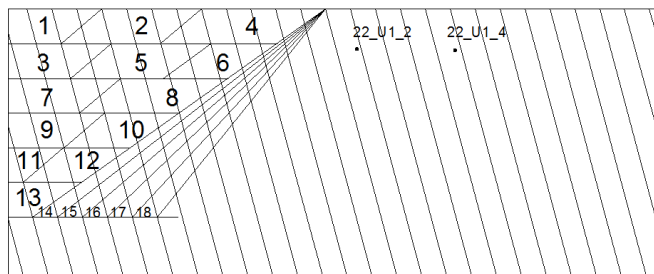
# Исследование деформирования бортов карьеров на ЭМ (А.М.Мочалов)



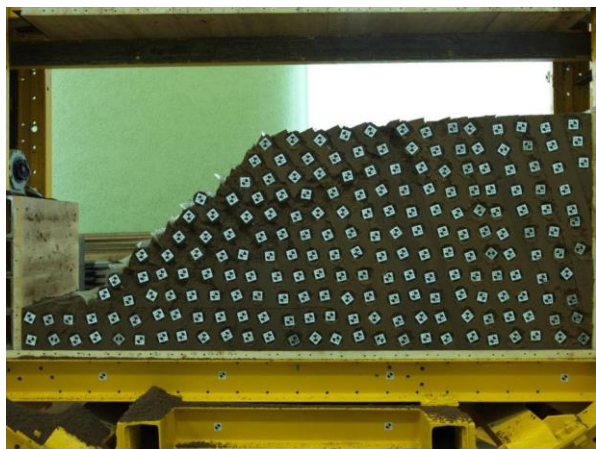




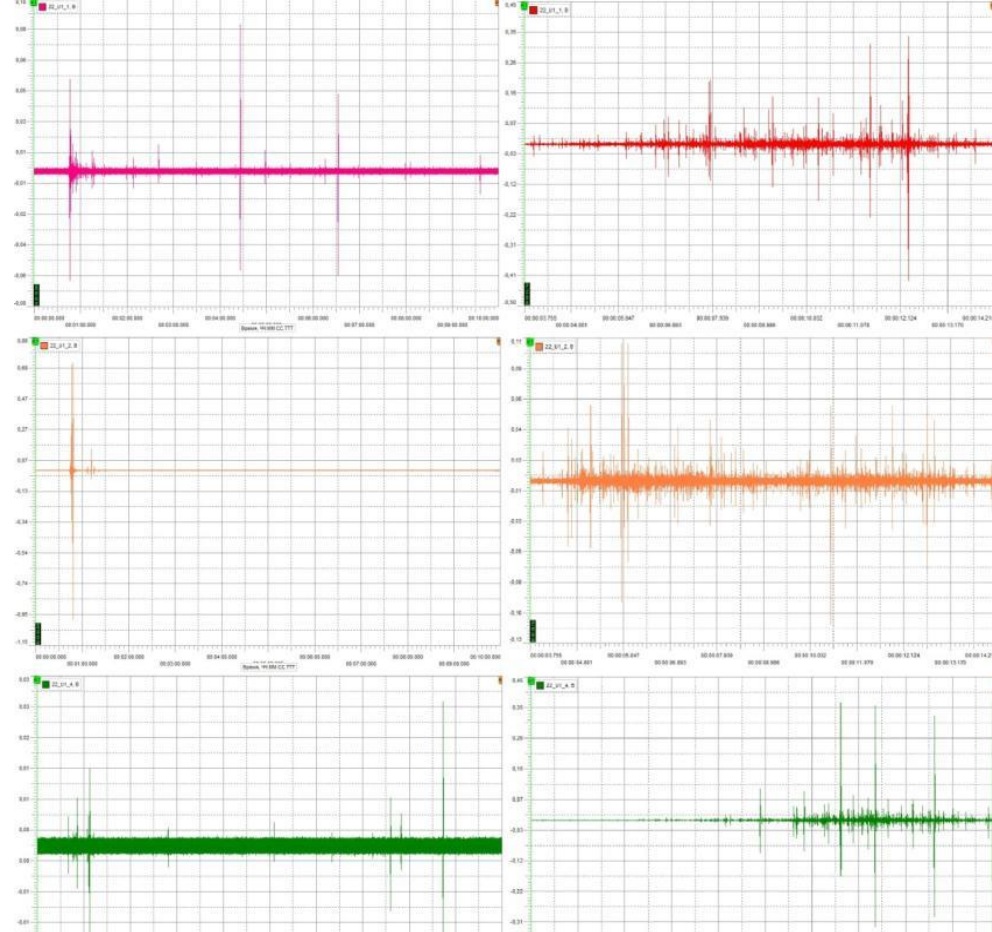




Модель 2. Обрушение при угле откоса 39



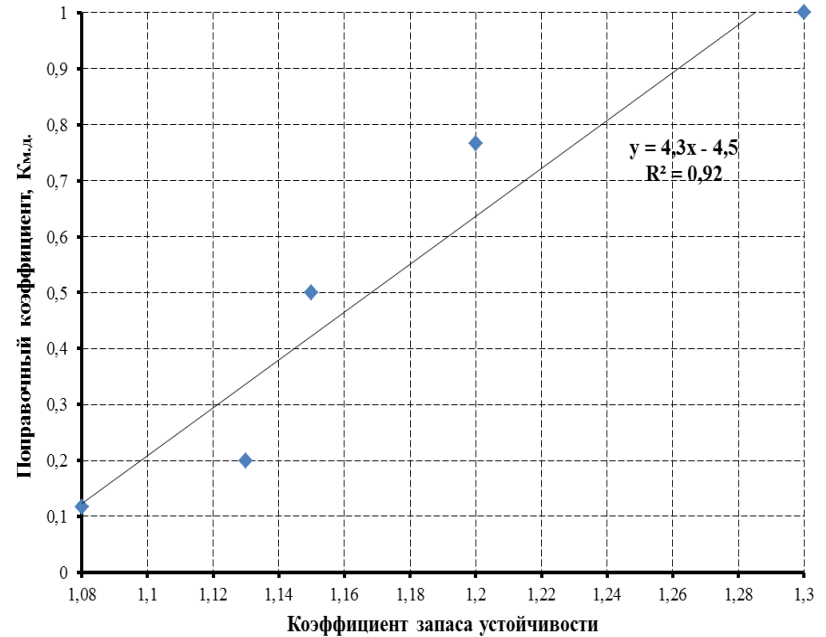
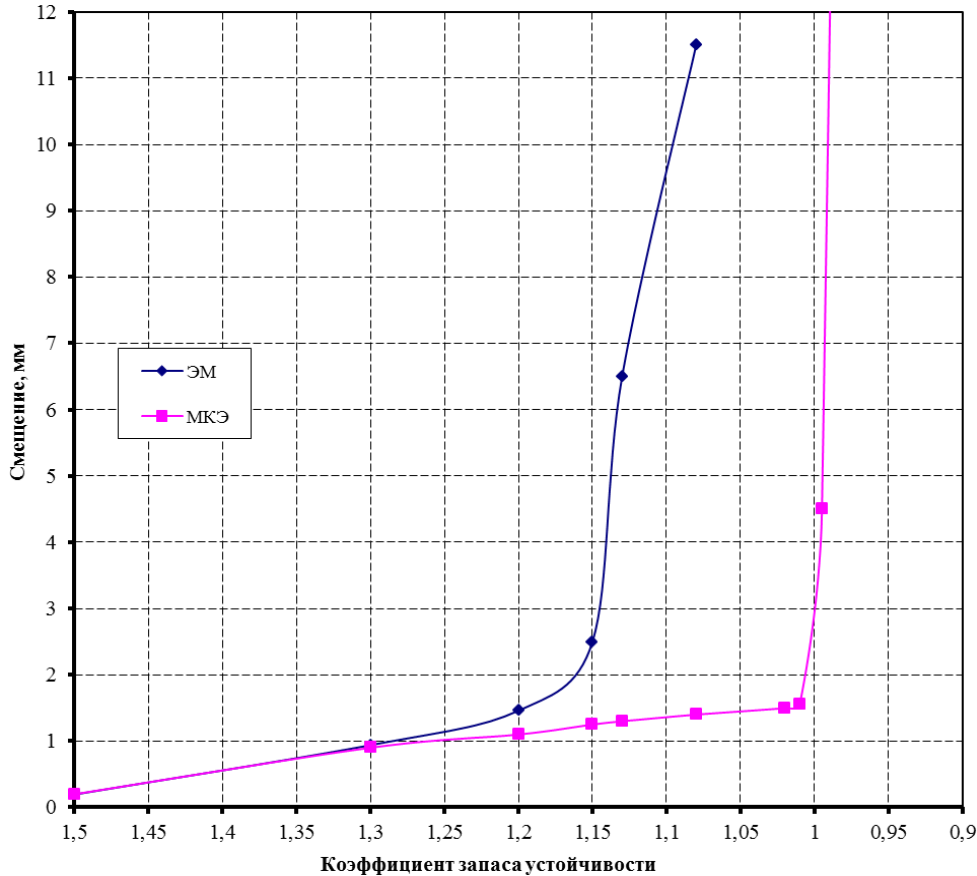
Общая схема обработки моделей и  
расположения акустических датчиков в  
модели 2



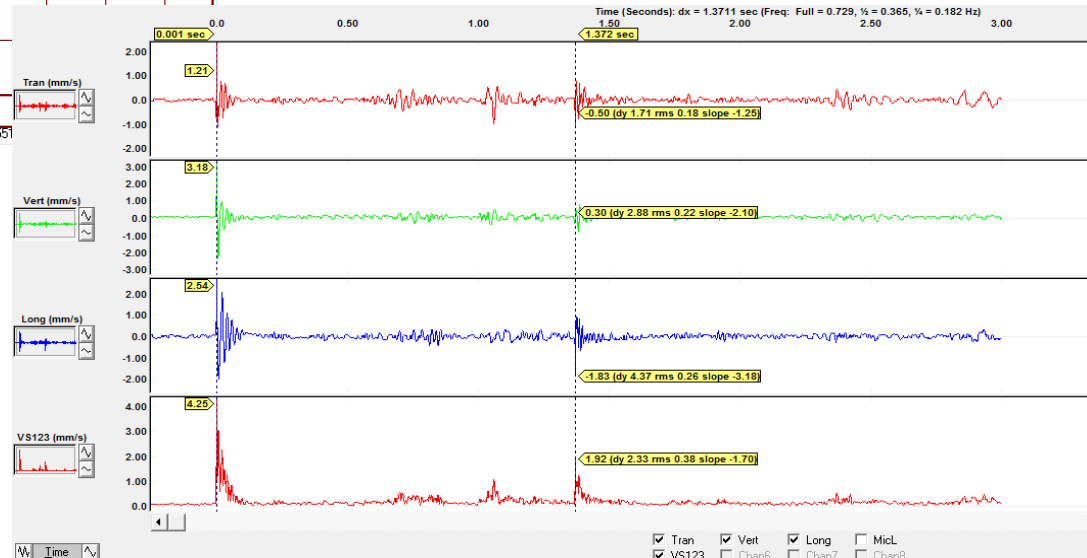
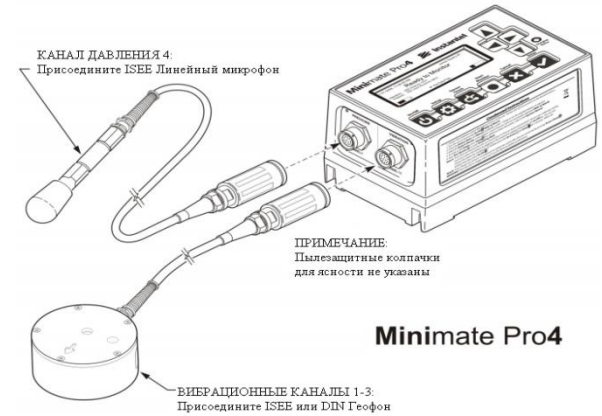
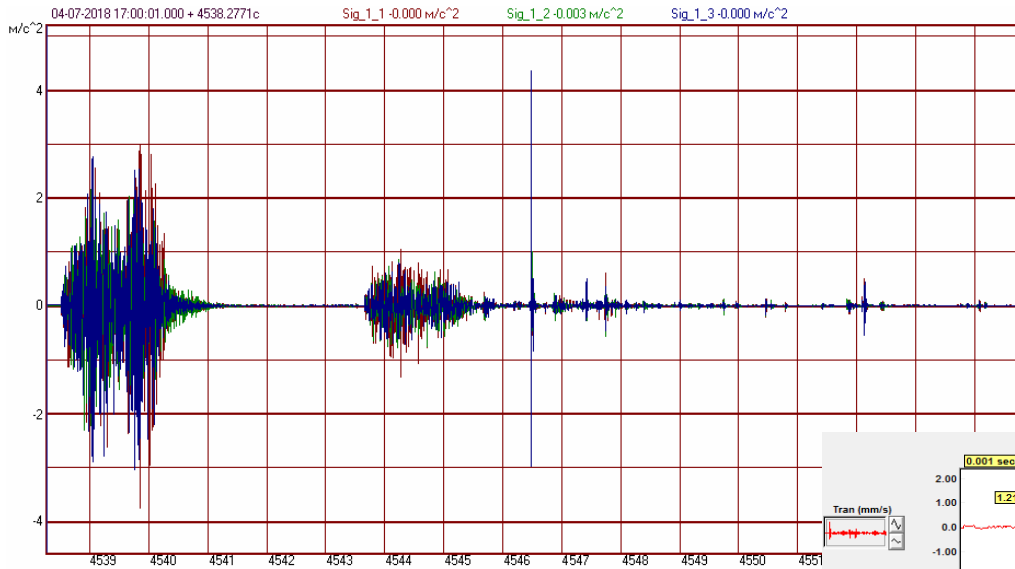
Сигналы АЭ - предвестники разрушения борта  
карьера (за 10 мин и 10 сек) в соответствии с  
кадрами скоростной съемки

# Развитие деформаций в откосе при различных значениях коэффициентов запаса

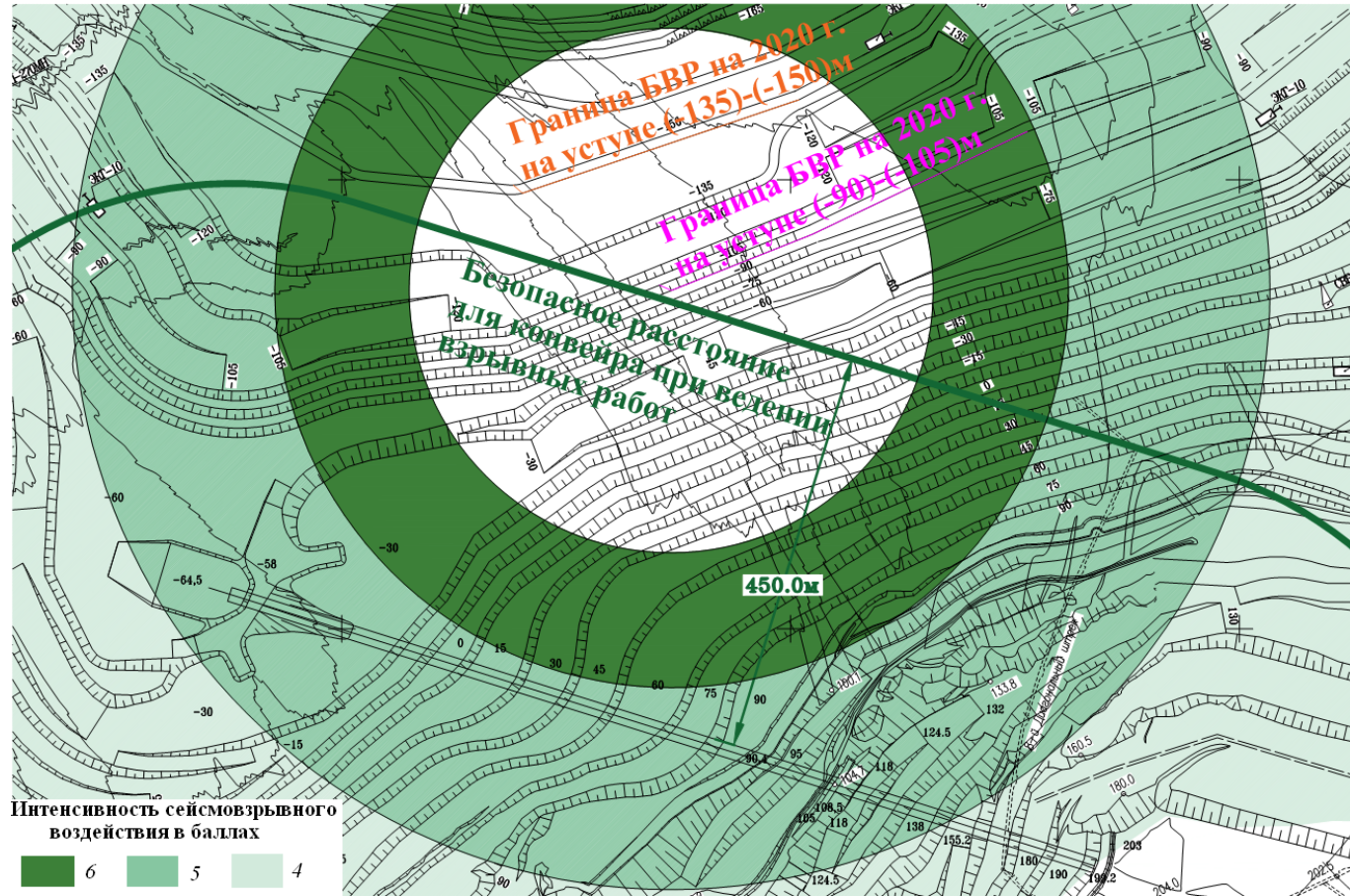
## коэффициентов запаса



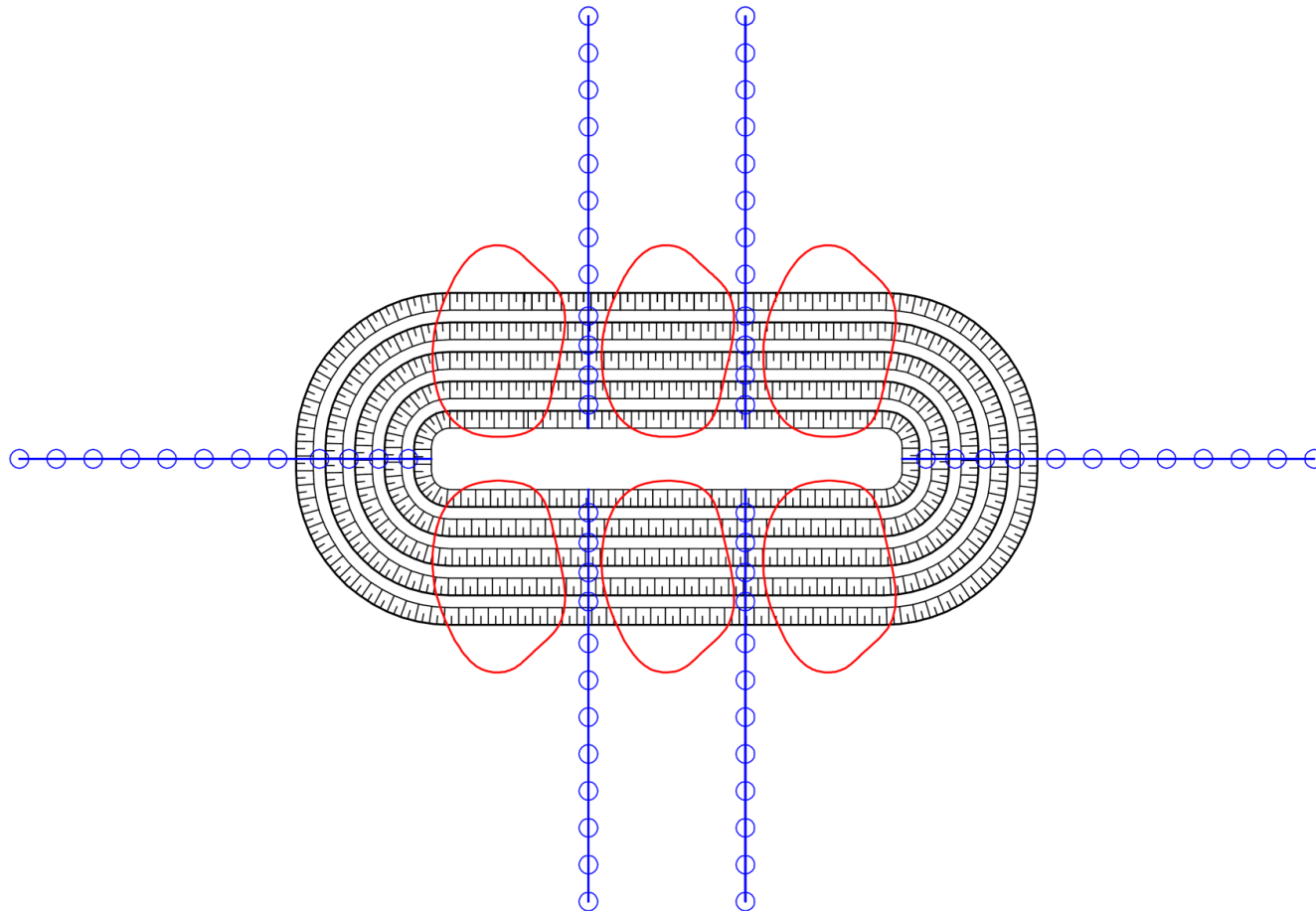
# Взрывные работы



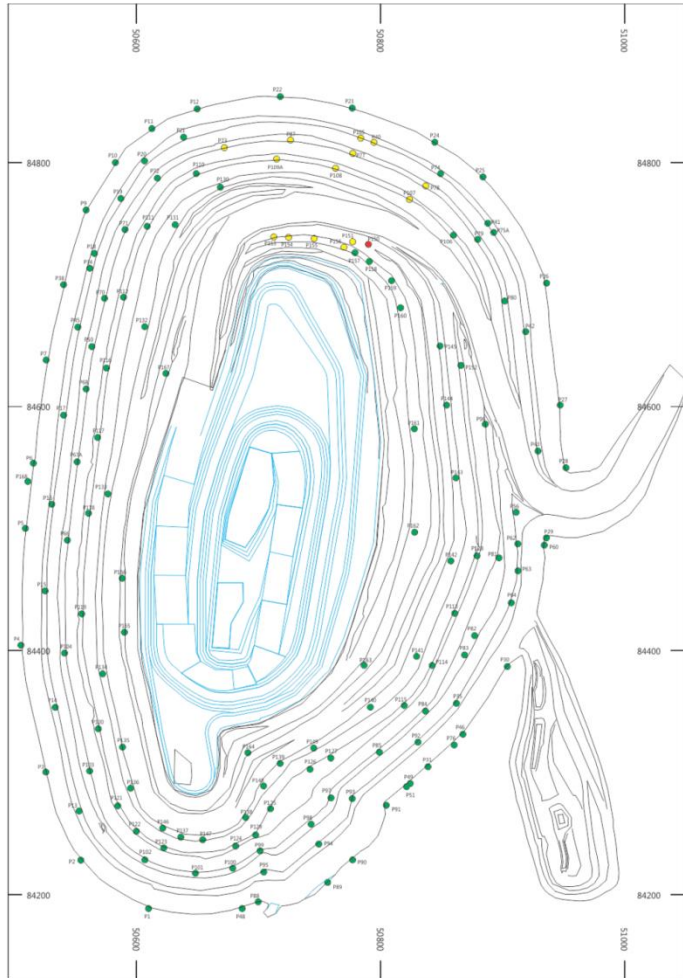
# Расчетные зоны интенсивности сейсмозрывного воздействия при взрывании



# Мониторинг устойчивости бортов карьеров





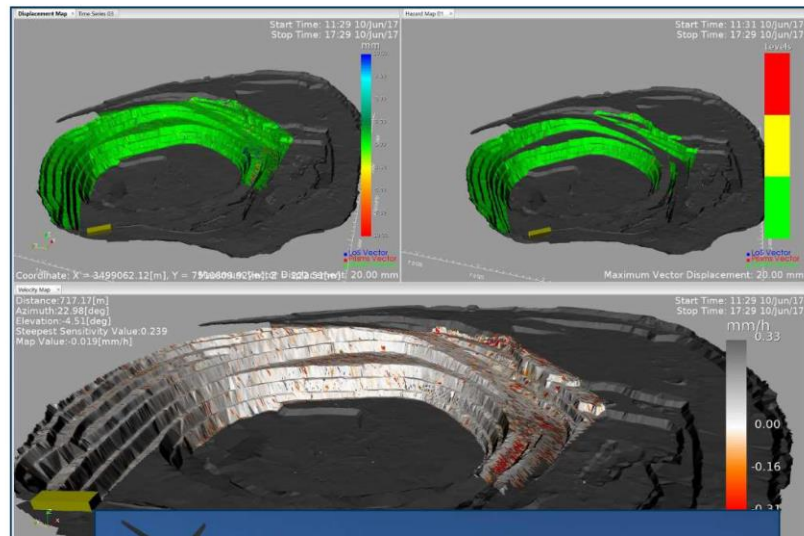


PRISM RATING:

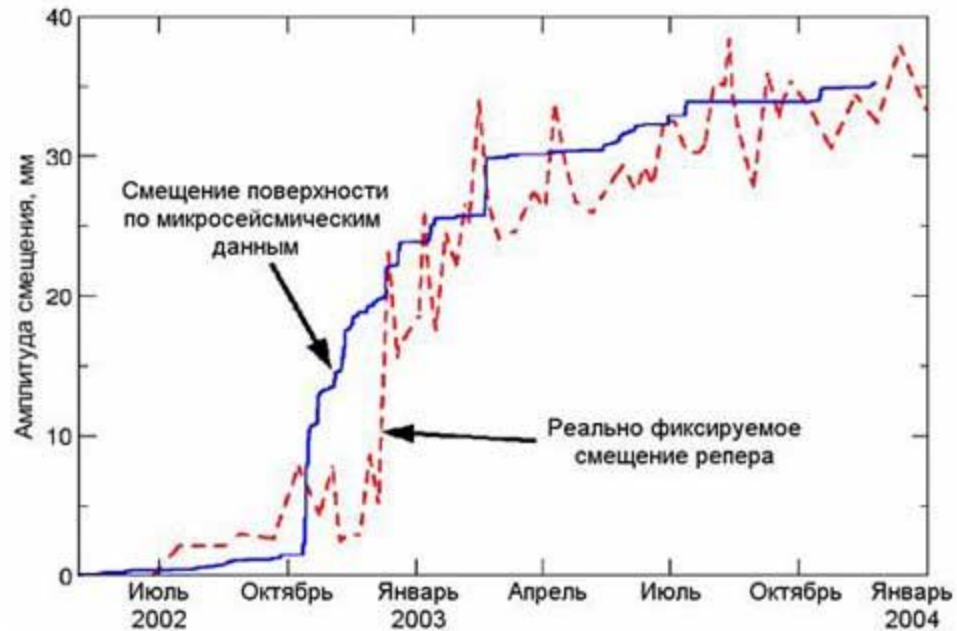
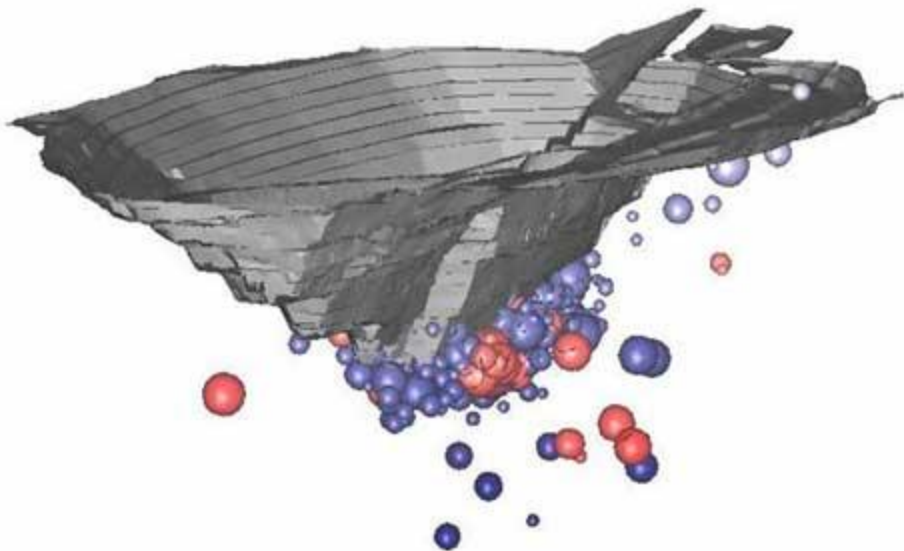
- R1 = stable: <math><0.5\text{ mm/day}</math>: survey pickup weekly
- R2 = low movement: <math>0.5\text{ to }2.9\text{ mm/day}</math>: survey pickup daily
- R3 = mod. movement: <math>3.0\text{ to }10.0\text{ mm/day}</math>: survey pickup 2x day
- R4 = imminent failure: <math>>10.0\text{ mm/day}</math>: survey pickup hourly



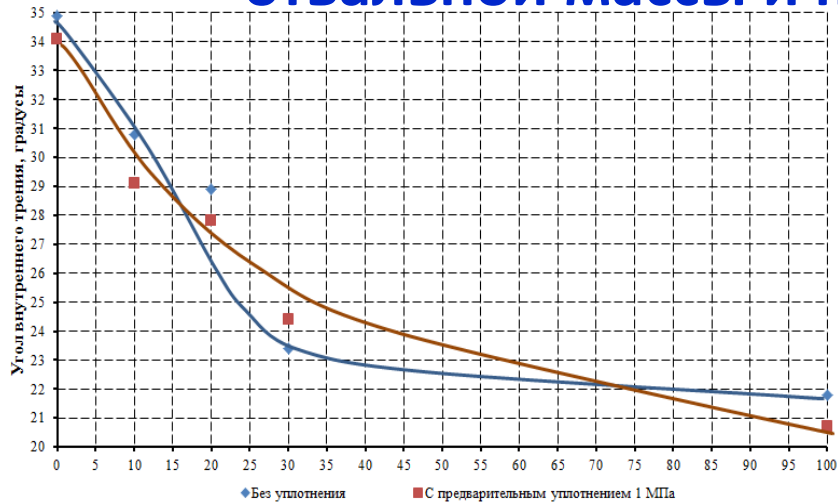
# Применение наземных радаров



# Сейсмический мониторинг



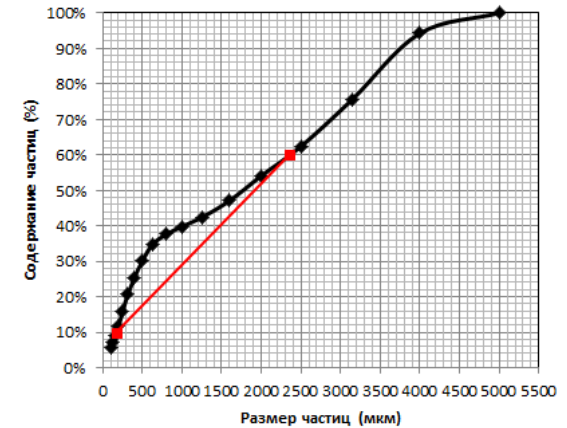
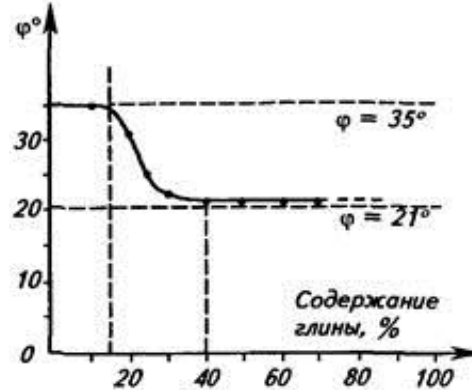
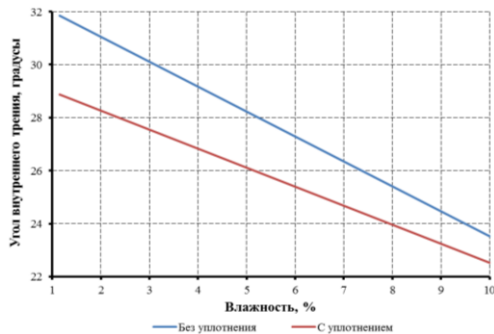
# Определение физико-механических свойств отвальной массы и пород основания отвалов



$$d_{\kappa} \geq \frac{l_{cp.np.}}{15}$$

$$100\% - \frac{25\pi \cdot \left( l_{cp.np.} - 2d_{\kappa} \right)^2}{S_{cp.np.}} \leq 5 \div 10\%$$

$$h \geq d_{\kappa}$$



$$n = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{x}{F} \left( \frac{dF}{dx} \right)^2 dx \approx k_2 \Delta F_1 + \sum_{i=2}^m k_1 \Delta F_i$$