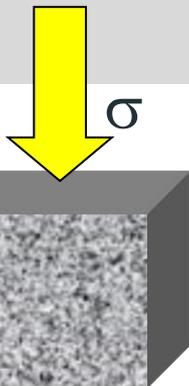
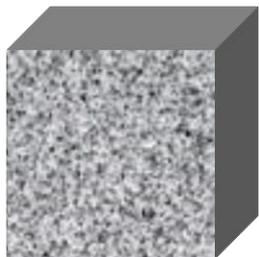


ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

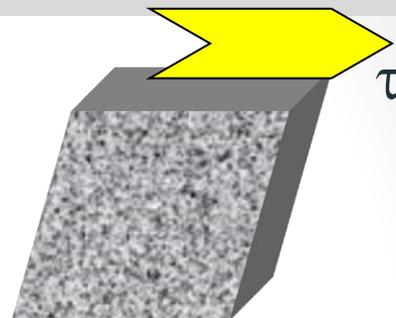
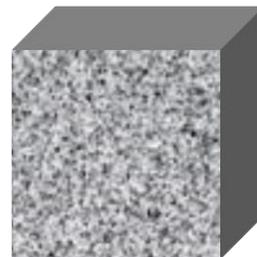
1. Основные понятия геомеханики

Presenter: Александр Макаров

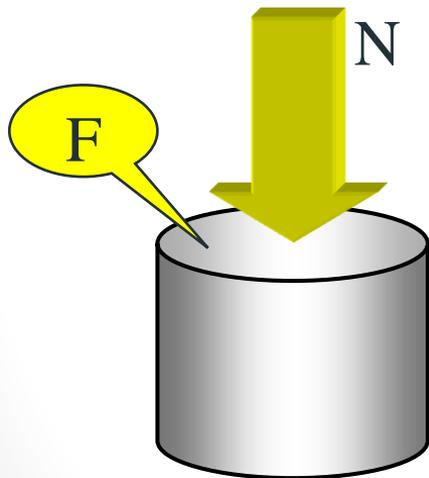
Location: Moscow 2023



*нормальные напряжения σ
изменяют размеры и объем тела*



*касательные напряжения τ
изменяют форму тела*



$$\sigma = N / F = \text{сила} / \text{площадь}$$

Размерность напряжений:

$$\sigma = [\text{Н/м}^2; \text{кг/см}^2; \text{т/м}^2]$$

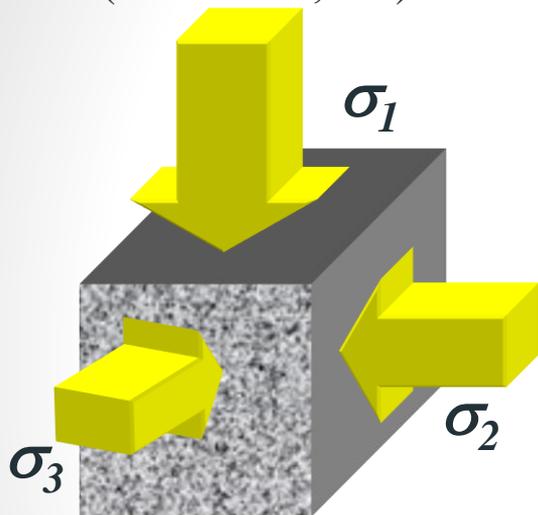
$$1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$$

$$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$$

$$1 \text{ МПа} = 10 \text{ кг/см}^2 = 100 \text{ т/м}^2$$

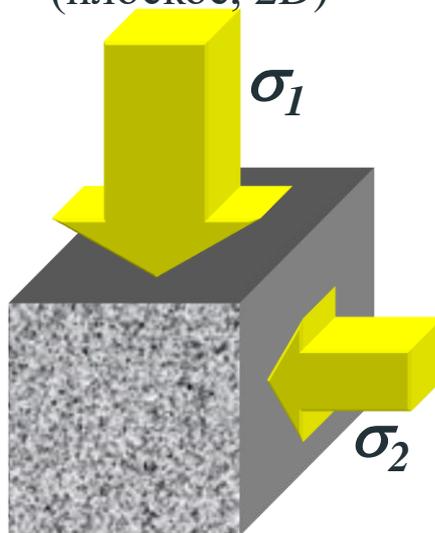
Виды напряженных состояний

трехосное
(объемное, 3D)



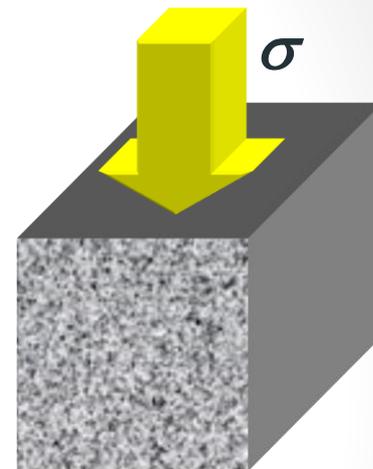
*в природном
массиве*

двухосное
(плоское, 2D)



*на контуре выработок,
в карьерных откосах*

одноосное (1D)



*в высоких
целиках*

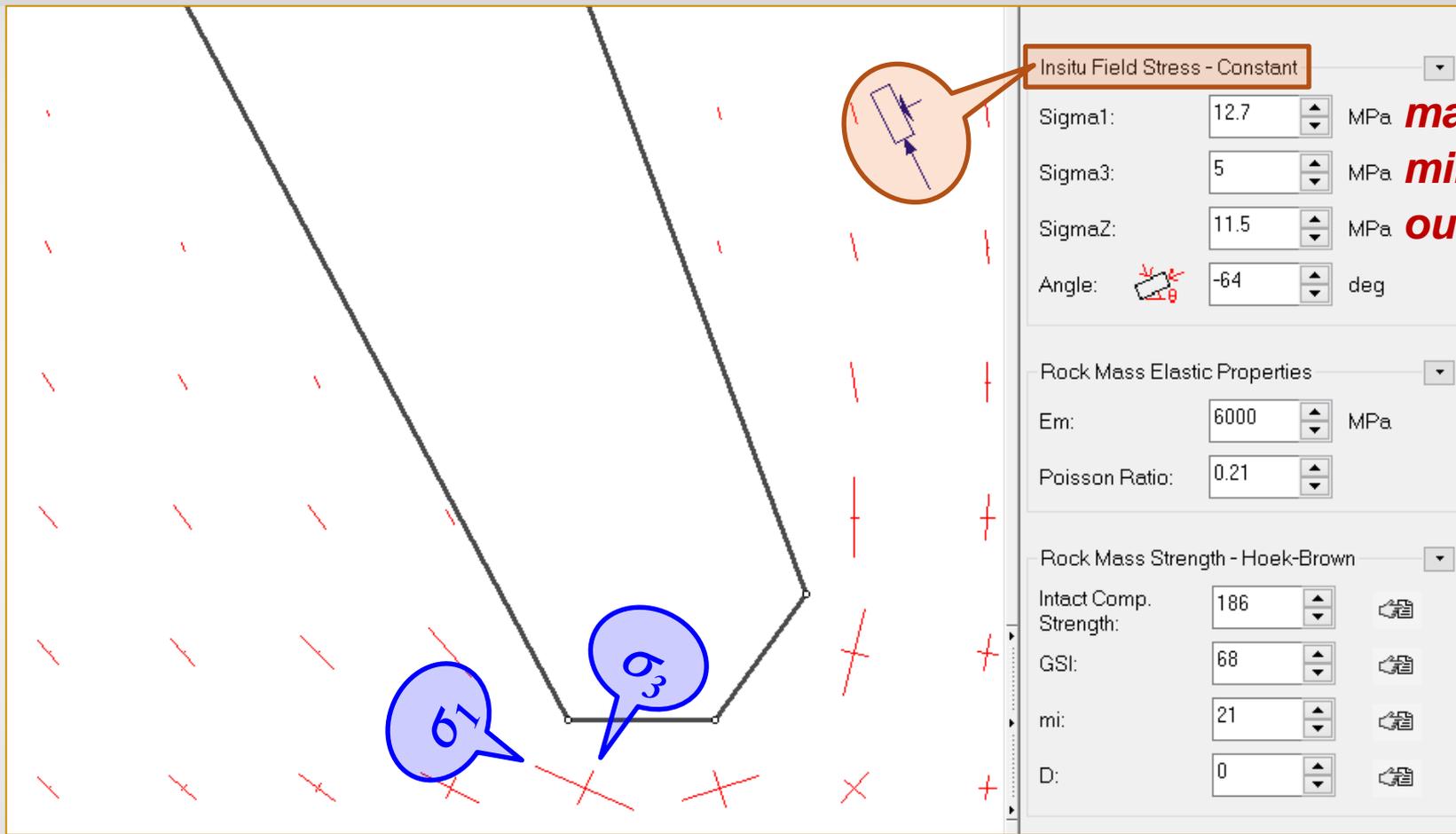
Всегда будем обозначать:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

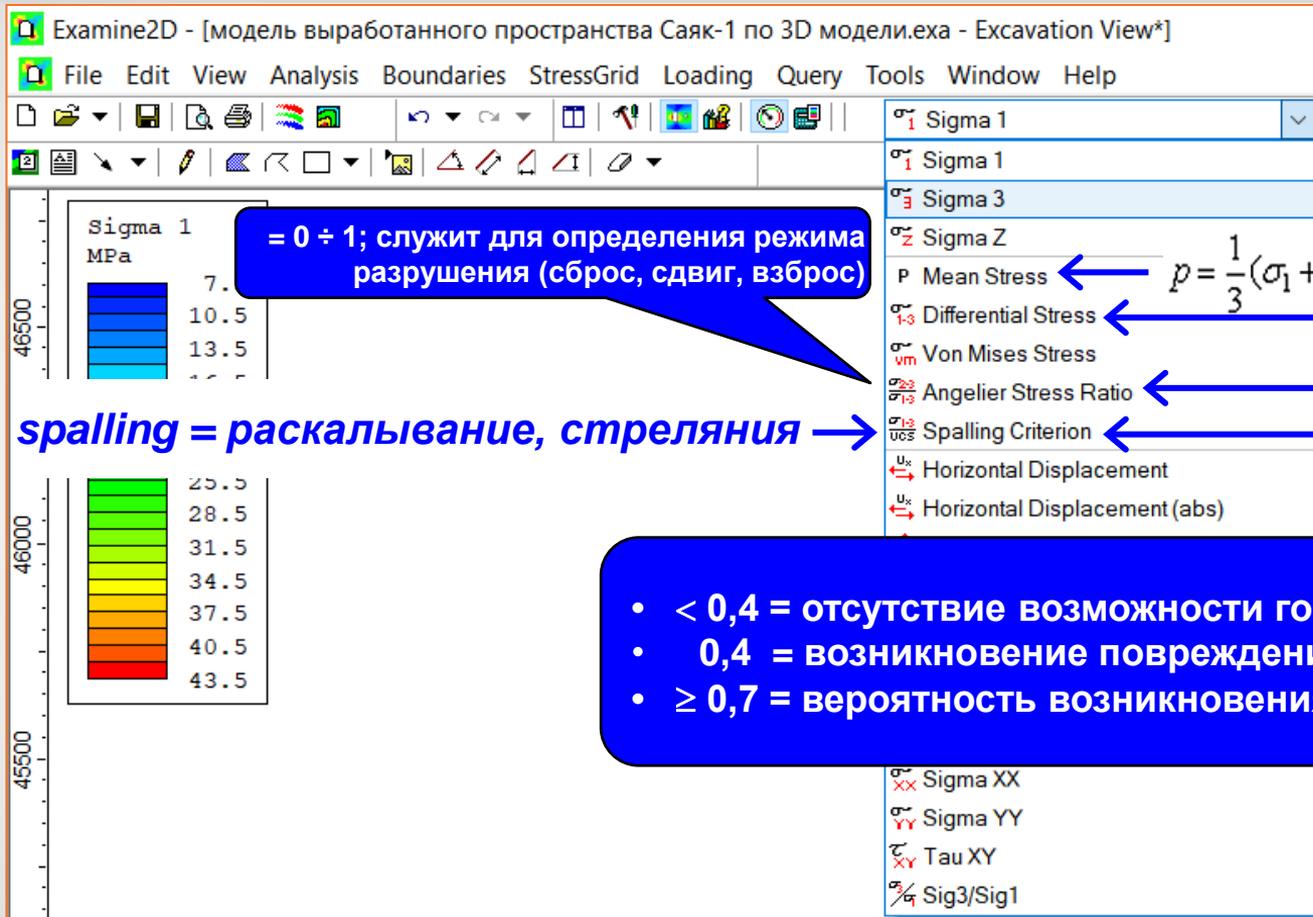
max *min*

Следует различать напряжения:

- ***природные***, действующие в массиве до начала горных работ (*in situ Field Stress, pre-mining Stress State*). Всегда 3D. Именно они используются в расчетах, в численном моделировании в качестве исходных данных, граничных условий. Их надо знать !!!
- ***техногенные***, действующие вокруг пройденных выработок, созданных выработанных пространств. Могут быть 2D, 1D. Их определяют расчетами, численным моделированием по заданным исходным данным



max
min
out of plane



= 0 ÷ 1; служит для определения режима разрушения (сброс, сдвиг, взброс)

spalling = раскалывание, стреляния →

- σ₁ Sigma 1
- σ₁ Sigma 1
- σ₃ Sigma 3
- σ_Z Sigma Z
- P Mean Stress
- σ₁₋₃ Differential Stress
- σ_{vm} Von Mises Stress
- $\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{13}}$ Angelier Stress Ratio
- $\frac{\sigma_{13}}{UCS}$ Spalling Criterion
- Horizontal Displacement
- Horizontal Displacement (abs)
- σ_{xx} Sigma XX
- σ_{yy} Sigma YY
- τ_{xy} Tau XY
- $\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ Sig3/Sig1

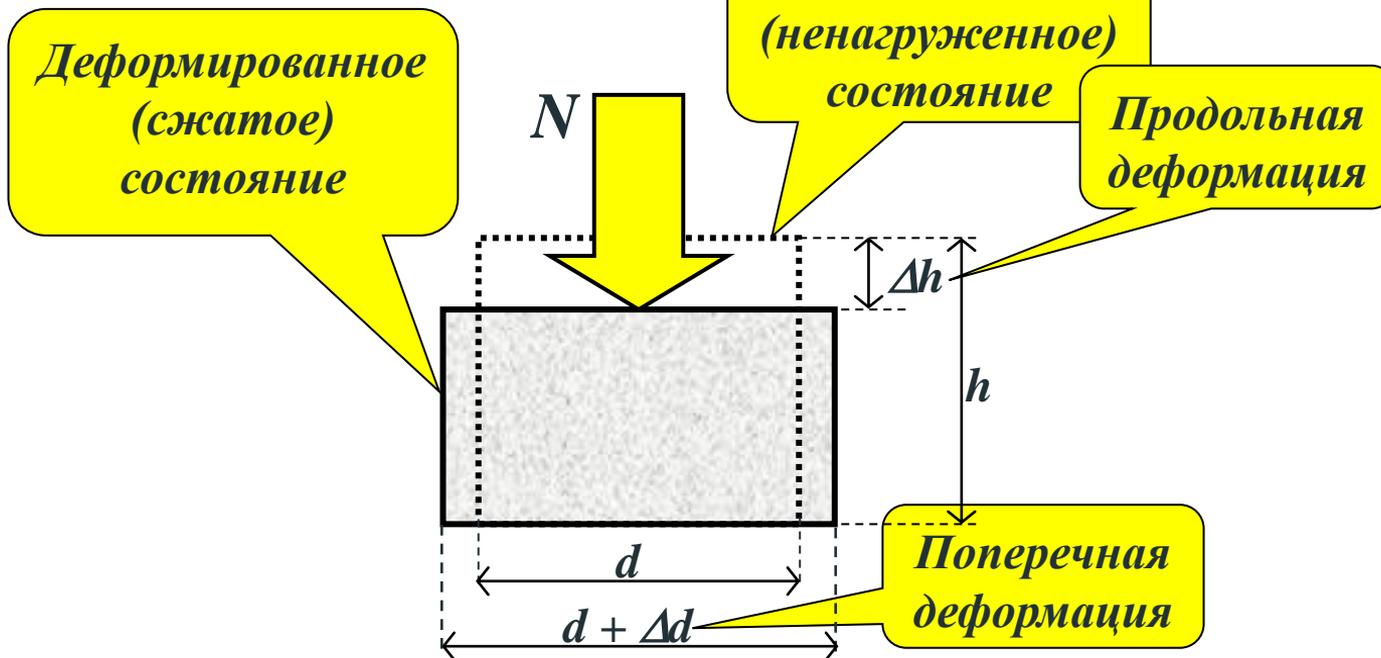
$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{UCS}$$

- < 0,4 = отсутствие возможности горного удара или разрушения;
- 0,4 = возникновение повреждений, начало разрушения;
- ≥ 0,7 = вероятность возникновения горных ударов.

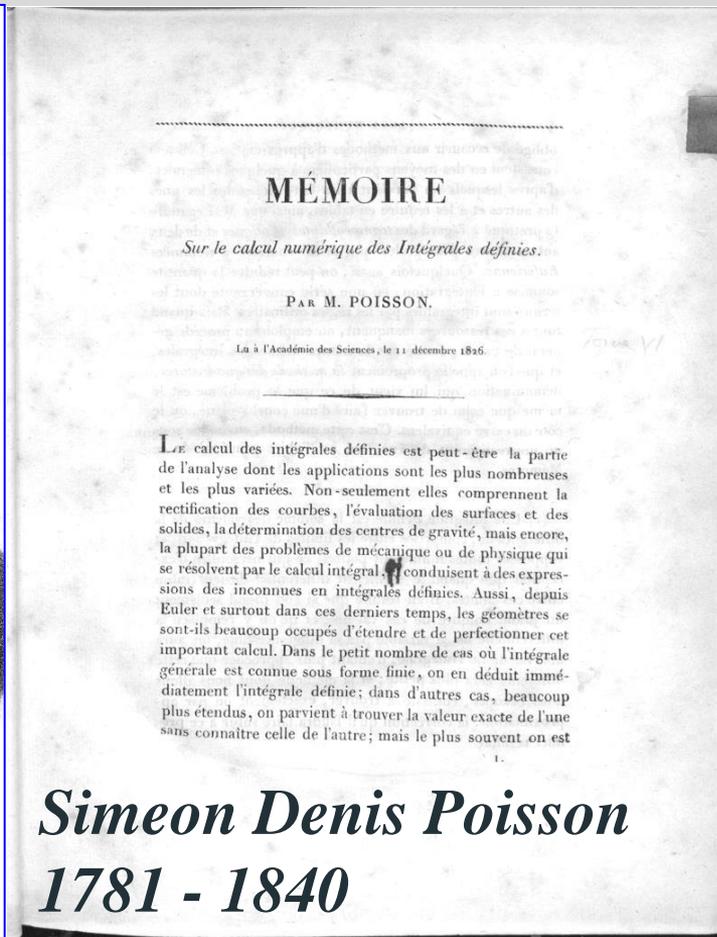


$\Delta h / h = \varepsilon_{\text{прод}}$ – продольная относительная деформация

$\Delta d / d = \varepsilon_{\text{попер}}$ – поперечная относительная деформация

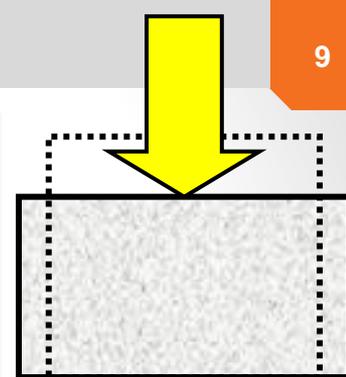
$\varepsilon_{\text{попер}} / \varepsilon_{\text{прод}} = \nu$ – коэффициент поперечных деформаций (коэффициент Пуассона)

Poisson Ratio



Simeon Denis Poisson
1781 - 1840

***Поперечное расширение при сжатии
есть фундаментальное свойство
всех твердых тел***



коэффициент поперечных деформаций (Пуассона) ν :

для крепких скальных пород $\nu = 0,16 \div 0,26 \sim 0,20$; для солей $\nu = 0,30 \div 0,36 \sim 0,33$

***исходный
образец соли***



***деформированный
образец соли***

Robert Hook, 1676:

UT TENSIO SIC VIS

КАКОВО РАСТЯЖЕНИЕ ТАКОВА И СИЛА (Lat.)

*работает только
до разрушения !!!*

1635 - 1703





Thomas Young. A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts
13-th Lecture:

Сила противодействия упругого вещества линейному растяжению или сжатию прямо пропорциональна относительному увеличению или сокращению длины:

$$E = \frac{F/S}{\Delta l/l} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{Const}$$

Закон Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

*при одноосном
сжатии или
растяжении*

E – модуль упругости (модуль Юнга)

$$E = [т / м^2; кг / см^2; МПа]$$

Thomas Young
1773 - 1829

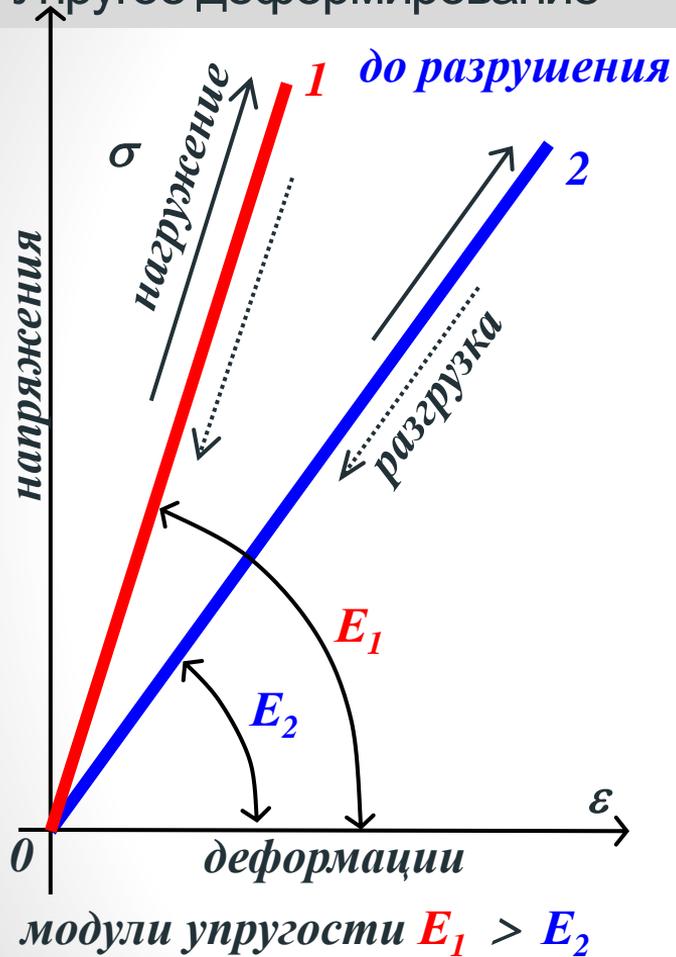
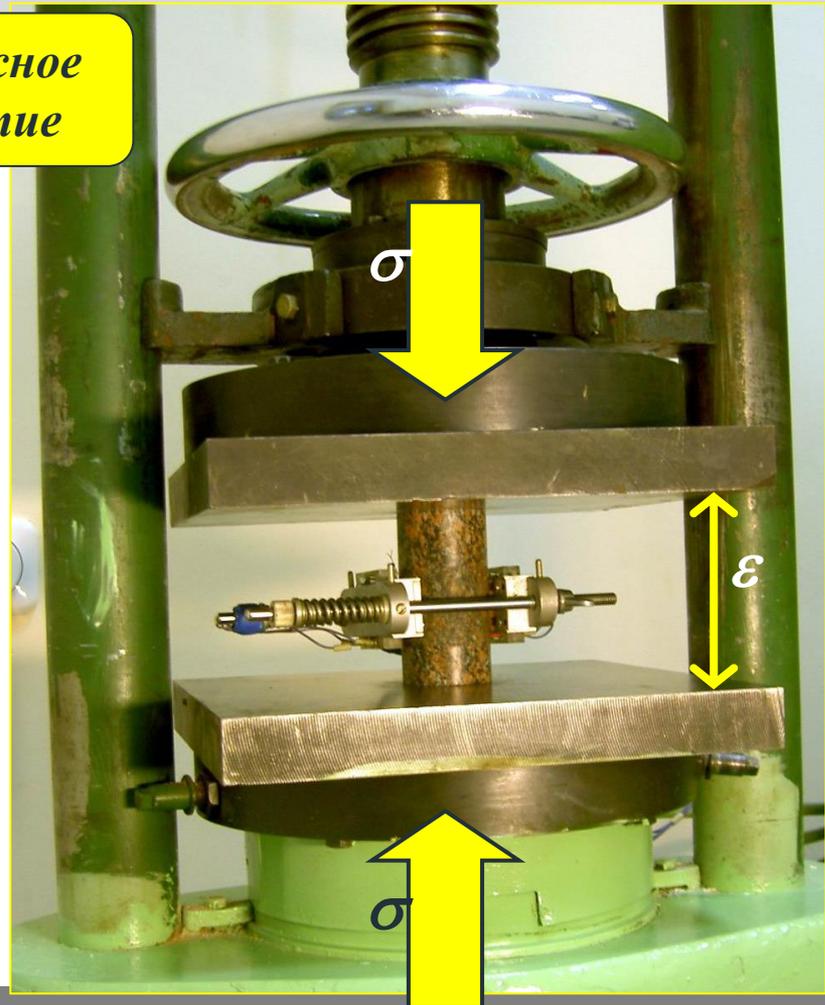
«Томас Юнг был человеком почти таких же универсальных знаний, как Леонардо да Винчи»

*Упругость есть
основное свойство
всех тел природы*



*акад. Крылов А.Н.
1863 - 1945*

Упругое деформирование

одноосное
сжатие

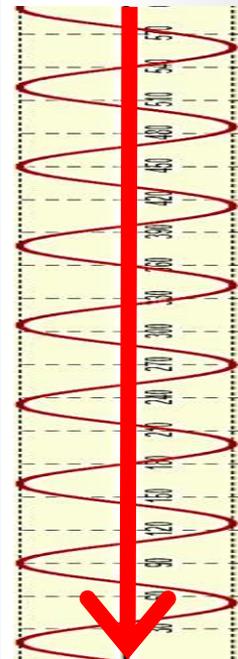
*прозвучивание
ультразвуком*

модуль упругости:

$$E = \rho \cdot V^2$$

ρ - плотность породы;

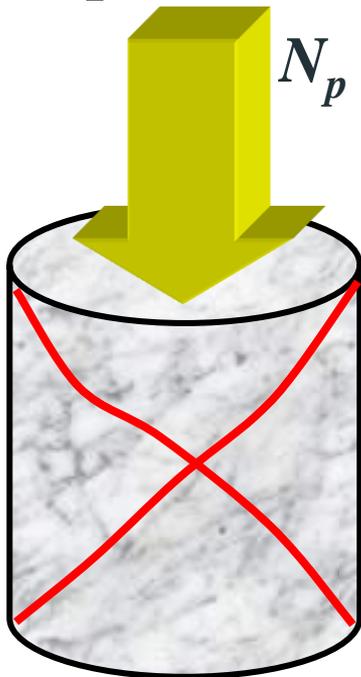
*V - скорость продольной
упругой волны*



разрушение при достижении предельных напряжений

UCS

unconfined compressive Strength UCS

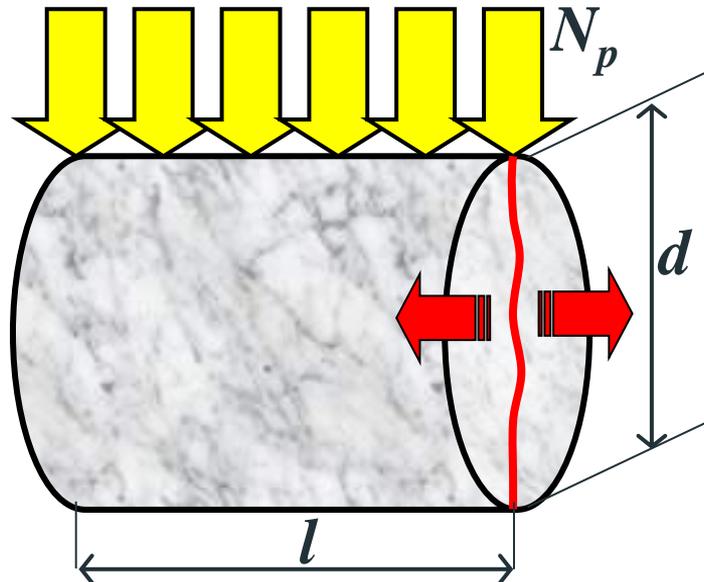


при одноосном сжатии:

$$\sigma_0 = N_p / F$$

UTS

uniaxial tensile Strength UTS



при одноосном растяжении:

$$\sigma_p = 2 N_p / (\pi d l) = 0,637 N_p / F_p$$

Испытания образцов пород на прочность на прессе

UCS >> UTS



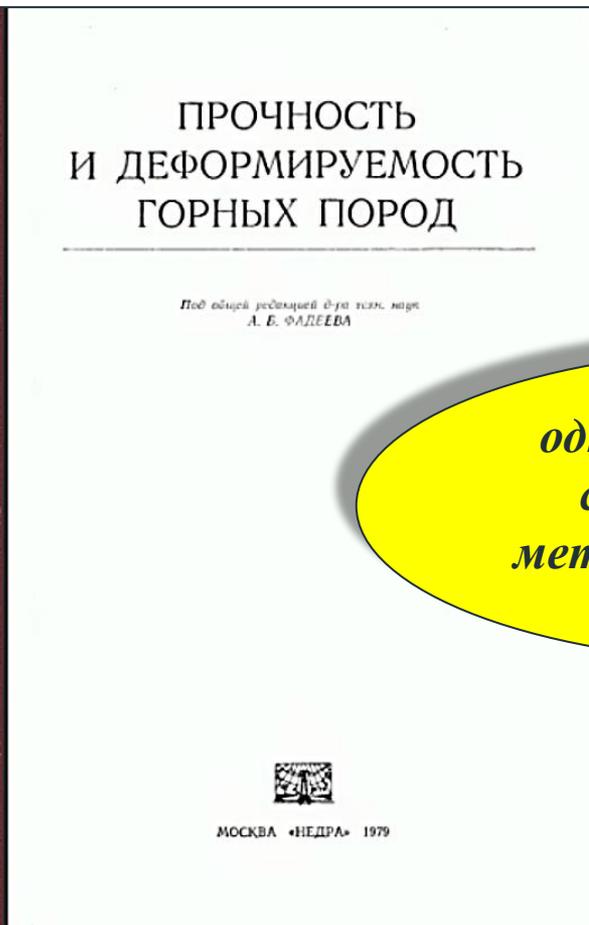
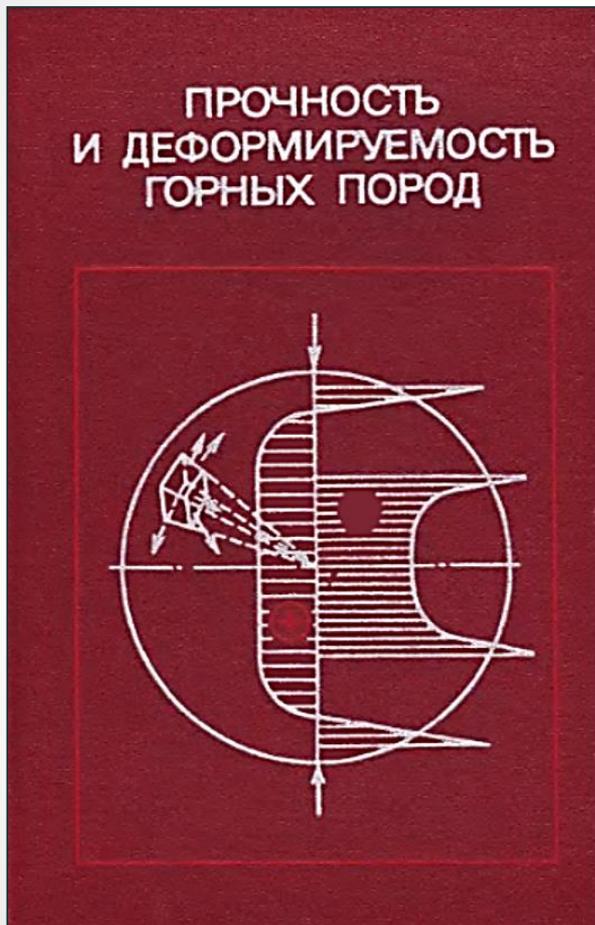


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

ПОРОДЫ ГОРНЫЕ
МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ
ОДНООСНОМ СЖАТИИ

ГОСТ 21153.2-84

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ
Москва



*одна из лучших книг о
свойствах пород и
методах их определения*

Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials

*Стандарт
ISRM*

PART 1. SUGGESTED METHOD FOR DETERMINATION OF THE UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF ROCK MATERIALS

1. SCOPE

This method of test is intended to measure the uniaxial compressive strength of a rock sample in the form of specimens of regular geometry. The test is mainly intended for strength classification and characterization of intact rock.

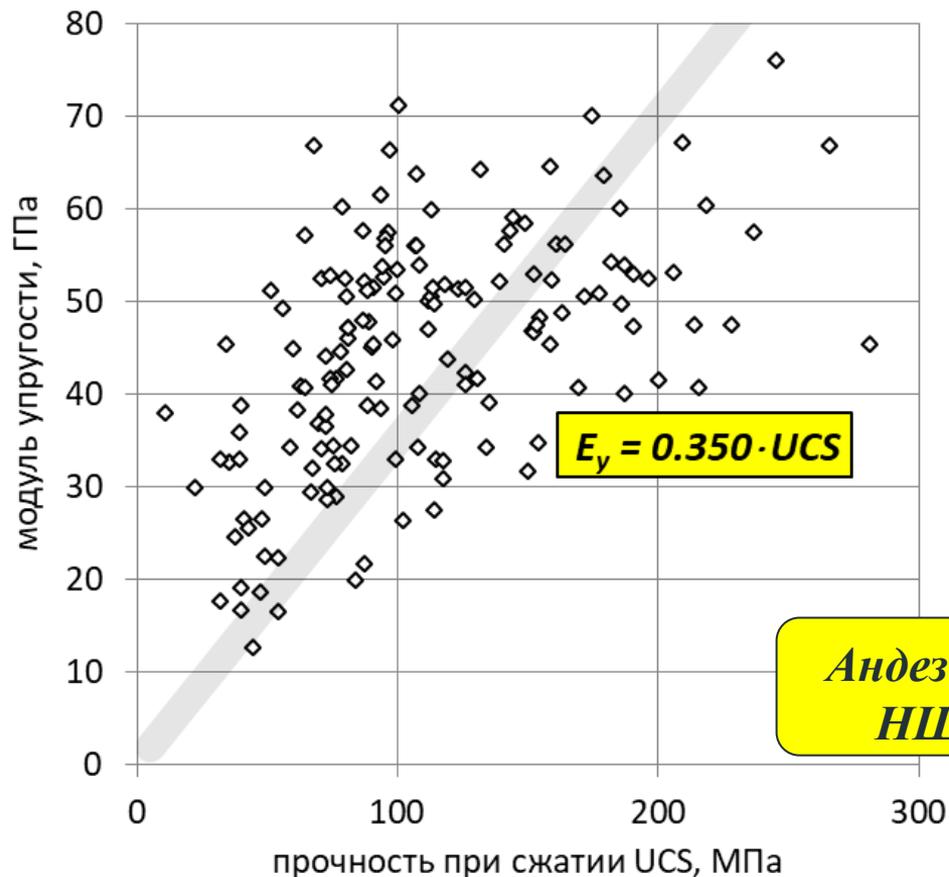
2. APPARATUS

upper end of the specimen. It should be lightly lubricated with mineral oil so that it locks after the dead-weight of the cross-head has been picked up. The specimen, the platens and spherical seat shall be accurately centred with respect to one another and to the loading machine. The curvature centre of the seat surface should coincide with the centre of the top end of the specimen.

3. PROCEDURE

(a) Test specimens shall be right circular cylinders having a height to diameter ratio of 2.5–3.0 and a diameter preferably of not less than NX core size, approximately 54 mm. The diameter of the specimen should be related to the size of the largest grain in the rock by the ratio of at least 10:1.





*Чем порода крепче,
тем она жестче...*

$$E = 0.350 \cdot UCS, \quad \text{ГПа}$$
$$E = 350 \cdot UCS, \quad \text{МПа}$$

$$1 \text{ ГПа} = 1000 \text{ МПа} = 10^3 \text{ МПа} = 10^9 \text{ Па}$$

*Андезиты
НШР*

*Чем порода крепче,
тем она жестче*

Estimate E_i using a Modulus Ratio ($E_i = MR * \sigma_{ci}$)

Using a modulus ratio (MR), it is possible to estimate the intact modulus (E_i) from:

$$E_i = MR * \sigma_{ci}$$

This relationship is useful when no direct values of the intact modulus are available or where completely undisturbed sampling for measurement of E_i is difficult.

Pick MR Value by Rock Type: 

Agglomerate	500 ± 100
Andesite	400 ± 100
Basalt	350 ± 100
Breccia	500 ± 0
Dacite	400 ± 50
Diabase	325 ± 25
Diorite	325 ± 25
Dolerite	350 ± 50
Gabbro	450 ± 50
Granite	425 ± 125
Granodiorite	425 ± 25
Norite	375 ± 25
Peridotite	275 ± 25
Porphyries	400 ± 0
Rhyolite	400 ± 100
Tuff	300 ± 100

Estimated Intact Modulus (E_i)

E_i :

MR Value:

σ_{ci} :

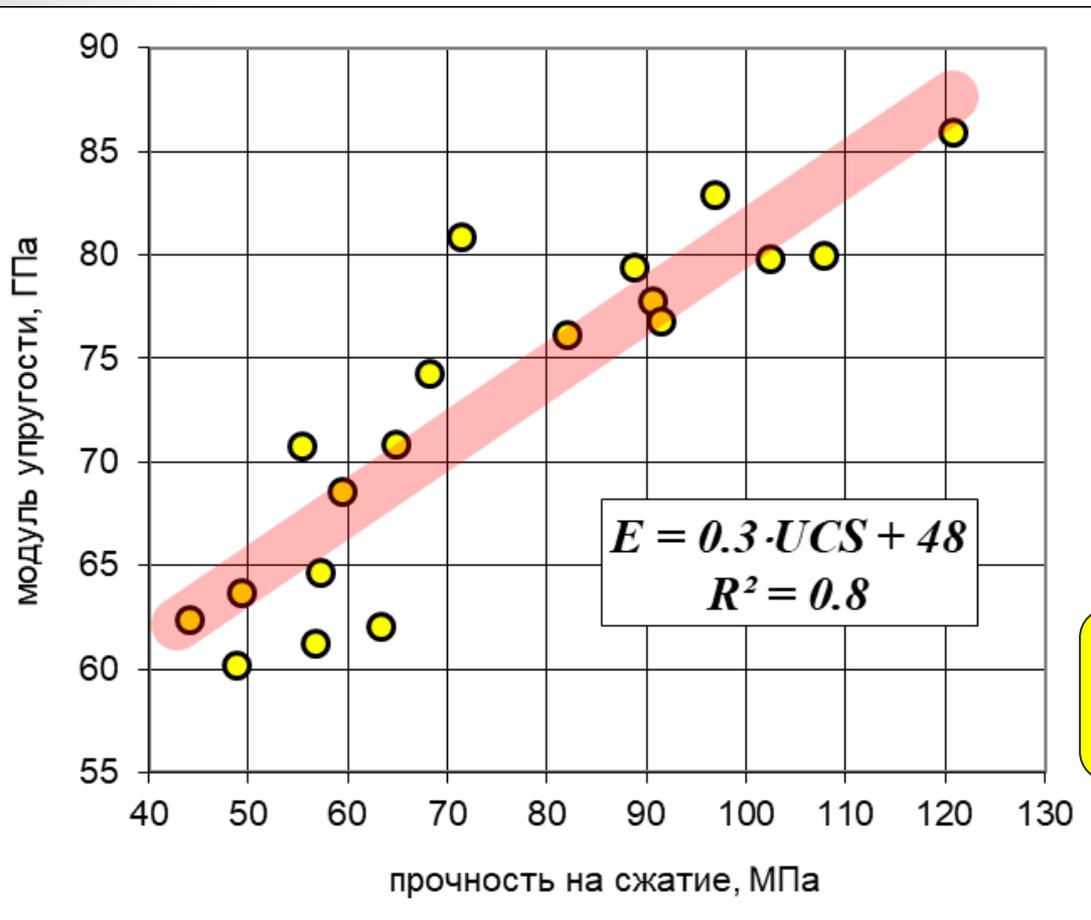
MR Filter List

Rock Type

- Sedimentary
- Igneous
- Metamorphic

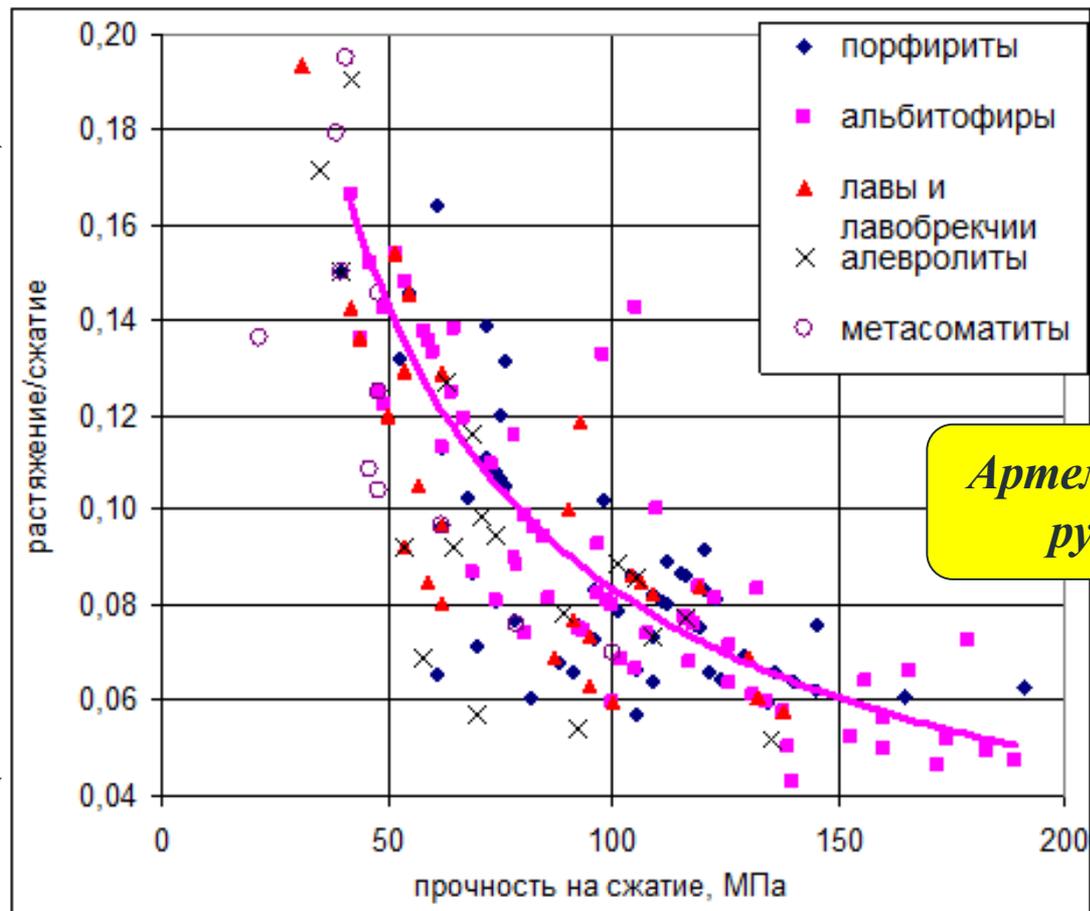
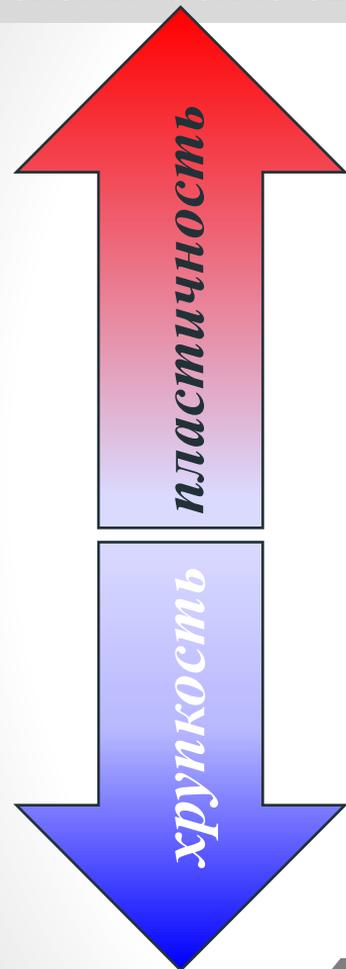
Texture

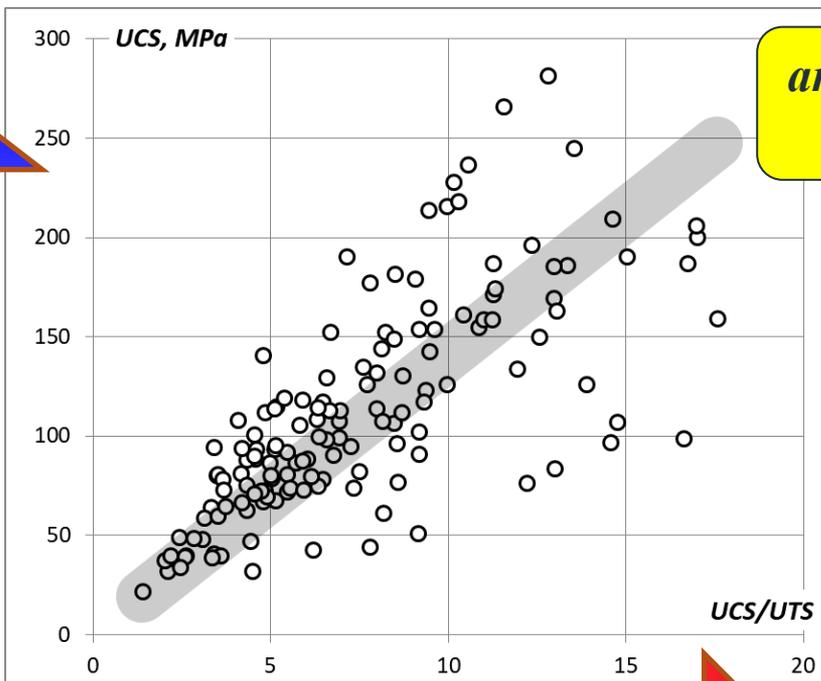
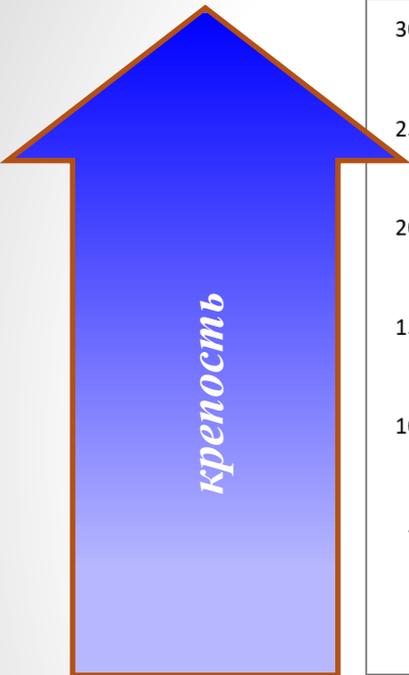
- Coarse
- Medium
- Fine
- Very Fine



*Чем порода
крепче, тем
она жестче*

*кварцевые диориты
рудник Нурказган*





*андезиты
НШР*

*Больше
крепость,
больше
хрупкость*



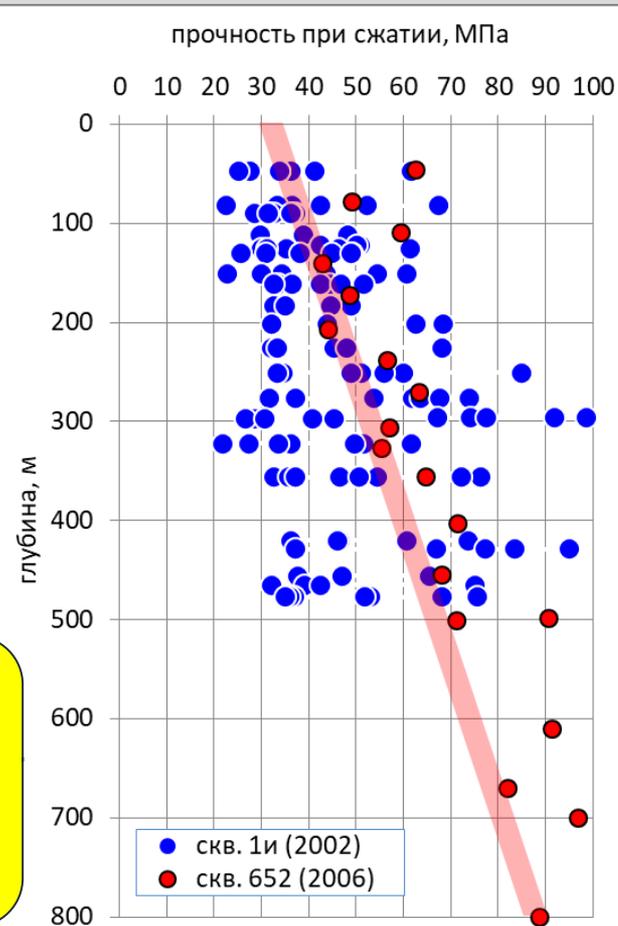
*Чем порода крепче, тем она более хрупкая !
и наоборот:
Чем слабее порода, тем она более пластична*



Изменение прочности руд / пород с глубиной

*Чем глубже, тем крепче!
(часто, но не всегда)*

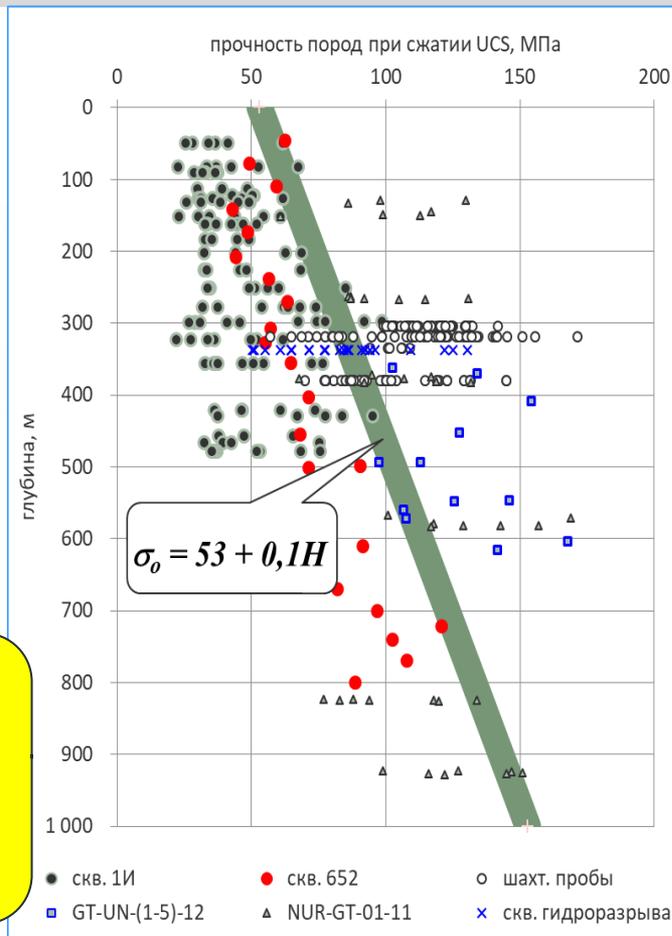
*рудник
Нурказган
руда в образцах
2011 г.*



Изменение прочности руд / пород с глубиной

*Чем глубже, тем крепче!
(часто, но не всегда)*

*рудник
Нурказган
руда в образцах
2019 г.*



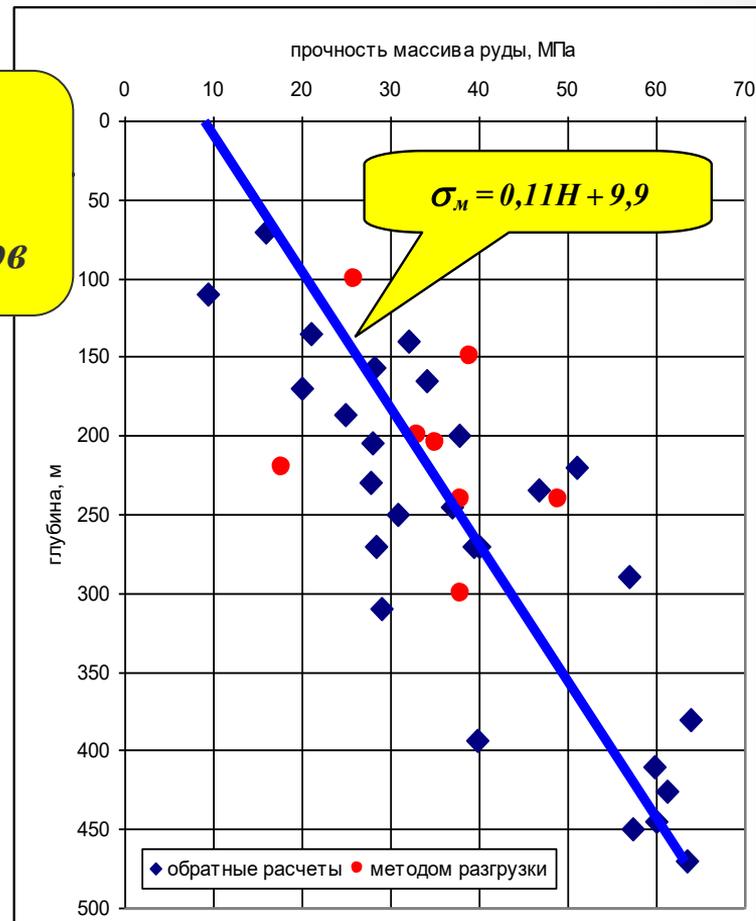
Изменение прочности руд / пород с глубиной

***Пополнение базы
данных может
изменить оценку
прочности
руды/пород
!!!!!!!!!!!!***



Изменение прочности руды с глубиной

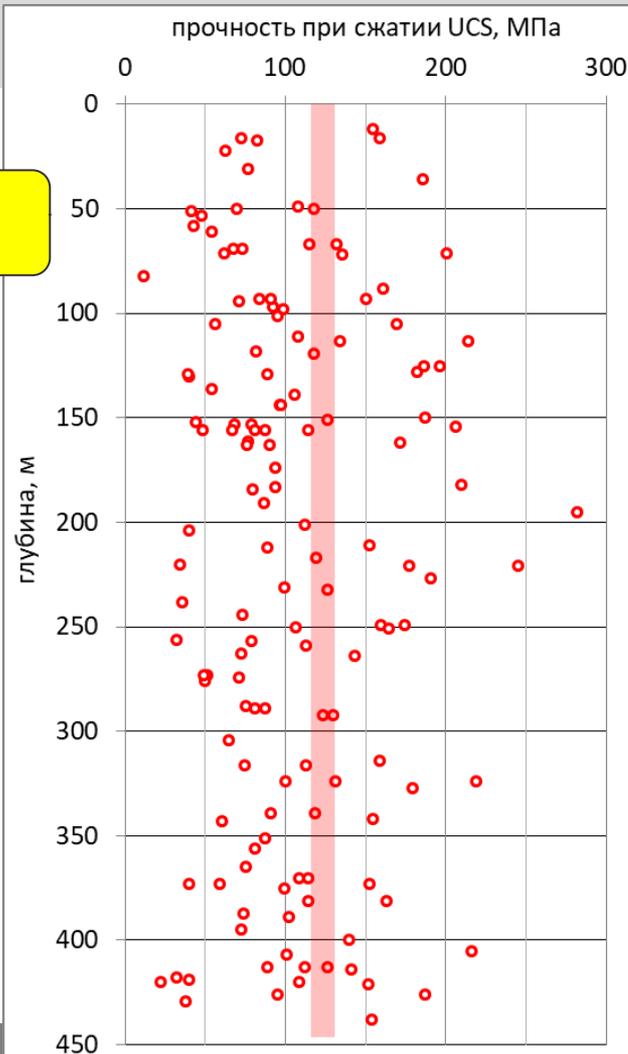
Жезказган
массив руды в целиках по
данным обратных расчетов



Изменение прочности руды с глубиной

Ново-Широкинский рудник

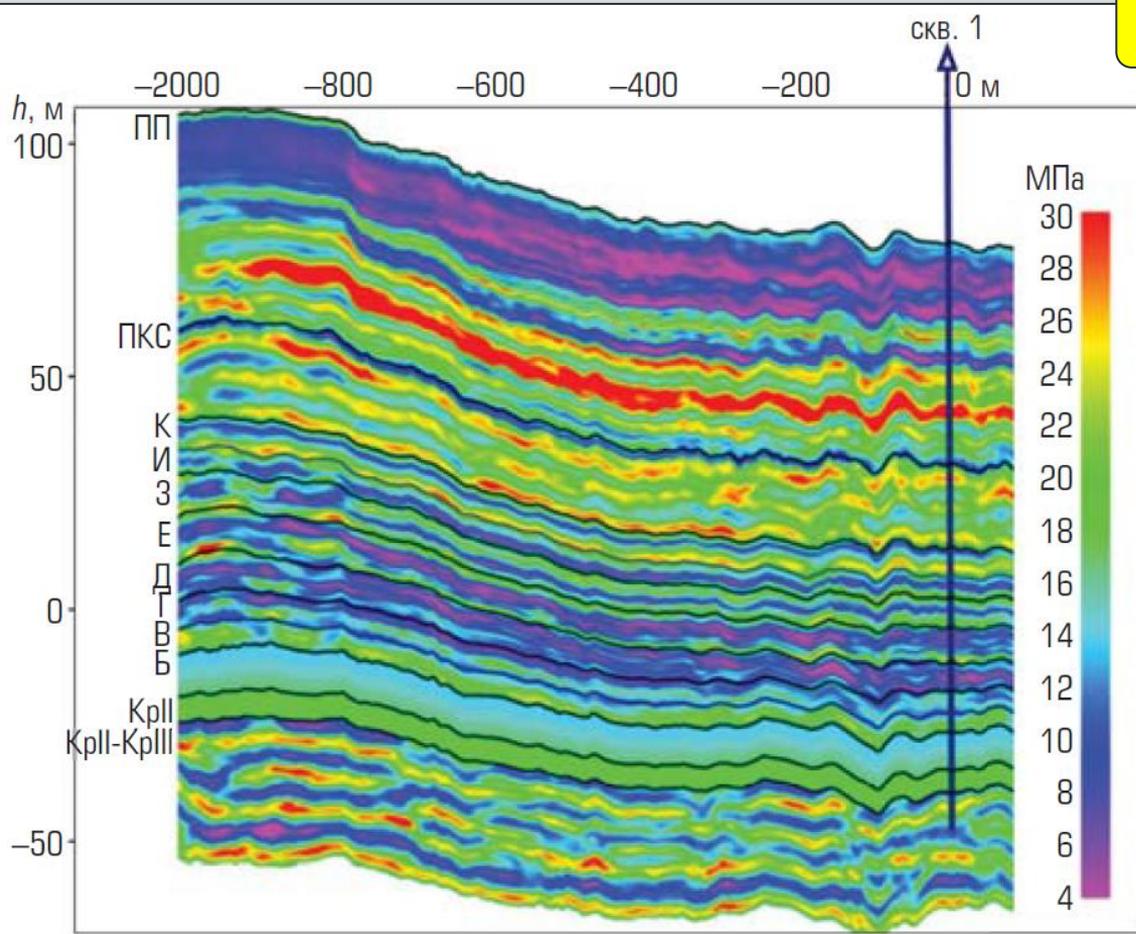
**С глубиной
прочность
андезитов
не изменяется**



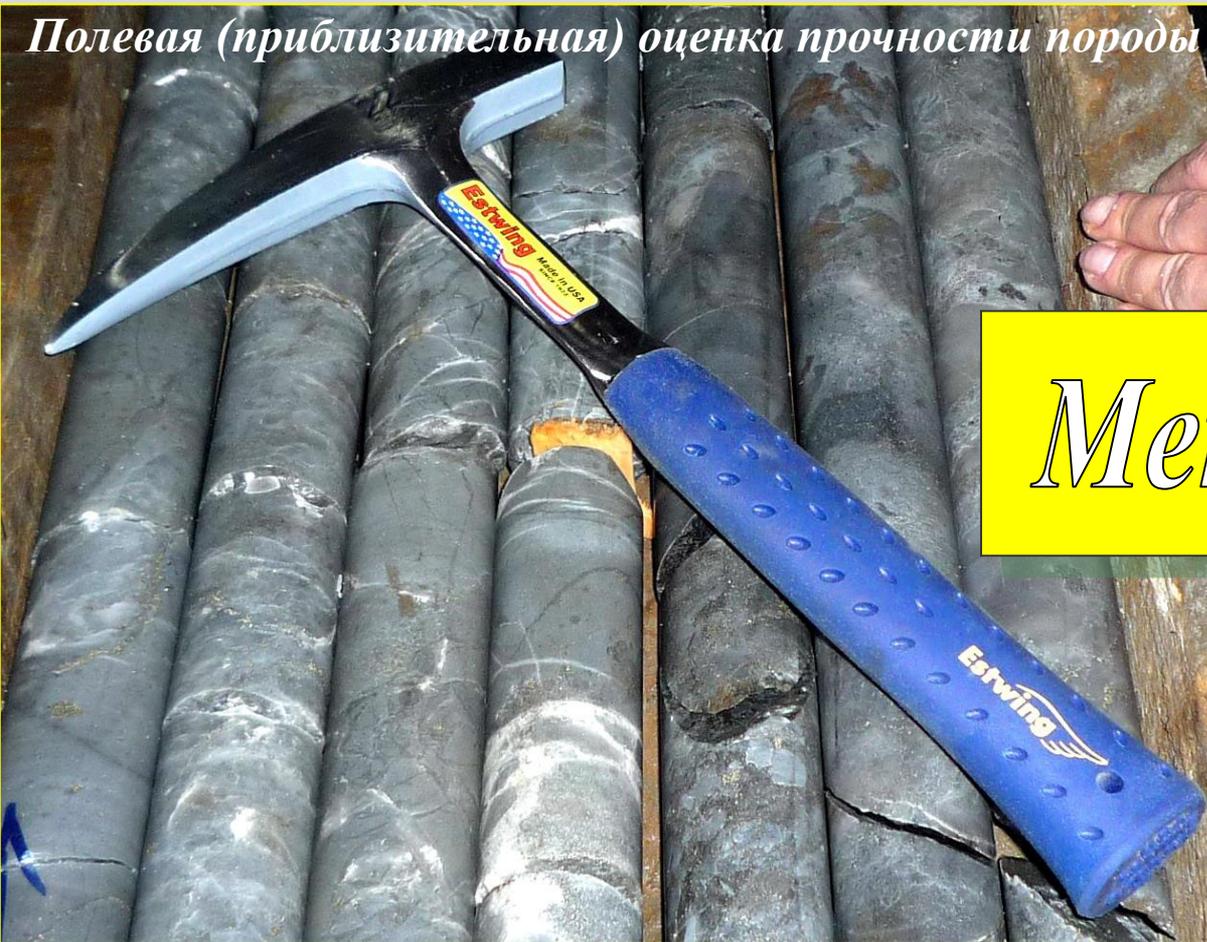
Уралкалий

Распределение прочности пород в толще осадочных пород ВКМКС по данным сейсморазведки

*Кашников Ю.А.
ГЖ, 2021, № 4*



Полевая (приблизительная) оценка прочности породы



девиз геологов:

Mente et malleo

*Умом и молотком
(Lat.)*

Полевая (приблизительная) оценка прочности породы

Класс прочности по классификации ISRM	Классификация	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Is50, МПа	Оценка прочности в полевых условиях
R6	Чрезвычайно крепкие	>250	>10	Порода только скалывается при многократных ударах молотка, звенит при ударе
R5	Очень крепкие	100–250	4–10	Чтобы разбить ненарушенные образцы породы, требуются многочисленные удары геологическим молотком
R4	Крепкие	50–100	2–4	Небольшие образцы породы можно разбить одним ударом геологического молотка
R3	Средней крепости	25–50	1–2	При сильном ударе острием геологического молотка на породе остается вмятина до 5 мм, нож только царапает поверхность
R2	Слабые	5–25	–	Нож режет породу, но она слишком крепкая, чтобы вырезать объемный образец
R1	Очень слабые	1–5	–	Порода дробится при сильных ударах острием геологического молотка, образец можно вырезать ножом
R0	Чрезвычайно слабые	0,25–1	–	Продавливается ногтем большого пальца

Полевая (приблизительная) оценка прочности породы

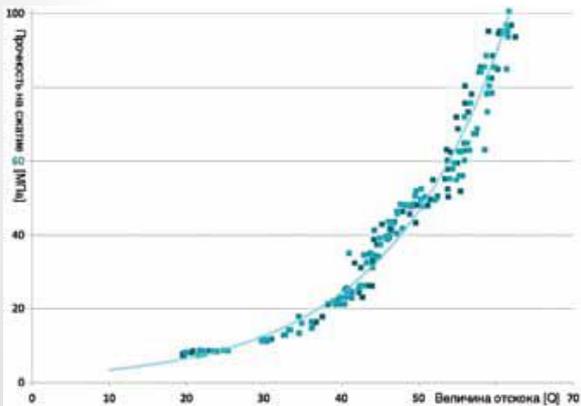
*Яковлевский рудник:
богатая мартитовая руда*

$$\sigma_{сж} \sim 1 \div 2 \text{ МПа}$$



*после удара геологическим
молотком падает крошка
раздробленной руды*

Полевая оценка прочности породы молотком Шмидта

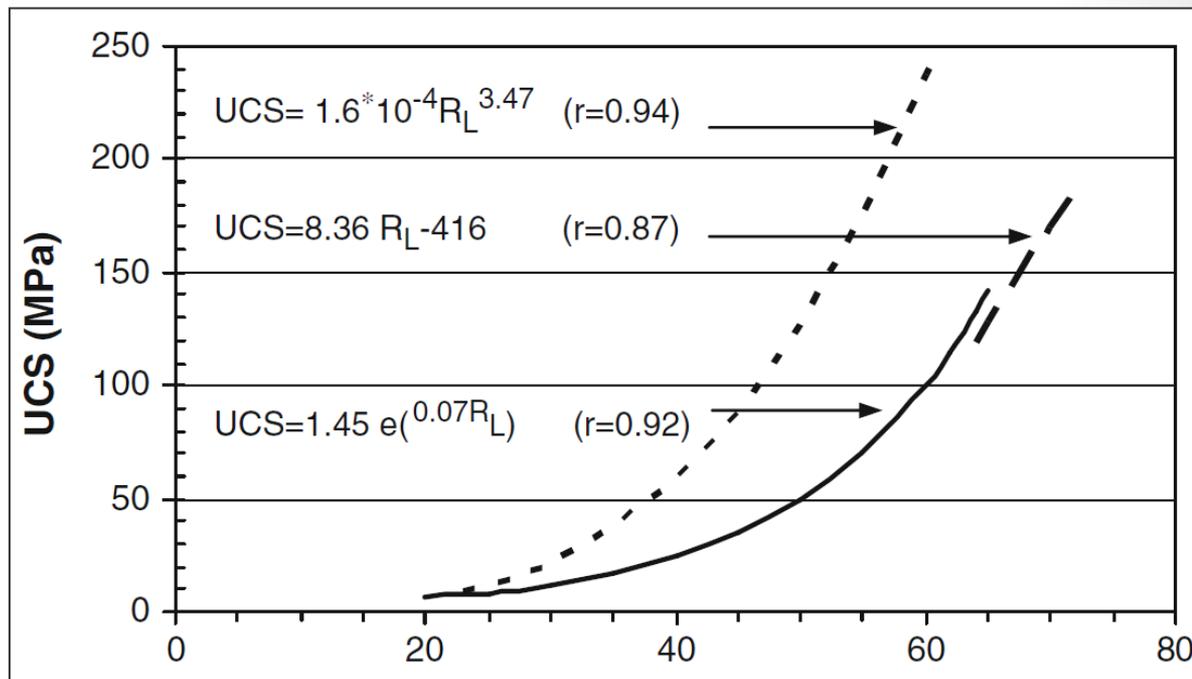


Полевая оценка прочности породы молотком Шмидта

ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version. Adnan Aydin (2008):

Запишите 20 значений отскока от одиночных ударов, разделенных по крайней мере диаметром плунжера, и усредните верхние 10 значений.

Расчет прочности пород UCS:

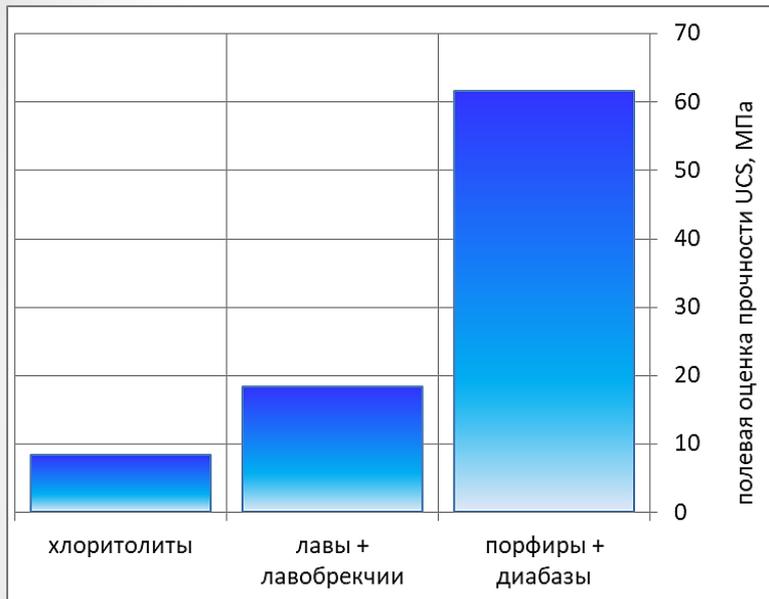


Полевая оценка прочности породы молотком Шмидта

порода	количество испытаний	среднее R_L	стандарт R_L	вариация %	$UCS = 1.45 \cdot \exp(0.07R_L)$, МПа
<i>руда</i>	160	59.7	12.4	21%	94.5
<i>висячий бок</i>	175	59.0	11.5	19%	90.2
<i>лежащий бок</i>	146	59.3	12.2	21%	91.8

Вывод: прочность руды, пород висячего и лежачего боков практически не различаются. Поэтому модель массива месторождения может быть однородной с усредненной прочностью всех типов руды и пород

Полевая оценка прочности породы молотком Шмидта



	хлоритолиты	лавы + лавобрекчии	порфиры + диабазы
кол-во испытаний	77	60	86
средняя UCS, МПа	8.4	18.3	61.6
стандарт UCS, МПа	6.3	18.3	40.1
коэфф. вариации	74%	100%	65%

**Вывод: породы резко различаются по прочности.
Поэтому модель массива должна быть неоднородной**

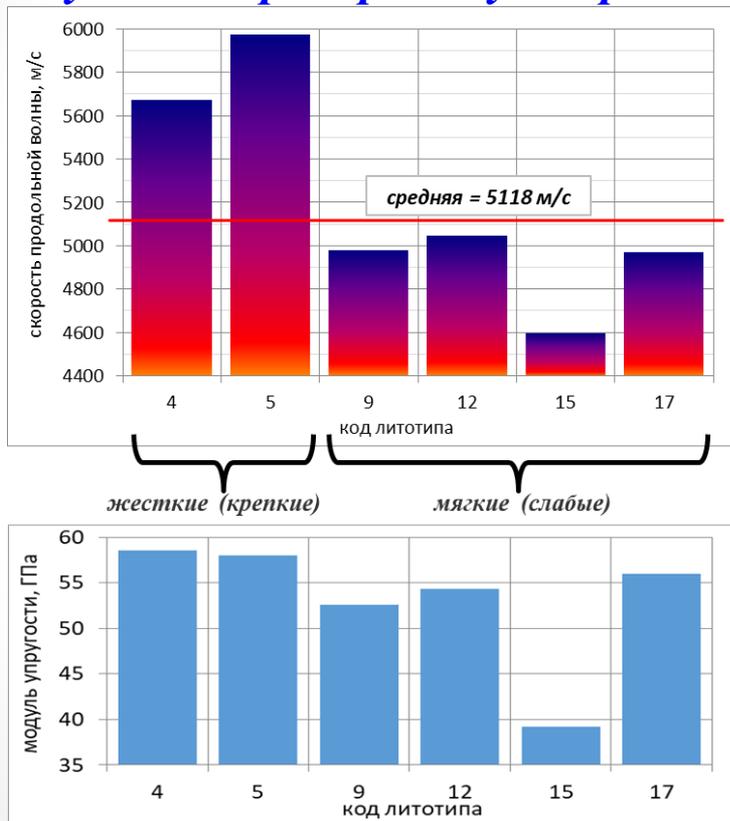


*Полевая оценка упругости
породы ультразвуковым
прибором Пульсар*

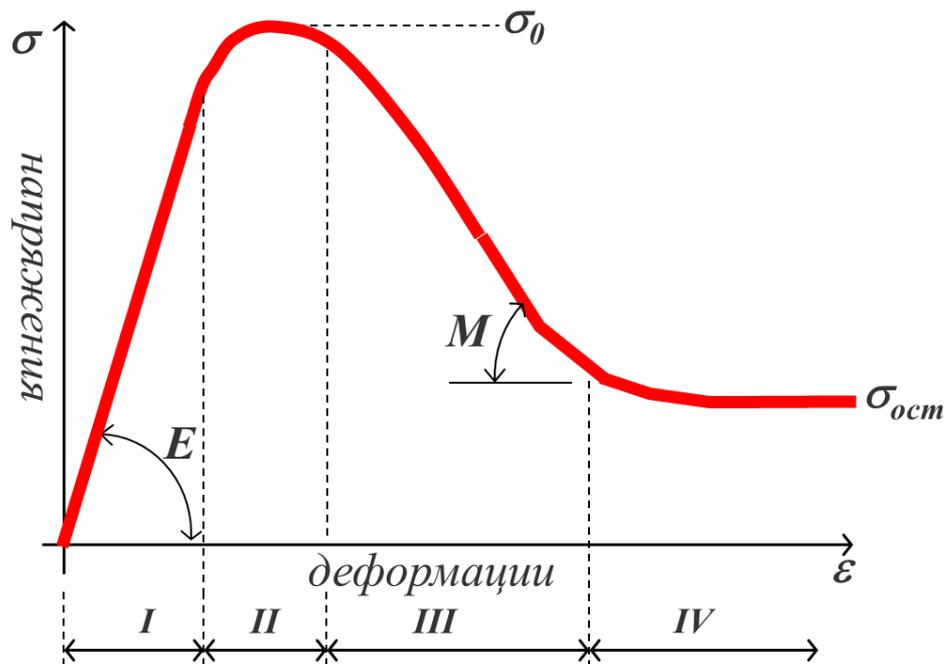
*Долинный
рудник*

Механические свойства пород

Полевая оценка упругости породы ультразвуковым прибором Пульсар

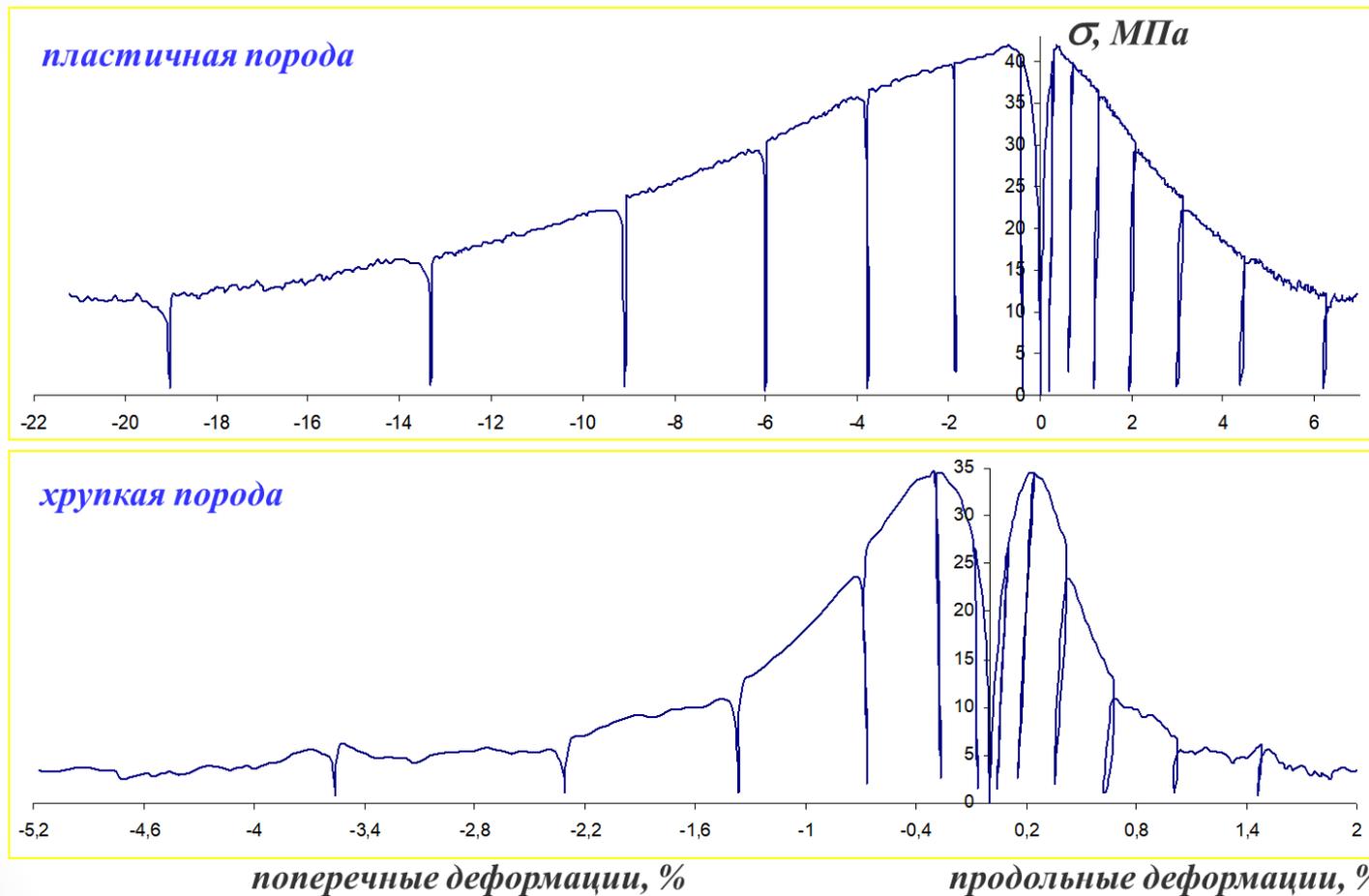


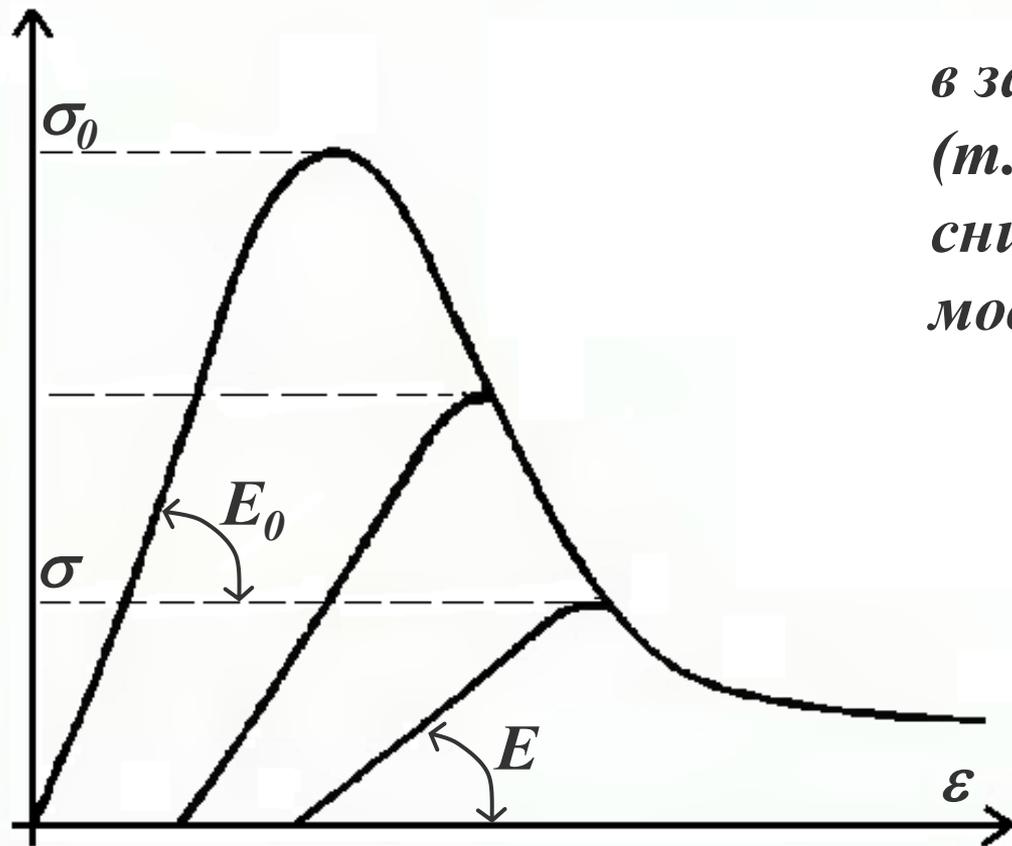
(до и после разрушения)



Режимы деформирования:

I - упругое; II - неупругое (пластическое); III - запредельное (развитие разрушения); IV - с остаточной прочностью





*в предельном состоянии
(т.е. в процессе разрушения)
снижаются и прочность, и
модуль упругости массива:*

$$\left(\frac{E}{E_0} \right)^2 = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$



Charles-Augustin de Coulomb
1736 - 1806

- *При сжатии разрушение пород происходит сдвигом по наклонным площадкам, на которых сопротивление сдвигу минимально.*
- *Сопротивление сдвигу на наклонных площадках определяется силами сцепления и внутреннего трения на них*

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

C – сцепление (Cohesion);

φ – угол внутреннего трения (Internal Friction Angle)

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

На наклонной площадке под углом β :

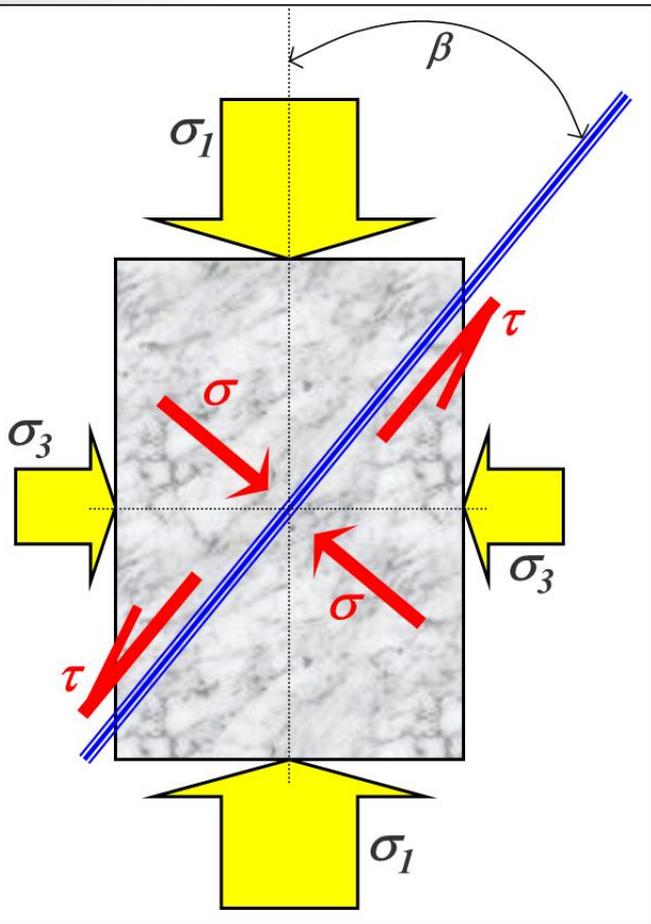
$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta$$

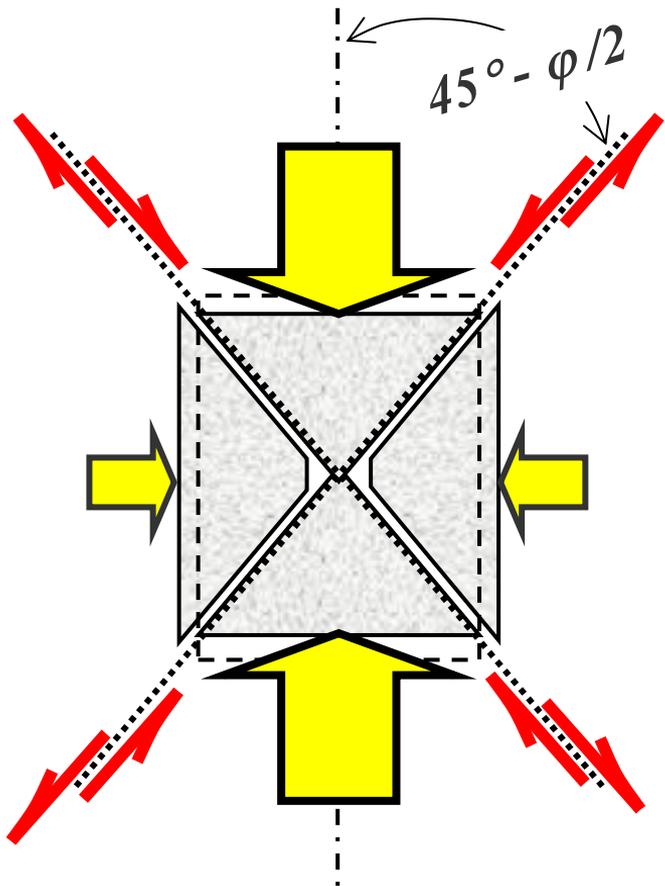
$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta$$

Чтобы найти площадки, по которым происходит срез (сдвиг), надо найти угол β , при котором:

$$\Phi = (C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi - \tau) \rightarrow \min$$

$$d\Phi / d\beta = 0$$





При сжатии разрушение пород сдвигом происходит по сопряженным площадкам, отклоненным от направления максимального сжатия на угол:

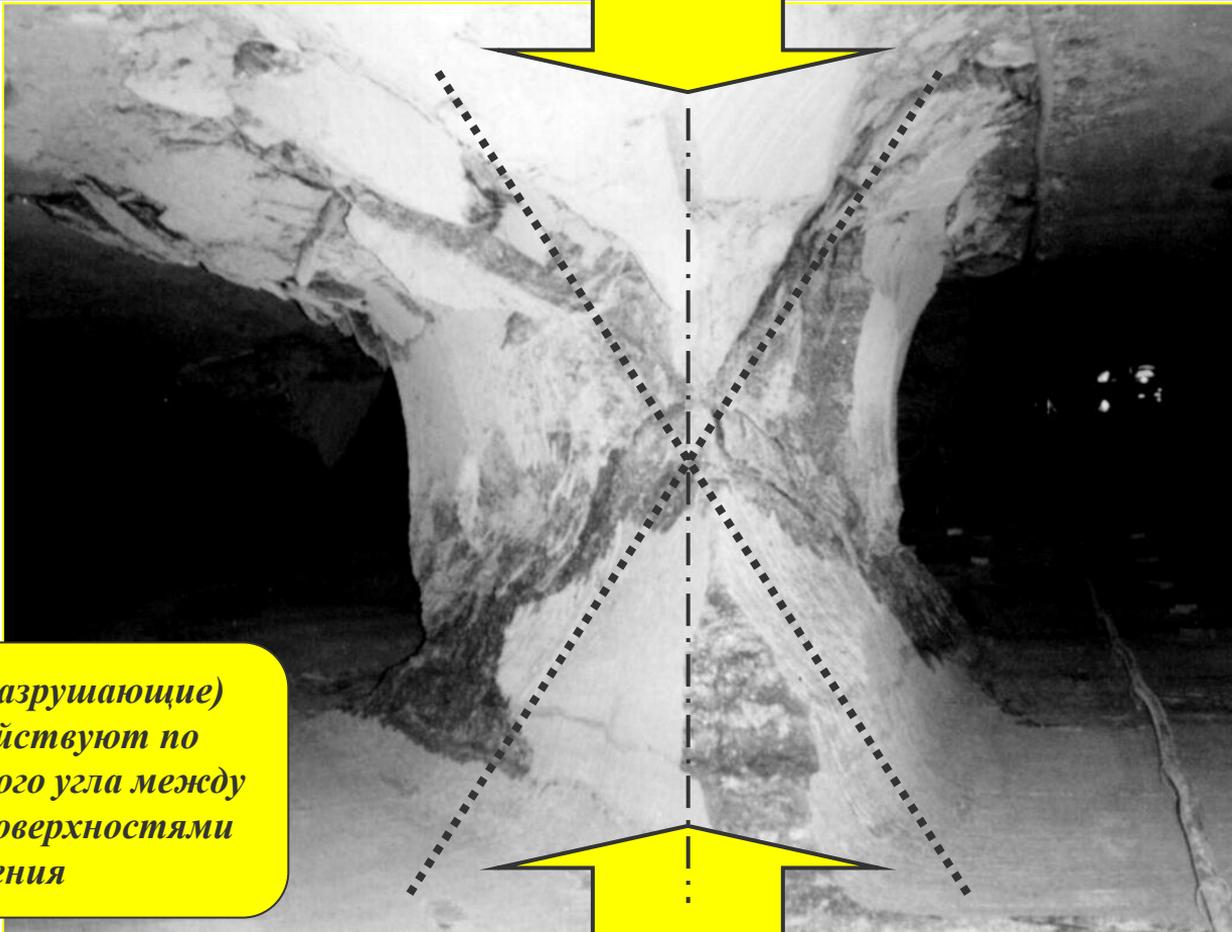
$$\pm (45^\circ - \varphi / 2)$$

где $\varphi = 30 \div 38^\circ$ - угол внутреннего трения пород

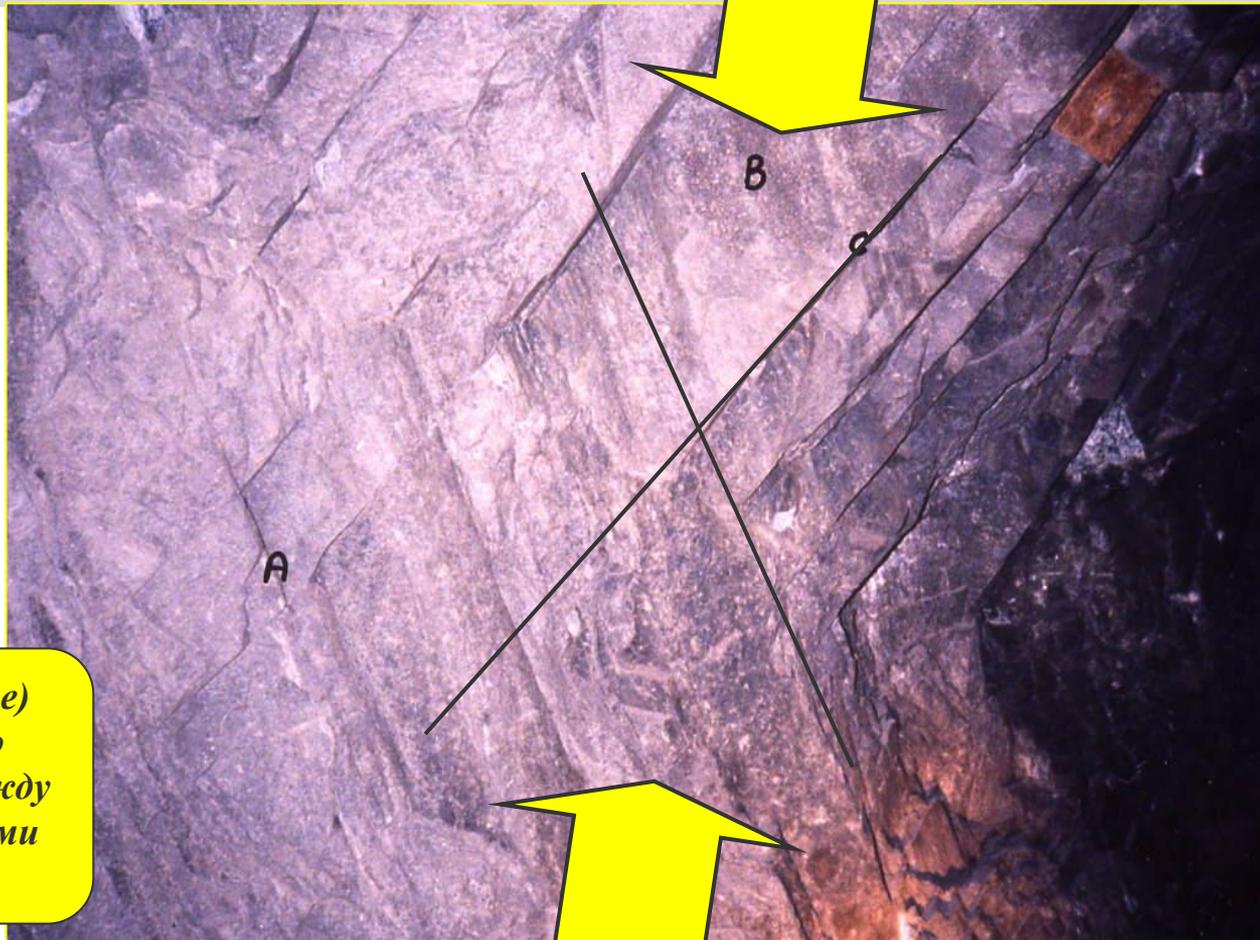
Если $\varphi = 36^\circ$, то это $\pm 27^\circ$



*идем по шахте и видим
разрушения на
сопряжении двух
выработок...*



*максимальные (разрушающие)
напряжения действуют по
биссектрисе острого угла между
сопряженными поверхностями
разрушения*



*максимальные (разрушающие)
напряжения действуют по
биссектрисе острого угла между
сопряженными поверхностями
разрушения*

*классическая форма
разрушения
междукамерных
целиков*

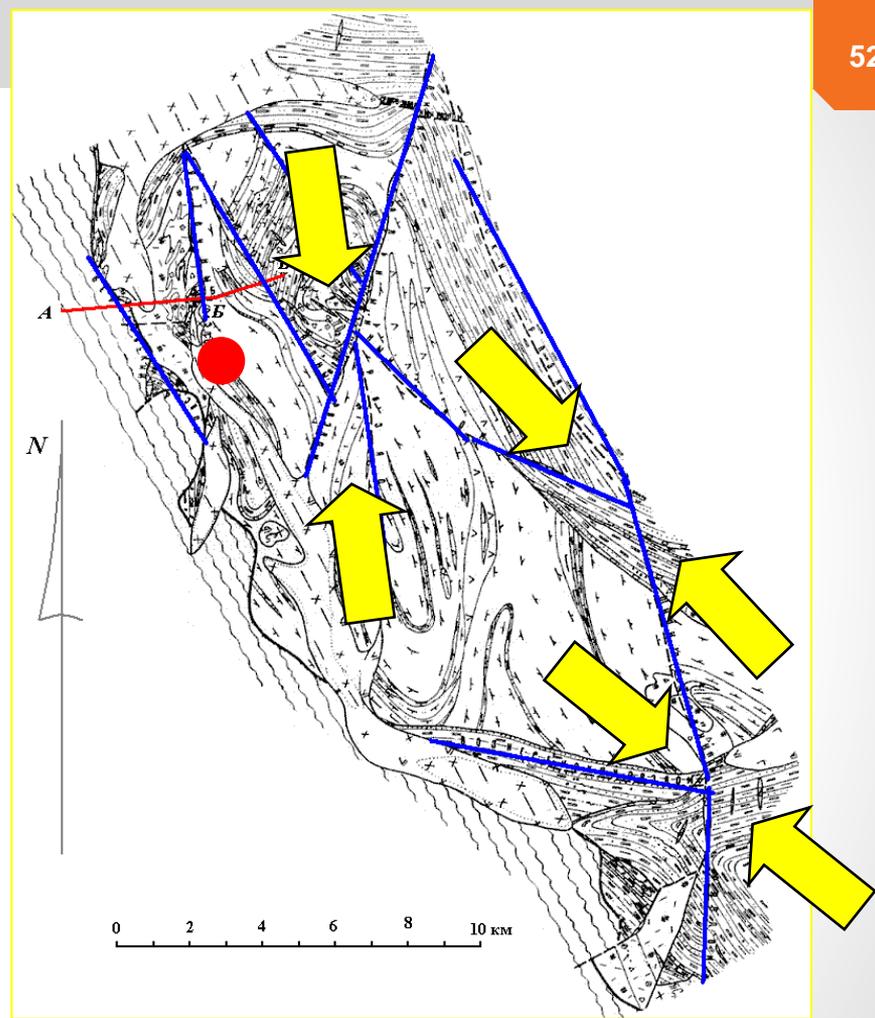


Реконструкция направлений действия тектонических напряжений в Орловском рудном поле по методу М.В. Гзовского

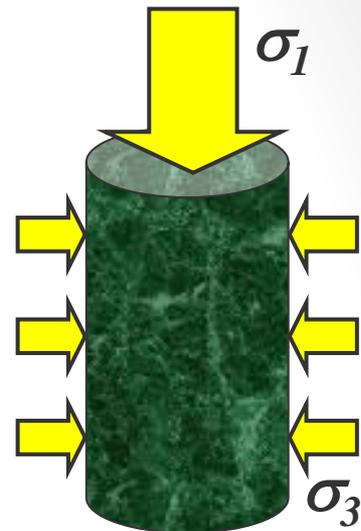
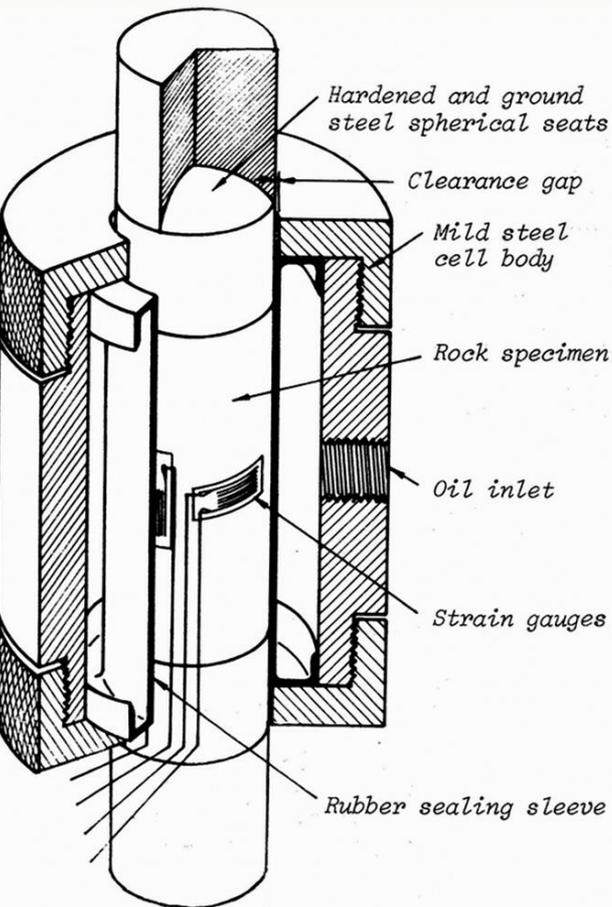


Гзовский М.В.

● Орловское месторождение

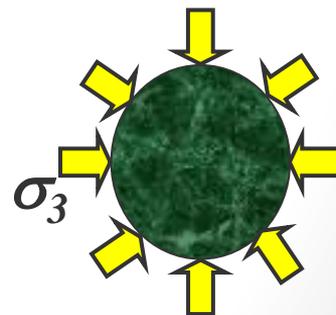


Испытания породы в объемном напряженном состоянии в камере Гудмана

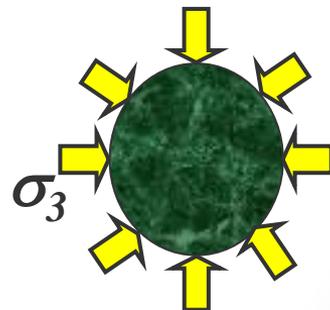
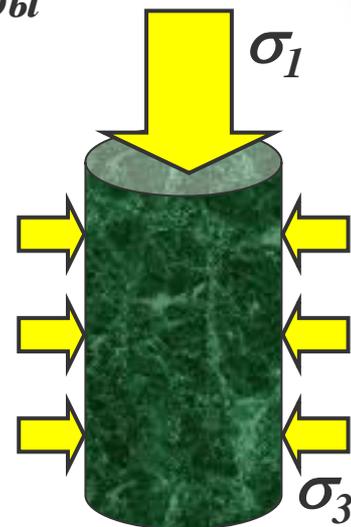
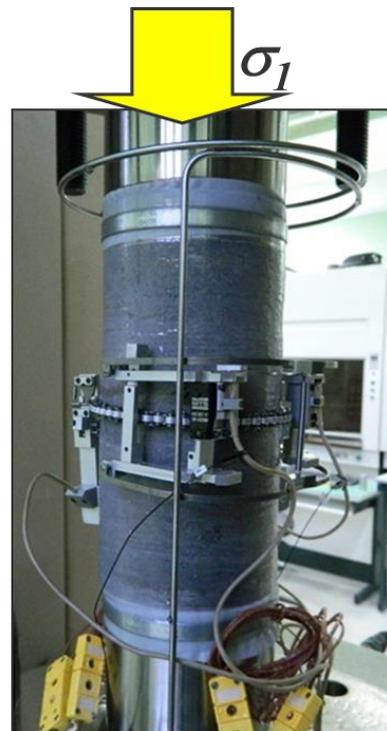


Условия нагружения:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$$

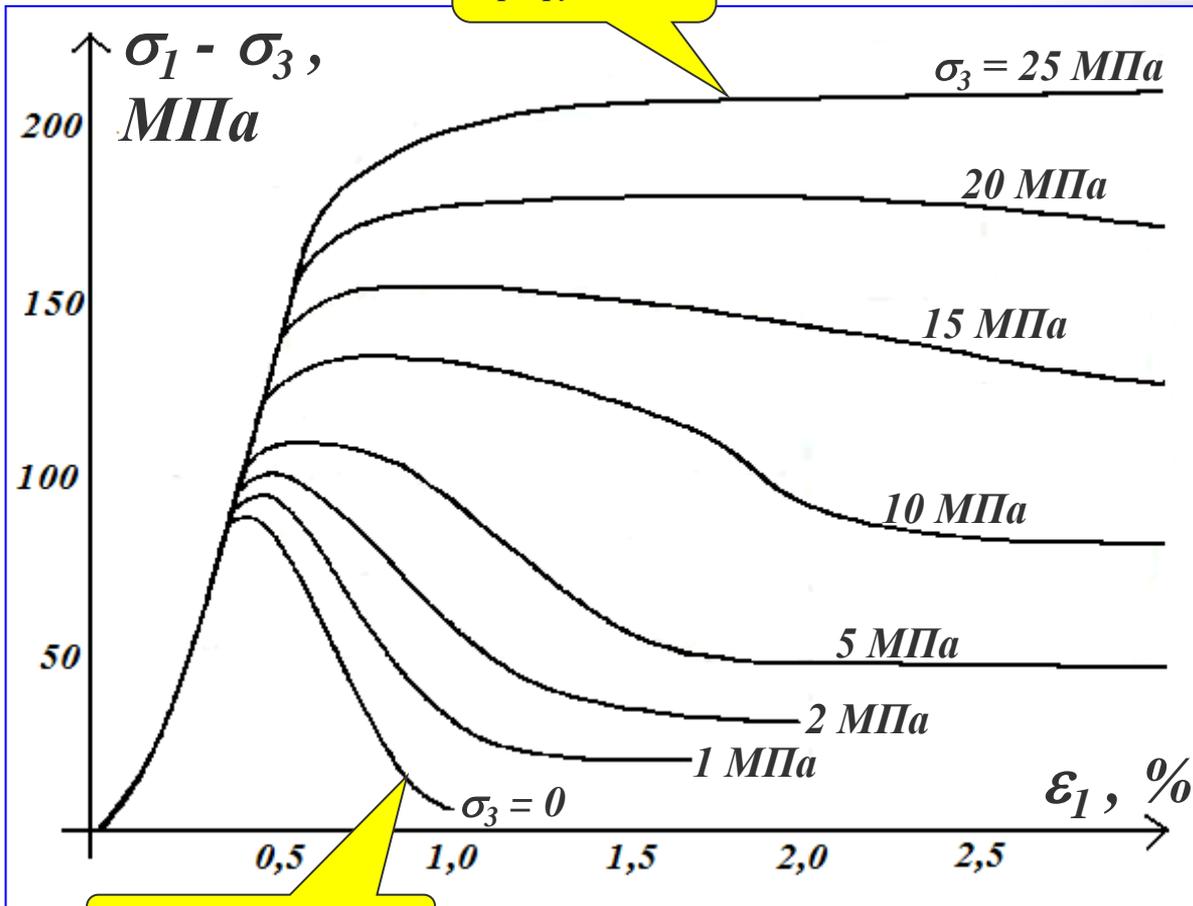


Сервогидравлическая система MTS 815 для испытаний породы в объемном напряженном состоянии (СПбГУ)



*Деформирование в объемном
напряженном состоянии*

*в объемном
напряженном
состоянии
увеличивается
прочность массива и
изменяется
характер его
разрушения*



пластическое
разрушение

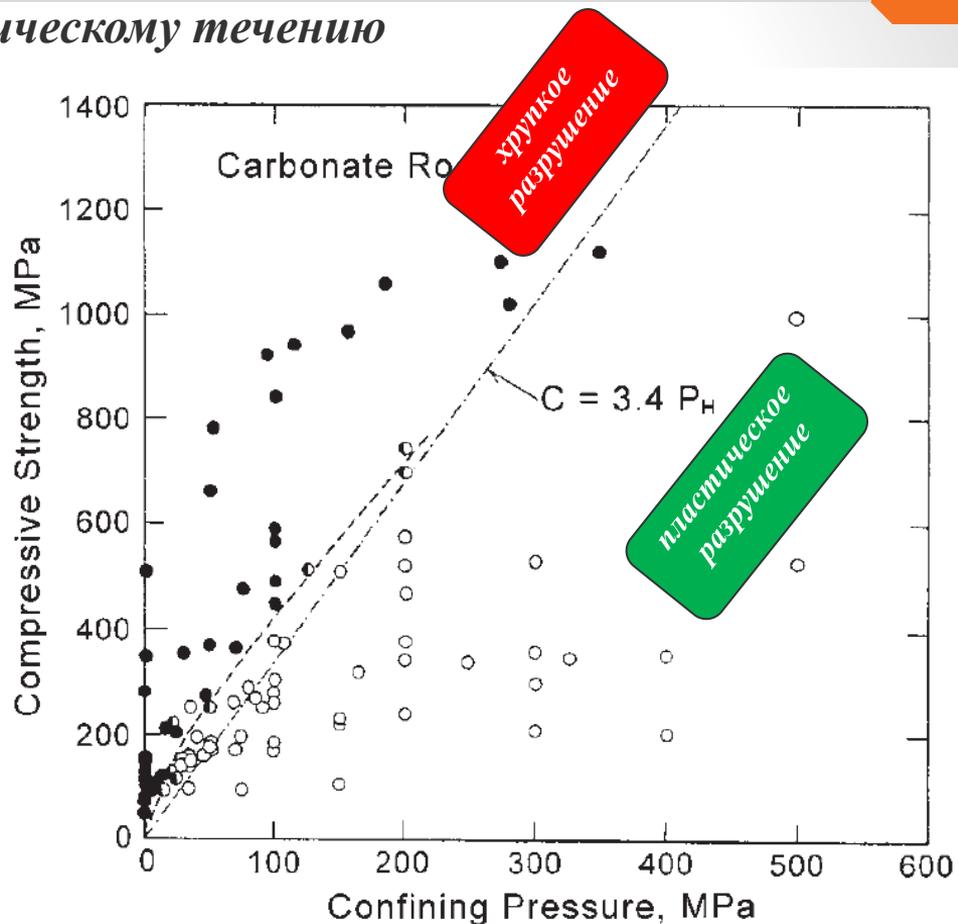
хрупкое разрушение

Переход от хрупкого разрушения к пластическому течению



Mogi's Line:

$$\sigma_1 = 3.4 \sigma_3$$



Calculate m_i , $sigci$ from Lab Data

Lab Data

Number of Tests: 72

mi: 8.450 sigci: 135.737 MPa

#	sig3 (MPa)	sig1 (MPa)
1	0	149.5
2	5	166.99
3	5	132.62
4	5	200.79
5	10	121.52
6	10	284.38
7	10	240.62
8	10	189.37
9	20	195.21
10	30	230.16
11	30	355.79
12	30	209.88
13	5	103.83
14	5	108.64
15	5	107.02

Copy Paste Import...

* Copy data from your spreadsheet, and then press Paste to have it entered in the grid
 * Use Import to read data from a RocData file or a (comma or tab delimited) text file

Plot Mogi's Line Residuals: 226020.44

Apply OK Cancel

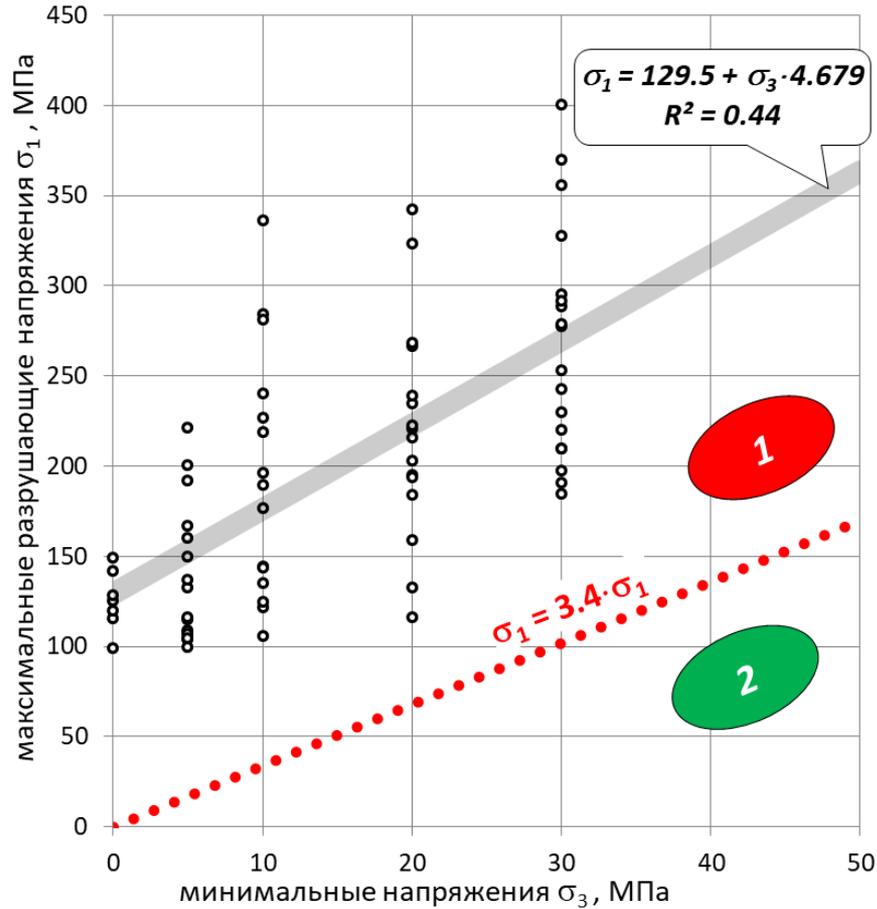
Переход от хрупкого разрушения к пластическому течению

Mogi's Line:

$$\sigma_1 = 3.4 \sigma_3$$

*андезиты
НШР*

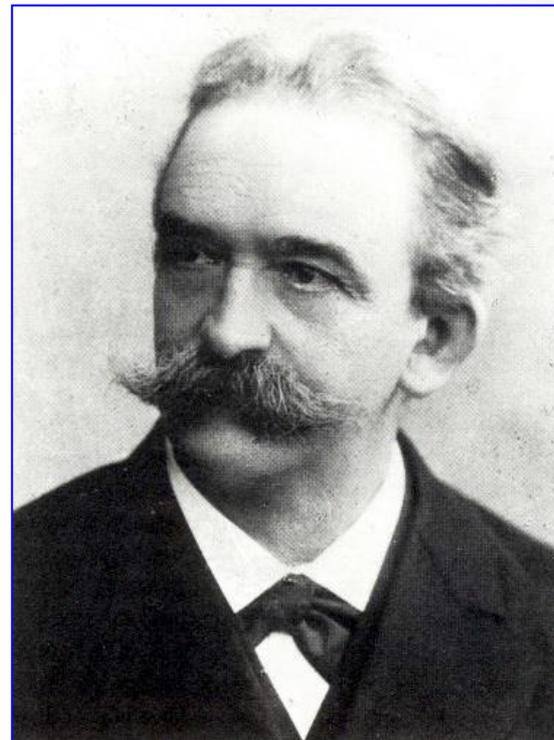
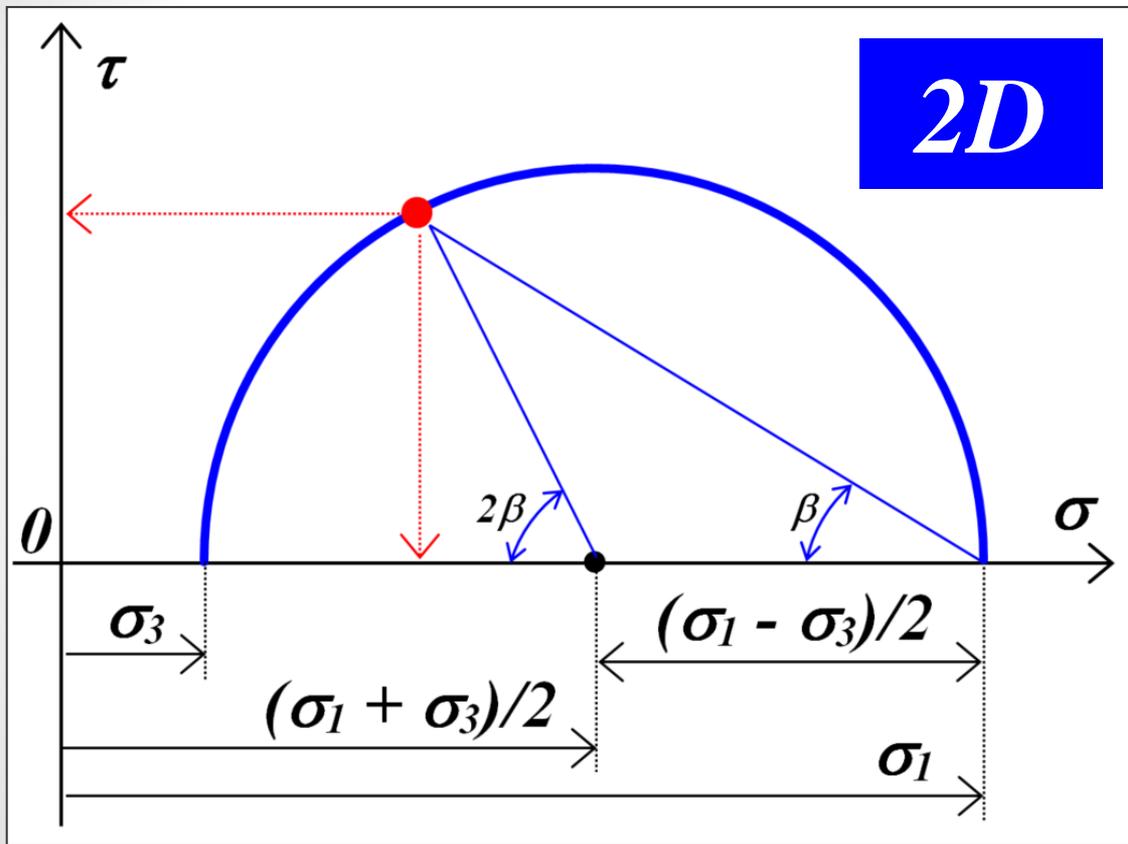
Трехосные испытания



Переход от хрупкого разрушения к пластическому течению

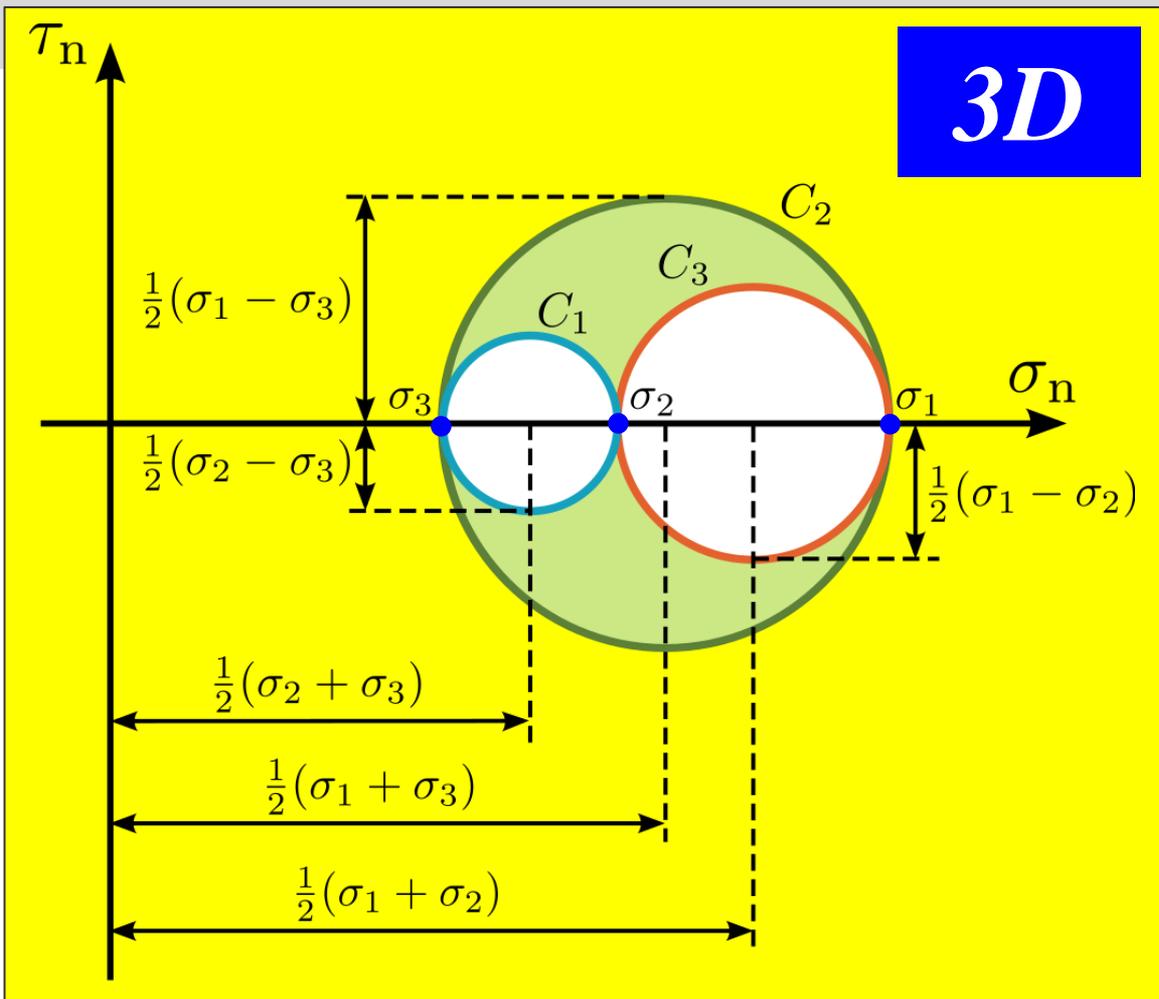
*Андезиты НШР
разрушаются хрупко,
т.е. они склонны к
горным ударам*

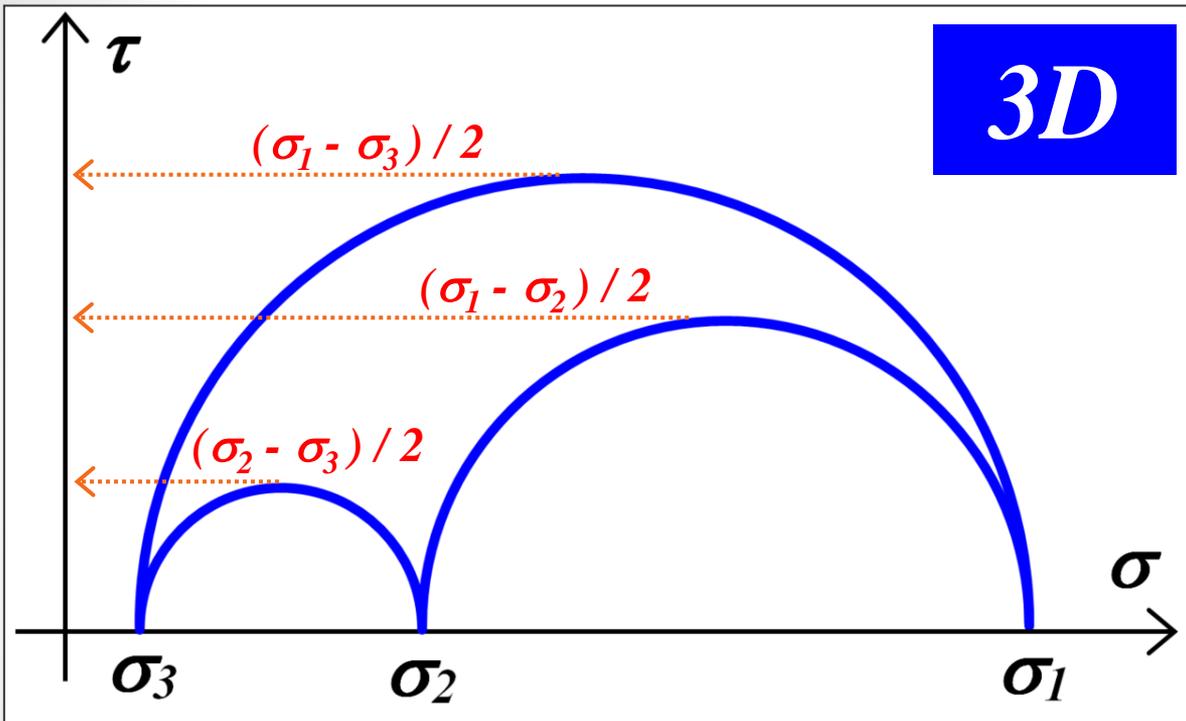
двумерная графическая интерпретация напряженного состояния



Christian Otto Mohr
1835 - 1918

двумерная графическая
интерпретация
напряженного состояния





Максимальные касательные напряжения τ_{max} :

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$$

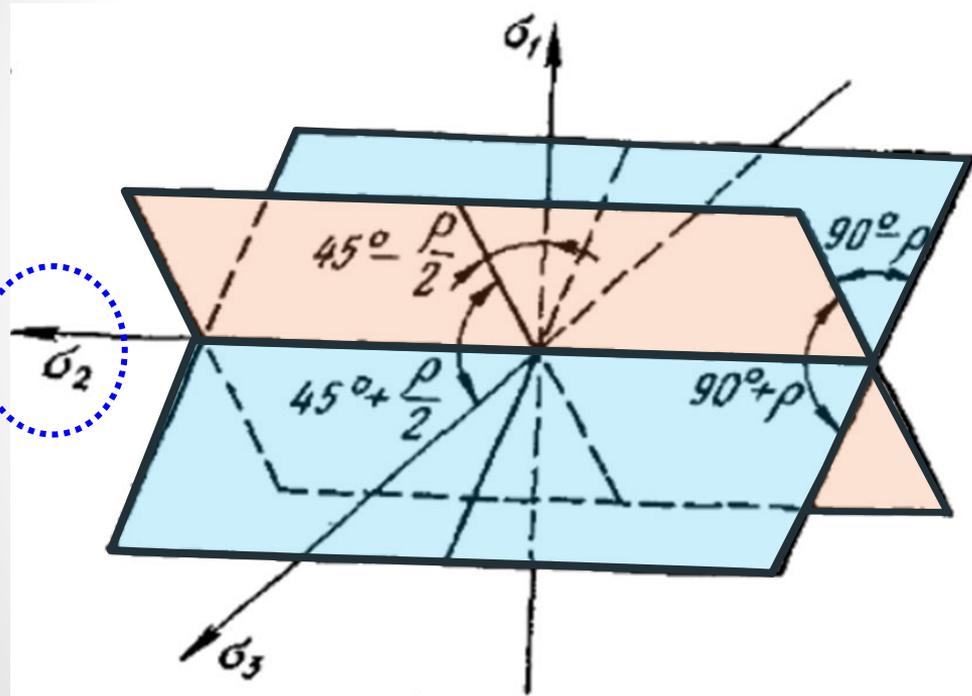
$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$$

$$\tau_{max} = (\sigma_2 - \sigma_3) / 2$$

*Условия разрушения определяются величинами σ_1 и σ_3
Величина σ_2 в критерии прочности не учитывается*



Условия разрушения определяются величинами σ_1 и σ_3
Величина σ_2 в критерии прочности не учитывается

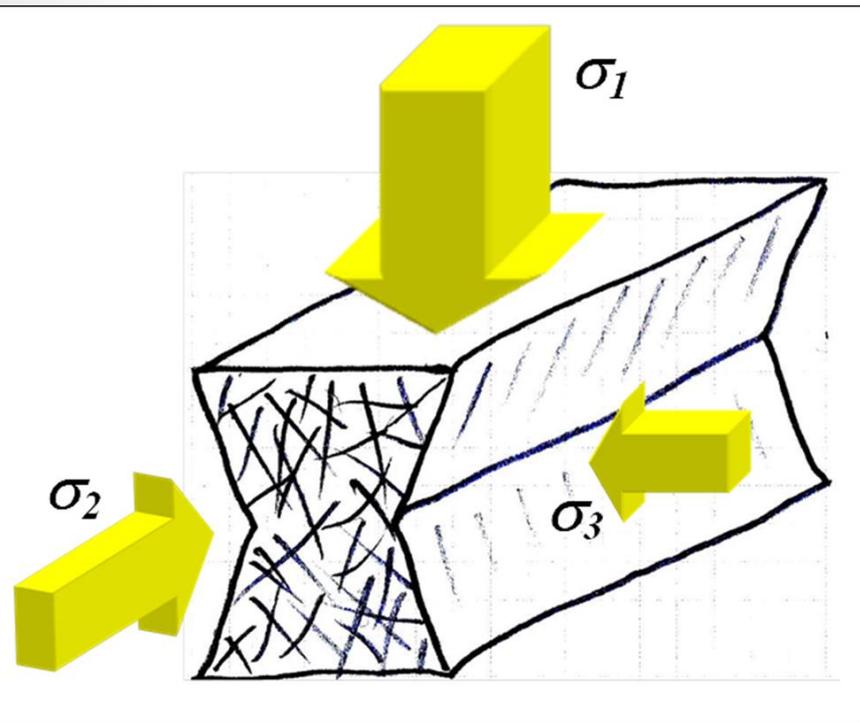
3D

плоскости разрушения
ориентированы по
направлению действия
промежуточных главных
напряжений σ_2



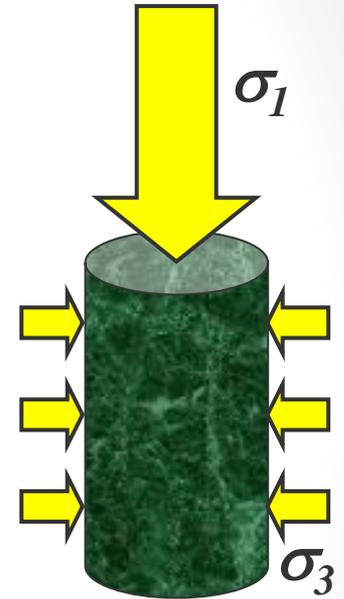
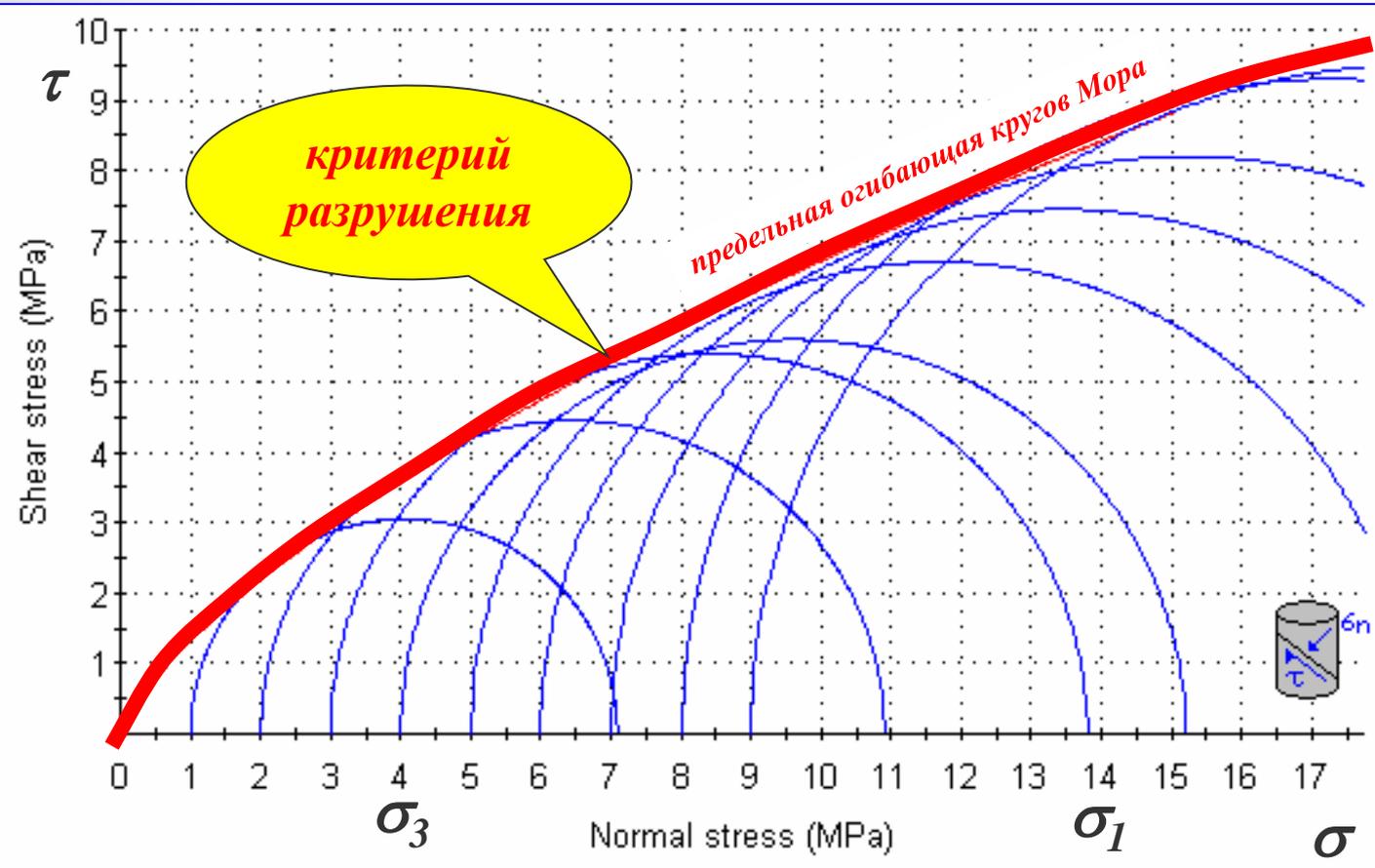
*Условия разрушения определяются величинами σ_1 и σ_3
Величина σ_2 в критерии прочности не учитывается*

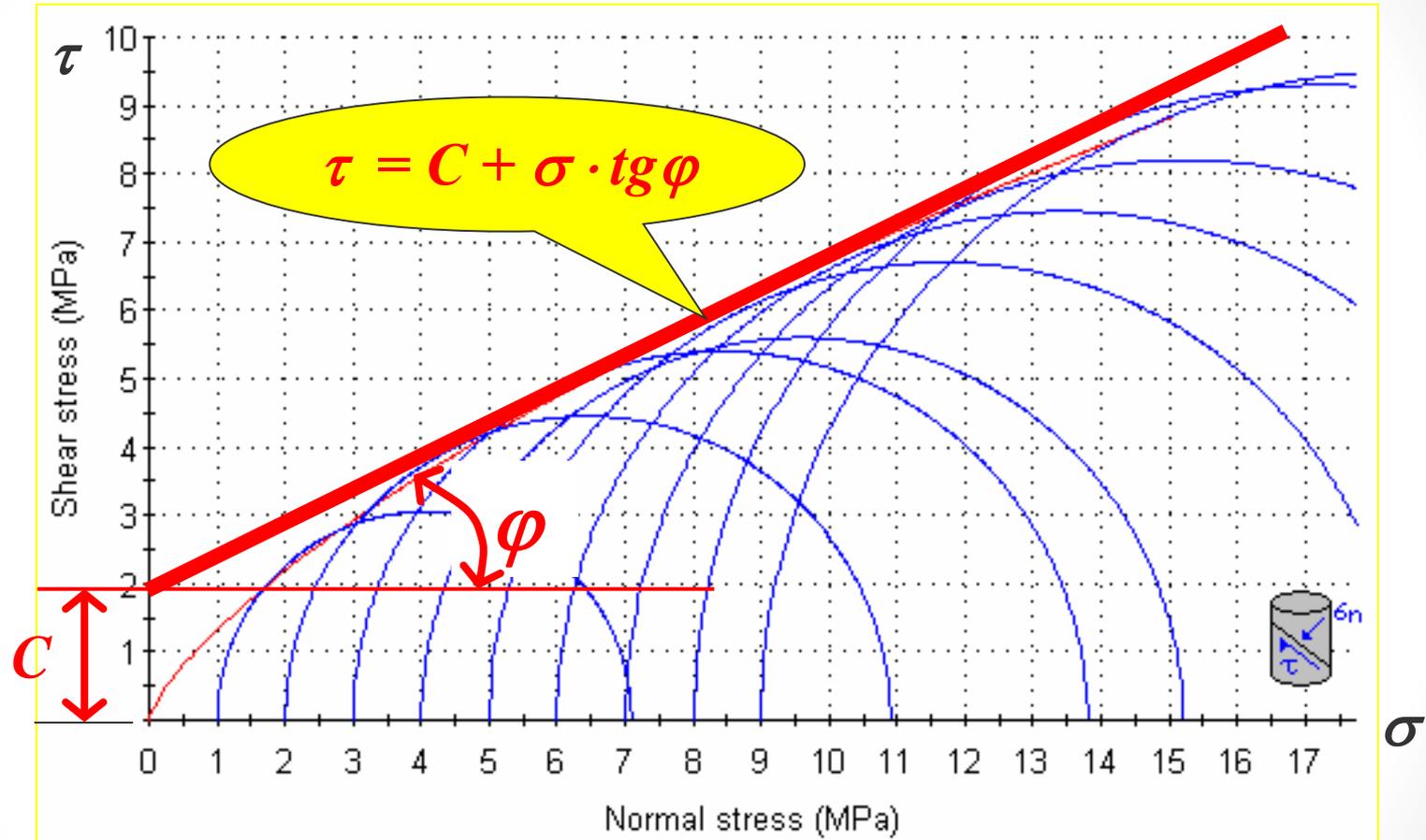
2D

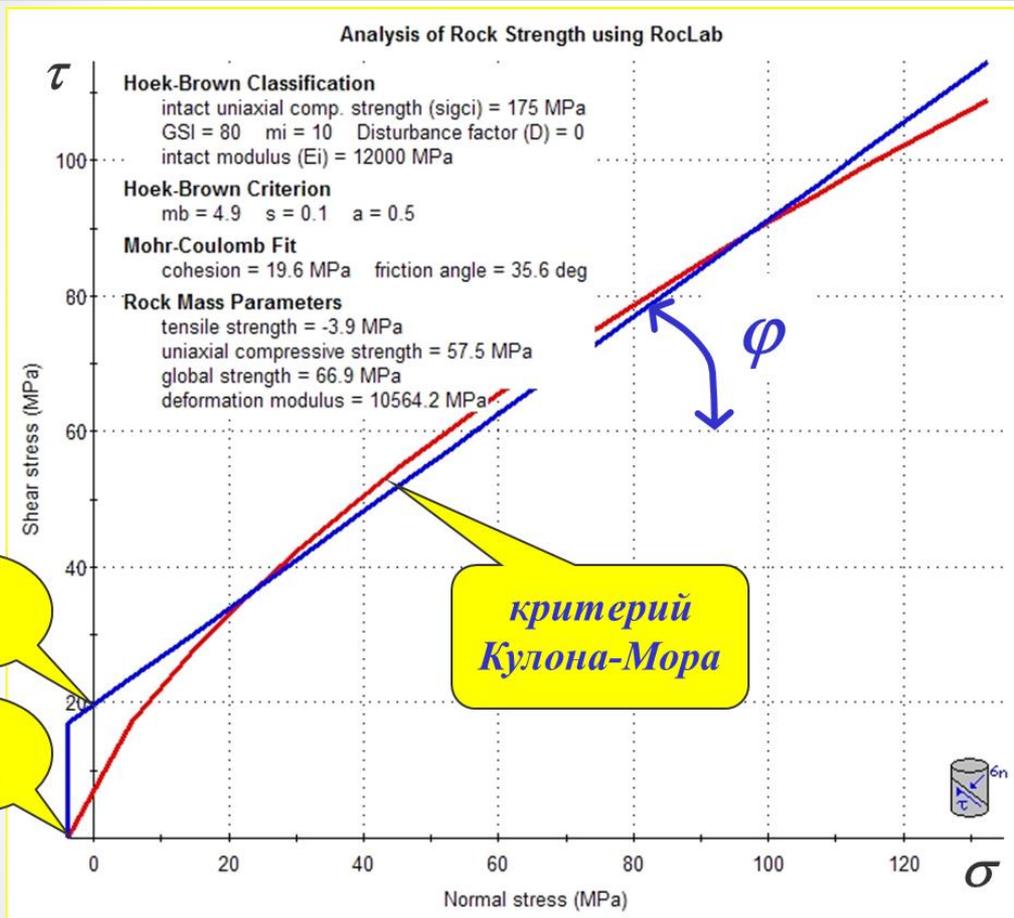


*плоскости разрушения
ориентированы по направлению
действия промежуточных
главных напряжений*









Параметры обобщенного критерия Кулона-Мора:

σ_p — прочность при растяжении, МПа;

C — сцепление, МПа

ϕ — угол внутреннего трения, град.

Сцепление – сопротивление сдвигу при отсутствии сил трения;

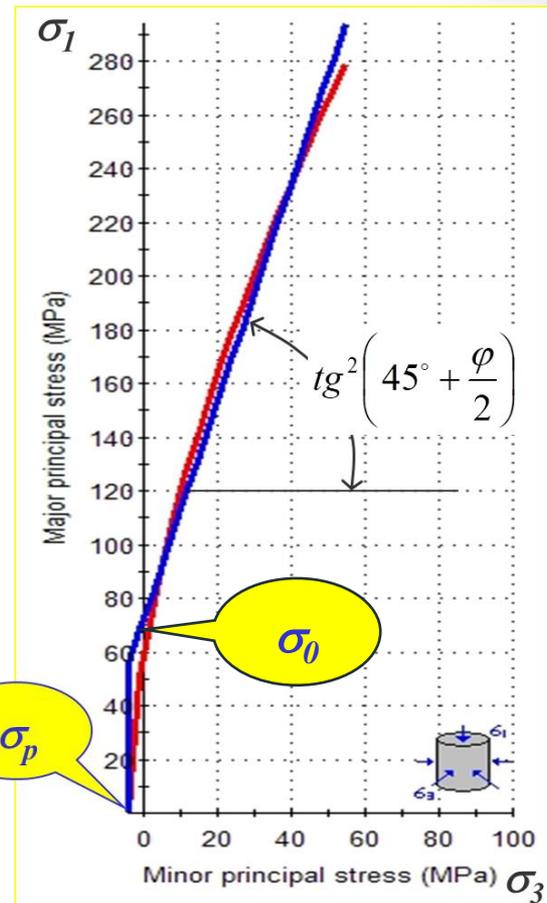
$\text{tg } \phi$ – коэффициент трения

Предельная величина максимальных напряжений:

$$\sigma_1 = 2C \cdot \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

σ_0 – прочность при
одноосном сжатии

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

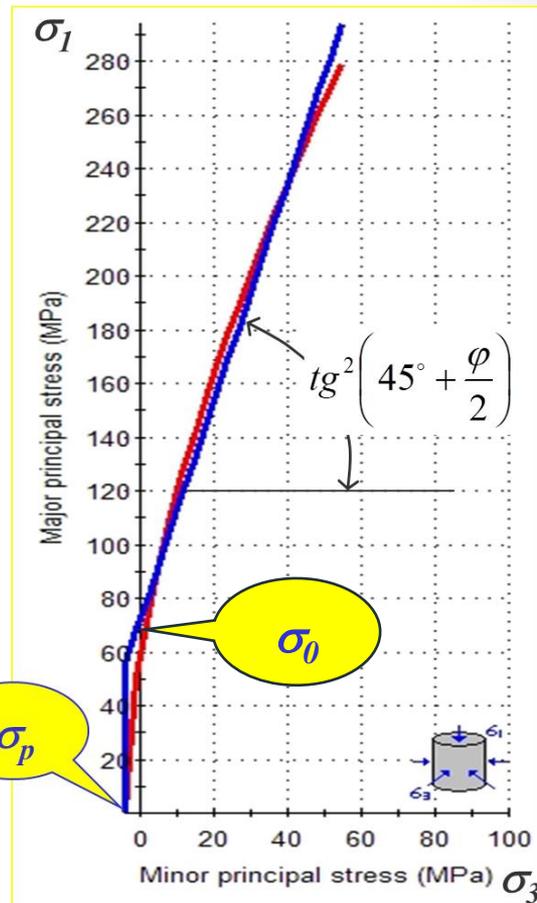


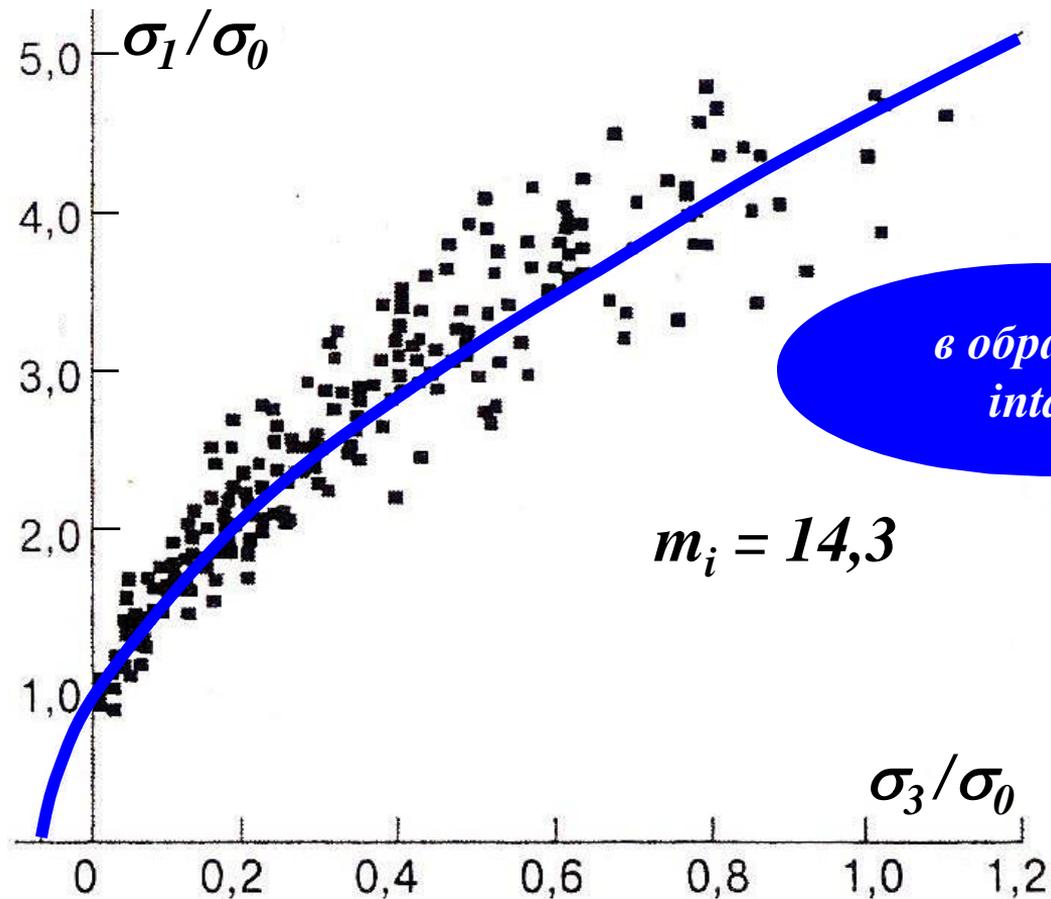
Предельная величина максимальных напряжений:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

в объемном напряженном состоянии прочность массива увеличивается за счет бокового зажима

Если $\varphi = 36^\circ$, то $\operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) = 3,85$





$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_0 \left(m_i \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_0} + 1 \right)^{0.5}$$

в образцах
intact

параметр критерия
Hoek-Brown m_i :

- зависит от типа породы,
- определяется по результатам 3-осного сжатия,
- справочные данные – в программах Rocscience

Hoek-Brown Classification

sigci 30 MPa

GSI 100

mi 10

D 0

Ei 12000 MPa

MR

Hoek-Brown Criterion

mb 10.000

s 1.0000

a 0.500

Failure Envelope Range

Application: General

Pick Mi Value

List of Mi Values

- Agglomerate 19 ± 3
- Amphibolites 26 ± 6
- Andesite 25 ± 5
- Anhydrite 12 ± 2
- Basalt 25 ± 5
- Breccia 19 ± 5
- Breccias 20 ± 2
- Chalk 7 ± 2
- Claystones 4 ± 2
- Conglomerates 21 ± 3
- Crystalline Limestone 12 ± 3
- Dacite 25 ± 3
- Diabase 15 ± 5
- Diorite 25 ± 5
- Dolerite 16 ± 5
- Dolerites 9 ± 2

Selected Mi Value

Mi Value: 10

Filter List

Rock Type

- Sedimentary
- Igneous
- Metamorphic

Texture

- Coarse
- Medium
- Fine
- Very Fine

OK Cancel

Hoek-Brown:

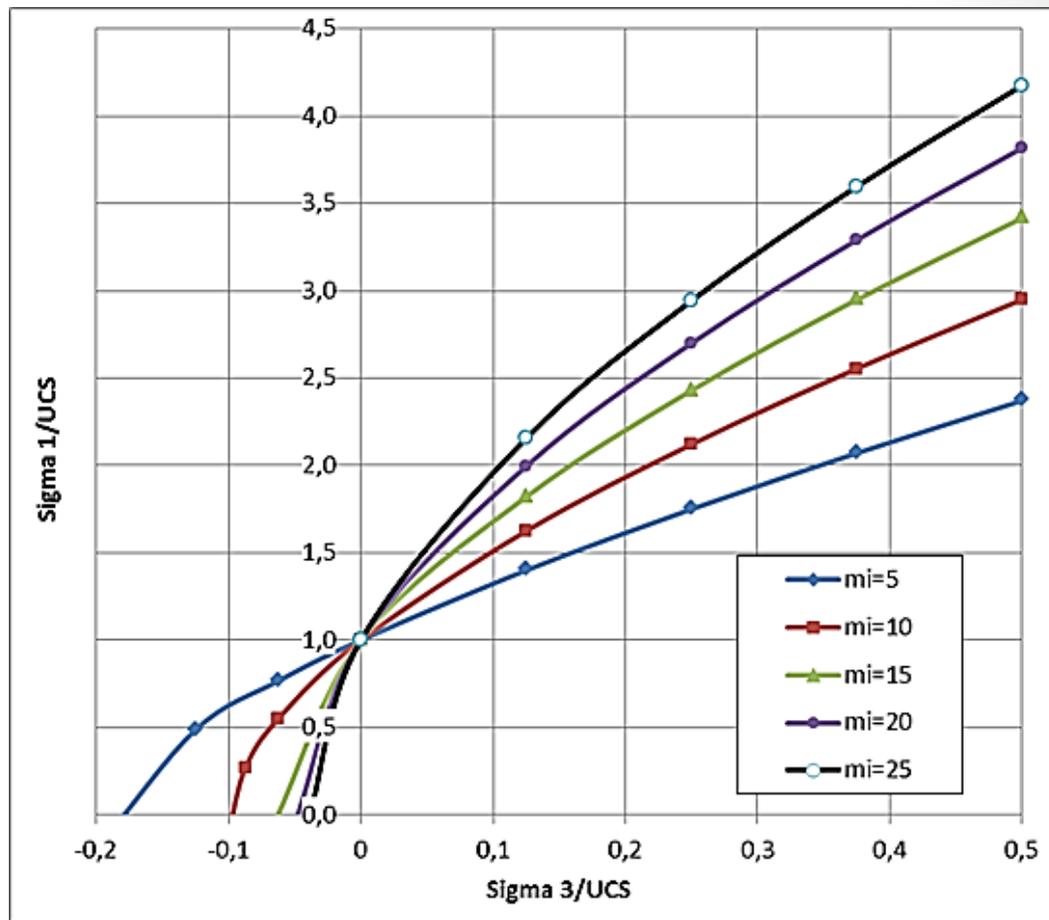
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_0 \left(m_i \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_0} + 1 \right)^{0.5}$$

*параметр m_i в критерии Хука-Брауна
есть аналог параметра $\operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)$
в критерии Кулона-Мора*

Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

параметр t_i в критерии Хука-Брауна есть аналог параметра $tg^2(45^\circ + \varphi/2)$ в критерии Кулона-Мора



параметр m_i для андезитов НШР по данным:

3-осных испытаний

справочника Rocscience

Pick Mi Value

List of Mi Values

- Agglomerate 19 ± 3
- Amphibolites 26 ± 6
- Andesite 25 ± 5**
- Anhydrite 12 ± 2
- Basalt 25 ± 5
- Breccia 19 ± 5
- Breccias 20 ± 2
- Chalk 7 ± 2
- Claystones 4 ± 2
- Conglomerates 21 ± 3
- Crystalline Limestone 12 ± 3
- Dacite 25 ± 3
- Diabase 15 ± 5
- Diorite 25 ± 5
- Dolerite 16 ± 5
- Dolerites 9 ± 2

*почувствуйте
разницу*

Calculate m_i , $sigci$ from Lab Data

Lab Data

Number of Tests: 72

#	sig3 (MPa)	sig1 (MPa)
7	10	240.62
8	10	189.37
9	20	195.21
10	30	230.16
11	30	355.79
12	30	209.88
13	5	103.83
14	5	108.64
15	5	107.33
16	10	105.97
17	20	266.52
18	20	342.4
19	5	192.12
20	5	136.75

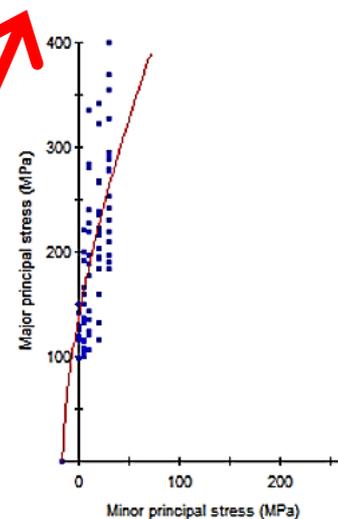
Copy Paste Import...

* Copy data from your spreadsheet, and then press Paste to have it entered in the grid

* Use Import to read data from a RocData file or a (comma or tab delimited) text file

m_i : 8.450

$sigci$: 135.737 MPa



Plot Mogi's Line Residuals: 226020.44

Apply OK Cancel

Критерий разрушения Хука - Брауна

m_i для андезитов НШР по данным:

*почувствуйте
разницу*

справочника Rocscience

Hoek-Brown Classification

sigci	135	MPa
GSI	60	
mi	25	
D	0	
<input checked="" type="radio"/> Ei	12000	MPa
<input type="radio"/> MR		

Hoek-Brown Criterion

mb	5.991
s	0.0117
a	0.503

Failure Envelope Range

Application: General

sig3max	33.7500	MPa
---------	---------	-----

Mohr-Coulomb Fit

c	10.133	MPa
phi	41.45	deg

Rock Mass Parameters

sigt	-0.265	MPa
sigc	14.446	MPa
sigcm	44.934	MPa
Erm	6240.00	MPa

Hoek-Brown Classification

sigci	135	MPa
GSI	60	
mi	8	
D	0	
<input checked="" type="radio"/> Ei	12000	MPa
<input type="radio"/> MR		

Hoek-Brown Criterion

mb	1.917
s	0.0117
a	0.503

Failure Envelope Range

Application: General

sig3max	33.7500	MPa
---------	---------	-----

Mohr-Coulomb Fit

c	7.494	MPa
phi	31.51	deg

Rock Mass Parameters

sigt	-0.827	MPa
sigc	14.446	MPa
sigcm	26.768	MPa
Erm	6240.00	MPa

3-осных испытаний

m_i для андезитов НШР по данным:

справочника Rocscience

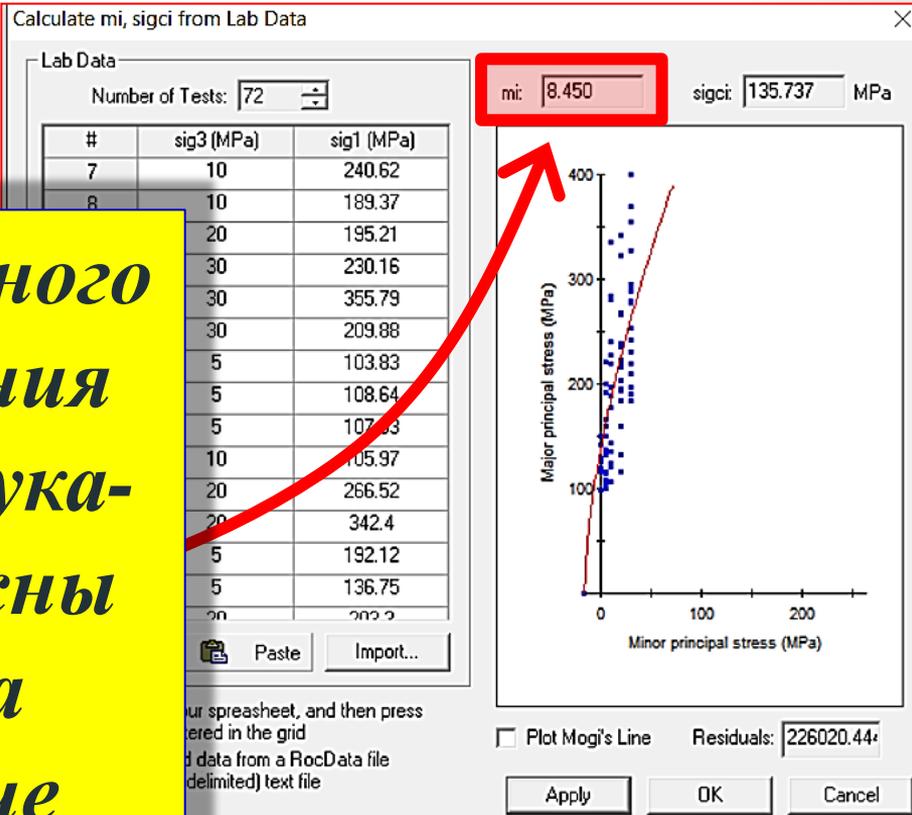
Pick Mi Value

List of Mi Values

Agglomerate	19 ± 3
Amphibolites	26 ± 6
Andesite	25 ± 5
Anhydrite	12 ± 2
Basalt	25 ± 5
Breccia	19 ± 5
Breccias	20 ± 2
Chalk	7 ± 2
Claystones	4 ± 2
Conglomerates	21 ± 3
Crystalline Limestone	12 ± 3
Dacite	25 ± 3
Diabase	15 ± 5
Diorite	25 ± 5
Dolerite	16 ± 5
Dolerites	9 ± 2

**для корректного
использования
критерия Хука-
Брауна нужны
тесты на
3D-сжатие**

3-осных испытаний на сжатие





resourceful



experienced



worldwide