



Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Горный институт
Кольского научного центра
Российской академии наук

Современные результаты изучения природных напряжений в верхней части земной коры и проблемы горного давления

А.А.Козырев

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлен факт широкой распространенности тектонических напряжений в верхней части земной коры как в изверженных кристаллических породах, так и в осадочном (метаморфизованном) комплексе пород .

По данным экспериментальных определений в породах кристаллического и складчатого фундамента горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 60% случаев, в осадочных породах – в 15-20%. Причем это превышение может достигать до 5-10 раз.

Именно горизонтальные напряжения определяют особенности проявлений горного давления и устойчивость конструктивных элементов систем разработки месторождений полезных ископаемых и комплексов различных подземных выработок.

Принципиально меняется понятие «глубокие рудники», поскольку динамические проявления горного давления отмечаются уже на глубине 200-300 м.

В настоящее время получили признание две концепции о формировании поля напряжений в верхней части земной коры. Согласно первой естественное поле напряжений определяется действием гравитационных и остаточных напряжений, связанных с генезисом формирования массивов. Остаточные напряжения рассматриваются как самоуравновешивающиеся компоненты напряжений при отсутствии действия внешних сил.

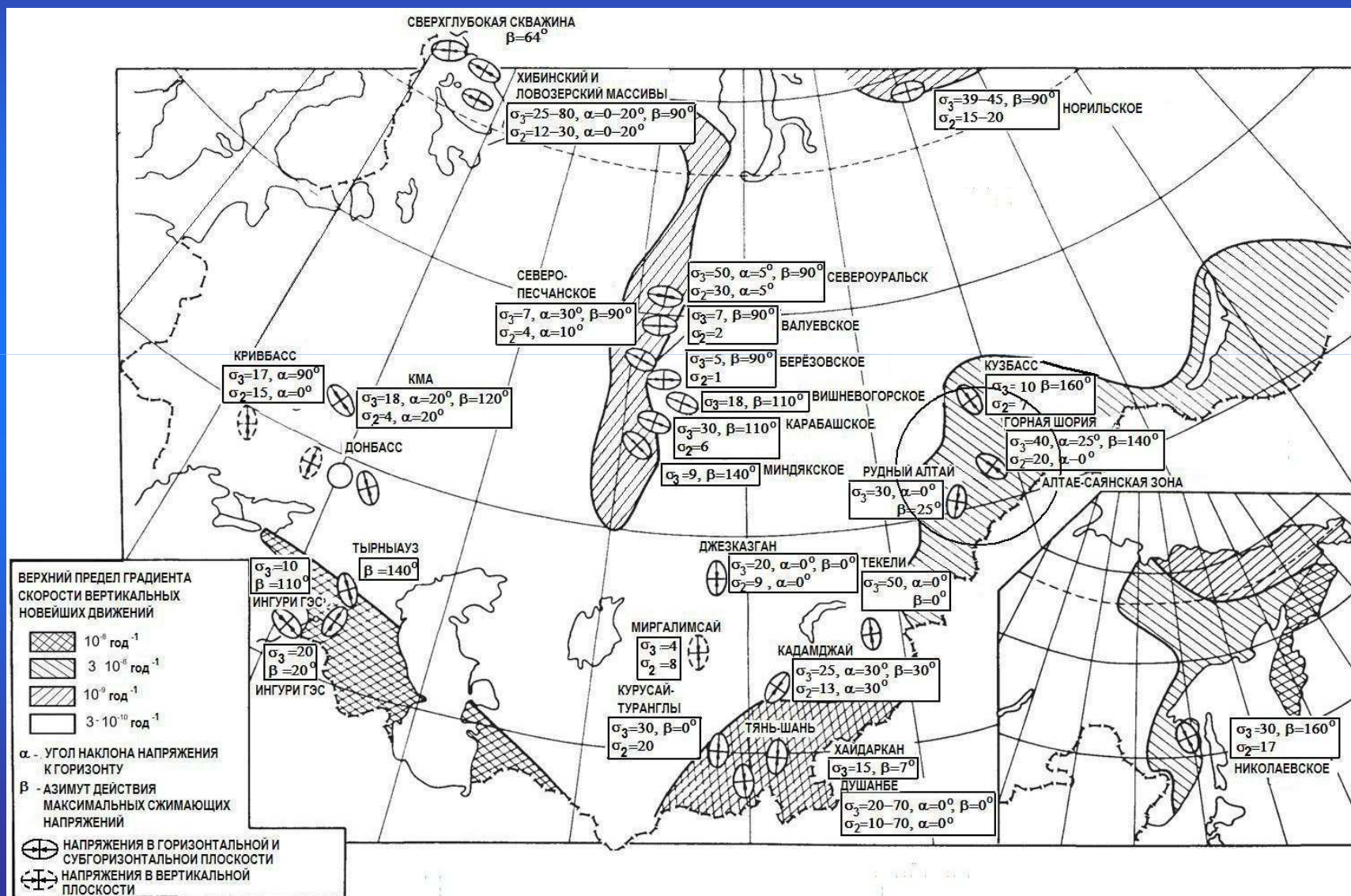
Согласно второй концепции суммарное поле напряжений в массиве определяется совместным действием гравитационного и тектонического полей, соотношение между которыми меняется в значительных пределах. Тектонические поля напряжений связываются с современными движениями плит и блоков земной коры

Схема ранжирования полей тектонических напряжений в земной коре (по П.Н.Николаеву)

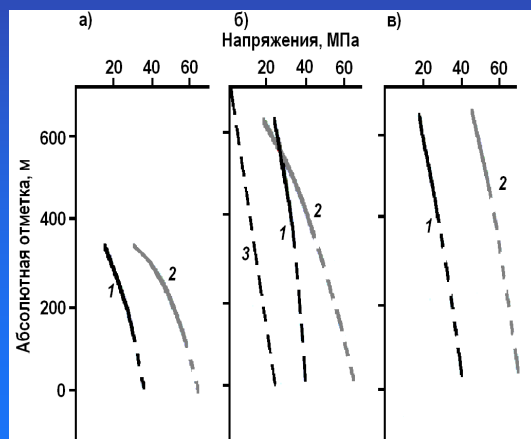


Тектонически напряженные массивы отличаются повышенными значениями градиента скорости современных поднятий земной коры, повышенной сейсмической активностью, аномальными проявлениями горного давления в скважинах и подземных выработках на сравнительно малых глубинах. Анализ опубликованных материалов, а также результатов наших определений различными методами и наблюдение за проявлениями горного давления на рудниках и в глубоких скважинах Кольского полуострова и Средней Азии позволили установить приуроченность проявления высоких горизонтальных напряжений к зонам тектонических поднятий земной коры [Марков, 1980; Козырев, 1996].

Карта напряженного состояния горных пород в основных горнопромышленных районах бывшего СССР по данным измерений в рудниках



Параметры естественного поля напряжений на рудниках



1 – горизонтальные
тектонические вкрест
простираия

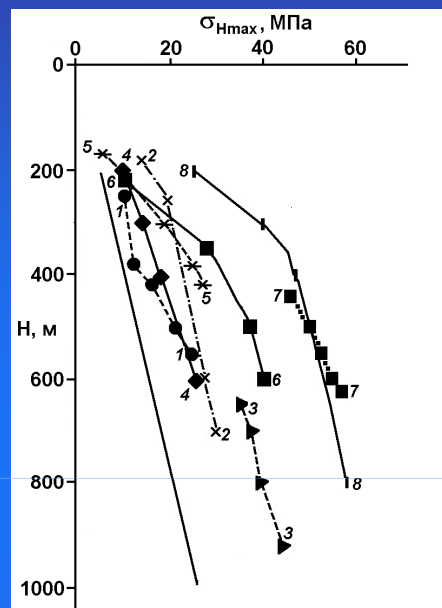
2 - Горизонтальные
тектонические по
простираию

3 - вертикальные

а – Кукисвумчорр;

б - Юкспор

в - Расвумчорр



1 - Северопесчанский

2 - Южная

3 - Гайское

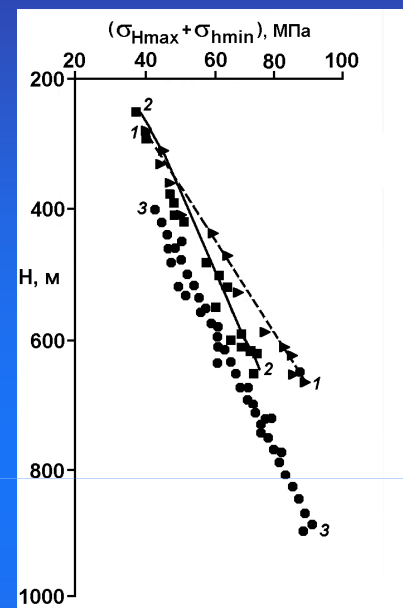
4 - Лебяжинское

5 - Новопесчанский

6 - Естюнинская

7 - Высокогорское

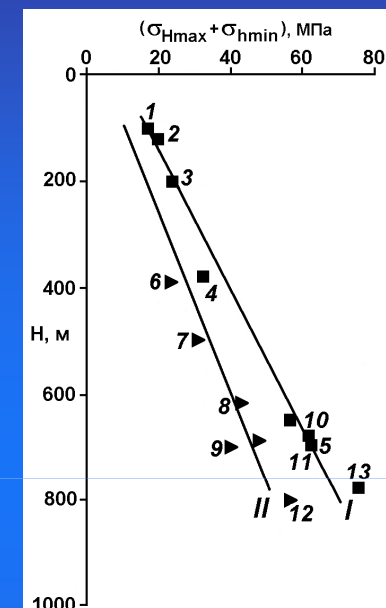
8 - Горноблагодатское



1 - Абаканский

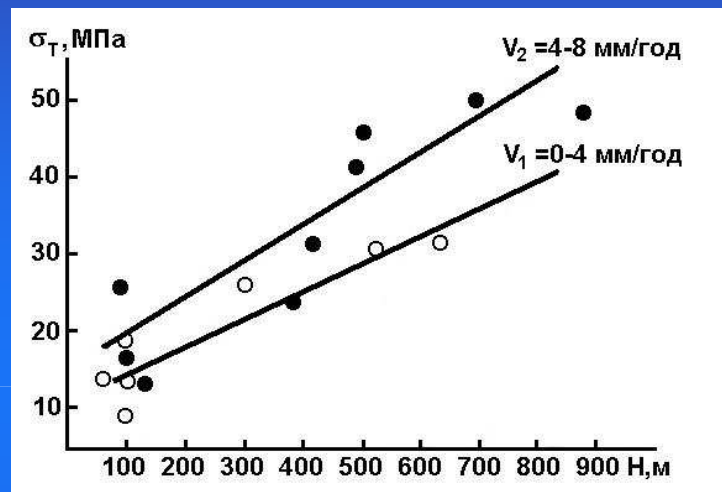
2 - Шерегешский

3 - Таштагольский



I – для крепких
пород,
II – для пород
средней крепости,
1-2 – Туранглы,
3 – Улуу-Тоо,
4-9 – Куру-Сай,
10-12 – Текели,
13 – Кан-Сай,
14 – Сумсар

Взаимосвязь измеренных горизонтальных напряжений с глубиной при различных скоростях современных движений участков земной коры на территории Фенноскандии.



Гистограмма распределения по годам горных ударов, тектонических горных ударов и техногенных землетрясений

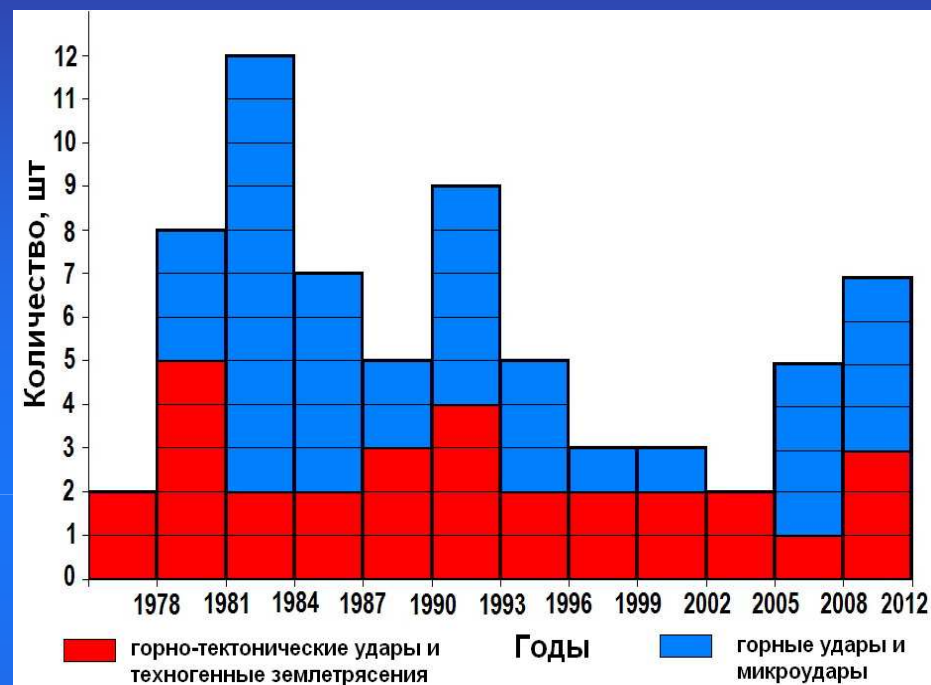
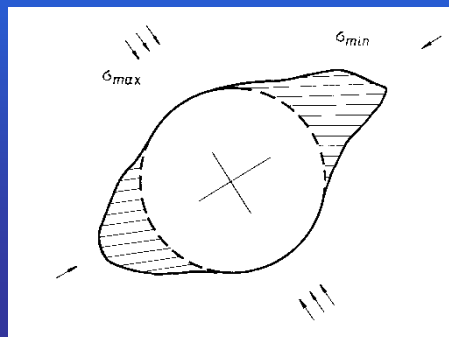
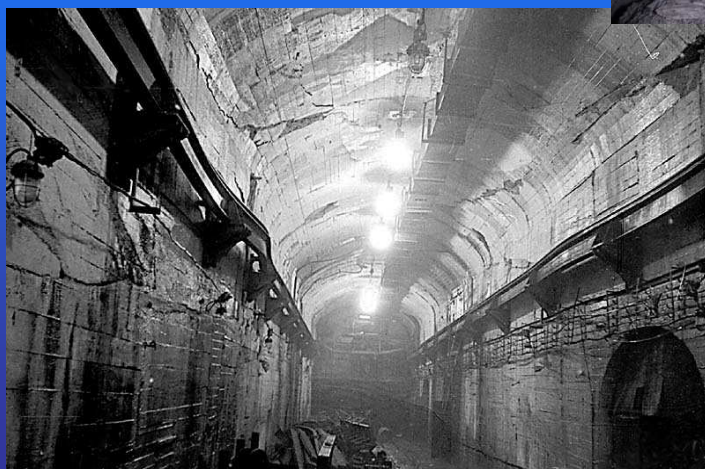


Фото и схема разрушения стенок скважины и керна под действием высоких напряжений



Разрушение выработок при горных ударах





Приуроченность проявления высоких горизонтальных напряжений к зонам тектонических поднятий земной коры просматривается как закономерная для территории Кольского полуострова, Фенноскандии, Средней Азии и не противоречит данным по другим территориям и регионам. Всюду, где наблюдаются современные поднятия земной коры или такие поднятия имели место в геологическом прошлом и отражены в рельефе, возможно проявление высокой горизонтальной напряженности. Поднятия могут быть связаны как с вертикальными, так и горизонтальными движениями участков земной коры. В зонах опусканий и медленных погружений земной поверхности наблюдается гравитационное напряженное состояние, поэтому горизонтальные напряжения здесь могут быть меньше вертикальных.

Типы напряженного состояния и направления действия максимальных горизонтальных напряжений

[Неверов, 2012]

Скандинавия



Поля напряжений:

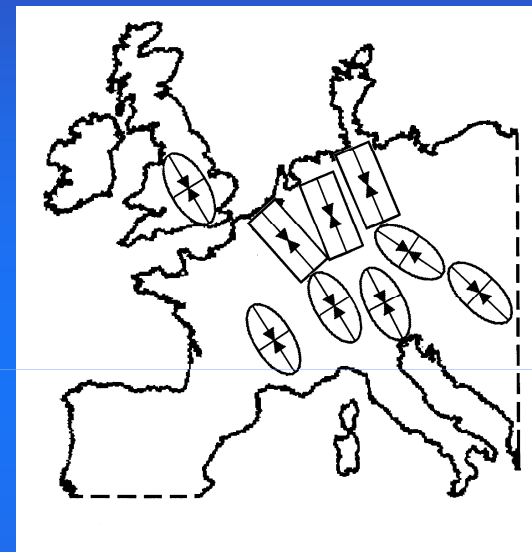
тектоническое



геостатическое, в т.ч. гравитационное



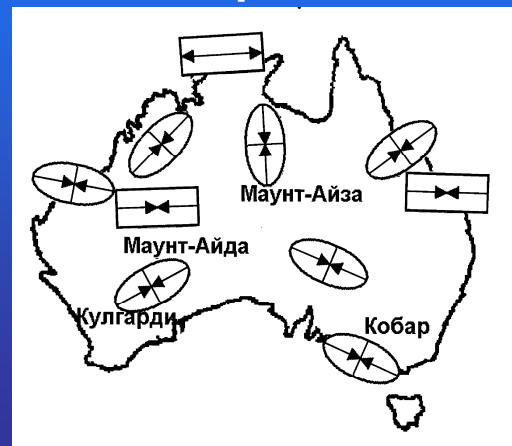
Центральная Европа



США

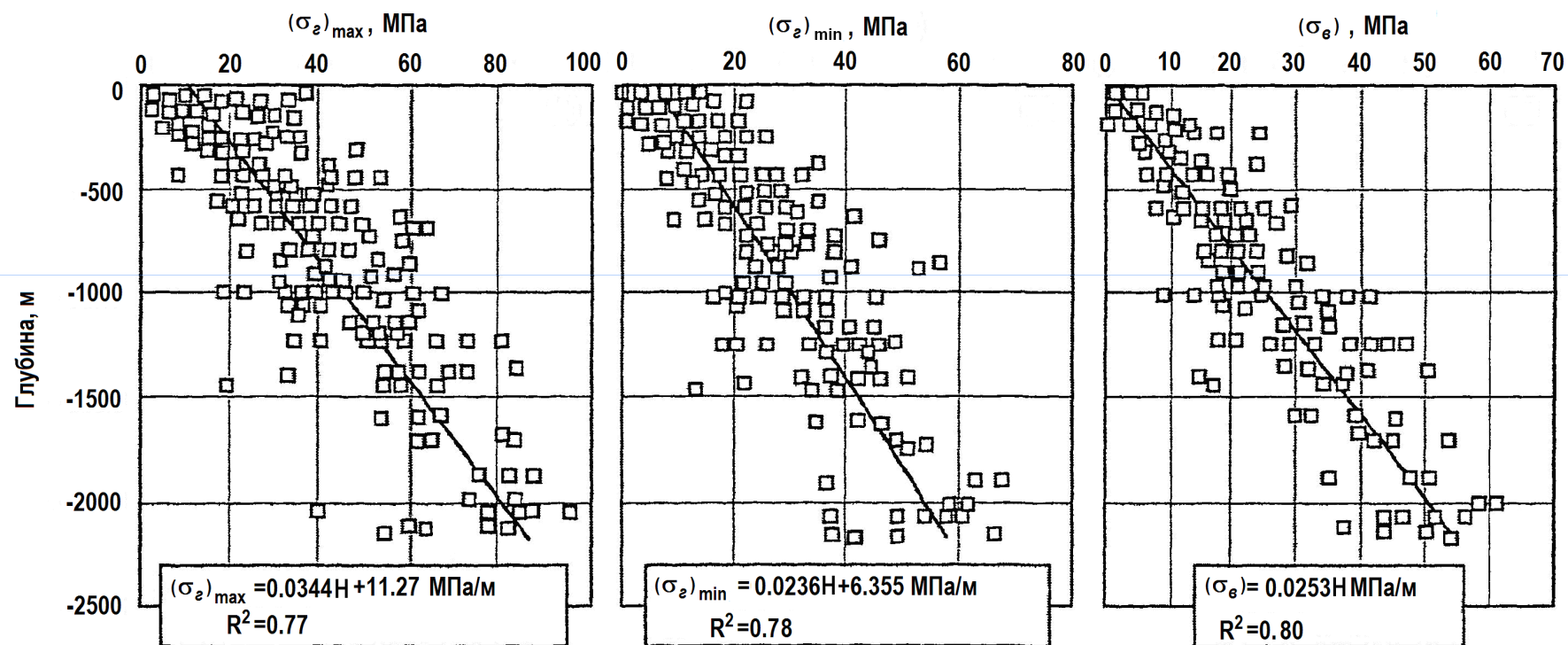


Австралия

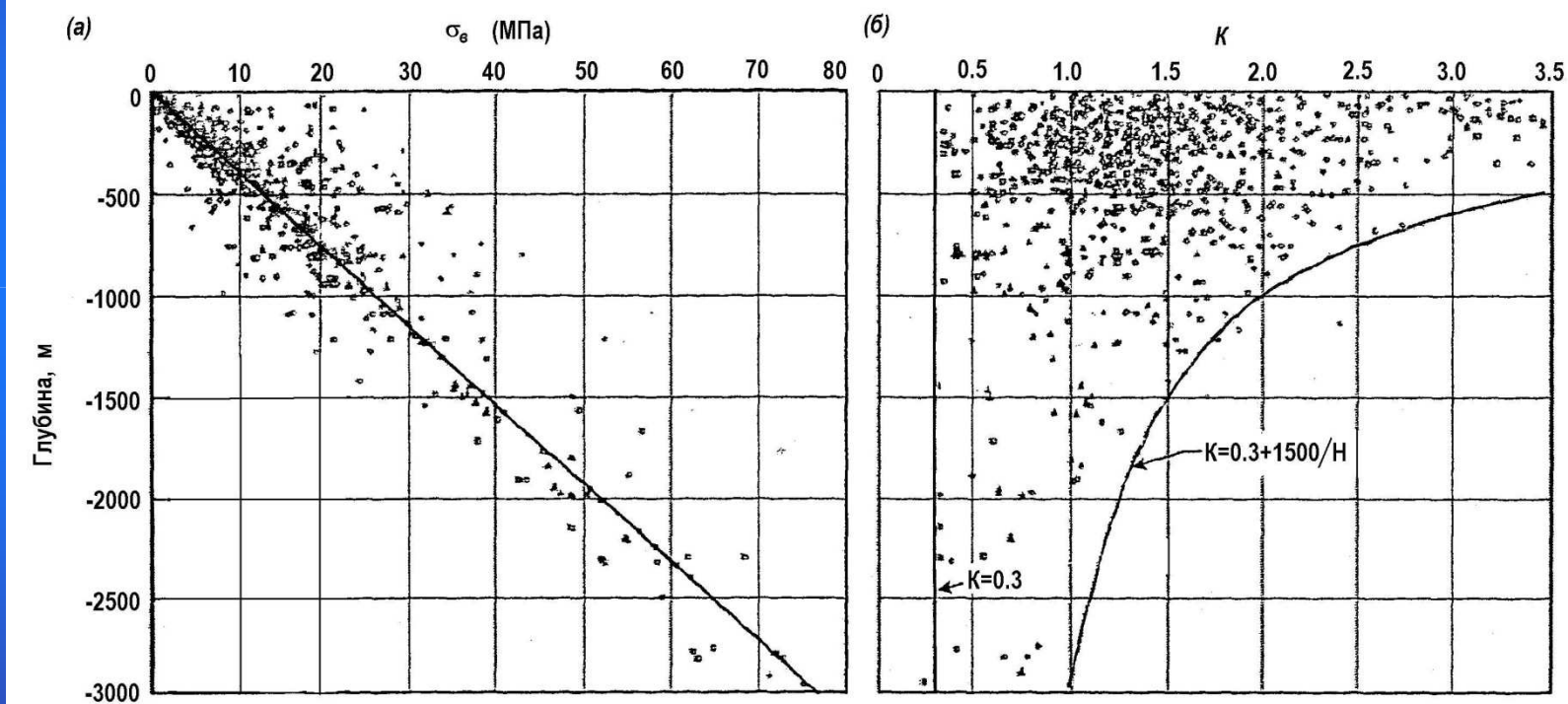


Изменение максимальных горизонтальных напряжений по данным зарубежных исследователей

[Арьянг, 2004, Канада].



Компиляция мировых измерений напряжений, показывающая (а) связь вертикальных напряжений с глубиной; (б) связь коэффициента « K » (средние горизонтальные/вертикальные) [Бреди, 2004].



$$\frac{\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin}}{2\sigma_v} = 0.3 + \frac{1500}{H}$$

Полученные зависимости горизонтальных напряжений с глубиной (H, м)

Для территории Северной Америки Б. Хаймсоном [Tectonic..., 1980] получена зависимость

$$\sigma_2 = 0.0196H + 5, \text{ МПа.}$$

Для территории Канадского щита Г. Хергетом [Hegert, 1974] приводится формула:

$$\sigma_2 = 0.04H + 8.139, \text{ МПа.}$$

Для территории Австралии Г. Воротницкий и Д. Денхам [Worotnicki, 1976] изменение горизонтальных напряжений с глубиной аппроксимируют уравнением

$$\sigma_2 = 0.0215H + 7.26, \text{ МПа.}$$

Для территории Скандинавии (Hast, 1974)

$$\sigma_{xmax} + \sigma_{xmin} = 0.098H + 18.0, \text{ МПа,}$$

Обобщенная формула [Brady, Brown, 2004]

$$\frac{\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin}}{2\sigma_v} = 0.3 + \frac{1500}{H}, \text{ где } \sigma_v = 0.027H$$

Расчётные значения максимальных напряжений σ_z по приведенным выше формулам

Глубина от поверхности, Н, м	Максимальные напряжения, $\sigma_{z \max}$ (МПа)						
	Н.Хаст*	Н. Булин	Г.Хергер	Б. Хаймсон	Б.Арьянг	Г.Воротницкий Д.Денхам	Б.Бради* Е.Браун
1000	71,0	37,1	48,0	25,0	45,0	29,0	58,0
500	41,0	22,0	28,0	15,0	28,0	18,0	47,0

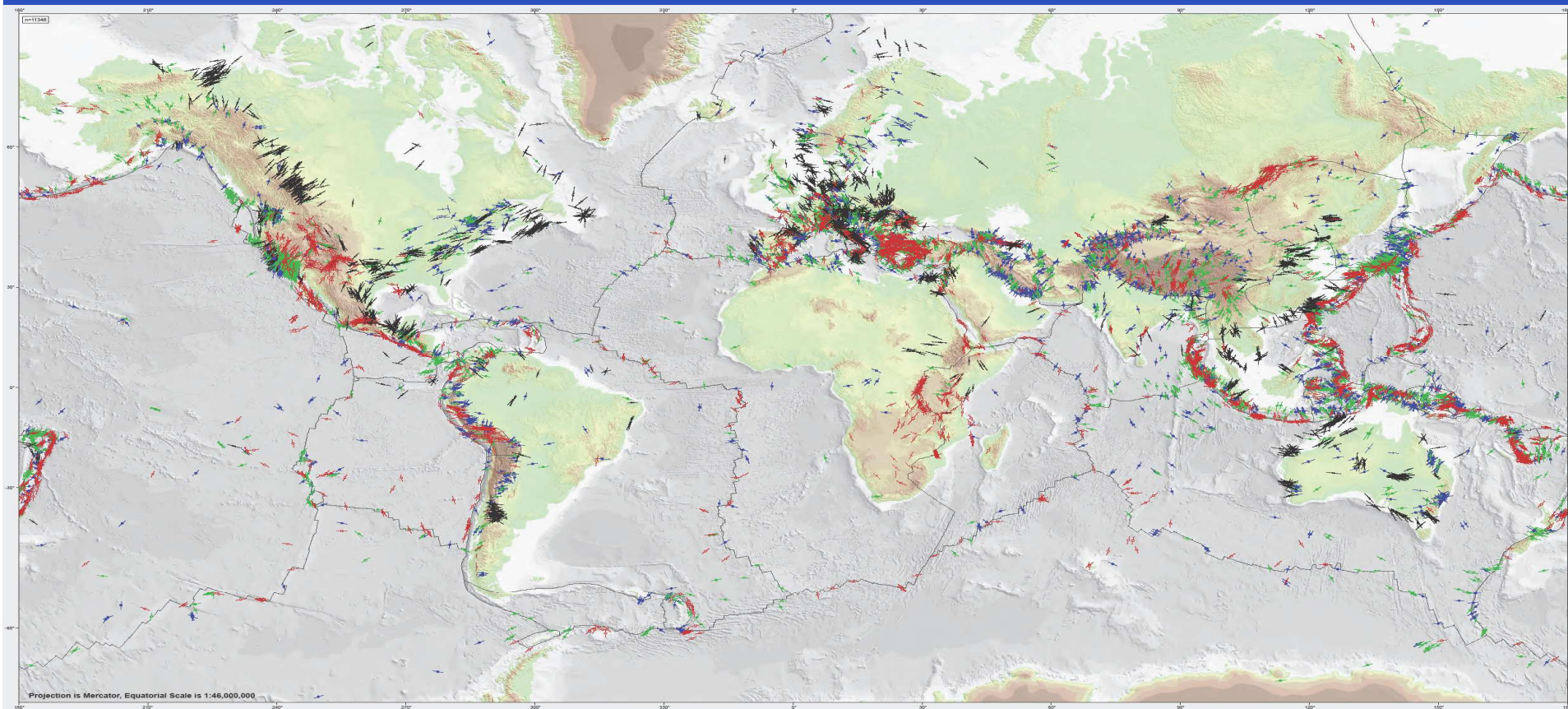
*Расчитано исходя из предпосылки, что отношение $\frac{\sigma_{z \min}}{\sigma_{z \max}} = 0,6$

Из вышеизложенного следует, что по приведенным формулам может быть получен очень широкий диапазон величин горизонтальных напряжений, в особенности для небольших глубин.

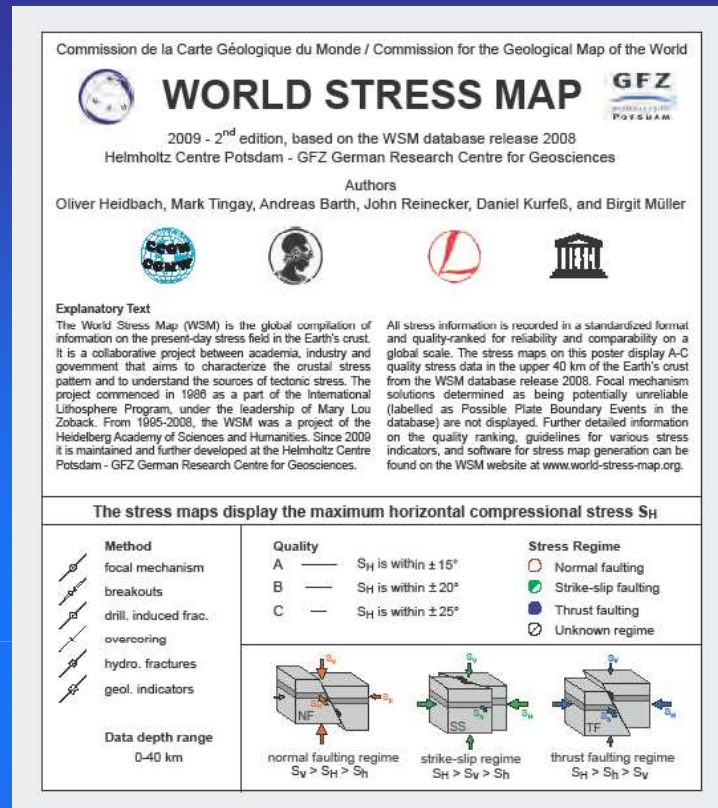
Поэтому к использованию установленных зависимостей необходимо подходить осторожно.

Таким образом, на многих месторождениях в различных районах бывшего СССР и за рубежом непосредственными измерениями установлено действие сложного гравитационно-тектонического поля напряжений. Условия и закономерности проявления тектонических напряжений весьма разнообразны.

WORLD STRESS MAP (МИРОВАЯ КАРТА НАПРЯЖЕНИЙ)



Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B., The World Stress Map based on the database release 2008, equatorial scale 1:46,000,000, Commission for the Geological Map of the World, Paris, doi:10.1594/GFZ.WSM.Map2009, 2009.



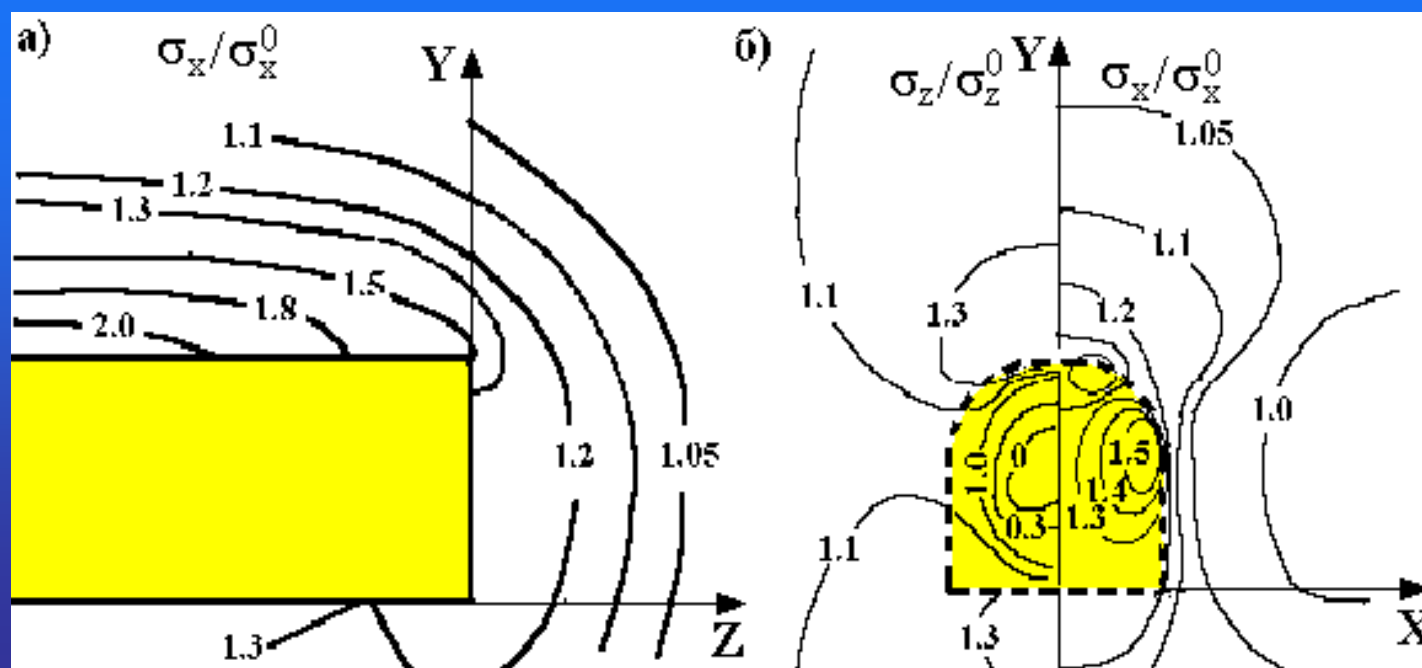
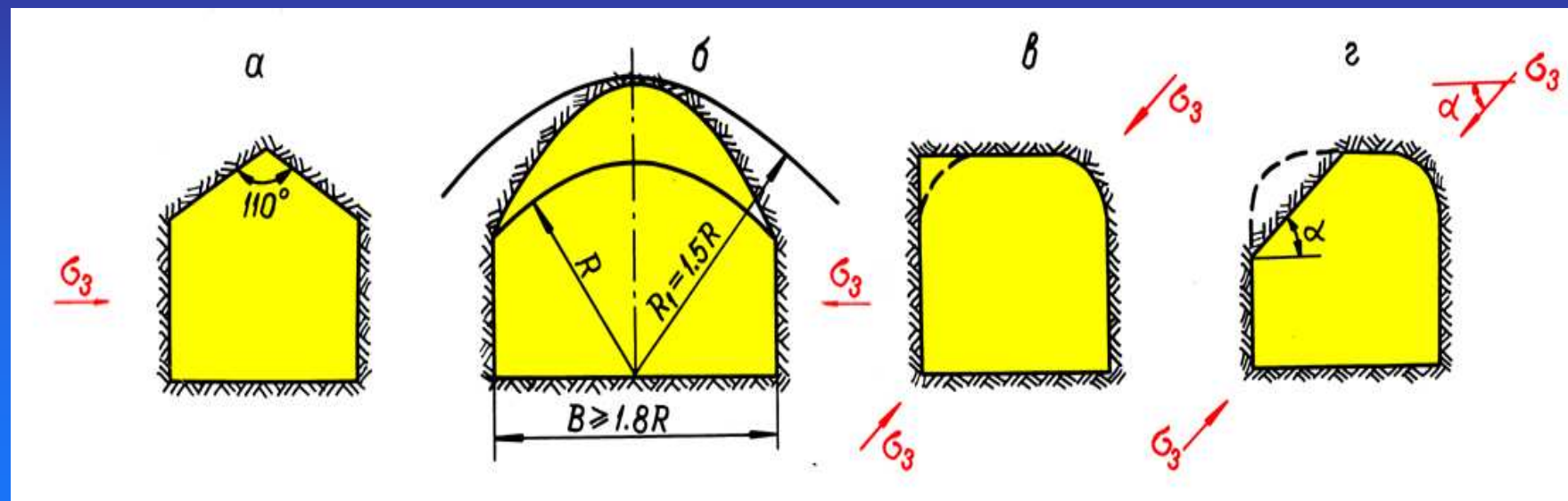
Анализ этой карты свидетельствует о том, что проявление тектонических напряжений приурочены в основном к границам взаимодействия литосферных плит, зонам субдукции и связаны напрямую с движением плит.

Обобщенные данные на основе анализа измеренных напряжений

1. Основная особенность установленных значений напряжений различными методами – это неопределенность ранга этих напряжений (глобальный, региональный, локальный). Факторы, определяющие ранг установленных напряжений не приведены.
2. Избыточные горизонтальные напряжения приурочены к зонам тектонических поднятий земной коры, чем выше скорость современных поднятий, тем выше уровень тектонических напряжений в верхней части земной коры. Поднятия могут быть связаны как с вертикальными, так и горизонтальными движениями участков земной коры.
3. Тектонические напряжения в нетронутым массиве горных пород на многих месторождениях достигают 50-60 МПа и более. При этом их величина превышает вертикальные в 3-5 раз, а вблизи поверхности и до 10 раз. Напряжения весьма неоднородны в пределах региона, месторождений и отдельных блоков и определяются тектонотипом месторождения, свойствами пород, блочностью и структурной нарушенностью массива, влиянием разломов, рельефа поверхности.
4. Максимальное сжатие в большинстве случаев ориентировано субгоризонтально в направлении вкрест простирания складчатых структур. При этом в зависимости от свойств вмещающих пород и рудного тела направление максимального сжатия может меняться на 90°.

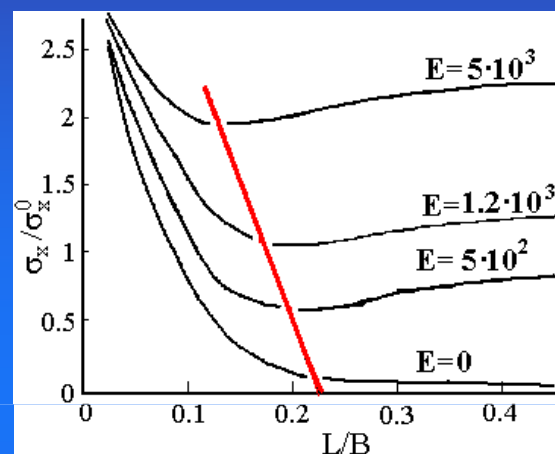
5. Для глубин до 700-800 м установлен в основном линейный характер изменения горизонтальных напряжений с увеличением глубины. На больших глубинах (1500-2000 м) отмечается тенденция выравнивания горизонтальных и вертикальных напряжений (гидростатическое состояния), что необходимо учитывать при проектировании ведения горных работ. При дальнейшем увеличении глубины до 3.0 – 4.0 км вертикальные напряжения могут снова превышать горизонтальные.
6. Тектонически напряженные массивы характеризуются повышенными значениями скорости современных поднятий геологических структур значительной сейсмической активностью, динамическими проявлениями в скважинах и горных выработках на малых глубинах.
7. Принципиально меняется понятие глубоких рудников, поскольку динамические проявления горного давления отмечаются уже на глубинах 200-300 м от поверхности. При этом необходимо защищать выработки не от вертикального давления, как это делается традиционно наработкой месторождения, а от горизонтального сжатия, формируя вертикальные щели либо полости в определенном направлении. Разработан целый комплекс мер по защите отдельных выработок или конструктивных элементов систем разработок от действия избыточных тектонических напряжений. Это направление и форма поперечного сечения выработок, направление фронта развития горных работ, разгрузка массива бурением строчки сближенных скважин, крепление выработок и т.д.

Выбор рациональной формы поперечного сечения выработок



Приведение выработок в неудароопасное состояние

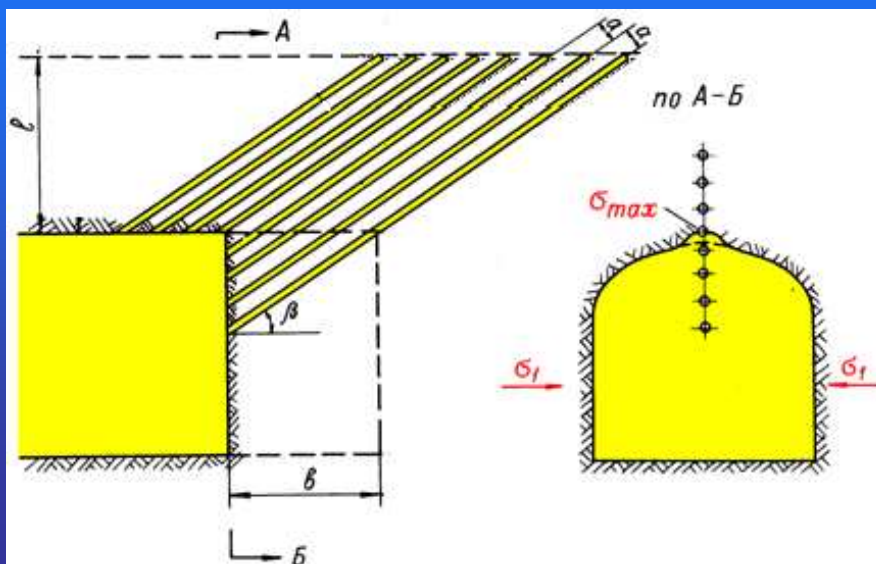
Определение рациональной глубины разгрузочной щели в зависимости от модуля упругости материала ее заполнения



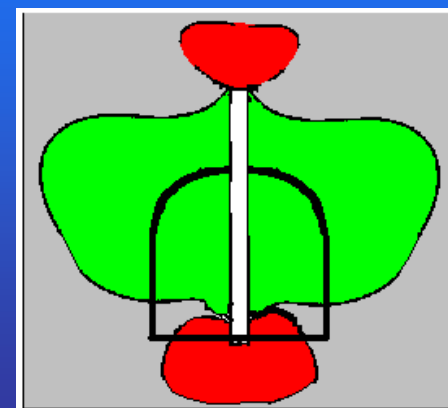
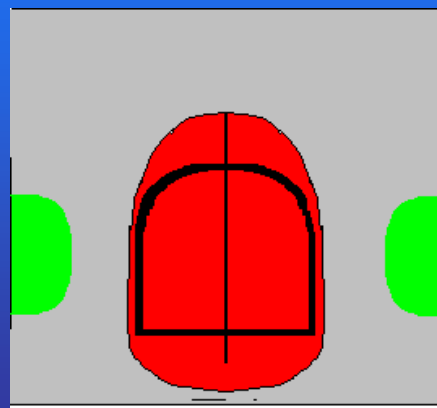
Бурение разгрузочной щели станком «Миниматик»



Паспорт БВР

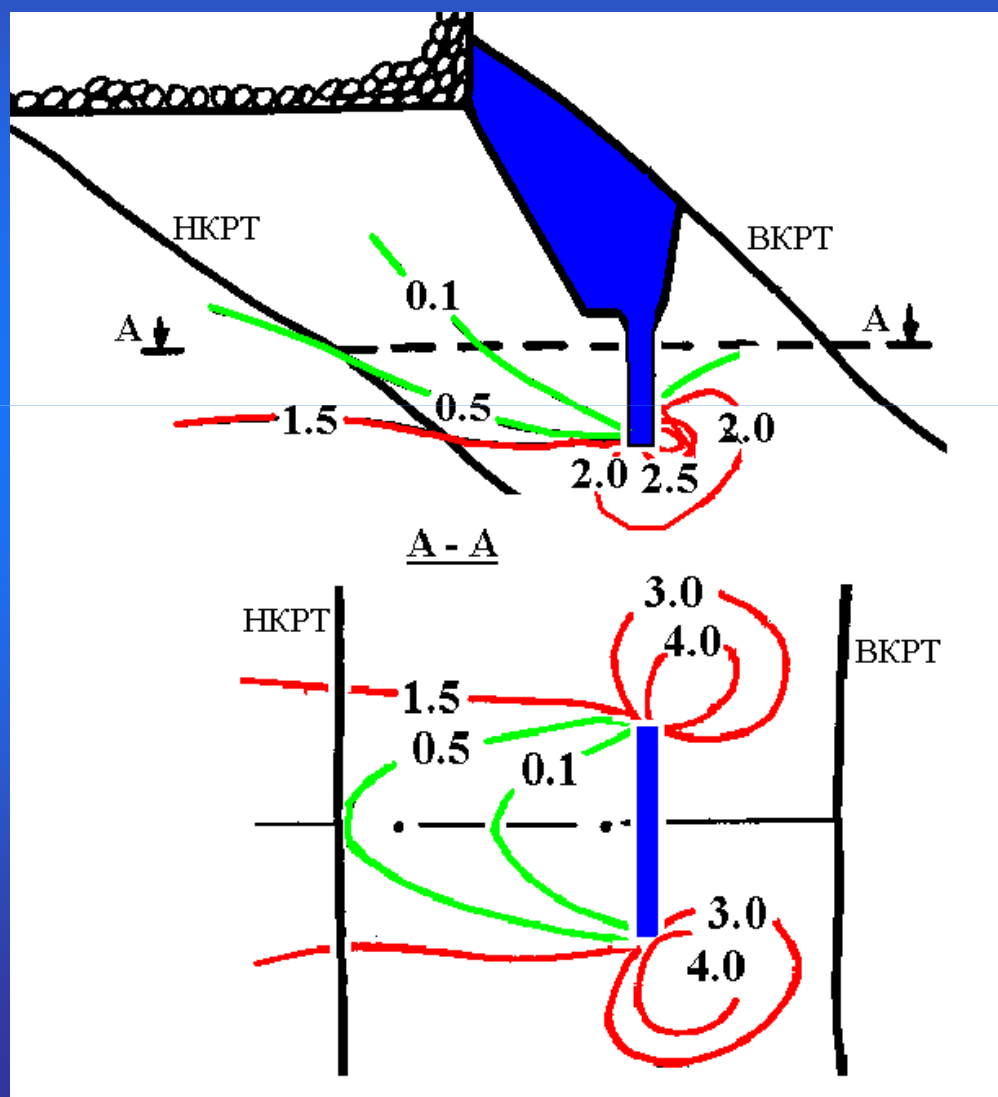


Эффект применения разгрузочных щелей



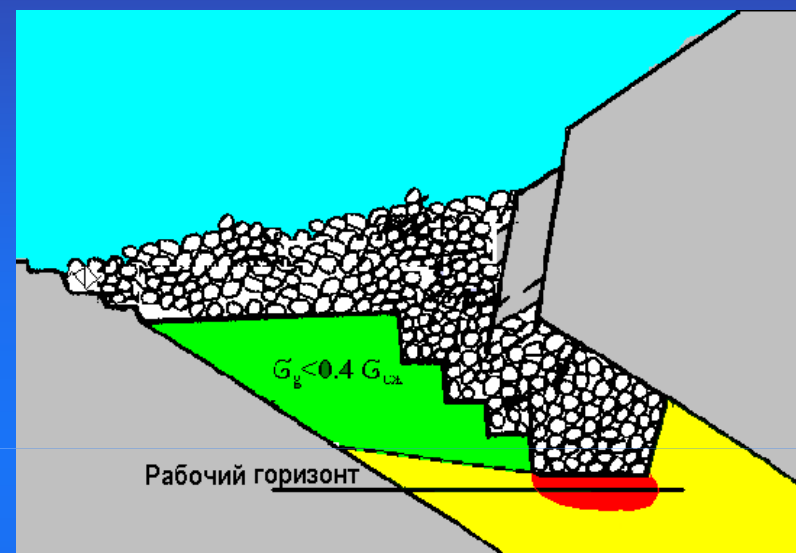
Принципы создания защитных зон при очистной выемке

Перераспределение напряжений при заглублении защитной щели ниже обрабатываемого горизонта



Напряжения на горизонте откатки:

без защитной зоны



с защитной зоной

