

*Albert V. Zubkov,
ScD, professor, Chief Researcher*

*Sergey V. Sentyabov,
Junior Researcher
Mining Institute, Ural Branch of Russian Academy of Sciences*

Forecast Stability of Mining Excavation and HPS's Dams After 2020 [Albert V. Zubkov, Sergey V. Sentyabov]

Key words: Stresses of the rock mass of the countries of the world, 4th hypothesis their formation and changes over time, Forecast stresses in rock structures.

Annotation: As a result of research for the first was proposed new structure of the stress field in the Earth's crust that occurs in cyclic expansion and contraction of the Earth, including gravity-tectonic stress and astrophysical chronological bound and was given forecast of stresses in mine excavation in the mines of the world up to 2020 and 2030.

Устойчивость конструкций, возведенных в массиве горных пород, зависит от напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочностных характеристик материала конструкции. К таким конструкциям относятся горные выработки, конструктивные элементы систем разработки при добыче полезных ископаемых (целики, стенки и кровля камер, выработанное пространство), а также элементы высоконапорных ГЭС, возведенных в глубоких каньонах.

Физико-механические свойства горных пород обычно определяют при проведении геологоразведочных работ или в лабораториях исследовательских организаций при испытании на разрушение образцов горных пород.

Обычно для перехода от прочности горной породы в образце к ее прочности в массиве используют коэффициент структурного ослабления, который зависит от размеров структурных блоков, заполнителя трещин и т.п. [1]

$$[\sigma]_M = [\sigma] \cdot K_{co}. \quad (1)$$

Для определения коэффициента структурного ослабления была принята зависимость, полученная Кимом [3].

$$K_{co} = \frac{1}{0,53(l/l_{co}+1,75)} + 0,315, \quad (2)$$

где: l – линейный размер оцениваемого на прочность участка массива, м;

l_{co} – линейный размер структурного блока, м.

Эта зависимость оправдала себя за тридцатилетний срок прогнозирования устойчивости конструктивных элементов систем разработки, сложенных крепкими магматическими и метаморфическими породами. С одной стороны, в десятках случаев подтвердилось прогнозируемое самообрушение горных конструкций при достижении ими расчетных параметров, а с другой стороны, при коэффициенте запаса прочности 1,3 была обеспечена устойчивость сотен конструктивных элементов систем разработки. Формулы 1 и

2 справедливы при действии сжимающих напряжений. При действии растягивающих напряжений K_{co} можно определить лишь опытным путем для каждого типа пород при действии сжимающих напряжений в зоне обнажения горных конструкций, откуда прежде всего и начинаются все разрушения.

При расчете напряженного состояния горных конструкций на ранних стадиях становления геомеханики в качестве граничных условий использовали природные напряжения в соответствии с гипотезами А.Гейма (1878 г.), А.Н.Динника (1951 г.) и Н.Хаста (1960 г.) (табл.1.1). В 2013 г. лабораторий геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН была выдвинута новая гипотеза. В соответствии с этой гипотезой напряженное состояние массива горных пород изменяется во времени, а не является постоянным, полученным в момент измерения.

Таблица 1- Гипотезы формирования природных напряжений в массиве горных пород

А.Гейм, 1878г	$\sigma_X^{\Pi} = \sigma_Y^{\Pi} = \sigma_Z^{\Pi} = -\gamma H$
А.Н.Динник, 1951г	$\sigma_Z^{\Pi} = -\gamma H$ $\sigma_X^{\Pi} = \sigma_Y^{\Pi} = -\lambda\gamma H$
N.Hast, 1960г	$\sigma_Z^{\Pi} = -\gamma H$ $\sigma_X^{\Pi} = -\lambda\gamma H + T_1$ $\sigma_Y^{\Pi} = -\lambda\gamma H + T_2$
А.В.Зубков и К^о, 2000г	$\sigma_Z^{\Pi} = -\gamma H + \sigma_{zm} + \sigma_{A\Phi}$ $\sigma_X^{\Pi} = -\lambda\gamma H + \sigma_{xm} + \sigma_{A\Phi}$ $\sigma_Y^{\Pi} = -\lambda\gamma H + \sigma_{ym} + \sigma_{A\Phi}$ где $\sigma_{xm} + \sigma_{A\Phi} = T_1$ $\sigma_{ym} + \sigma_{A\Phi} = T_2$ $\sigma_{A\Phi} = \sum_{i=K21}^{K12} \sigma_{i(t)}$

где $\sigma_X^{\Pi}, \sigma_Y^{\Pi}, \sigma_Z^{\Pi}$ - составляющие главных напряжений, МПа;

γ - удельный вес пород, Н/м³ ;

H - мощность налегающих горных пород, м;

λ - коэффициент бокового распора (определяемый коэф. Пуассона);

T_1, T_2 - главные статические составляющие тектонических сил, МПа;

$\sigma_{zm}, \sigma_{xm}, \sigma_{ym}$ - главные статические составляющие постоянных тектонических сил, неизменных в течение десятков лет, МПа;

$\sigma_{\text{АФ}}, \varepsilon_{\text{АФ}}$ - временной ход астрофизических напряжений (МПа) и относительных деформаций;

$\sigma_{\text{АФ}(t)}$ – временной показатель пульсации астрофизических напряжений;

$\sum_{21}^{12} \sigma_i(t)$ - суммарный вклад величин изменения НДС различных геологических циклов.

С 1998 г. по 2013 г. лабораторией было отслежено изменение $\sigma_{\text{АФ}}$ на рудниках Урала в 11-и летнем цикле (рис.1) и зафиксировано при специальной обработке результатов измерения напряжений на Урале и Алтае, где они ранее фигурировали как тектонические пульсирующие напряжения $\Delta\sigma_{\text{тп}}$ [2].

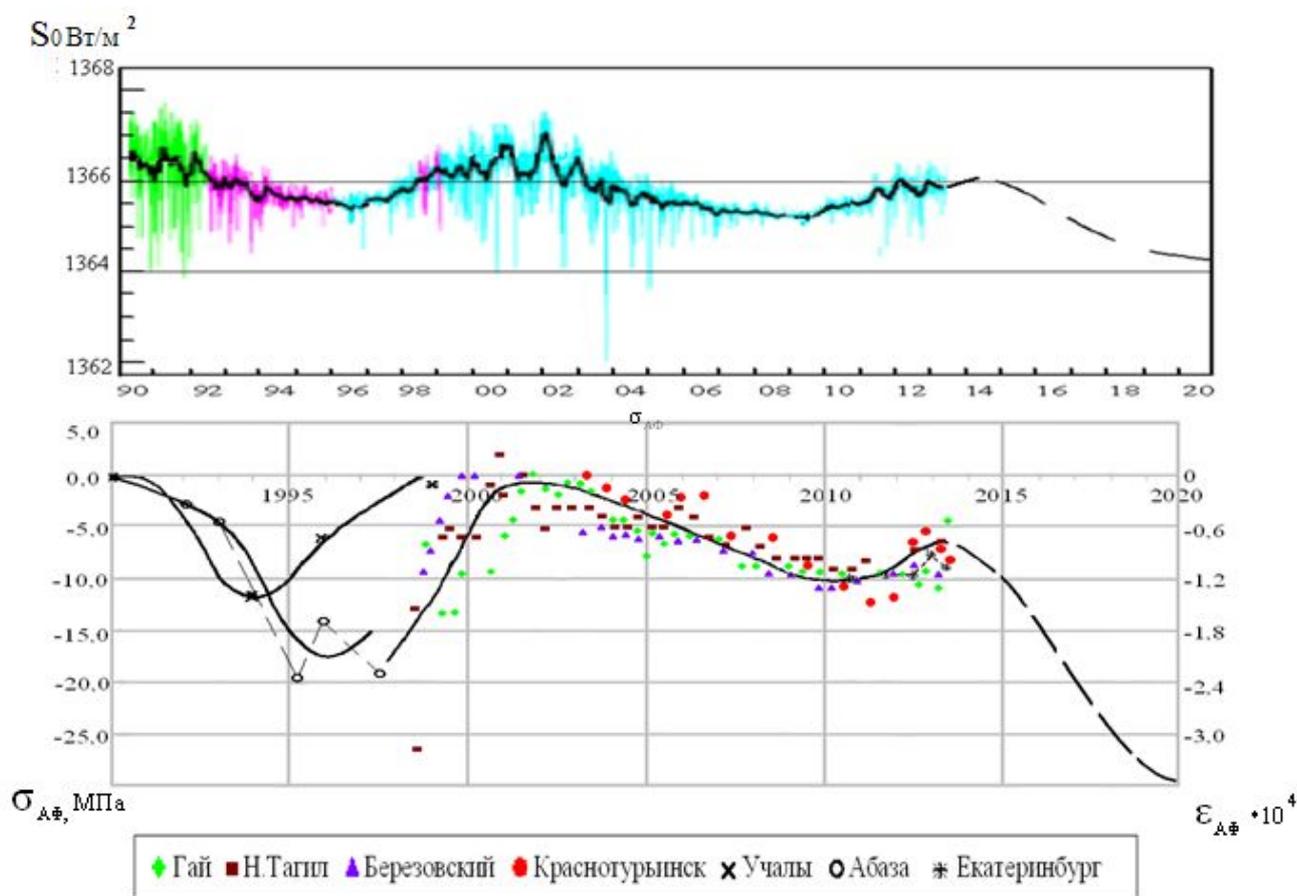


Рисунок 1- Изменение НДС массива на рудниках в городах Урала и Алтая на фоне изменения излучения Солнца

На рисунке 1 показана связь солнечной активности СА с астрофизическими напряжениями $\sigma_{\text{АФ}}$ в массиве горных пород. Обращено внимание на солнечную активность СА, которая описывается двумя характеристиками: пятнообразованием, оцениваемым числом Вольфа и солнечной постоянной, оцениваемой излучением солнечной энергии S_0 Вт/м², и связанной с радиусом солнца R_0 . Радиус Солнца измеряется инструментально со спутников с 1978года, а с 2013 года сделан прогноз. Полученные измерения $\sigma_{\text{АФ}}$ хорошо вписываются в график S_0 . Максимум S_0 соответствует минимуму $\sigma_{\text{АФ}}$, а минимум S_0 приходится на максимальное сжатие Земной коры.

Закономерности формирования природных напряжений в различных регионах мира представлены в виде графиков на рис.2-9.

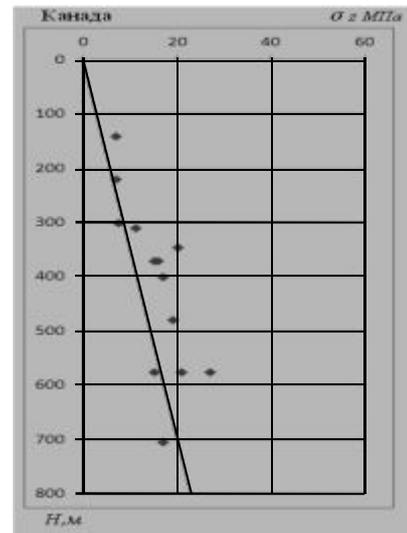
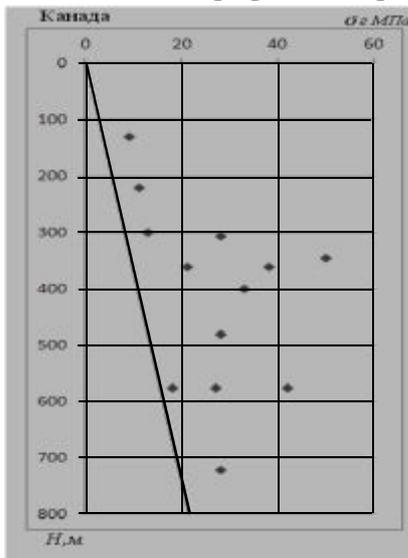


Рисунок 2

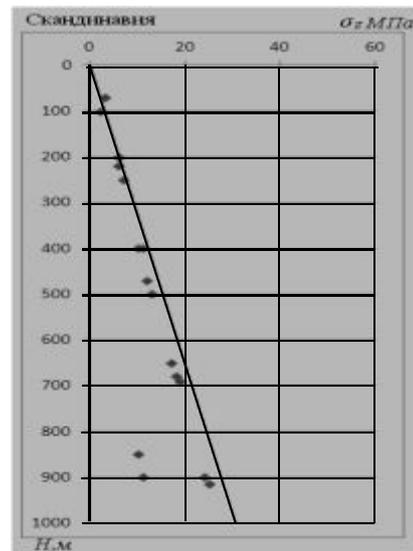
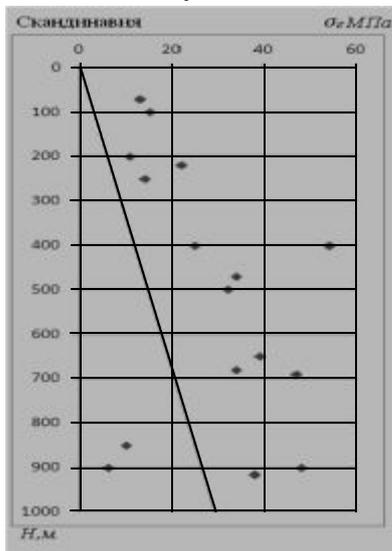


Рисунок 3

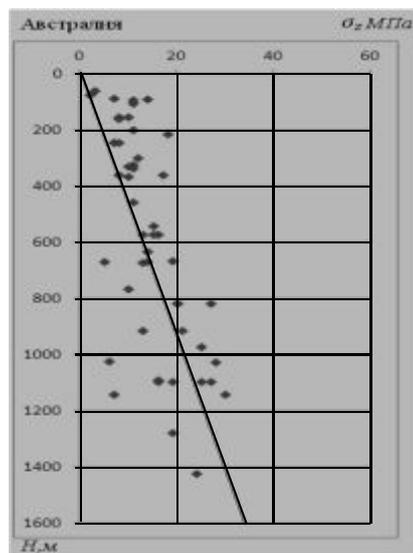
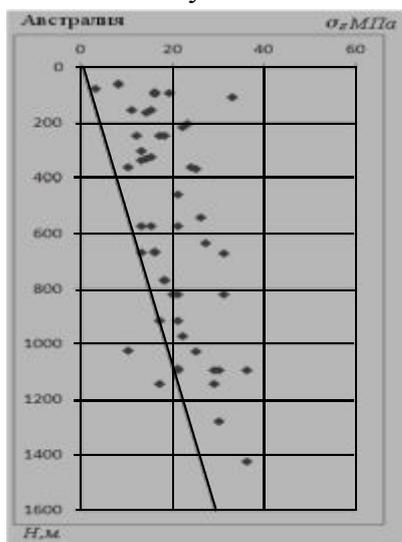


Рисунок 4

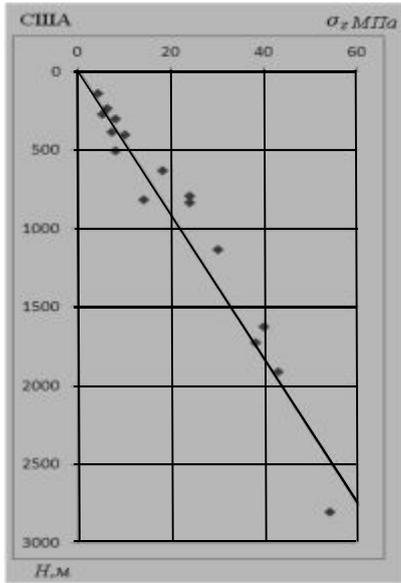


Рисунок 5

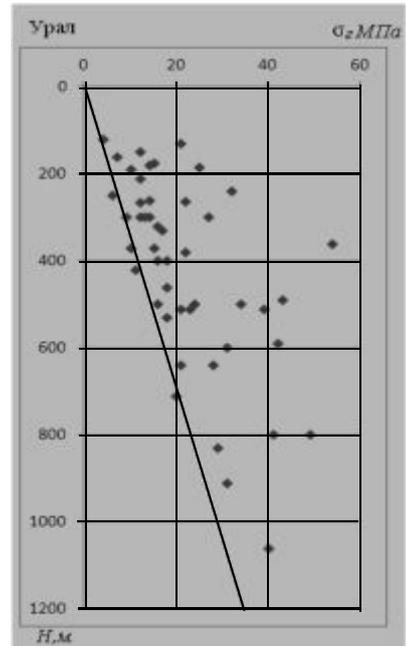


Рисунок 7

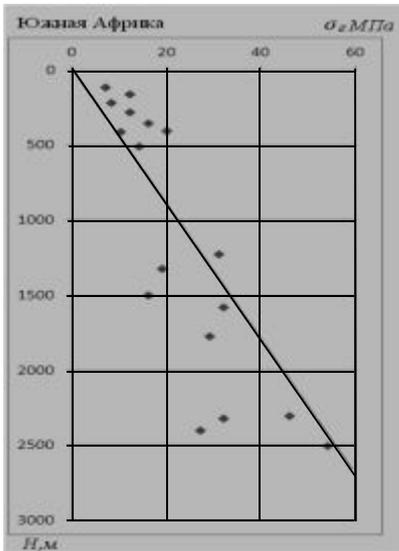
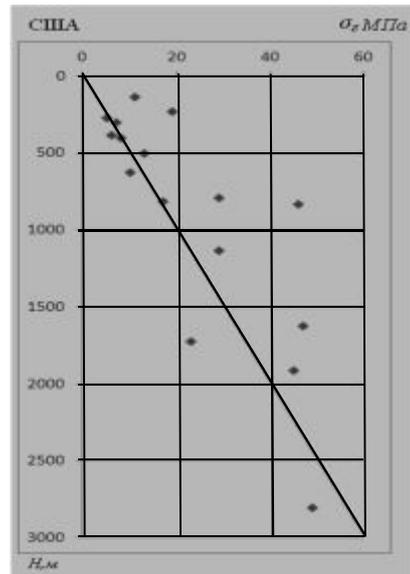
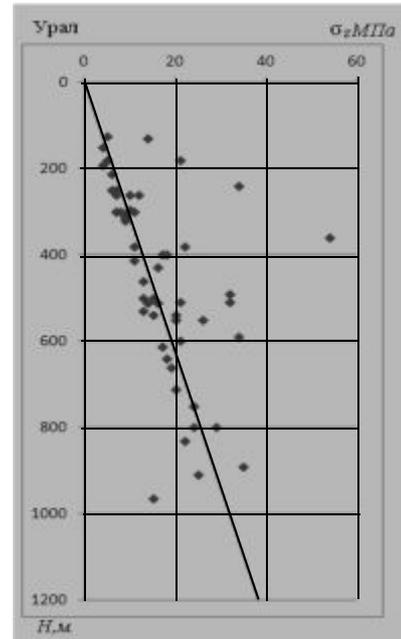
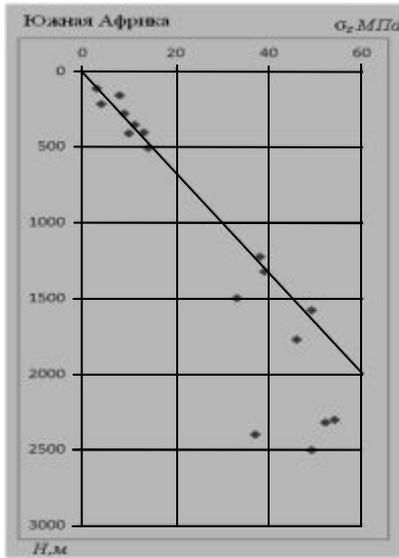


Рисунок 6





Китай

σv, МПа

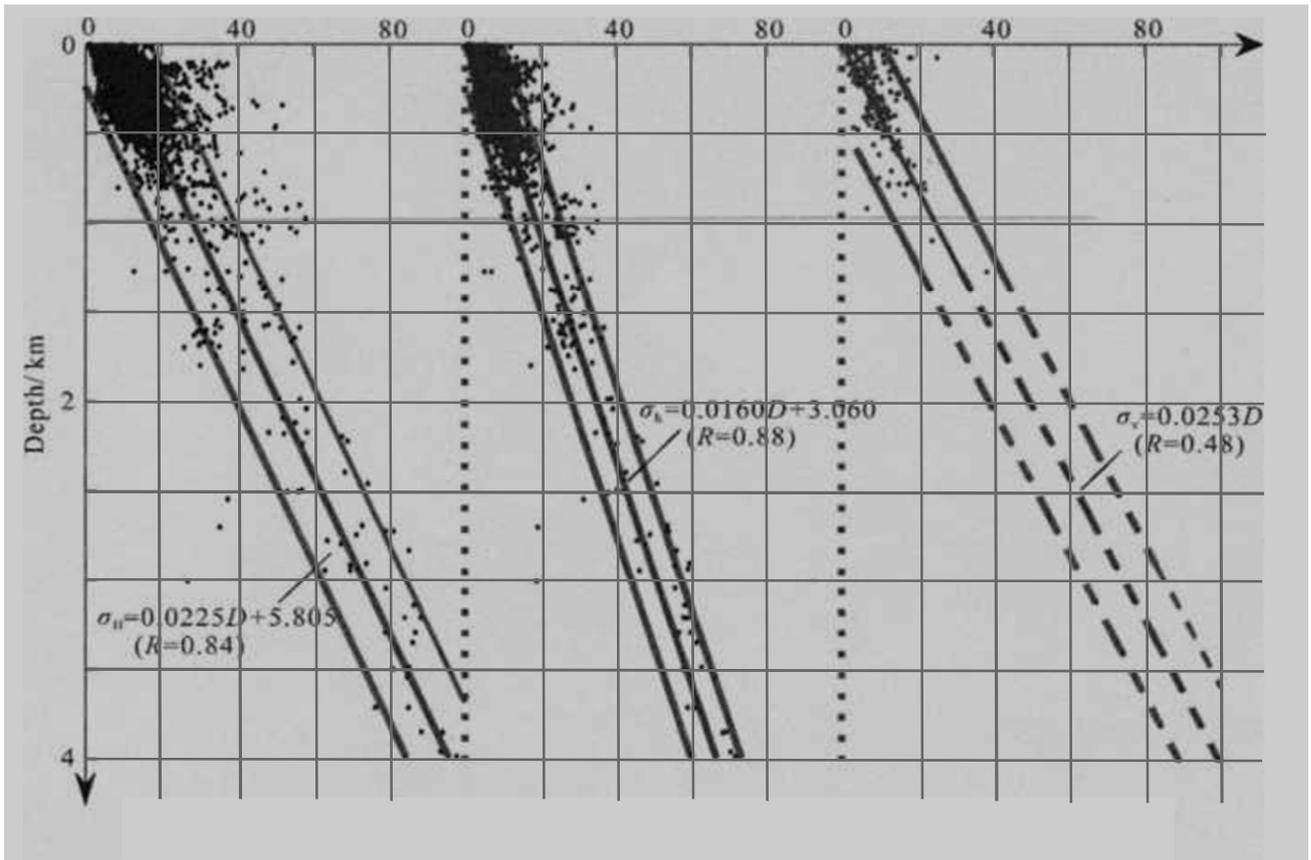


Рисунок 8 - Изменение измеренных напряжений с глубиной

Япония

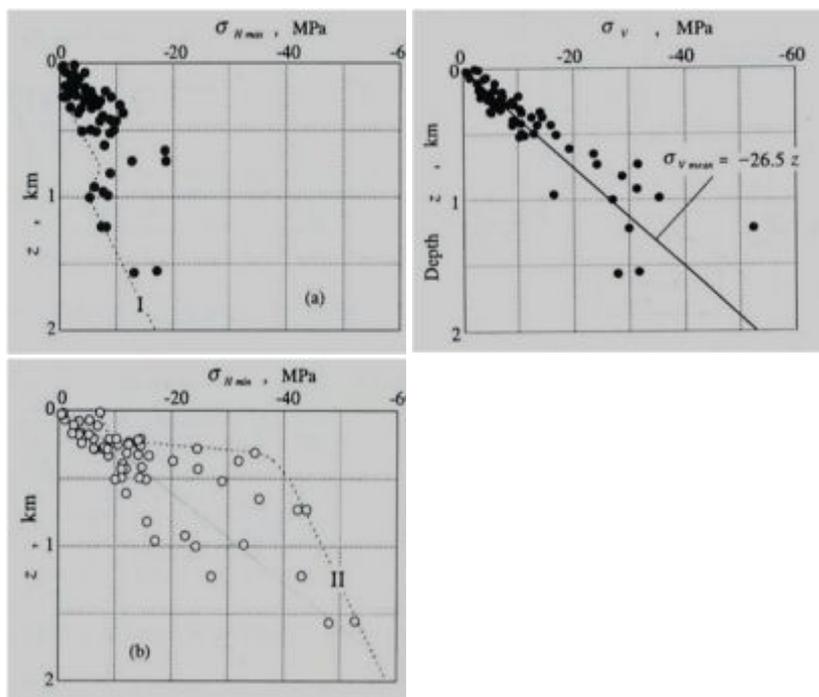


Рисунок 9 - Изменение измеренных напряжений с глубиной

Необходимо иметь в виду, что на графиках приведены результаты с учетом присутствия $\sigma_{A\Phi}$, средняя величина которых до 2000 года не превышала 4 МПа.

$$\sigma_z^H = -\gamma H + \sigma_{Zm} + \sigma_{A\Phi}, \quad (3)$$

$$\sigma_r^H = (\sigma_x^H + \sigma_y^H) / 2 = -\lambda \gamma H + \sigma_{A\Phi} + (\sigma_{xm} + \sigma_{ym}) / 2.$$

В общем виде приведенные результаты измерения напряжений можно представить зависимостями:

1. Урал [1] $\sigma_z^H = -0,03H$; $\sigma_r^H = -(16 + 0,03H)$
2. Скандинавия [4] $\sigma_z^H = -0,027H$; $\sigma_r^H = -(17,3 + 0,03H)$
3. Канада [4] $\sigma_z^H = -0,025H$; $\sigma_r^H = -(12 + 0,04H)$
4. США [4] $\sigma_z^H = -(0 + 0,0027H)$; $\sigma_r^H = -(5,0 + 0,0225H)$
5. Южная Африка [4] $\sigma_z^H = -0,027H$; $\sigma_r^H = -(7 + 0,012H)$
6. Китай [5] $\sigma_z^H = -0,0253H$; $\sigma_{r_{\min}}^H = -(5,8 + 0,0225H)$
 $\sigma_{r_{\max}}^H = -(3,1 + 0,016H)$
7. Австралия [4] $\sigma_z^H = -0,02H$; $\sigma_r^H = -(17 + 0,009H)$
8. Япония [6] $\sigma_z^H = -0,0265H$; $\sigma_r^H = \frac{\sigma_{r_{\min}}^H + \sigma_{r_{\max}}^H}{2} = -0,02H$

В результате действия этих напряжений в конструктивных элементах систем разработки и горных выработках формируются техногенные напряжения.

К конструктивным элементам систем разработки при отработке крутопадающих рудных месторождений на большой глубине, т.е. глубже 500 м, по которым оценивается эффективность и безопасность горных работ, следует отнести:

- кровлю и стенки камер;
- целики;
- призабойный рудный и породный массивы;
- днища выемочных элементов;
- подготовительно-нарезные выработки.

Отдельно следует рассмотреть капитальные горные выработки, находящиеся за пределами зоны влияния горных работ: стволы, квершлаг и штреки.

В приконтурной части капитальных горных выработок происходит концентрация природных напряжений в соответствии с зависимостями

- в стволах

$$\sigma_{\theta \max} = K_{\max} \sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} - K_{\min} \sigma_{\Gamma \min}^{\Pi}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} = \sigma_3^{\Pi}; \quad \sigma_{\Gamma \min}^{\Pi} = \sigma_i^{\Pi}$

- в горизонтальных выработках,

$$\sigma_{\theta \max} = K_{\max} \sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} + K_{\min} \sigma_Z^{\Pi}, \quad (5)$$

В приконтурном слое пород, толщиной 0,1 радиуса выработки коэффициенты концентрации напряжений $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi}$ изменится от 3 до 2,4, т.к. в среднем $K_{\max}=2,7$, а K_{\min} изменяется от -1,8 до -0,6 и в среднем $K_{\min}=-0,8$.

По заведенной традиции результаты измерения напряжений на рудниках мира в большинстве случаев представлены σ_z - вертикальные; $\sigma_{\Gamma \text{ ср}}$ - средние горизонтальные.

Анализ большого числа результатов измерения напряжений на месторождениях мира показывает, что отношение $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} : \sigma_{\Gamma \min}^{\Pi}$ и $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} : \sigma_Z^{\Pi}$; изменяется от 1 до 1,5÷2,0 и более. На Урале это отношение в среднем равно 1,35.

При $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} = \sigma_{\Gamma \min}^{\Pi} = 1$ средние напряжения $\sigma_{\text{ср}}=1$, т.е. $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} = \sigma_{\text{ср}}$

При $\sigma_{\Gamma \min}^{\Pi} = 0,5 \sigma_{\Gamma \max}^{\Pi}$ и $\sigma_{\max}=1$; $\sigma_{\text{ср}}=0,75 \sigma_{\Gamma \max}^{\Pi}$, т.е. $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} = 1,33 \sigma_{\text{ср}}$

В целом по мировым данным можно принять, что $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi}$ превышают $\sigma_{\text{ср}}$ в 1,0÷1,33 раза, т.е. в среднем более чем в 1,17 раза.

В приконтурной части выработки в одном случае при $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} = \sigma_{\Gamma \min}^{\Pi} = \sigma_{\text{ср}}$

$\sigma_{\theta \max} = \sigma_{\text{ср}} * 2,7 + (-0,8) \sigma_{\text{ср}} = 1,9 \sigma_{\Gamma \max}^{\Pi}$, а в другом случае при $\sigma_{\Gamma \max}^{\Pi} = 1,17 \sigma_{\text{ср}}$ и

$$\sigma_{\Gamma \min}^{\Pi} = 0,86 \sigma_{\text{ср}}$$

$\sigma_{\theta \max} = 2,7 * 1,17 \sigma_{\text{ср}} + (-0,8) * 0,86 \sigma_{\text{ср}} = 2,47 \sigma_{\text{ср}}$ или равно $2,1 \sigma_{\Gamma \max}^{\Pi}$

В конструктивных элементах систем разработки концентрация природных напряжений в том участке массива горных пород, где располагаются подготовительно-нарезные выработки, может достигать 2-4, т.е. в среднем 3,0. С учетом этого обстоятельства в приконтурной части подготовительно-нарезных выработок напряжения могут достигать

$$\sigma_{\theta \max} = \sigma_{\text{ср}} \cdot 2,1 \cdot 3,0 = 6,3 \cdot \sigma_{\text{ср}}.$$

Величины напряжений в приконтурной части капитальных и подготовительно-нарезных выработок, без которых невозможна добыча полезного ископаемого подземным способом, приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2 - Величины напряжений в приконтурной части капитальных и подготовительно-нарезных выработок на глубине 500м

п/п	Регион	Напряжения в массиве, МПа				Напряжения в конструкциях, МПа	
		$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_3^II + \sigma_1^II}{2};$	σ_{cp} при H=500м	$\sigma_3^II = \sigma_{cp} \cdot 1,17$	$\sigma = \sigma_3^II + \sigma_{АФ};$ при $\sigma_{АФ} = 0;$ $\sigma_{АФ} = -20;$ $\sigma_{АФ} = -40;$	$\sigma_\theta = \sigma \cdot 2,1;$ В конструктивных элементах системы разработки, в капитальных выработках	$\sigma_\theta = \sigma \cdot 6,3;$ В подготовительно- нарезных выработках
	Урал	-(16,0+0,03Н)	-31	-36	-36/-56/-76	-76/-118/-160	-227/-353/-479
	Скандинавия	-(17,3+0,3Н)	-32	-37	-37/-57/-77	-78/-120/-162	-233/-359/-485
	Канада	-(12,0+0,04Н)	-32	-37	-37/-57/-77	-78/-120/-162	-233/-359/-485
	США	-(5,0+0,0225Н)	-16	-19	-19/-39/-59	-40/-82/-105	-120/-246/-315
	Южная Африка	-(7,0+0,012Н)	-13	-15	-15/-35/-55	-32/-74/-116	-95/-220/-347
	Китай	-(4,4+0,019Н)	-14	-16	-16/-36/-56	-34/-76/-118	-101/-227/-353
	Австралия	-(17,0+0,009Н)	-22	-26	-26/-46/-66	-55/-97/-139	-164/-290/-416
	Япония	-0,02Н	-10	-12	-12/-32/-52	-25/-67/-109	-76/-202/-328
	Япония*	-(20,0+0,026Н)	-33	-38	-38/-58/-78	-80/-122/-164	-239/-365/-491

Таблица 3 - Величины напряжений в приконтурной части капитальных и подготовительно-нарезных выработок на глубине 1000м

п/п	Регион	Напряжения в массиве, МПа				Напряжения в конструкциях, МПа	
		$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_3^II + \sigma_1^II}{2};$	σ_{cp} при H=1000м	$\sigma_3^II = \sigma_{cp} \cdot 1,17$	$\sigma = \sigma_3^II + \sigma_{AF};$ при $\sigma_{AF} = 0;$ $\sigma_{AF} = -20;$ $\sigma_{AF} = -40;$	$\sigma_\theta = \sigma \cdot 2,1;$ В конструктивных элементах системы разработки, в капитальных выработках	$\sigma_\theta = \sigma \cdot 6,3;$ В подготовительно- нарезных выработках
	Урал	-(16,0+0,03H)	-46	-54	-54/-74/-94	-113/-155/-197	-340/-466/-592
	Скандинавия	-(17,3+0,3H)	-47	-55	-55/-75/-95	-115/-157/-199	-346/-472/-598
	Канада	-(12,0+0,04H)	-52	-61	-61/-81/-101	-128/-170/-212	-384/-510/-636
	США	-(5,0+0,0225H)	-28	-33	-35/-55/-75	-69/-111/-153	-207/-334/-460
	Южная Африка	-(7,0+0,012H)	-19	-22	-22/-42/-62	-46/-88/-130	-139/-265/-391
	Китай	-(4,4+0,019H)	-23	-27	-27/-47/-67	-56/-98/-140	-170/-296/-422
	Австралия	-(17,0+0,009H)	-25	-29	-29/-49/-69	-70/-118/-166	-209/-353/-497
	Япония	-0,02H	-20	-23	-23/-43/-63	-48/-90/-132	-145/-270/-397
	Япония*	-(20,0+0,026H)	-46	-54	-54/-74/-94	-113/-155/-197	-340/-466/-592

Примечание: * приведено напряженное состояние на территории с максимальным сжатием.

В таблицах 2 и 3 приведены средние напряжения в приконтурной части выработок и с учетом того, что прочность крепких горных пород находится в пределах 100-300 МПа, в 2020-2030 гг. доступ к полезным ископаемым на глубинах более 500 м и, тем более 1000 м, будет чрезвычайно затруднен, а в ряде случаев невозможен при существующих технологиях и способах ведения горных работ, особенно в России, Канаде и Скандинавии.

В то же время, судя по значительному разбросу измеренных напряжений на месторождениях мира, напрашивается вывод о том, что аргументированно об эффективности и безопасности ведения горных работ и обосновании технологии на каждом месторождении можно будет сделать только после измерений напряжений именно на этом месторождении и определении тренда изменения $\sigma_{ДФ}$ на ближайшие 10-20 лет.

Подобная сложная геомеханическая обстановка могла быть 400 лет назад, но в то время не было глубоких шахт, карьеров и плотин высоконапорных ГЭС. Судя по изменению солнечной активности в 17 веке должно было наблюдаться максимальное сжатие Земли в 400-летнем цикле (рис.2). К началу 19 века было максимальное сжатие Земли в 200-летнем цикле, но в 400-летнем этот период соответствовал минимальному сжатию, что нивелировало общее сжатие Земли. Начало 20 века соответствовало максимальному сжатию в 90-летнем цикле, но оно нивелировалось уменьшением сжатия в 400 и 200-летних циклах. Поэтому на этом фоне инструментально зафиксированы изменения НДС Земной коры в 11-летних циклах во второй половине 20 века соответствовали средним показателям, но даже в этих условиях в экстремумах 11-и летних циклов происходили катастрофические разрушения горных конструкций и элементов ГЭС (табл.4).

Таблица 4 - Аварии на ГЭС, рудниках и шахтах

Объект	Высота плотины, м	Начало строительства (пуск), год	Авария, год	$\sigma_{тп}$	Примечание
ГЭС в каньонах					
Сэнт-Френсис (Калифорния)	60	1924	1928	min	Обломило береговые секции в результате расширения каньона и ослабления их контакта с береговыми откосами
Тактогульская	215	(1975)	1982-83	≈ max	Обрыв болтов крышки турбины в

					результате деформации колодца при его сжатии
Нурекская	300	1961 (1972)	1983	≈ max	Обрыв 50 из 72 гаек и шпилек (69%) крышки турбины, то же
Саяно-Шушинская	275	1967 (1978)	2009	≈ max	Обрыв 65% гаек и шпилек крышки турбины, то же
Рудники и шахты					
Р-к Таштагольский шх. Ново-Капитальная		- 1960	1964 1971	max min	Разрушение бетонной крепи, перекрепка 112м железобетонной крепью. Крепь разорвало по 3-м азимутам, трещины шириной 20-200 мм L=10 м
Р-к Таштагольский, Ствол «Сибиряк»			1991	min	Трещины в бетонной крепи на Н=560-606 м и в ж-б крепи на Н=840-965 м, Перекрепка Н=756-865м
Ствол в г. Хромтау		1980	1984	max	Разрушено 200 м бетонной крепи Н=520-720 м
шх. Сан-Хосе (Чили)			2010	max	Разрушение вертикального и наклонного стволов Н=400 и 500 м
Березниковский рудник-3			1986	max	Затопление рудника
Соликамский рудник-2			1995	max	Землетрясение с магнитудой 5 баллов
Березниковский рудник-1			2006	≈ max	Затопление рудника
Соколовский рудник			2006	max	Затопление рудника
Шх. имени Засядько Украина	1978		2006- 2007	≈ max	Выброс газа. Погибло 13 чел. Погибло 89 чел.
Шх. им.Ленина Казахстан			2006	≈ max	Погиб 41 чел.
Шх. Налемба Силезия	1030		2006	≈ max	Погибло 23 чел.
Шх. Ульяновская Кузбасс			2007	≈ max	Погибло 110 чел.
Шх. Распадская Кузбасс			2010	max	Погибло 90 чел.

В начале 21 века, т.е. к 2020-2030 гг., максимальное сжатие Земли будет соответствовать сумме деформаций в 400, 200, 90 и 11-летних циклах, что видно на рис.2.

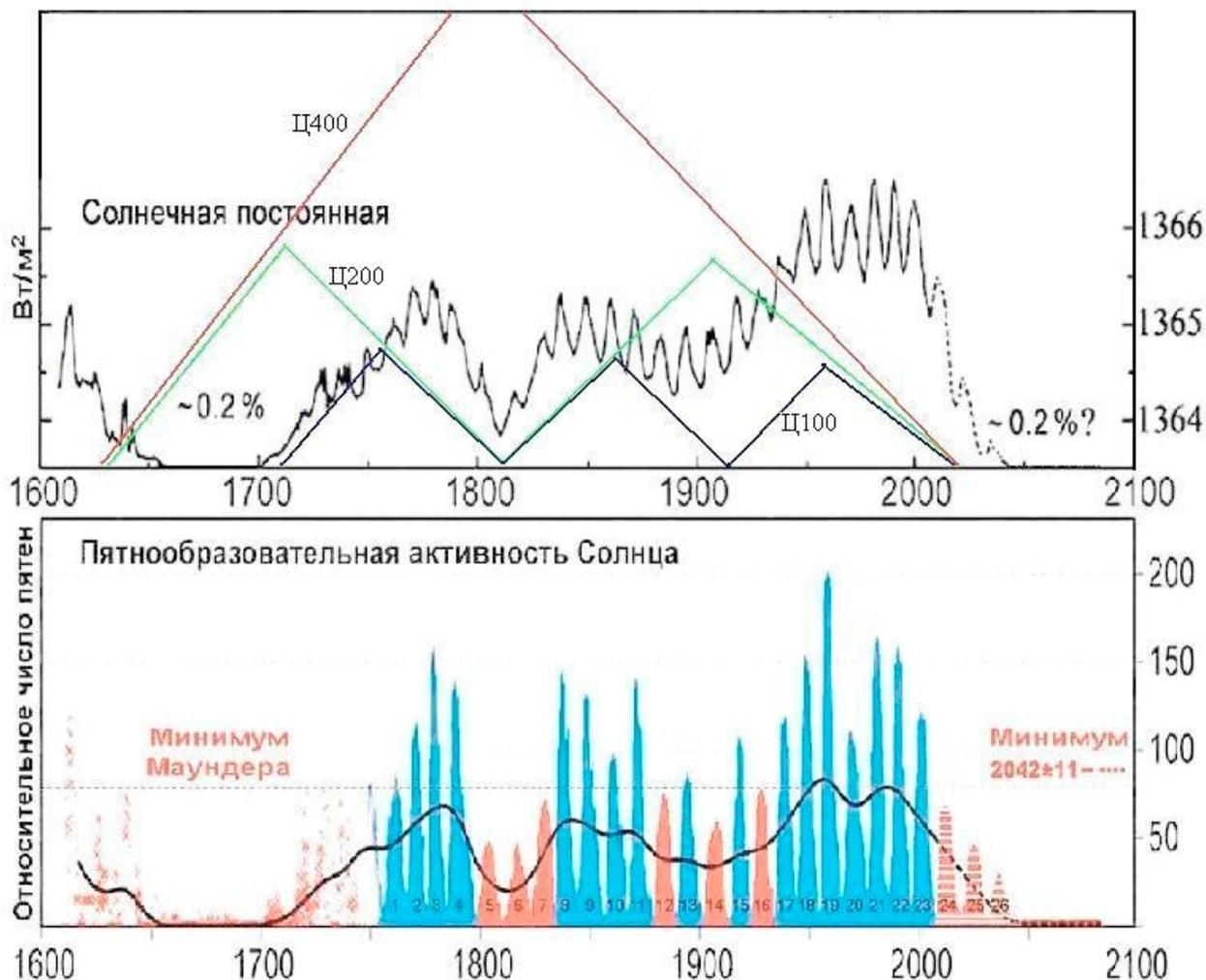


Рисунок 2 - Графики солнечной активности за все время наблюдений и прогноз на будущее

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. К главным геомеханическим факторам, влияющим на эффективность и безопасность горных работ следует отнести физико-механические свойства массива, а не образца, природные напряжения в массиве горных пород и их концентрацию в конструктивных элементах систем разработки и горных выработках.

2. Впервые в мировой практике установлено, что в дополнении к гипотезам формирования природных напряжений в массиве в результате суммирования гравитационных γH и условно постоянных тектонических напряжений σ_T по А.Гейму,

А.Н.Диннику и Н.Хасту необходимо учитывать переменную астрофизическую составляющую σ_{AF} .

Астрофизические напряжения с цикличностью 11 лет в 20 веке достигали 10-15 МПа, а в начале 21 века могут увеличиться до 20-40 МПа.

4. С учетом σ_{AF} в 21 веке во всех регионах мира напряжения в приконтурной части капитальных и подготовительно-нарезных выработок могут превысить прочность пород в 1,5-4 раза, что затруднит, а в некоторых случаях сделает невозможным проникновение под землю на глубинах более 500 м. Особенно это касается России, Скандинавии, Канады и Японии.

Reference:

1. Zubkov A.V. *Geomechanics and Geotechnology* / A.V. Zubkov. - Ekaterinburg: IGD RAS, 2001. – 335 p.
2. Zubkov A.V., Zoteev O.V., Smirnov O.Y. *dr. Regularities of formation and stress-strain state of the Earth's crust in the Urals time* // *Litosfera*. 2010. № 1. pp. 84-93.
3. Kim D.N. *Influence of structure on the shear strength of the array and define division calculated mechanical characteristics* / D.N. Kim // *Mining pressure Pinch of rocks and methods of surveying works: Sat scientific. tr. / VNIMI*. - Issue. 72. - L., 1969. - pp. 568 – 585.
4. Brown E. T. *Trends in relation between measured in situ stresses with depth* / E. T. Brown, E. Hoek // *Int.J.Rock Mech.Min.Sci & Geomech.* -1978. - Vol.15. - № 4. - P. 211 - 215.
5. YANG Shu-Xin, YAO Rui, CUI Xiao-Feng, CHEN Qun-Ce, HUANG Lu-Yuan // *CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS*. – 2012. - Vol. 55. - No.6. - P. 708 -718. **НАЗВАНИЯ СТАТЬИ НЕТ**
6. Sugawara K. *Measuring rock stress and rock engineering in Japan* / K. Sugawara. - Kumamoto: Department of Civil Engineering and Architecture, Japan. -1997. - Vol. 15, no 1.