ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831 DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81

Астрофизическая и другие компоненты напряжений горных массивов

Зубков А. В.[1], Сентябов С. В.[1]*
[1] Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Реферат

Цели работы *– исследование закономерностей формирования напряжений на разных месторождениях, выявление тренда изменения напряжений во времени и уменьшение тяжести последствий техноприродных катастроф в сфере недропользования. Прогноз места и времени проявления горного давления в настоящее время является одной из самых актуальных задач.*

Методика исследований *включает натурные экспериментальные измерения напряженного состояния массива пород и руд месторождения на доступных глубинах и горизонтах, установление закономерностей роста напряжений с глубиной, а также длительный (с 1990 г.) геодеформационный мониторинг уровня напряжений нетронутого массива пород во времени.*

Методология проведения работы *– геодеформационный мониторинг в шахтных условиях, статистическая обработка результатов.*

Анализ результатов *исследований позволил установить закономерности изменения напряженно-деформированного состояния как природных, так и техногенных массивов при ведении горных работ. Анализ опыта ведения горных работ показал, что тектонические нарушения, как правило, являются концентраторами напряжений, вносящими значительную неоднородность в поле напряжений участка массива, что зачастую приводит к возникновению аварийных ситуаций.*

Выводы. *Приведены обобщенные результаты длительного геодеформационного мониторинга природных напряжений на рудниках Урала, проводимого лабораторией геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН в течение последних двадцати лет, которые дали основание предложить новую, более современную структуру поля естественных напряжений с привязкой их изменения во времени. Выявлено, что относительная деформация Земли и земной коры в отдельных циклах не превышает величины* $1{,}43 \cdot 10^{-4}$ *(что приводит к изменению напряженного состояния массива горных пород на 5–15 МПа), которая предположительно одинакова для всех континентов и везде вызывает аварийные ситуации.*

Ключевые слова: *напряженное состояние массива; скальные породы; вариации напряжения; астрофизические напряжения; космофизические напряжения; гравитационные напряжения; концентрация напряжений; выработка; выработанное пространство; техногенные напряжения; удароопасность.*

Исследования выполнены по государственному заданию № 075-00412-22 ПР, тема № (FUWE-2022-0003), рег. № 1021062010536-3-1.5.1.

Введение. Горное дело – сфера человеческой деятельности, связанная с извлечением полезных ископаемых из недр в условиях знакопеременного изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Изме-

нение НДС может проявляться внезапными разрушениями горных конструкций, а также землетрясениями.

Анализ опыта ведения горных работ показал, что тектонические нарушения, как правило, являются концентраторами напряжений, вносящими значительную неоднородность в поле напряжений участка массива, что зачастую приводит к возникновению аварийных ситуаций. Все конструктивные элементы подземных систем разработки имеют замкнутый контур, что предопределяет затрудненные условия для нарушения специального предельного равновесия. Поэтому основной моделью массива скальных пород является модель сплошной среды [1].

Разрушение массива горных пород в окрестности подземных выработок также происходит на двух масштабных уровнях: на базе подземных горных выработок и на базе очистных выработок (камер и целиков, фронта подвигания очистных работ).

В подземных выработках обрушения развиваются по трем основным сценариям:

– нарушения устойчивости, практически не зависящие от величины действующих природных напряжений (вывалы породных блоков и отслоения пород по поверхностям ослабления, образование куполов обрушения при хаотической трещиноватости);

– хрупкое или близкое к нему разрушение пород на контуре выработок в результате концентрации напряжений, в том числе стреляние пород [2];

– большие деформации выработок по всему контуру под воздействием высокого уровня напряжений, характерные для пород, склонных к пластическим деформациям [3].

Цели работы – исследование закономерностей формирования напряжений на различных месторождениях, выявление тренда изменения напряжений во времени и прогноз их величин, разработка технологии снижения риска и уменьшения тяжести последствий техноприродных катастроф в сфере недропользования.

Постановка задачи. Вывалы породных блоков по природным поверхностям ослабления, а также образование куполов обрушения при интенсивной хаотической трещиноватости и хрупкое или близкое к нему разрушение пород на контуре выработок наиболее характерны для скальных массивов на рудных месторождениях.

Отслоения пород по поверхностям ослабления за счет изгиба слоев широко встречаются на рудных, угольных и соляных месторождениях.

Разрушение выработок вследствие больших деформаций по части или всему контуру выработок наиболее характерно для угольных и соляных месторождений.

В приконтурной части капитальных горных выработок – в стволах – происходит концентрация природных напряжений в соответствии с зависимостью:

$$\sigma_{\theta\max} = 3\sigma_3^{\text{П}} - \sigma_1^{\text{П}},$$

где $\sigma_1^{\text{П}}, \sigma_3^{\text{П}}$ – составляющие главных природных напряжений, МПа.

Анализ большого числа результатов измерения напряжений на месторождениях мира показывает, что отношение составляющих главных природных напряжений $\sigma_3^{\text{П}} : \sigma_1^{\text{П}}$; $\sigma_y^{\text{П}} : \sigma_z^{\text{П}}$; $\sigma_x^{\text{П}} : \sigma_z^{\text{П}}$ изменяется от 1 до 1,5–2,0 и более. Следовательно, среднее напряжение $\sigma_{\text{ср}}$, $\sigma_{\text{ср}} = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$, может изменяться от 1,0 до 1,5, т. е. в среднем можно принять $\sigma_{\max}^{\text{П}} = 1{,}25\sigma_{\text{ср}}$, а $\sigma_{\min} = 0{,}8\sigma_{\text{ср}}$.

С учетом этого

$$\frac{\sigma_{\theta\max}}{\sigma_{\max}^{\text{П}}} = \frac{1{,}25\sigma_{\text{ср}}3 - 0{,}80\sigma_{\text{ср}}}{1{,}25\sigma_{\text{ср}}} = 2{,}4,$$

откуда $\sigma_{\theta\max} = \sigma_{\max} \cdot 2{,}4$.

Этот же коэффициент концентрации следует использовать при прогнозировании тангенциальных напряжений в бортах карьеров.

В конструктивных элементах систем разработки концентрация природных напряжений в том участке массива горных пород, где располагаются сближенные подготовительно-нарезные выработки, может достигать 2,0–4,0, т. е. в среднем 3,0. С учетом этого обстоятельства в приконтурной части подготовительно-нарезных выработок напряжения могут достигать $\sigma_{\theta\,max} = \sigma_{ср}(2{,}4–3{,}0)$.

При разрушении массива на базе отрабатываемых камер основной причиной разрушения является формирование в приконтурном массиве камер областей с повышенными или пониженными (растягивающими) напряжениями. В соответствии с классическими представлениями, в стенках высоких камер могут сформироваться растягивающие вертикальные напряжения, параллельные стенкам, в результате чего камера приобретает бочкообразную форму. В кровле и днище формируется область высоких сжимающих напряжений, в результате которых может начаться куполение кровли и разрушение выработок днища. При низких широких камерах в стенках формируются высокие сжимающие напряжения, а в кровле могут сформироваться области растягивающих напряжений.

Структура природного поля напряжений. Результаты многолетних измерений, представленные в табл. 1, позволяют утверждать, что природное напряженное состояние земной коры формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами Земли, а также переменными компонентами различного происхождения, и может быть представлено в следующем виде [11, 12]:

$$\sigma_z = \gamma H + \sigma_{z\,т} + \sigma_z^{П};$$
$$\sigma_x = \lambda\gamma H + \sigma_{x\,т} + \sigma_x^{П};$$
$$\sigma_y = \lambda\gamma H + \sigma_{y\,т} + \sigma_y^{П},$$

где σ_z – действующее вертикальное напряжение (наиболее часто совпадает с одним из главных нормальных напряжений); σ_x и σ_y – горизонтальные главные нормальные напряжения; γH – вертикальное напряжение, создаваемое весом налегающих пород; λ – коэффициент бокового распора, определяемый деформационными характеристиками массива пород; $\sigma_{z\,т}$, $\sigma_{x\,т}$ и $\sigma_{y\,т}$ – компоненты тектонических напряжений, остающиеся неизменными многие десятилетия.

Переменная составляющая поля напряжений может определяться многими причинами: притяжение Луны и Солнца (приливы и отливы), тектоника плит и, в частности, сейсмическая активность регионов, мелкомасштабные подвижки по тектоническим разломам и т. д. [12]. Естественно, что длительность, величина и повторяемость этих компонентов весьма различны. Главное, что их объединяет: накладываясь на статическое поле напряжений, они могут создавать предпосылки для аварий, а в сочетании с техногенными факторами – и для катастроф.

Прогноз изменения природного поля напряжений во времени. Предыдущими исследованиями установлено, что в приповерхностной части земной коры происходят знакопеременные подвижки, локализующиеся, как правило, в зонах крупных тектонических нарушений. Продолжительность этих подвижек невелика и не превышает 2–3 месяцев [4, 5].

Астрофизическая составляющая поля напряжений является величиной переменной, ее необходимо непрерывно отслеживать. Измерение можно проводить

как на поверхности, так и в подземных условиях, измеряя деформацию базисов различной длины [6, 7].

В настоящее время к таким методам относятся измерения при использовании:

– спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС;

– лазерных дальномеров (ЛД);

– кварцевых трубчатых деформометров (КТД);

– маркшейдерских мерных проволок, рулеток (МР).

Таблица 1. Деформации массива горных пород
Table 1. Deformations of the rock mass

Объект исследования, местоположение	Инструмент исследования	Базис	Интервал времени	Деформация $\varepsilon \cdot 10^6$
Байкало-монгольский регион [4], размер по широте 14°, по долготе 26°	GPS	1550 × 2890 км	1994–2001 г.; 2002–2007 г.	–0,15 +0,13
г. Екатеринбург [5]	GPS	2,4–5,4 км	2003–2010 г.	–0,54
г. Екатеринбург [6]	GPS	706 м	2002–2010 г.	< –0,1
г. Екатеринбург [7]	ЛД	706 м	2002–2010 г.	–9,0
Обсерватория Ала-Арча, северный Тянь-Шань, штольня [3]	ЛД	25 м	1996–2001 г.; 2001–2010 г.	+3,0 +7,0
Боксанское ущелье, штольня [8]	ЛД	75 м	Год	±6,0
Месторождение Антей, рудник, H = 300 м [9]	ЛД	50 м	Сутки	±1,6
Обсерватория Ала-Арча [3]	КТД	8,5 м	1989–1996 г.	–3,0
г. Нижний Тагил, рудник, H = 400 м [10], изменение диаметра выработки	КТД	3,5 м	Сутки, 14 дней	±3,0 ±(8,0–16,0)

ЛД – лазерный дальномер; КТД – кварцевый трубчатый деформометр.

Астрофизическая составляющая на рудниках Урала [8–10, 13] определялась в результате экспериментального измерения на глубинах более 400 м, т. е. ниже зоны дезинтеграции массива горных пород, вызванного знакопеременными подвижками по нарушениям (рис. 1 и табл. 2, где А – Абаза (представлены средние значения $\sigma_{АФ} = \sigma_{i\,ПР} - (\sigma_Т + \gamma H)$, $\sigma_{i\,ПР}$ – составляющая природных напряжений, МПа, $\sigma_Т + \gamma H$ – составляющая тектонических и гравитационных напряжений, МПа), Б – Березовский, Г – Гай, К – Краснотурьинск, Т – Нижний Тагил; Е – Европа (OPERA), С – США (MINOS); направления базисов: I – 0°–9°, II – 20°–30°, III – 45°–75°, IV – 80°–90°, V – 125°–135°, VI – 156°–160°).

Анализ представленных материалов позволяет сделать следующие выводы:

– изменения деформаций хорошо коррелируются как с солнечной активностью (идут в одной фазе), так и с вариациями космических лучей (идут в противофазе);

– невзирая на то что места измерений расположены далеко друг от друга (расстояние между шахтой Северопесчанская и Гайским подземным рудником составляет около 1300 км) и относятся к разным генетическим типам, величины дополнительных деформаций близки друг к другу, что дает основание предположить, что они будут одинаковы для всех месторождений, расположенных в скальных породах;

– из положения, что астрофизическая компонента деформаций одинакова для всех скальных массивов, можно предположить, что она должна проявляться в из-

менении фигуры Земли, что может быть дополнительно отслежено методами гравиметрии (максимальное изменение оценивается как 0,5 км).

Следует отметить, что из-за наличия в массиве большого количества разноориентированных трещин разных размеров его прочность на растяжение пренебрежимо мала и редко превышает 1–2 МПа.

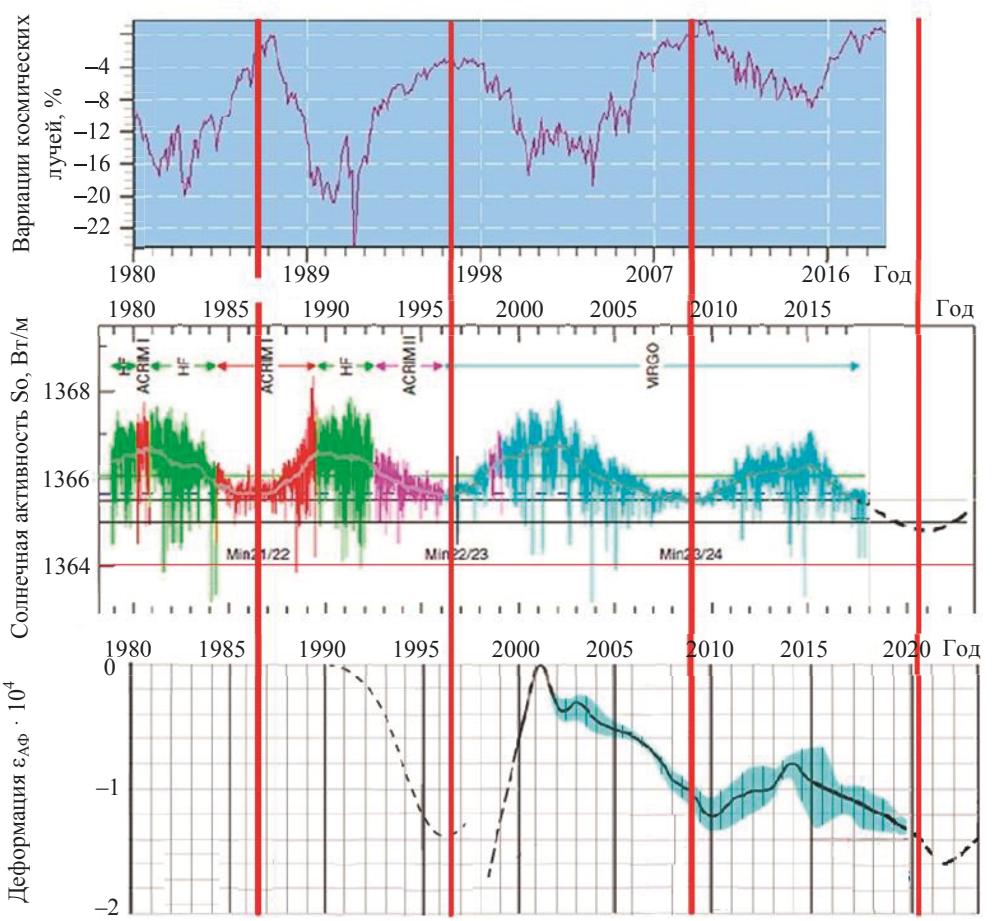

Рисунок 1. Изменение средних по четырем рудникам значений деформаций массива горных пород $\varepsilon_{АФ}$ на Урале на фоне изменения излучающей способности Солнца So и интенсивности космического излучения

Figure 1. Change in the average values of the parameters of the stress-strain state of a rock mass $\varepsilon_{АФ}$ in the Urals against the backdrop of some changes in the solar emissivity So and cosmic radiation intensity

Реализация того или иного механизма разрушения массива определяется целой группой факторов, которые делятся на две группы: природные (неуправляемые) и техногенные (управляемые).

К природным факторам относятся:

– пространственная ориентировка крупных разрывных нарушений;

– густота, протяженность и состояние основных систем трещин;

– физические характеристики горных пород;

– прочностные характеристики горных пород;

– реологические характеристики горных пород (для соляных и солесодержащих толщ);

– прочностные характеристики контактов пород и других поверхностей ослаблений;

– деформационные характеристики массива горных пород, в том числе характеристики деформирования за пределами прочности и упругости;

– температурный режим, проявляющийся в оттаивании–замерзании горных пород;

– уровень подземных вод, водоносных горизонтов и водных объектов на земной поверхности;

– обводненность массива;

– наличие водорастворимых пород, карстов и иных природных полостей;

– газоносность массива;

– параметры природного поля напряжений;

– сейсмическая активность региона;

– параметры современных геодинамических движений;

– склонность пород к выветриванию;

– иные факторы, связанные в том числе с влиянием астрономических показателей.

Дополнительно к природным факторам при проходе выработок в массивах дисперсных горных пород (в основном – вскрывающие выработки, проходимые с дневной поверхности) учитываются следующие характеристики:

– набухание, снижение прочности и развитие локальных деформаций в подземных выработках или на откосах карьеров и отвалов;

– водонасыщенность пород, наличие водосборных площадей с затрудненной разгрузкой;

– количество атмосферных осадков, характер дождей, мощность снегового покрова и продолжительность его таяния;

– температурный режим района, глубина сезонного промерзания и оттаивания пород;

– гранулометрический и минеральный состав пород;

– число пластичности и показатель текучести (для глинистых пород);

– естественная влажность;

– относительная деформация просадочности (для глинистых пород);

– коэффициенты пористости и водонасыщения (для крупнообломочных грунтов и песков);

– относительное содержание органического вещества;

– компрессионные свойства пород;

– температурно-прочностные свойства горных пород и контактов, криогенная структура, льдистость.

К техногенным факторам относятся:

– система разработки;

– форма и размеры выработок;

– глубина заложения подземных выработок;

– расстояние между выработками;

– назначение и срок службы выработок;

– ориентировка систем трещин относительно направления оси выработок;

– очередность и порядок отработки запасов;

– влияние очистных работ на устойчивость выработок;

– способ проходки и поддержания подземных выработок;

– характеристики крепи;

Таблица 2. Результаты измерения относительной деформации массива горных пород на рудниках Урала, а также США и Европы

Table 2. Results of measuring the relative deformation of a rock mass in the mines of the Urals, as well as the USA and Europe

Год	*	Азимут						
		I	II	III	IV	V	VI	Деформация $\varepsilon_{срАФ} \cdot 10^4$
1990	А							0
1993	А							–0,49
1995	А							–1,32
1997	А							–1,29
1998	Т	–2,13	–1,87	–	–	–1,88	–1,99	–1,97±0,12
1999	Т	–0,72	–0,50	–	–1,94	–0,55	–0,60	–1,08±0,31
	Г	–	–0,64	–	–2,02	–	–	
2002	Т	–0,18	–0,19	–	–	–0,24	–0,70	–0,36±0,21
	Г	–	–0,49	–	–0,11	–	–0,30	
2003	К	–0,17	–	–0,15	–0,16	–0,16	–0,65	–0,31±0,21
	Т	–0,15	–0,06	–	–	–0,30	–0,79	
	Б	–	–0,56	–0,44	–0,51	–	–0,39	
	Г	–	–0,47	–	–0,19	–	–0,33	
2004	К	–	–	–0,37	–0,31	–0,20	–0,84	–0,45±0,19
	Т	–0,43	–0,36	–	–	–0,23	–0,79	
	Б	–	–0,52	–0,53	–0,66	–	–0,67	
	Г	–	–0,64	–	–0,32	–	–0,48	
2005	К	–	–	–0,49	–0,53	–0,35	–0,92	–0,53±0,15
	Т	–0,47	–0,36	–	–	–0,45	–0,79	
	Б	–	–0,53	–0,60	–0,62	–	–0,75	
	Г	–	–0,66	–	–0,47	–	–0,52	
2006	К	–0,77	–	–0,28	–0,62	–0,56	–0,75	–0,58±0,16
	Т	–0,65	–0,35	–	–	–0,35	–0,79	
	Б	–	–0,40	–0,59	–0,65	–	–0,71	
	Г	–	–0,75	–	–0,50	–	–0,62	
2007	К	–0,88	–	–0,61	–0,75	–0,50	–1,06	–0,71±0,18
	Т	–0,85	–0,36	–	–	–0,61	–1,06	
	Б	–	–0,61	–0,75	–0,72	–	–0,82	
	Г	–	–0,77	–	–0,63	–	–0,70	
	С	–	–	–	–	–0,50	–	
2008	К	1,00	–	–0,94	–0,87	–0,50	–0,94	–0,92±0,14
	Т	–0,74	–0,92	–	–	–0,84	–0,79	
	Б	–	–0,96	–1,00	–1,14	–	–1,07	
	Г	–	–1,04	–	–0,90	–	–0,97	
2009	К	1,56	–	–1,12	–0,96	–0,90	–1,11	–1,03±0,19
	Т	–0,98	–0,67	–	–	–0,80	–0,79	
	Б	–	–1,02	–1,06	–1,10	–	–1,07	
	Г	–	–1,09	–	–0,92	–	–1,05	
2010	К	–1,85	–	–1,24	–1,24	–1,38	–1,30	–1,22±0,29
	Т	–1,03	–0,43	–	–	–1,03	–1,29	
	Б	–	–1,05	–	–	–1,11	–1,09	
	Г	–	–	–	–1,17	–	–1,15	
	Е	–	–	–	–	–0,38	–	
2011	К	–1,80	–	–1,39	–1,18	–1,35	–	–1,1±0,29
	Т	–1,10	–	–	–	–	–	
	Б	–	–0,94	–0,99	–	–0,97	–0,89	
	Г	–	–0,75	–	–0,97	–	–0,88	

Год	*	Азимут						
		I	II	III	IV	V	VI	Деформация $\varepsilon_{срАФ} \cdot 10^4$
2012	К	–1,20	–	–0,77	–1,01	–0,70	–	–1,02±0,24
	Т	–	–	–	–	–1,00	–1,45	
	Б	–	–1,12	–1,04	–	–1,13	–1,20	
	Г	–	–0,62	–	–0,82	–	–0,72	
2013	К	–1,26	–	–1,27	–0,53	–0,85	–	–1,00±0,37
	Т	–0,17	–	–	–	–0,26	–1,19	
	Б	–	–0,92	–1,00	–	–1,04	–1,02	
	Г	–	–0,79	–	–1,10	–	–1,47	
2014	К	–1,14	–	–0,42	–0,37	–0,41	–	–0,8±0,30
	Т	–0,82	–	–	–	–0,95	–1,15	
	Б	–	–0,95	–1,14	–	–1,04	–0,47	
	Г	–	–0,65	–	–0,90	–	–0,70	
2015	К	–1,00	–	–0,81	–0,41	–0,30	–	–0,94±0,39
	Т	–1,18	–	–	–	–1,22	–1,44	
	Б	–	–1,15	–1,31	–	–1,17	–1,20	
	Г	–	–0,68	–	–0,76	–	–0,60	
2016	К	–1,60	–	–0,92	–0,96	–0,84	–	–1,1±0,21
	Т	–1,25	–0,80	–	–	–1,14	–1,17	
	Б	–	–1,22	–1,23	–1,23	–1,23	–1,21	
	Г	–	–0,95	–	–1,10	–	–0,83	
2017	К	–1,47	–	–0,82	–0,94	–	–	–1,11±0,23
	Т	–1,32	–0,67	–	–	–1,14	–	
	Б	–	–1,10	–1,30	–1,20	–	–1,16	
	Г	–	–1,13	–	–1,16	–	–1,24	
2018	К	–1,50	–	–0,89	–1,07	–1,25	–	–1,18±0,17
	Т	–1,24	–0,88	–	–	–	–1,20	
	Б	–	–	–1,24	–1,30	–	–1,17	
	Г	–	–1,17	–	–1,18	–	–1,30	
2019	К	–1,69	–	–1,27	–1,22	–1,45	–	–1,36±0,20
	Т	–	–0,86	–	–	–	–1,30	
	Б	–	–	–1,45	–1,30	–	–1,33	
	Г	–	–1,38	–	–1,41	–	–1,42	
2020	К	–1,51	–	–1,23	–1,08	–1,61	–	–1,39±0,22
	Г	–	–1,46	–	–1,41		–1,42	
2021	К	–1,57	–	–1,20	–1,02	–1,31	–	–1,31±0,18
	Т	–	–0,91	–	–	–1,15	–1,36	
	Г	–	–1,39	–	–1,32	–	–1,43	

* Место проведения измерений.

– возможность проявления газо-, геодинамических явлений в ходе отработки месторождения.

Таким образом, подход к сооружению объектов на земной поверхности и объектов подземной разработки должны быть различными:

Для *объектов на земной поверхности*, а также для закладки шахтных стволов и выбора мест расположения технологических капитальных камер основным мероприятием является выбор места заложения сооружений на удалении от тектонических разломов примерно в центре крупных структурных блоков. В случае

необходимости закладки сооружений вблизи от разломов строительство должно осуществляться с учетом возможных подвижек (как в сейсмоопасных районах). Дополнительным условием является выбор места заложения сооружений на удалении от контактов пород, имеющих резко различные (в 2–3 раза и более) модули деформации.

При проектировании очистных *подземных работ* необходимо учитывать изменяющуюся во времени величину первоначальных напряжений. На сегодняшний день показано, что увеличение напряжений относительно результатов измерения может составлять от 0 до 15 МПа в зависимости от солнечной активности, соответствующей периоду проведения измерений и модуля деформации массива. Это возможное изменение должно закладываться в параметры крепи и целиков всех видов и назначений. При самообрушении пород кровли и висячего бока возрастают потери и разубоживание руды, создавая дополнительные сложности при обогащении руды, что в свою очередь увеличивает себестоимость добычи и существенно ухудшает технико-экономические показатели по предприятию в целом [14–18].

Величины деформаций, если исключить измерения 1998 г., не превышают $1{,}43 \cdot 10^{-4}$. При этом величина сжимающих напряжений может возрастать на 6–15 МПа в зависимости от модуля деформации массива (максимальные напряжения характерны для Естюнинского месторождения, имеющего аномально высокие деформационные и прочностные характеристики массива скальных пород).

Хотя полученные результаты наблюдений позволяют выделить периодичность 11–12 лет, вопрос об амплитуде и периоде изменения астрофизической составляющей природного поля напряжений нельзя считать решенным до конца, поскольку в природе солнечной активности выделяются гармоники с большим периодом.

На сегодняшний день можно с большой долей уверенности предположить, что до конца 2022 г. будет продолжаться незначительный рост напряжений (не более 2–3 МПа), а с 2032 г. начнется их незначительное снижение. Прогноз изменения величины астрофизической составляющей во времени на настоящий момент можно вести только на основе экстраполяции зависимостей, причем прогноз на период более 2–3 лет может выполняться только с большими погрешностями. Анализ приведенных результатов позволяет утверждать, что при увеличении глубины разработки месторождения величина напряжений на обнажении массива будет превышать предел прочности на одноосное сжатие руды (100 МПа) (рис. 1) [18–22].

Оценка напряженного состояния массива пород для подземных предприятий. Для подземных предприятий в первую очередь выполняется оценка напряженного состояния массива горных пород. При этом районирование ведется по двум параметрам:

– по глубине отработки, что не только определяет величину действующих первоначальных напряжений, но и позволяет учесть изменение соотношения горизонтальных и вертикальных напряжений с глубиной и определить верхнюю границу удароопасности;

– по времени заложения выработок и сроку их службы, что позволяет учесть величину астрофизической составляющей.

В последнем случае можно использовать установленную на сегодняшний день величину дополнительной астрофизической деформации ($\varepsilon_{АФ} \leq 2 \cdot 10^{-4}$) и с ее помощью оценить максимально возможное увеличение действующих напряжений, задавая модуль деформации массива.

Для оценки величины тектонических напряжений можно воспользоваться результатами измерений напряженного состояния, приведенными в табл. 1.

Таким образом, для выбора мест и обоснования безопасных условий строительства объектов на земной поверхности достаточно оценки сейсмоактивности рассматриваемого участка и картирования сетки тектонических нарушений с оценкой их активности. При проектировании и эксплуатации подземных рудников в обязательном порядке должно учитываться напряженное состояние массива и его изменение во времени [10].

Выводы. Доказана хорошая корреляция переменной компоненты деформаций с 11-летним циклом солнечной активности. Связь этой компоненты с более низкопериодными колебаниями активности не доказана в связи с малым периодом наблюдений (чуть более 20 лет). Все деформации являются деформациями сжатия.

Переменная деформация практически для всех рудников, где производились измерения, одинакова и не превышает для 11-летнего цикла величины $1{,}43 \cdot 10^{-4}$. При этом величина сжимающих напряжений может возрастать на 5–15 МПа в зависимости от модуля деформации массива.

Заключение. Представлено обобщение результатов длительного геодеформационного мониторинга природных напряжений на рудниках Урала, проводимого лабораторией геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН в течение последних 20 лет, которые дали основание предложить новую, более современную структуру поля естественных напряжений с привязкой их изменения во времени.

Выявлено, что относительная деформация Земли и земной коры в отдельных циклах не превышает величины $\varepsilon_{АФ} = 1{,}43 \cdot 10^{-4}$, что приводит к изменению напряженного состояния массива горных пород $\varepsilon_{АФ}$ на 5–15 МПа. Предположительно деформация одинакова для всех континентов и везде вызывает аварийные ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шуплецов Ю. П. Прочность и деформируемость скальных массивов. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 195 с.

2. Зотеев В. Г., Зотеев О. В. Нетипичные деформации бортов глубоких рудных карьеров и меры по их предотвращению // Горный журнал. 2007. № 1. С. 40–45.

3. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. 335 с.

4. Афанасьев С. Л. Циклическая динамика в природе и обществе // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Научный мир, 1998. Т. 1. С. 88–94.

5. Абдусаматов Х. И. Глобальный минимум мощности солнечного излучения приведет к малому ледниковому периоду. СПб: Нестор-История, 2013. 246 с.

6. Борисенков Е. П., Пасецки В. Н. Тысячелетняя летопись необычных явлений природы. М.: Мысль, 1988. 522 с.

7. Добрецов Н. Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек: докл. АН СССР. 1977. Т. 357. № 6. С. 797–800.

8. Зубков А. В. Связь геодинамических событий в литосфере с солнечной активностью // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. науч. тр. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2005. С. 68–74.

9. Зубков А. В., Зотеев О. В., Смирнов О. Ю., Липин Я. И., Худяков С. В., Криницын Р. В., Селин К. В., Ершов А. А., Валиуллов Л. Р. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния земной коры Урала во времени // Литосфера. 2010. № 1. С. 84–93.

10. Зубков А. В. Периодическое расширение и сжатие Земли как вероятный механизм природных катаклизмов // Литосфера. 2013. № 2. С. 145–156.

11. Зубков А. В., Селин К. В., Сентябов С. В. Закономерности формирования напряженного состояния массива горных пород в верхней части земной коры // Литосфера. 2015. № 6. С. 116–129.

12. Зубков А. В. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры // Литосфера. 2016. № 5. С. 146–151.

13. Зубков А. В., Сентябов С. В. Деформация земной коры, способы изучения, закономерности, проблемы // Литосфера. 2020. № 6. С. 863–872. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-863-872

14. Timonin V. V., Kondratenko A. S. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 5. P. 1056–1061.

15. Jianju Du, Xiang huiQin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal // Engineering Geology. 2017 (March). Vol. 220. P. 76–84.

16. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. No. 85. P. 406–417.

17. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. No. 72. P. 55–63.

18. Rib S. V. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 206. P. 1–4 (012011). URL: http://library.sibsiu.ru

19. Gell E. M., Walley S. M., Braithwaite C. H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. No. 3. P. 1–13.

20. Hong K., Han E., Kang K. Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. No 9. P. 702–708.

21. Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N. Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks // ARMA: 51st U. S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA. 2017. P. 1–8.

22. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. Rock pressure control methods based on detected regularities of stress formation in mining structures. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2021. No. 2. P. 14–25. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-14-25

Поступила в редакцию 16 февраля 2022 года

Сведения об авторах:

Зубков Альберт Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: sentyabov1989@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9906-0852

Сентябов Сергей Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: sentyabov1989@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-7495-8962

DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81

Astrophysical and other components of rock mass stress

Albert V. Zubkov[1], Sergei V. Sentiabov[1]

[1] Institute of Mining UB RAS, Ekateriburg, Russia.

Abstract

Research objective *is to study the patterns of stress formation in various fields, identify the trend in stress changes over time and reduce the severity of technological disaster consequences in the field of subsoil use. Prediction of rock pressure manifestation place and time is currently one of the most urgent tasks.*

Methods of research *include in-situ experimental measurements of the stress state of the deposit's rock mass and ore at accessible depths and horizons, the establishment of patterns of stress growth with depth, as well as long-term geodeformation monitoring of virgin ground stress level since 1990.*

Research methodology *is geodeformation monitoring in mine conditions and statistical processing of the results.*

Results analysis *made it possible to establish the patterns of changes in the stress-strained state of both natural and man-made rock masses in the course of mining. An analysis of mining experience has shown that tectonic disturbances commonly act as stress concentrators, introducing significant heterogeneity in the stress field of a rock mass section and often resulting in emergency situations.*

Conclusions. *The paper presents the generalized results of long-term geodeformation monitoring of natural stresses in Ural mines, carried out by the Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, IM UB RAS, over the past 20 years. The results have suggested a new, more advanced structure of the field of natural stresses with reference to their change in time. It was revealed that the relative deformation of the Earth and the Earth's crust in particular cycles does not exceed* $1.43 \cdot 10^{-4}$ *(leading to changing rock mass stress state by 5–15 MPa), which is presumably the same for all continents and causes emergencies everywhere.*

Keywords: *stress-strained state of rock mass; hard rock; variations of stress; astrophysical stress; cosmophysical stress; gravitational stress; stress concentration; mine working; goaf; mining-induced stress; rock-bump hazard.*

The research has been carried out following the state contract no. 075-00412-22 PR, theme no. (FUWE-2022-0003), reg. no. 1021062010536-3-1.5.1.

REFERENCES

1. Shupletsov Iu. P. *Strength and deformability of rock massifs*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2003. (In Russ.)

2. Zoteev V. G., Zoteev O. V. Atypical deformations of deep ore open pit walls and preventive measures. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2007; 1: 40–45. (In Russ.)

3. Zubkov A. V. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)

4. Afanasiev S. L. Cyclic dynamics in nature and society. In: *Atlas of temporal variations of natural, anthropogenic and social processes*. Moscow: Nauchnyi mir Publishing; 1998. Vol. 1. p. 88–94. (In Russ.)

5. Abdusamatov Kh. I. *The global minimum of solar radiation power will lead to a little ice age*. St. Petersburg: Nestor-Istoriia Publishing: 2013. (In Russ.)

6. Borisenkov E. P., Pasetski V. N. *A thousand-year chronicle of unusual natural phenomena*. Moscow: Mysl Publishing; 1988. (In Russ.)

7. Dobretsov N. L. *Mantle superplumes as the cause of the main geological periodicity and global rearrangements: AS USSR report*. 1977; 357(6): 797–800. (In Russ.)

8. Zubkov A. V. Connection of geodynamic events in the lithosphere with solar activity. In: *Geotechnological problems of complex development of the bowels: a collection of scientific papers*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing: 2005; 3(93): 68–74.

9. Zubkov A. V., Zoteev O. V., Smirnov O. Iu., Lipin Ia. I., Khudiakov S. V., Krinitsyn R. V., Selin K. V., Ershov A. A., Valiullov L. R. Regularities of formation stress-deformed state of the Urals Earth's crust in time duration. *Litosfera = Lithosphere*. 2010; 1: 84–93. (In Russ.)

10. Zubkov A. V. Periodic expansion and contraction of the Earth as a probable mechanism of natural disasters. *Litosfera = Lithosphere*. 2013; 2: 145–156. (In Russ.)

11. Zubkov A. V., Selin K. V., Sentiabov S. V. Patterns of the formation of the stress state of a rock mass in the upper part of the Earth's crust. *Litosfera = Lithosphere*. 2015; 6: 116–129. (In Russ.)

12. Zubkov A. V. The law of formation of the natural stress state of the Earth's crust. *Litosfera = Lithosphere.* 2016; 5: 146–151. (In Russ.)

13. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. Deformation of the Earth's crust, methods of study, patterns, problems. *Litosfera = Lithosphere.* 2020; 6: 863–872. (In Russ.) Available from: doi: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-863-872

14. Timonin V. V., Kondratenko A. S. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51. No. 5. 1056–1061.

15. Jianju Du, Xiang huiQin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal. *Engineering Geology*. 2017 (March); 220: 76–84.

16. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019; 85: 406–417.

17. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018; 72: 55–63.

18. Rib S. V. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 206: 1–4 (012011). Available from: http://library.sibsiu.ru

19. Gell E. M., Walley S. M., Braithwaite C. H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019; 3: 1–13.

20. Hong K., Han E., Kang K. Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017; 9: 702–708.

21. Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N. Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks. In: *ARMA: 51st U. S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA*. 2017. 1–8.

22. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. Rock pressure control methods based on detected regularities of stress formation in mining structures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 2: 14–25. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-2-14-25

Received 16 February 2022

Information about the authors:

Albert V. Zubkov – DSc (Engineering), chief researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS; https://orcid.org/0000-0001-9906-0852
Sergei V. Sentiabov – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: sentyabov1989@mail.ru

Для цитирования: Зубков А. В., Сентябов С. В. Астрофизическая и другие компоненты напряжений горных массивов // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 3. С. 70–81. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81
For citation: Zubkov A. V., Sentiabov S. V. Astrophysical and other components of rock mass stress. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 3: 70–81 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81