ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УрО РАН - 60 ЛЕТ

V

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-119-126

Лаборатория геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН: исследования массива горных пород

А.В. Зубков, Р.В. Криницын, С.В. Сентябов, К.В. Селин

Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация Stress.iqd@mail.ru

Резюме: Деятельность лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела Уральского отделения РАН направлена на организацию и проведение фундаментальных научных исследований, подготовку кадров высшей квалификации, а также решение прикладных задач, способствующих успешному развитию горнодобывающей промышленности Российской Федерации и стран СНГ. Исследования лаборатории: 1) методология исследования и контроля значений параметров напряженно-деформированного состояния массива пород, а также прогноз изменения их во времени и в ходе ведения горных работ; 2) теоретическое обоснование обеспечения устойчивости горных выработок и конструктивных элементов систем разработки. Миссия лаборатории заключается в проведении фундаментальных исследований, базирующихся на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности в области геомеханического сопровождения ресурсосбережения, в горнодобывающей промышленности Уральского региона и России в целом. Фундаментальные исследования лаборатории геодинамики и горного давления направлены на изучение закономерностей формирования полей первоначальных и вторичных напряжений, разработку способов управления напряженным состоянием массива горных пород и предупреждение геодинамических явлений для повышения эффективности эксплуатации недр.

Ключевые слова: массив горных пород, напряженное состояние, закономерности формирования напряжений, относительная деформация, геодеформационный мониторинг, щелевая разгрузка, метод фотоупругих включений, математическое моделирование

Благодарности: авторы выражают признательность коллегам за помощь в работе над статьей: канд. техн. наук Ю.Г. Феклистову, мл. науч. сотр. Е.М. Ушакову.

Для цитирования: Зубков А.В., Криницын Р.В., Сентябов С.В., Селин К.В. Лаборатория геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН: исследования массива горных пород. *Горная промышленность*. 2022;(1S):119–126. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-119-126.

Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure at the Institute of Mining, Ural Branch of RAS: Rock Mass Studies

A.V. Zubkov, R.V. Krinitsyn, S.V. Sentyabov, K.V. Selin Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation Stress.igd@mail.ru

Abstract: The activities of the Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure of the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences are aimed at organizing and conducting fundamental research, training of highly qualified personnel, as well as solving applied tasks that contribute to successful development of the mining industry in the Russian Federation and the CIS countries. The laboratory conducts research in the following areas: 1) methodology of studies and control of the stress-and-strain state parameters of the rock mass, as well as forecasting their changes over time and in the course of mining operations; 2) theoretical justification of ensuring the stability of mine workings and structural elements of mining methods. The mission of the laboratory is to conduct fundamental research based on the principles of consistent, comprehensive, interdisciplinary and innovative approach in the field of geomechanical support of subsoil development in order to improve industrial and environmental safety, energy efficiency and resource conservation in the mining industry of the Ural region and Russia as a whole. Fundamental researches at the laboratory of Geodynamics and Formation Pressure are focused on studying regularities in formation of initial and secondary stress fields, development of methods to control the stress condition of rock mass and prevention of geodynamic phenomena to enhance the efficiency of subsoil development.

Keywords: Rock mass, stress condition, stress formation patterns, strain, geodeformation monitoring, unloading with slots, photoelastic inclusion method, mathematical modeling



ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УрО РАН — 60 ЛЕТ

Acknowledgments: The authors wish to express their gratitude to their colleagues Candidate of Technical Sciences Yu.G. Feklistov, Junior Research Assistant E.M. Ushakov for their help in preparing this article.

For citation: Zubkov A.V., Krinitsyn R.V., Sentyabov S.V., Selin K.V. Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure at the Institute of Mining, Ural Branch of RAS: Rock Mass Studies. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry.* 2022;(1 Suppl.):119–126. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-119-126.



А.В. Зубков,

доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики игорного давления Института горного дела Уральского отделения РАН



Р.В. Криницын, заведующий лабораторией геодинамики и горного давления Института горного дела Уральского отделения РАН



С.В. Сентябов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела Уральского отделения РАН



К.В. Селин, научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела Уральского отделения РАН

Введение

Выбор эффективной и безопасной системы разработки напрямую зависит от результатов исследования параметров напряженно-деформированного состояния (НДС).

Для обеспечения безопасности горных работ параметры НДС определяются в начале эксплуатации месторождения, а также во время эксплуатации на всех этапах понижения горных работ. При этом возникают условия, снижающие точность исследований. Например, формирующееся выработанное пространство, вокруг которого происходит перераспределение первоначальных напряжений. Также оказывают влияние сложные горно-геологические условия. Наиболее сложной является задача по определению НДС на нижних участках месторождения, особенно когда меняется система разработки.

Исследование параметров НДС массива горных пород всегда представляет собой последовательное выполнение многих задач, главными из которых являются:

- изучение горно-геологических условий;

исследование физико-механических свойств горных пород;

 проведение натурных экспериментов по определению параметров НДС массива горных пород на месторождении;

– анализ полученных данных с последующим определением значений параметров НДС.

Методы исследований

Для повышения эффективности исследования параметров НДС целесообразно применять комплекс взаимодополняющих исследований, включающий в себя натурные экспериментальные методы и методы математического моделирования.

Основой комплексного исследования является метод щелевой разгрузки [1], базирующийся на оценке деформации массива после нарушения его сплошности. По сравнению с другими деформационными методами щелевая разгрузка характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений, т.к. зона разгрузки достигает трёх размеров щели.

Учитывая современный уровень развития оборудования, методика производства работ щелевой разгрузки была усовершенствована. В качестве режущего инструмента, образующего щель, используется пила с алмазным диском. Данное оборудование полностью автономно, не требует подключения к магистралям со сжатым воздухом, привязки к электрическим сетям и водопроводу, что позволяет существенно увеличить количество замеров.

Методика расчёта параметров первоначальных напряжений, действующих в массиве горных пород, основана на экспериментальных данных о деформации породного массива после образования разгрузочной щели в виде



Рис. 1 Схема к измерению напряжений методом щелевой разгрузки

Fig. 1 A sketch for measuring the stresses using the slot unloading method

сегмента, который образуется при заглублении в массив диска диаметром 350 мм (рис. 1).

Проведено математическое моделирование изменения напряженного состояния массива до и после формирования разгрузочной щели. Решалась упругая задача методом суперпозиций с использованием программного комплекса FEM [2] (рис. 2).



Рис. 2 Схема распределения напряжений вокруг вновь образованной щели (FEM) Fig. 2 Layout of stress distribution around a newly formed slot (FEM)

В результате расчетов установлены:

 – закономерности формирования НДС массива горных пород вокруг разгрузочной щели;

 – закономерности между напряжениями, действующими в массиве горных пород, и смещениями на контуре по мере удаления от щели.

Электрометрия является вторым используемым методом контроля изменения НДС массива. Методика измерения напряжений методом электрометрии может применяться как вспомогательный метод, который базируется на интерпретации результатов измерения кажущегося электрического сопротивления (КС) методом подземного электрического зондирования (ПЭЗ), являющегося аналогом поверхностного метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)¹[3]. Главное преимущество электрометрии заключается в достаточно точном определении значения напряжения в вертикальной плоскости, а также коэффициентов его соотношения с напряжениями, действующими в горизонтальной плоскости.

Для подтверждения значений параметров напряжений, полученных по данным щелевой разгрузки, производится сравнение их с величинами напряжений, рассчитанных с учётом усреднённых коэффициентов соотношения напряжений и средних значений вертикальных напряжений, определённых по данным обоих экспериментальных методов.

Подтвержденные результаты используются в качестве граничных условий при математическом моделировании [2].

Оба метода могут применятся на различных этапах отработки месторождения. Исследования параметров НДС целесообразно проводить именно этими методами, что подтверждается практикой использования этих методов на большом количестве месторождений.

Дополнительно применяются различные методы контроля изменения параметров НДС массива (мониторинг) горных пород во времени.

Хорошо зарекомендовал себя метод фотоупругих включений. Контроль приращения напряжений массива осуществляется с помощью фотоупругих датчиков [4]. Датчики устанавливаются в шпурах. С помощью цементирующего состава обеспечивается всесторонний контакт со стенками шпура. Деформация скважины или шпура воспринимается датчиком, при этом в датчике возникает поле напряжений.

При исследовании поля напряжений в поляризованном свете с помощью оптического прибора полярископа наблюдается интерференционная картина полос (рис. 3). Она образуется плоско поляризованным лучом света из полярископа, который в каждой точке датчика рассеивается на две составляющие, плоскости колебаний которых совпадают с направлением действия главных нормальных напряжений в этой точке. Свет, выходящий из датчика, проходит в полярископе через анализатор, в котором обе составляющие снова приводятся к одной плоскости. Вследствие разной скорости их распространения в датчике одна из составляющих луча опережает вторую (рис. 3). В зависимости от величины взаимного опережения, называемого разностью хода, при монохроматическом свете изменяется интенсивность света от максимума до минимума (в виде чередования белых и черных полос). Форма и число полос находятся в строгой зависи-



Рис. 3

Интерференционная картина полос в фотоупругом датчике а) схема интерференционных полос в фотоупругом датчике; б) общий вид

интерференционной картины в фотоупругом датчике



Fig. 3

Interference fringe patterns in the photoelastic strain gauge a) a schematic representation of interference fringes in the photoelastic strain gauge; 6) a general view of the interference patterns in the photoelastic strain gauge

Методические рекомендации по определению напряженного состояния массива и оценке его удароопасности методом подземной электрометрии. Свердловск: ИГД МЧМ СССР; 1986. 47 с.

мости от направления действия и величины напряжений в горной породе. Это дает возможность получить расчетные формулы для вычисления приращения напряжений по разности хода поляризованного света [4].

Дополнительно к методу фотоупругих включений применяется простой и малозатратный контроль смещения реперов во времени на базах до 50 м при помощи маркшейдерской рулетки – методом гибких нитей.

Большая часть результатов исследований изменения значений параметров НДС во времени получена на геодинамических полигонах. Полигон состоит, как минимум из трёх разно ориентированных линий с базой измерения до 50 м. Выработки для установки линий подбираются так, чтобы при переносе их на плоскость получался треугольник с углами более 25 град. Расстояние между марками измеряется маркшейдерской рулеткой по методике гибких нитей [5].

Марки (реперы) представляют собой крючки, жестко закрепленные на стенке выработки при помощи бетонной смеси, на которые подвешивается рулетка (рис. 4).



Рис. 4 Схема измерения длины между марками для определения деформаций

Fig. 4 Layout of measuring the distances between the marks to determine the deformations

При исследовании изменений параметров НДС нужно знать не абсолютную величину расстояния между марками, а изменение этого расстояния. В этом случае технология гибких нитей позволяет получить изменения базы с погрешностью не более 0,2 мм по внутренней сходимости результатов.

Важнейшее достоинство этого метода – простота выполнения замеров, которая в свою очередь не требует абсолютно никаких дополнительных затрат со стороны предприятия на покупку дорогостоящего измерительного оборудования. Для применения данного метода измерения длины деформационных линий достаточно использования штатного оборудования, применяемого маркшейдерскими службами (нивелир, рулетка, термометр).

Результаты исследований

В результате многолетних исследований, проводимых научным коллективом лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН, представлен законом формирования природных напряжений в массиве горных пород. Согласно данной закона НДС изменяется во времени. Наибольший вклад в это изменение вносит астрофизическая составляющая (σ_{ΛΦ}). Составляющие напряжений характеризуются следующим образом:

$$\sigma_{z}^{\Pi} = -\gamma H + \sigma_{zT} + \sigma_{zA\Phi}; \tag{1}$$

$$\sigma_{\rm x}^{\rm II} = -\lambda \gamma H + \sigma_{\rm xT} + \sigma_{\rm xA\Phi;} \tag{2}$$

$$\sigma_{\rm y}^{\Pi} = -\lambda\gamma H + \sigma_{\rm yT} + \sigma_{\rm yA\Phi}; \tag{3}$$

где: σ_z^{Π} ; σ_x^{Π} ; σ_y^{Π} – природные напряжения в массиве горных пород, МПа;

γ – удельный вес пород, H/м³;

Н – мощность налегающих горных пород, м;

 λ – коэффициент бокового распора (определяемый коэффициентом Пуассона)

σ_{*zT*}; σ_{*xT*}; σ_{*yT*} – составляющие тектонических напряжений, остающихся неизменными длительное время (десятки лет), МПа;

 $\sigma_{zA\Phi}, \sigma_{xA\Phi}, \sigma_{yA\Phi} = \sum_{i=K21}^{K13} \sigma_{i(t)}$ – суммарный вклад переменных физических процессов Космоса, различных классов (астрофизических явлений), МПа [6].

Связь НДС и относительной деформации представлена зависимостями (4); (5); (6) (Зубков, 2018) согласно закону Гука:

$$\mathcal{E}_X^{\mathrm{M}} = \frac{1}{\mathrm{E}} \left[\sigma_X^{\mathrm{M}} - \mu (\sigma_Y^{\mathrm{M}} + \sigma_Z^{\mathrm{M}}) \right]; \tag{4}$$

$$\mathcal{E}_{Y}^{\mathrm{M}} = \frac{1}{\mathrm{E}} [\sigma_{Y}^{\mathrm{M}} - \mu (\sigma_{X}^{\mathrm{M}} + \sigma_{Z}^{\mathrm{M}})]; \tag{5}$$

$$\mathcal{E}_Z^{\mathsf{M}} = \frac{1}{\mathsf{E}} \left[\sigma_Z^{\mathsf{M}} - \mu (\sigma_X^{\mathsf{M}} + \sigma_Y^{\mathsf{M}}) \right]. \tag{6}$$

При равенстве $\sigma_X^{M} = \sigma_Y^{M} = \sigma_Z^{M}$ (объемное сжатие или растяжение)

$$\varepsilon_i^{\mathrm{M}} = \frac{\sigma_i^{\mathrm{M}}}{\mathrm{E}} (1 - 2\mu),\tag{7}$$

где Е страна стр страна стран страна ст

- μ коэффициент Пуассона;
- σ напряжение, действующее в массиве;
- Е модуль упругости массива.

Переменная «астрофизическая» составляющая изменяется с определенной периодичностью. Период ее изменения составляет 11–13 лет. Измерения можно проводить как на поверхности, так и в подземных условиях, измеряя деформацию базисов различной длины.

В настоящее время к таким методам относятся измерения при использовании:

- спутниковых навигационных систем (GPS и ГЛОНАСС);
- лазерных дальномеров (ЛД);
- кварцевых трубчатых деформометров (КТД);
- маркшейдерских рулеток (MP) (табл. 1).

Астрофизическая составляющая на рудниках Урала и Сибири определяется в результате экспериментального измерения на глубинах более 400 м, т.е. ниже зоны дезинтеграции массива горных пород, вызванного знакопеременными подвижками по нарушениям.

Установлено, что изменение относительной деформации массива горных пород за период с 1990 г. по настоящее время достигало $\varepsilon_{A\Phi} = -2.0\cdot 10^{-4}$ (табл. 2).

Все эти изменения имеют цикличность 11–13 лет. В период экстремумов фиксировались аварийные ситуации на производственных объектах.

Графики изменения относительной деформации $\Delta \sigma_{\Lambda \Phi}$ и переменной «астрофизической» составляющей природных напряжений $\Delta \sigma_{\Lambda \Phi}$ приведены совместно с графиками изменения излучения солнца S_0 , интенсивности галактических космических лучей (%) и интенсивности землетрясений (*N*) [7; 8] на рис. 5.

Рис. 5

Изменение средних значений параметров напряжённодеформированного состояния массива горных пород на Урале на фоне аварий на рудниках, изменения излучающей способности Солнца (So), интенсивности космического излучения (%) и землетрясений (N)

Fig. 5

Changes in the average values of the stress-and-strain state parameters of the rock mass in the Urals against the background of mine accidents, changes in the solar emissivity (So), cosmic ray intensity (%) and earthquakes (N)

Таблица 1

Относительная деформация материи от воздействия волн космоса на микро и макро уровнях

Table 1 Relative deformation of matter from the action of waves of space at micro and macro levels

ε * 104	Период измерения	Примечание		
ε _{RP} = -(850÷900)	2001 ÷ 2020	радиуса протона [8]		
ε _{мгп} = -(6.0÷7.0)	2001 ÷ 2020	массива горных пород		
ε _{Py} = -(4.8÷5.6)	2001 ÷ 2020	маркшейдерской рулетки		
ε _{κτ} = -(1.05÷1.22)	2001 ÷ 2020	кварцевой трубки		
ε _{мгп лд} = -0.12 ε _{мгпснс} = -0.05	2010 ÷ 2017 2001 ÷ 2011	измерения с помощью лазерного дал. измерения с помощью СНС на Урале		
ε _{MΓΠCHC} = +0.0015 ε _{MΓΠCHC} = -0.0013	1994 ÷ 2001 2001 ÷ 2007	то же на Дальнем востоке		
$\epsilon_0 = -3.0 \div 5.0$ $\epsilon_0 = -10.0$	1970 ÷ 2001 1800 ÷ 2010	радиуса Солнца в 11-и летних циклах радиус Солнца в 200 летнем цикле [8]		
ε _{воды} – ε _{металл} = -1.7 × 10 ⁻⁴	1889 ÷ 2014	разница деформации воды и металлической емкости при контроле эталона веса [8]		

ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УРО РАН — 60 ЛЕТ

Таблица 2

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

Table 2

Results of measuring the rock mass strain in underground mines in the Urals, as well as in the USA and Europe

Азимут		*	I	II	Ш	IV	V	VI	ε _{cpAΦ} ·10 ⁴
	1990	Α							0
ľ	1992	Α							-0,35
	1993	Α							-0,49
	1995	Α							-1,32
	1997	Α							–1,29
	1998	Т	-2,13	-1,87	_	_	-1,88	-1,99	-1,97 ± 0,12
_	1999	Т Г	-0,72 -	-0,5 -0,64	-	-1,94 -2,02	-0,55 -	-0,6	-1,08 ± 0,31
	2001		0	0	0	0	0	0	0
_	2002	Т Г	-0,18 -	-0,19 -0,49		_ _0,11	-0,24	-0,7 -0,3	-0,36 ± 0,04
	2003	К Т Б Г	-0,17 -0,15 -	_ _0,06 _0,56 _0,47	-0,15 - -0,44 -	-0,16 - -0,51 -0,19	-0,16 -0,3 -	-0,65 -0,79 -0,39 -0,33	-0,31 ± 0,13
Год	2004	К Т Б Г		_ -0,36 -0,52 -0,64	-0,37 - -0,53 -	-0,31 - -0,66 -0,32	-0,20 -0,23 -	-0,84 -0,79 -0,67 -0,48	-0,45 ± 0,12
	2005	К Т Б Г		_ _0,36 _0,53 _0,66	-0,49 -0,60 _	-0,53 - -0,62 -0,47	-0,35 -0,45 -	-0,92 -0,79 -0,75 -0,52	-0,53 ± 0,06
	2006	К Т Г	-0,77 -0,65 - -	_ _0,35 _0,40 _0,75	-0,28 - -0,59 -	-0,62 - -0,65 -0,50	-0,56 -0,35 - -	-0,75 -0,79 -0,71 -0,62	-0,58 ± 0,03
	2007	К Т Б Г	-0,88 -0,85 - -	_0,36 _0,61 _0,77	-0,61 - -0,75 -	-0,75 - -0,72 -0,63	-0,50 -0,61 -	-1,06 -1,06 -0,82 -0,70	-0,71 ± 0,02
		С	_	—	—	—	-0,5	_	
	2008	К Т Б Г	1,00 -0,74 - -	_0,92 _0,96 _1,04	-0,94 -1,0 -	-0,87 - -1,14 -0,09	-0,50 -0,84 -	-0,94 -0,79 -1,07 -0,97	$-0,92 \pm 0,09$
	2009	К Т Б Г	1,56 -0,98 - -		-1,12 - -1,06 -	-0,96 - -1,10 -0,92	-0,9 -0,8 -	-1,11 -0,79 -1,07 -1.05	-1,03 ± 0,1
	2010	К Т Б Г	-1,85 -1,03 - -	_ _0,43 _1,05 _	-1,24 - - -	-1,24 - - -1,17	-1,38 -1,03 -1,11 -	-1,30 -1,29 -1,09 -1,15	-1,22 ± 0,14
		E	-	_	_	_	-0,38	-	
-	2011	К Т Б Г	1,80 1,10 - -	- _ _0,94 _0.75	-1,39 - -0,99 -	-1,18 - - -0.97	-1,35 - -0,97	- - -0,89 -0.88	-1,1 ± 0,22
	2012	К Т Б Г	-1,20 - - -	 	-0,77 _ -1,04 _	-1,01 - - -0,82	-0,70 -1,00 -1,13	-1,45 -1,20 -0,72	-1,02 ± 0,18
	2013	К Т Б Г	-1,26 -0,17 -	_ _0,92 _0,79	-1,27 - -1,0 -	-0,53 - - -1,1	-0,85 -0,26 -1,04 -	-1,19 -1,02 -1,47	-1,00 ± 0,04
	2014	К Т Г	-1,14 -0,82 - -	_ _0,95 _0,65	-0,42 - -1,14 -	-0,37 - - -0,9	-0,41 -0,95 -1,04 -		-0,8 ± 0,17
	2015	К Т Г	-1,00 -1,18 - -	_ _0,38	-0,81 - -1,31 -	-0,41 _ -0,46	-0,3 -1,22 -1,17 -	-1,44 -1,20 -0,60	-0,94 ± 0,34

Азимут		*	I	II	ш	IV	v	VI	ε _{cpAΦ} •10 ⁴
Год	2016	КТБГ	-1,60 -1,25 - -	_ -0,80 -1,22 -0,95	-0,92 - -1,23 -	-0,96 - -1,23 -1,10	-0,84 -1,14 -1,23 -	_ _1,17 _1,21 _0,55	-1,1 ± 0,12
	2017	КТБГ	-1,47 -1,32 -	_0,67 _1,10 _1,13	-0,82 - -1,30 -	-0,94 - -1,20 -1,16	 	_ 	-1,11 ± 0,16
	2018	К Т Г	-1,50 -1,24 -	 	-0,89 - -1,24 -	-1,07 - -1,30 -1,18	-1,25 -1,20 -	_ 	-1,18 ± 0,20
	2019	К Т Г	-1,69 - - -	 	-1,27 - -1,45 -	-1,22 - -1,30 -1,41	-1,45 -1,30 - -	_ 	-1,34 ± 0,18
	2020	К Г	-1,51 -		–1,23 –	-1,08 -1,41	-1,61	-1,42	-1,39 ± 0,22

* Измерения проводились на рудниках, расположенных вблизи городов:

А – Абаза (представлены средние значения $\sigma_{T}+\sigma_{A\Phi}=\sigma_{i\Pi P}-\gamma H$), Б – Березовский, Г – Гай, К – Краснотурьинск, Т – Нижний Тагил;

Е – Европа (проект OPERA), С – США (проект MINOS);

Направления базисов: I – 00-90, II – 200-300, III – 450-750, IV – 800-900, V – 1250-1350, VI – 1560-1600

Заключение

1. Разработан комплекс взаимодополняющих исследований параметров НДС массива горных пород, включающий в себя натурные экспериментальные методы и методы математического моделирования, что повышает эффективность исследования.

2. Наблюдения за изменением НДС массива горных пород во времени позволяют делать прогнозную оценку устойчивости массива, что повышает безопасность ведения горных работ.

3. Анализ результатов, их статистическая обработка и обобщение показали, что в пределах Северного, Среднего и Южного Урала НДС массива горных пород изменяется периодически, совпадая по времени с относительным изменением размеров Солнца.

4. Представлен закон формирования природных напряжений в массиве горных пород, в котором наряду с условно постоянными гравитационно-тектоническими напряжениями присутствует переменная во времени составляющая ($\sigma_{A\Phi}$), вызванная астрофизическими полями и излучениями, одинаково воздействующими на Солнце и Землю.

5. Определено, что относительная деформация Земли и земной коры ($\epsilon_{A\Phi}$) в отдельных циклах достигает величины $\epsilon_{A\Phi} = \pm (2-4) \cdot 10^{-4}$, что приводит к изменению переменной во времени составляющей напряженного состояния массива горных пород ($\sigma_{A\Phi}$), $\epsilon_{A\Phi}$, одинакова для всех континентов и является основным триггером возникновения аварийных ситуаций.

Список литературы

1. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра; 1994. 208 с.

2. Зотеев О.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методам. *Известия вузов. Горный журнал.* 2003;(5):108–115.

3. Скрыпченко В.В. Методика определения напряженного состояния массива пород методом подземного электрического зондирования. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1987;(6):91–97.

4. Криницын Р.В., Зубков А.В., Феклистов Ю.Г. Контроль напряженного состояния горных и строительных объектов полярископом ПШК-С. *Безопасность труда в промышленности*. 2017;(12):22–26. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-12-22-26

5. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2001. 333 с.

6. Зубков А.В. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры. Доклады Академии наук. 2018;483(3):296–298. https://doi.org/10.31857/S086956520003251-9

7. Зубков А.В., Селин К.В., Сентябов С.В.. Закономерности формирования напряженного состояния массива горных пород в верхней части земной коры. Литосфера. 2015;(6):116–129. Режим доступа: https://www.lithosphere.ru/jour/article/ view/163/164

8. Зубков А.В., Сентябов С.В. Деформация земной коры, способы изучения, закономерности, проблемы. Литосфера. 2020;20(6):863–872. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-6-863-872

ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УРО РАН - 60 ЛЕТ

References

1. Vlokh N.P. Rock pressure management in underground mines. Moscow: Nedra; 1994. 208 p. (In Russ.)

2. Zoteev O.V. Modelling of the stress-and-strain state of rock mass using numerical methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*. *Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2003;(5):108–115. (In Russ.)

3. Skrypchenko V.V. A method to determine the stress condition of the rock mass using underground electric sounding. *Fiziko-texhnicheskiye problemy razrabbotki poleznykh iskopaemykh*. 1987;(6):91–97. (In Russ.)

4. Feklistov Yu.G., Zubkov A.V., Krinitsin R.V. Control of Strained Condition of Mining and Construction Objects by Polariscope PShK-S. *Monthly Journal of Research and Production*. 2017;(12):22–26. (In Russ.) https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-12-22-26

5. Zubkov A.V. Geomechanics and Geotechnology. Ekaterinburg: Ural Branch of RAS; 2001. 333 p. (In Russ.)

6. Zubkov A.V. The Law of Formation of the Natural Stress State of the Earth's Crust. *Doklady Akademii nauk*. 2018;483(3):296–298. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S086956520003251-9

7. Zubkov A.V., Selin K.V., Sentyabov S.V. The regularities of rock mass stressed state formation in the upper part of the Earth crust. *Lithosphere (Russia)*. 2015;(6):116–129. (In Russ.) Available at: https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/163/164

8. Zubkov A.V., Sentyabov S.V. Deformation of the Earth's crust: measurement methods, regularities, nature. *Lithosphere (Russia)*. 2020;20(6):863–872. (In Russ.) https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-6-863-872

Информация об авторах

Зубков Альберт Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Криницын Роман Владимирович – заведующий лабораторией геодинамики и горного давления, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Сентябов Сергей Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Селин Константин Владимирович – научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: stress. iqd@mail.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.10.2021 Поступила после рецензирования: 17.11.2021 Принята к публикации: 18.11.2021

Information about the authors

Albert V. Zubkov – Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Roman V. Krinitsyn – Chief of Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Sergey V. Sentyabov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Konstantin V. Selin – Research Associate, Laboratory of Geodynamics and Formation Pressure, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: stress.igd@mail.ru.

Article info

Received: 10.10.2021 Revised: 17.11.2021 Accepted: 18.11.2021