

УДК 622.831.3

DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779

## Методика определения природных напряжений в массиве по деформации карьера с использованием спутниковых навигационных систем

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

Институт горного дела Уральского отделения РАН, 620075, Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Поступила в редакцию 23.11.2018 г., принята к печати 28.01.2019 г.

**Объект исследований.** Относительная деформация массива горных пород, полученная на Урале на глубинах ниже 500 м, т.е. ниже зоны дезинтеграции массива, при использовании традиционных геодезических методов измерения позволяет внести поправку в результаты определения базиса и получить его истинную величину. **Материалы и методы исследования.** Разработан метод определения природных напряжений, базирующийся на физическом законе, в котором утверждается, что природное напряженное состояние земной коры формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами Земли, а также астрофизическими силами, вызванными физическими процессами в космосе. **Результаты.** Основной вклад в формирование напряженного состояния вносят гравитационная и астрофизическая составляющие. Значение астрофизической составляющей изменяется во времени с цикличностью до 12 лет и на глубинах более 500 м достигает десятков МПа, а тектоническая составляющая не превышает в среднем единицы МПа. Экспериментально полученная деформация земной коры, а именно литосферных плит в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах, а также континентальных плит в Азии и на Урале, свидетельствует об их одинаковой объемной деформации во всех регионах мира. **Выводы.** Основываясь на экспериментальных данных о циклическом изменении линейных параметров земной коры, сделан вывод о том, что существует погрешность определения координат спутниковыми навигационными системами (СНС). Значительное увеличение астрофизической составляющей напряжений за короткий промежуток времени в 2–3 года в 11-м цикле является главной причиной активизации землетрясений и разрушения конструкций, возведенных в массиве горных пород.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, деформация, земная кора, геологические циклы, астрофизические напряжения, массив горных пород

## A technique for determination of natural stresses in rock masses by surface deformation using satellite navigation systems

Albert V. Zubkov, Sergei V. Sentyabov, Konstantin V. Selin

The institute of Mining, Ural Branch of RAS, 58 Mamin-Sibiryak st., Ekaterinburg, 620075 Russia,  
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Received 23.11.2018, accepted 28.01.2019

**Research subject.** The relative deformation of rock masses, which was obtained in the Urals at depths below 500 m, i.e. below the zone of massif disintegration, through the use of traditional geodetic measurement methods, allows correction of the results of determining the massif basis to obtain its true value. **Materials and methods.** A method for determining natural stresses was developed on the basis of a physical law stating that the natural stress state of the Earth's crust is formed as a result of the application of stress fields due to the gravitational and tectonic forces of the Earth, as well as astrophysical forces caused by physical processes in space. **Results.** The Earth's stress state is largely formed by the contribution of the gravitational and astrophysical components. The value of the astrophysical component varies in time with a cycle of up to twelve years and reaches tens of MPa at depths of more than 500 meters, while the tectonic component, on average, does not exceed the value of 1 MPa. The experimentally obtained deformation of the Earth's crust, i.e. lithospheric plates in the Pacific, Indian and Atlantic oceans, as well as continental plates in Asia and the Urals, indicates their identical and volumetric deformation in all regions of the world. **Conclusions.** On the basis of experimental data on a cyclic change in the linear parameters of the Earth's crust, it is concluded that satellite navigation systems determine geo-

**Для цитирования:** Зубков А.В., Сентябов С.В., Селин К.В. (2019) Методика определения природных напряжений в массиве по деформации карьера с использованием спутниковых навигационных систем. *Литосфера*, 19(5), 767-779. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779

**For citation:** Zubkov A.V., Sentyabov S.V., Selin K.V. (2019) A technique for determination of natural stresses in rock masses by surface deformation using satellite navigation systems. *Litosfera*, 19(5), 767-779. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779

© А.В. Зубков, С.В. Сентябов, К.В. Селин, 2019

graphical coordinates with an error. A significant increase in the astrophysical component of stresses over a short period of 2-3 years in the eleven-year cycle is the main reason for the activation of earthquakes and the destruction of structures constructed in the rock environment.

**Keywords:** stress-strain state, deformation, crust, geological cycles, astrophysical stresses, rock mass

#### Acknowledgements

The research was carried out on the topic of state task No. 0405-2019-0007.

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая потребность в рудном сырье обуславливает интенсификацию подземных и открытых горных работ при отработке месторождений Российской Федерации, в том числе и мощных крутопадающих залежей. Это обстоятельство приводит к ускоренному росту глубины разработки и возникновению проблем обеспечения устойчивости конструктивных элементов систем разработки и, конечно, безопасности геотехнологий.

Обоснование спускового механизма разрушения массива при ведении открытых и подземных горных работ базируется на знании природного поля напряжений на месторождении, концентрации этих напряжений в конструктивных элементах применяемых систем разработки в соответствии с геомеханическими закономерностями и обоснованными механизмами нарушения целостности массивов. В настоящее время существует ряд методов крупномасштабного исследования напряженно-деформированного состояния массива на месторождениях, где ведутся открытые работы, которые не в полной мере удовлетворяют исследованиям.

Исследование природного напряженного состояния массива горных пород с 60-х гг. прошлого века и по настоящее время во всех регионах мира проводится на подземных рудниках. Между тем открытые горные работы ведут в карьерах глубиной сотни метров и устойчивость бортов в этих условиях напрямую связана с напряженным состоянием массива горных пород. Сложность решения этой задачи объясняется отсутствием доступа исследователей к участкам массива горных пород вне зоны влияния очистных работ, где обычно целесообразно производить измерения. В зоне открытых горных работ практически нет подходящих горных выработок. Этим и объясняется необходимость разработки нового метода, который позволил бы выполнить поставленную задачу.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение природного напряженного состояния массива горных пород производим на основании нового физического закона, в котором утверждается, что природное напряженное состоя-

ние земной коры формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами Земли, а также астрофизическими силами, вызванными физическими процессами в космосе, и оно представлено нормальными компонентами тензора напряжений [Зубков, 2016, 2018]:

$$\sigma_z^{\Pi} = -\gamma H + \sigma_{zm} + \sigma_{\Lambda\Phi}, \quad (1)$$

$$\sigma_x^{\Pi} = -\lambda\gamma H + \sigma_{xm} + \sigma_{\Lambda\Phi}, \quad (2)$$

$$\sigma_y^{\Pi} = -\lambda\gamma H + \sigma_{ym} + \sigma_{\Lambda\Phi}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{zm}$ ,  $\sigma_{xm}$ ,  $\sigma_{ym}$  – составляющие тектонических напряжений, остающихся неизменными длительное время (десятки лет), МПа;

$$\sigma_{ZAA, X\Lambda\Phi, YAA} = \sum_{t=K21}^{K12} \sigma_{i(t)}.$$

суммарный вклад в напряженное состояние массива горных пород переменных физических процессов космоса различных классов (астрофизических явлений) со средней продолжительностью: K21 – 160 мин, K20 – 1 день, K19 – 14 дней, K18 – 3 мес., K17 – 1 год, K16 – 3.5 года, K15 – 11 лет, K14 – 90 лет, K13 – 200 лет и т.д.

Если ориентироваться на максимально сложный вариант решения задачи, то необходимо определить 9 составляющих напряжений, найти закономерность их влияния на деформацию прибортовых массивов карьера, просуммировать эти деформации и сравнить суммарные значения с деформациями, полученными при использовании спутниковой системы GPS, за исследуемый отрезок времени.

Для того чтобы решить эту задачу, необходимо проанализировать поведение и влияние каждой составляющей на результаты, полученные мировой наукой. При этом важно обратить внимание на следующие направления исследований.

1. Результаты определения природных напряжений в целом и их отдельных составляющих.
2. Закономерности изменения упругих характеристик массива горных пород.
3. Закономерности деформирования приборто-

вой зоны под влиянием изменения каждой составляющей природных напряжений.

4. Возможности спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС фиксировать деформации массива горных пород.

В любом случае эту сложнейшую задачу можно решить только при каких-то допущениях и аналогиях, которые могут быть скорректированы при контрольном сравнении расчетных и экспериментально измеренных напряжений и деформаций на конкретном месторождении. Это позволит надежно обосновать отдельные элементы природных напряжений и не только использовать их в горной практике в настоящее время, но и делать прогноз на будущее.

Средние значения горизонтальных составляющих природных напряжений в различных регионах мира получены в ходе анализа результатов экспериментальных данных на рудниках. Данные по региону выражены эмпирической зависимостью изменения средних напряжений с глубиной и представлены в табл. 1 [Zubkov, Sentyabov, 2014].

Для получения средних напряжений на горизонте необходимо было сделать несколько десятков измерений, например на Урале – от 10 до 50. Таким образом, в анализе использовано несколько десятков тысяч измерений при суммарном числе горизонтов 212.

Средние значения горизонтальных напряжений по регионам мира представлены зависимостью

$$\sigma_{\text{ср}} = -(11.1 + 0.028H) \text{ МПа}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{Тср}} + \sigma_{\text{АФср}} = -11.1 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{Зср}} = -0.028H \text{ МПа}$ ,  $H$  – глубина,  $\gamma = 0.028 \text{ Мн/м}^2$  – объемный вес,  $\sigma_{\text{Тср}}$  – тектоническая составляющая.

Если принять результаты исследований В.Н. Родионова [1996], который считает, что в земной коре, при медленных ее тектонических движениях, касательные напряжения не будут превышать

$$\frac{\sigma_{\text{гор}} - \gamma H}{2} = -0.6 \text{ МПа}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{гор}} + \gamma H = \sigma_{\text{Т}} = -1.2 \text{ МПа}$ , то:

$$\sigma_{\text{АФср}} = -11.1 - (-1.2) \approx -10 \text{ МПа},$$

т.е. они могли в зависимости от времени изменяться от 0 до  $-20 \text{ МПа}$ .

Закономерности изменения упругих характеристик массива скальных пород в зависимости от размера оцениваемого участка и учета иерархической блочности пород можно найти, принимая во внимание следующее.

В работе В.Н. Опарина и М.В. Курленя [1994] показано, что геоблок ранга  $p$  может вмещать линейно  $2-5$  блоков ранга  $p+1$ , т.е. коэффициент вло-

**Таблица 1.** Величины средних горизонтальных природных напряжений в регионах мира, МПа

**Table 1.** Values of average horizontal natural stresses in regions of the world, MPa

Кол-во горизонтов измерений	Регион	$\sigma_{\text{ср}}$
58	Урал	$-(16.0 + 0.03H)$
16	Скандинавия	$-(17.3 + 0.03H)$
13	Канада	$-(12.0 + 0.035H)$
10	США	$-(15.0 + 0.022H)$
12	Южная Африка	$-(0.0 + 0.024H)$
20	Китай	$-(6.0 + 0.026H)$
26	Австралия	$-(8.0 + 0.024H)$
57	Япония	$-(16.0 + 0.026H)$

жения  $\lambda = 2-5$ , но наиболее верную оценку состояния массива можно сделать при  $\lambda = 5$ . В результате моделирования и расчетов установлено, что в этом случае справедлива зависимость А.В. Зубкова [2001]:

$$E_{\text{М}} = 0.93^n E_0, \quad (6)$$

где  $E_{\text{М}}$  – модуль упругости массива,  $E_0$  – модуль упругости структурного блока,  $n$  – число рангов геоблоков на оцениваемом участке.

Следовательно, при размере структурного блока  $0.5$  м его модуль упругости соответствует величине, полученной при испытании образцов ( $E_0$ ), а геоблок будет иметь линейный размер, равный пяти структурным блокам ( $L_1 = 2.5$  м), и модуль упругости

$$E_{\text{М}} = 0.93^1 E_0. \quad (7)$$

Модуль упругости массива следующего геоблока размером  $L_2 = 12.5$  м составит

$$E_{\text{М}} = 0.93^2 E_0, \text{ т.е. } E_{\text{М}}/E_0 = 0.86. \quad (8)$$

Аналогично

при  $L_3 = 62.5$  м  $E_{\text{М}} = 0.93^3 E_0$ ,  $E_{\text{М}}/E_0 = 0.8$ ,  
при  $L_4 = 310$  м  $E_{\text{М}}/E_0 = 0.75$ ,  
при  $L_5 = 1500$  м  $E_{\text{М}}/E_0 = 0.7$ ,  
при  $L_5 = 7.500$  м  $E_{\text{М}}/E_0 = 0.65$ .

Опытная проверка данной методики проводилась в рудниках Урала в магматических и метаморфических породах на подземных геодинамических полигонах размером  $200-600$  м при измерении НДС массива на базах  $20-50$  м [Зубков, 2001]. Средние значения модуля упругости массива ( $E_{\text{М}}$ ) по от-

ношению к результатам, полученным при испытании образцов ( $E_0$ ), описываются зависимостью

$$E_m = (0.65-0.80)E_0. \quad (9)$$

Многочисленные решения объемных геомеханических задач по определению НДС прибортового массива горных пород при раздельном действии составляющих природных напряжений [Зубков, 2001] показали следующее.

1. При включении в граничные условия только гравитационных напряжений с развитием выемки карьеров в приповерхностной зоне массива горных пород наблюдаются деформации расширения.

2. При действии тектонических напряжений карьер сжимается.

3. При действии астрофизической составляющей деформация карьера соответствует знаку напряже-

ний. Если значение  $\sigma_{\text{АФ}}$  отрицательное, то карьер сжимается, а если положительное – карьер расширяется.

Главная проблема при разработке методики определения природных напряжений в массиве горных пород по деформации карьера с использованием GPS состоит в определении астрофизической составляющей деформации массива.

Спутниковые навигационные системы GPS и ГЛОНАСС основаны на неизменности размеров Земли, и их математический аппарат независимо от времени измерения выдает неизменное расстояние между пунктами:  $B_{2002} = \text{const}$ , и относительную деформацию измеряемых базисов в пределах погрешности метода, т.е. близкую к нулю [Генике, Побединский, 1999]. Это подтверждают результаты измерений деформаций земной коры на полигонах в Байкало-Монгольском и Уральском регионах (табл. 2) [Зубков, 2002; Лухнев и др., 2010].

**Таблица 2.** Деформация земной коры по данным СНС (GPS)

**Table 2.** Deformation of the earth's crust according to SNS (GPS)

№ п.п.	Территория 43°–54° СШ 88°–110° ВД Базисы 100–500 км и более	Скорость деформации, мм/год	Относительная деформация $\varepsilon \cdot 10^8$	Относительная деформация $\varepsilon \cdot 10^8$
			за 7 лет (1994–2001 гг)	за 3 года (2001–2004 гг)
1	Гобийский Алтай-Хангай	$-21.9 \cdot 10^{-9}$ $-25.8 \cdot 10^{-9}$	–15.3 –18.0	–6.6 –7.7
2	Север Хангая	$-11 \cdot 10^{-9}$	–7.7	–3.3
	Центральная часть Хангая	$+7.7 \cdot 10^{-9}$	–5.3	+2.3
3	Южная часть Монгольского Алтая:	$+9.6 \cdot 10^{-9}$ $-12.6 \cdot 10^{-9}$	–2.9	–3.8
4	Долина Больших озер:	$+12.3 \cdot 10^{-9}$ $-21.5 \cdot 10^{-9}$	+8.6	–6.4
5	Предгория Хангая	$-11.2 \cdot 10^{-9}$	+1.0	–3.4
	Зона Байкальского разлома	$+14 \cdot 10^{-9}$	+2.0	–4.2
6	Структура сжатия район Хамар-Дабана	$-23.6 \cdot 10^{-9}$	+11.2	–5.1
		$+16.1 \cdot 10^{-9}$	+4.0	–7.1
7	Структура растяжения центральной части Байкальского рифта:	$+(14.6...33.4) \cdot 10^{-9}$	+23.4	+9.8
		$-(1.4 \div 17.6) \cdot 10^{-9}$	–12.3	–1.0
8	Урал. Полигон около г. Екатеринбург. Базисы 2...5 км (2003–2010 гг)			–(340...920)

Примечание. Знаком “–” показана деформация сжатия, знаком “+” показана деформация растяжения.

Note. “–” is the compression deformation, “+” is the stretching deformation.

Следовательно, с точки зрения принятой модели, положение пунктов коррекции орбит спутников GPS, расположенных на вулканических островах в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах, т.е. на океанических литосферных плитах, и пунктов на континентальных плитах в Азии и на Урале не изменяется во времени десятки лет, т. е. относительная деформация земной коры, по данным GPS, равна нулю:  $\varepsilon_{GPS} \approx 0$ .

При реальной деформации земной коры в рассматриваемый момент времени  $\varepsilon_{pt}$  получаем

$$\varepsilon_{pt} + \varepsilon_{nt} = \varepsilon_{GPS} = 0,$$

где  $\varepsilon_{pt}$  – поправка, которая вводит GPS.

Если  $\varepsilon_{nt}$  едина для всей Земли, то и реальная деформация земного фундамента в 11-летних циклах ее изменения на всех литосферных плитах одинакова, т.е.  $\varepsilon_{pt} = \text{const}$  [Зубков, 2013].

В табл. 3 представлены результаты 13-летнего периода измерения относительной деформации массива горных пород на базисах подземных геодинимических полигонов до 50 м, расположенных на рудниках Урала и Сибири. Глубина заложения полигонов от –460 до –830 м. Полученные относительные деформации массива горных пород были названы нами астрофизическими ( $\varepsilon_{AF}$ ), поскольку выявлена их 11-летняя цикличность, совпадающая в экстремумах с тем же циклом изменения солнеч-

**Таблица 3.** Результаты измерения относительной деформации массива горных пород на рудниках Урала, а также США и Европы

**Table 3.** The results of measuring the relative deformation of the rock mass in the mines of the Urals, as well as the United States and Europe

Год	Азимут*	I	II	III	IV	V	VI	$\varepsilon_{срАФ} \cdot 10^4$
1990	A							0
1992	A							–0.35
1993	A							–0.49
1995	A							–1.32
1997	A							–1.29
1998	T	–2.13	–1.87	–	–	–1.88	–1.99	$–1.97 \pm 0.12$
1999	T	–0.72	–0.5	–	–1.94	–0.55	–0.6	$–1.08 \pm 0.31$
	Г	–	–0.64	–	–2.02	–	–	
2001		0	0	0	0	0	0	0
2002	T	–0.18	–0.19	–	–	–0.24	–0.7	$–0.36 \pm 0.04$
	Г	–	–0.49	–	–0.11	–	–0.3	
2003	K	–0.17	–	–0.15	–0.16	–0.16	–0.65	$–0.31 \pm 0.13$
	T	–0.15	–0.06	–	–	–0.3	–0.79	
	Б	–	–0.56	–0.44	–0.51	–	–0.39	
	Г	–	–0.47	–	–0.19	–	–0.33	
2004	K	–	–	–0.37	–0.31	–0.20	–0.84	$–0.45 \pm 0.12$
	T	–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	K	–	–	–0.49	–0.53	–0.35	–0.92	$–0.53 \pm 0.06$
	T	–0.47	–0.36	–	–	–0.45	–0.79	
	Б	–	–0.53	–0.6	–0.62	–	–0.75	
	Г	–	–0.66	–	–0.47	–	–0.52	
2006	K	–0.77	–	–0.28	–0.62	–0.56	–0.75	$–0.58 \pm 0.03$
	T	–0.65	–0.35	–	–	–0.35	–0.79	
	Б	–	–0.4	–0.59	–0.65	–	–0.71	
	Г	–	–0.75	–	–0.50	–	–0.62	
2007	K	–0.88	–	–0.61	–0.75	–0.5	–1.06	$–0.71 \pm 0.02$
	T	–0.85	–0.36	–	–	–0.61	–1.06	
	Б	–	–0.61	–0.75	–0.72	–	–0.82	
	Г	–	–0.77	–	–0.63	–	–0.7	
	C	–	–	–	–	–0.5	–	



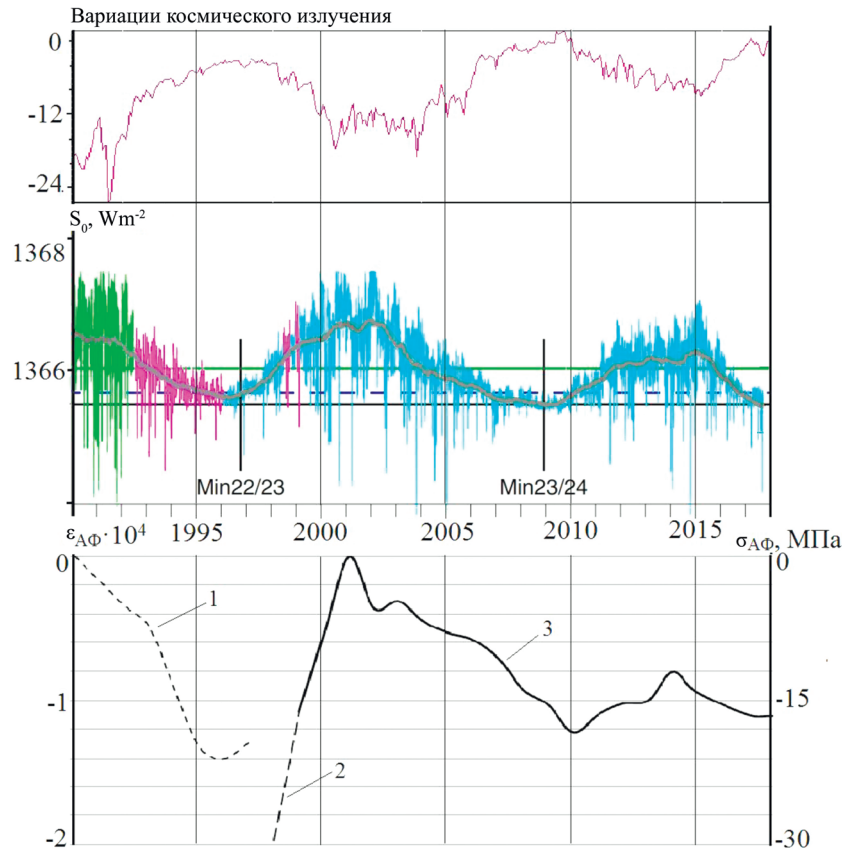
Таблица 3. Окончание

Table 3. Ending

Год	Азимут*	I	II	III	IV	V	VI	$\varepsilon_{\text{срАФ}}, 10^4$
2008	К	1.00	–	–0.94	–0.87	–0.50	–0.94	$-0.92 \pm 0.09$
	Т	–0.74	–0.92	–	–	–0.84	–0.79	
	Б	–	–0.96	–1.0	–1.14	–	–1.07	
	Г	–	–1.04	–	–0.9	–	–0.97	
2009	К	1.56	–	–1.12	–0.96	–0.9	–1.11	$-1.03 \pm 0.1$
	Т	–0.98	–0.67	–	–	–0.8	–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	–1.3	$-1.22 \pm 0.14$
	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	–1.8	–	–1.39	–1.18	–1.35	–	$-1.1 \pm 0.22$
	Т	–1.1	–	–	–	–	–	
	Б	–	–0.94	–0.99	–	–	–0.89	
	Г	–	–0.75	–	–0.97	–0.97	–0.88	
2012	К	–1.2	–	–0.77	–1.01	–0.7	–	$-1.02 \pm 0.18$
	Т	–	–	–	–	–1.0	–1.45	
	Б	–	–1.12	–1.04	–	–1.13	–1.2	
	Г	–	–0.62	–	–0.82	–	–0.72	
2013	К	–1.26	–	–1.27	–0.53	–0.85	–	$-1.00 \pm 0.04$
	Т	–0.17	–	–	–	–0.26	–1.19	
	Б	–	–0.92	–1.0	–	–1.04	–1.02	
	Г	–	–0.79	–	–1.1	–	–1.47	
2014	К	–1.14	–	–0.42	–0.37	–0.41	–	$-0.8 \pm 0.17$
	Т	–0.82	–	–	–	–0.95	–1.15	
	Б	–	–0.95	–1.14	–	–1.04	–0.47	
	Г	–	–0.65	–	–0.9	–	–0.7	
2015	К	–1.0	–	–0.81	–0.41	–0.3	–	$-0.94 \pm 0.34$
	Т	–1.18	–	–	–	–1.22	–1.44	
	Б	–	–1.15	–1.31	–	–1.17	–1.2	
	Г	–	–0.38	–	–0.46	–	–0.6	
2016	К	–1.6	–	–0.92	–0.96	–0.84	–	$-1.1 \pm 0.12$
	Т	–1.25	–0.8	–	–	–1.14	–1.17	
	Б	–	–1.22	–1.23	–1.23	–1.23	–1.21	
	Г	–	–0.95	–	–1.10	–	–0.55	
2017	К	–1.49	–	–0.82	–0.9	–	–	$-1.11 \pm 0.16$
	Т	–1.32	–0.67	–	–	–1.14	–	
	Б	–	–1.10	–1.29	–1.19	–	–	
	Г	–	–1.12	–	–1.11	–	–1.21	
2018	К	–1.61	–	–0.89	–0.92	–	–	$-1.15 \pm 0.20$
	Т	–1.24	–0.86	–	–	–1.18	–	
	Б	–	–1.04	–1.30	–1.29	–	–	
	Г	–	–1.15	–	–1.17	–	–1.20	

Примечание. \*Измерения проводились на рудниках, расположенных вблизи городов: А – Абазы (представлены средние значения  $\sigma_T + \sigma_{\text{АФ}} = \sigma_{\text{ИПР}} - \gamma H$ ), Б – Березовский, Г – Гай, К – Краснотурьинск, Т – Нижний Тагил, Е – Европа (проект OPERA), С – США (проект MINOS). Направления базисов: I – 0–9°, II – 20–30°, III – 45–75°, IV – 80–90°, V – 125–135°, VI – 156–160°. Прочерк – отсутствие выработок по данному азимуту.

Note. \*Measurements were taken at mines located near cities: A – Abaza (average values of  $\sigma_T + \sigma_{\text{АФ}} = \sigma_{\text{ИПР}} - \gamma H$  are presented), B – Berезovsky, G – Guy, K – Krasnoturinsk, T – Nizhny Tagil, E – Europe (OPERA project), C – USA (MINOS project). Directions of the bases: I – 0–9°, II – 20–30°, III – 45–75°, IV – 80–90°, V – 125–135°, VI – 156–160°. Dash – no outputs of this azimuth.



**Рис. 1.** Изменение средних значений параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород ( $\sigma_{AФ}$  и  $\varepsilon_{AФ}$ ) на Урале на фоне изменения излучающей способности Солнца  $S_0$  и интенсивности космического излучения.

1 – Абаза; 2 – Нижний Тагил; 3 – Березовский, Гай, Краснотуринск, Нижний Тагил.

**Fig. 1.** Changes in the average values of the parameters of the stress-strain state of the array of rocks ( $\sigma_{AФ}$  and  $\varepsilon_{AФ}$ ) in the Urals against the background of a change in the emissivity of the Sun  $S_0$  and the intensity of cosmic radiation.

1 – Abaza; 2 – Nizhny Tagil; 3 – Berezovsky, Guy, Krasnoturinsk, Nizhny Tagil.

ной постоянной ( $S_0$ ) и интенсивности космического излучения (%) [Зубков, 2018] (рис. 1). Это позволяет утверждать, что природа деформационных процессов может быть больше связана с процессами в космосе<sup>1</sup> [Lean, 2010], а не на Земле<sup>2</sup> [Штенгелов, 1982].

Для того чтобы продолжать успешно использовать в народном хозяйстве очень технологичные СНС, необходимо своевременно вносить поправки в результаты, выдаваемые этими системами. Для определения длины искомого базиса  $B_i$  необходимо базис, определенный при использовании GPS, умножить на поправочный коэффициент в соответствии с зависимостью [Зубков, 2017]:

$$B_i = B_{GPS}(1 + \varepsilon_{AФ(i)}). \quad (10)$$

Математический аппарат [Зубков, 2016] базируется на законе Гука. Массив считается упругим, если

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}, \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}, \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}. \quad (11)$$

При наложении компонент деформаций получаем полную деформацию массива  $\varepsilon_m$ :

$$\varepsilon_{xm} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ym} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \quad (13)$$

<sup>1</sup> Solar Constant. Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present (<http://pmodwrc.ch/pmod/php?topic=tsi/composite/solar> Constant: 25.12.2014).

<sup>2</sup> Найманбаев М. О парадоксах в Солнечной системе (<http://www.proza.ru/2010/03/02/759>).

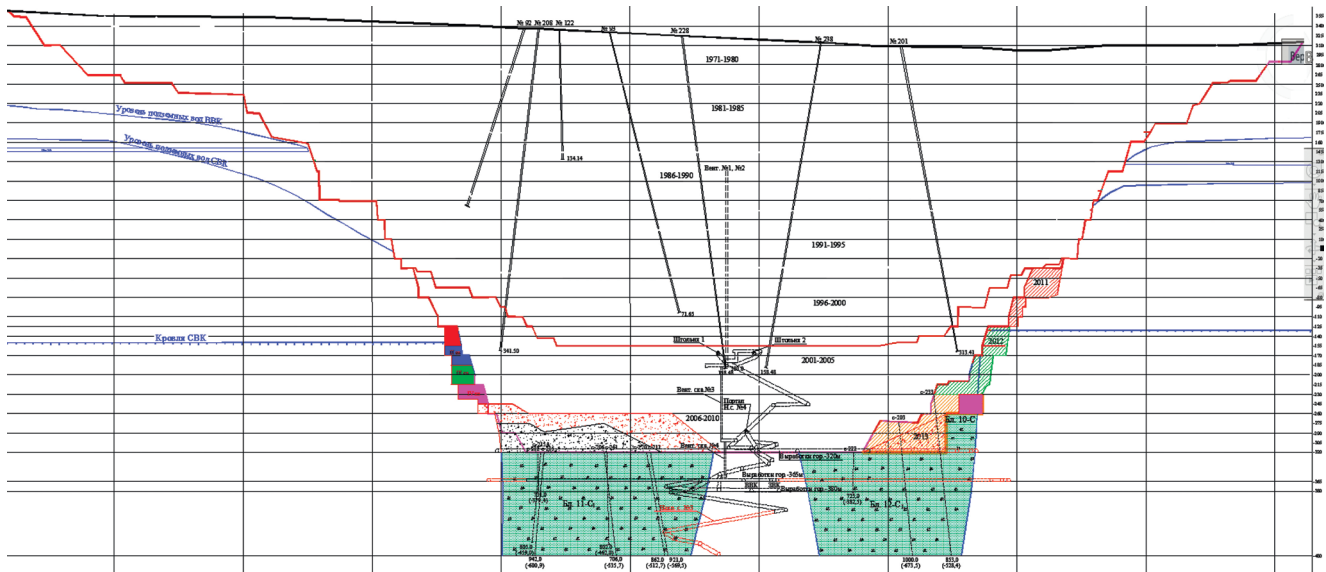


Рис. 2. План развития горных работ рудника Удачный

Fig. 2. Mining development plan of Udachnyi mine.

$$\varepsilon_{zm} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]. \quad (14)$$

При измерении деформации базиса

$$\varepsilon_m = \frac{I_m}{B}, \quad (15)$$

где  $B$  – длина измеряемого базиса,  $I_m$  – деформация базиса.

Отсюда при

$$\Delta\sigma_{xA\Phi} = \Delta\sigma_{yA\Phi} = \Delta\sigma_{zA\Phi} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{xm} = \varepsilon_{ym} = \varepsilon_{zm} = \frac{\Delta\sigma_{A\Phi}}{E_m} (1 - 2\mu) \quad (17)$$

$$\text{или} \quad \Delta\sigma_{xA\Phi} = \Delta\sigma_{yA\Phi} = \Delta\sigma_{zA\Phi} = \frac{\varepsilon_i \cdot E_m}{(1 - 2\mu)},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона массива.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Отработка методики проведена на примере развития горных работ на руднике Удачный в период с 2000 по 2009 г. (рис. 2 и 3).

Карьер находится в толще осадочных пород, представленных известняками и доломитами общей мощностью 2500 м ( $E_{0(0)} = 0.55 \cdot 10^5$  МПа и  $\mu = 0.26$ ), которую подстилают метаморфические

породы фундамента архейского возраста, представленные кристаллическими сланцами и гранито-гнейсами ( $E_{0(\Phi)} = 0.8 \cdot 10^5$  МПа и  $\mu_{(\Phi)} = 0.26$ ).

При деформации земной коры архейский фундамент и осадочная толща, деформируясь одинаково, должны иметь разное напряженное состояние, обратно пропорциональное их модулю упругости. Следовательно, если в фундаменте будут действовать  $\sigma_{A\Phi(\Phi)}$  (18), то в осадочной толще  $\sigma_{A\Phi(0)}$  будет иметь вид (19):

$$\sigma_{A\Phi(\Phi)} = \frac{\sigma_{A\Phi(0)} E_{\Phi} (1 - 2\mu_0)}{E_0 (1 - 2\mu_{\Phi})}, \quad (18)$$

$$\sigma_{A\Phi(0)} = \frac{\sigma_{A\Phi(\Phi)} E_0 (1 - 2\mu_{\Phi})}{E_{\Phi} (1 - 2\mu_0)}. \quad (19)$$

Исходной территорией, где детально исследованы  $\sigma_{A\Phi}$  и  $\varepsilon_{A\Phi}$ , является Урал. Среднее значение модуля упругости  $E_y$  принято равным  $0.93^6 E_0$ .

В 2009 г.  $\sigma_{A\Phi} = -15.0$  МПа,  $E_0 = 1.0 \cdot 10^5$  МПа. По зависимостям (18) и (19) получаем:  $\sigma_{A\Phi(\Phi)} = -12.0$  МПа,  $\sigma_{A\Phi(0)} = -8.2$  МПа.

В прибортовом массиве были заложены реперы (см. рис. 3) [Сашурин, Балек, 2014]:

по оси X: 2–1, 2–3 и 5–1, 5–3;

по оси Y: 1–1, 1–4 и 4–6, 4–7.

Экспериментально определенные изменения длин базисов  $\Delta B$  между реперами за период 2000–2009 гг. с учетом того, что в 2000 г.  $\varepsilon_{A\Phi} = 0$ , а в 2009 г.  $\varepsilon_{A\Phi} = -1.03 \cdot 10^{-4}$ , приведены в табл. 4 и 5.



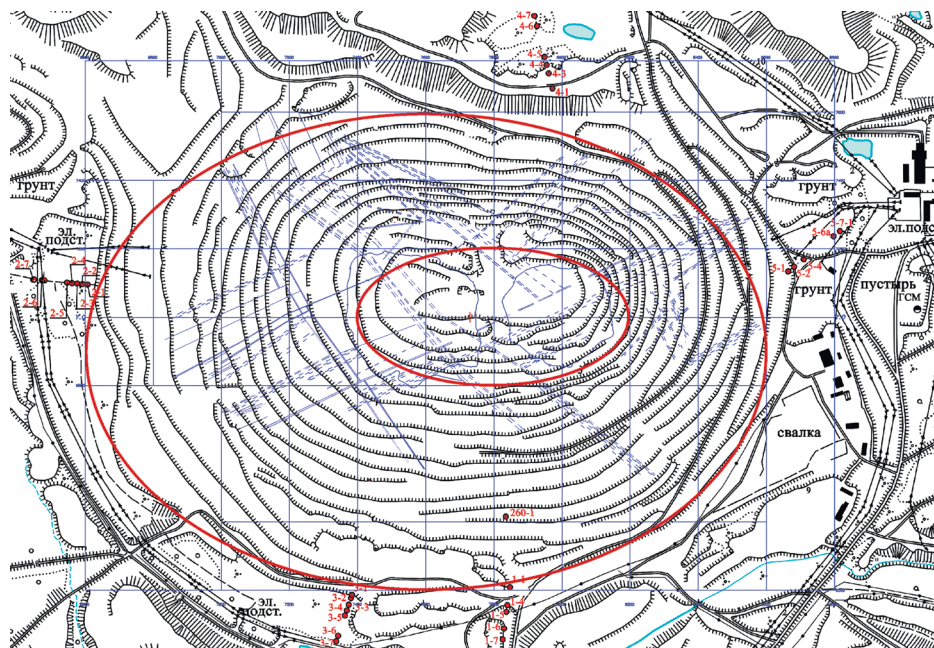


Рис. 3. План поверхности рудника Удачный с нанесенным контуром карьера.

Fig. 3. Mine surface plane Udachnyi mine with the contour of the open pit.

Исследование закономерностей влияния различных составляющих природных напряжений на деформацию карьера проводилось на основе численного моделирования НДС массива. Моделирование выполнено с использованием программного комплекса Fem, основанного на методе конечных элементов (МКЭ).

Решались упругие задачи в объемной постановке. В качестве граничных условий при расчетах использовались различные варианты нагружения модели. В качестве первого варианта рассматривалась модель с действием первоначальных напряжений, вызванных только собственной массой налегающих пород. Во втором варианте модель нагру-

жалась только тектоническими напряжениями по обоим направлениям на 10 МПа, это сделано с целью получить значения напряжений по двум осям X и Y – для определения средних напряжений. Определение азимута действия главных сжимающих напряжений в задаче не предусматривалось.

Физико-механические свойства массива горных пород, использованные при моделировании, приведены в табл. 6.

Глубина и радиус дна карьера во всех рассматриваемых вариантах расчета были приняты фактические в соответствии с календарным планом на момент отработки в 2000 г. (глубина 485 м) и на момент отработки в 2010 г. (глубина 650 м). Второй красный

Таблица 4. Изменение базисов ΔБ между реперами на борту карьера с 2000 по 2009 г.

Table 4. Change of bases ΔB between the reference points on board the quarry from 2000 to 2009

Год	Р <sub>п</sub>	Координаты, м	Приведенные координаты, м	Р <sub>п</sub>	Координаты, м	Приведенные координаты, м	Б, м	ΔБ <sub>2009-2000</sub>
2000	2–1	46606.668		5–1	48662.519		2055.851	–0.253
	2–2	46591.228		5–3	48692.928		2116.451	
	2–3	46576.477						
2009	2–1	46606.710	46601.238	5–1	48662.549	48656.836	2055.598	–0.282
	2–2	46591.277	46585.807	5–3	48692.925	48687.208	2116.169	
	2–3	46576.508	46571.040					
2000	1–1	46208.995		4–6	47852.552		1643.557	–0.292
	1–4	46156.893		4–7	47882.523		1725.630	–0.268
2009	1–1	46209.045	46203.620	4–6	47852.503	47846.885	1643.265	
	1–4	46156.920	46156.501	4–7	47882.484	47876.863	1725.362	

Таблица 5. Характеристики состояния массива горных пород

Table 5. Characteristics of the state of the rock mass

№ п.п.	Характеристики состояния массива	На 2000-й г., $\sigma_{\text{АФ}} = 0, \varepsilon_{\text{АФ}} = 0$	На 2009-й г., $\sigma_{\text{АФ}} \neq 0, \varepsilon_{\text{АФ}} \neq 0$
1	Размер карьера по поверхности, м – по оси X – по оси Y	2000 1400	2000 1400
2	Глубина карьера, м	485	650
3	Модуль упругости пород в образце $E_0$ , МПа То же в массиве $E_m = A^n \cdot E_0$	$0.55 \cdot 10^5$ $0.93^6 \cdot E_0 = 0.36 \cdot 10^5$	$0.55 \cdot 10^5$ $0.36 \cdot 10^5$
4	Коэффициент Пуассона $\mu$	0.26	0.26
5	$\sigma_z^{\text{П}} = -\gamma H$	–12.6	–16.9
6	$\lambda \gamma H \neq$ при $\lambda = 1$	–12.6	–16.9
7	$\sigma_{\text{хТ}}$ , МПа	–1,0	–1,0
8	$\sigma_{\text{уТ}}$ , МПа	–1,0	–1,0
9	$\sigma_{\text{хАФ}} = \sigma_{\text{уАФ}} = \sigma_{\text{АФ}}$ , МПа	0.0	–8,2
10	$\varepsilon_{\text{хАФ}} = \varepsilon_{\text{уАФ}} = \varepsilon_{\text{АФ}}$	0.0	$-1.03 \cdot 10^{-4}$
11	Базис между реперами на борту карьера $B_{\text{х,у}} = B_{\text{GPS}}(1 - \varepsilon_{\text{АФ}})$ , м – по оси X – $B_x(2-1...5.1)$ $B_x(2-3...5.3)$ – по оси Y – $B_y(1-1...4-6)$ $B_y(1-4...4-7)$	2055.851 2116.451 1643.557 1725.630	2055.598 2116.169 1643.265 1725.362
12	Изменение длины базисов с 2000 по 2009 г. по GPS, м $\Delta B_{\text{х(GPS)}}$ $\Delta B_{\text{у(GPS)}}$	–0.268 –0.280	
13	Изменение длины базисов от $\sigma_{\text{АФ}}$ с 2000 по 2009 г. по GPS, м $\Delta B_{\text{х(АФ)}}$ $\Delta B_{\text{у(АФ)}}$	–0.436 –0.451	
14	Изменение длины базисов от $\sigma_z$ , м $\Delta B_{\text{х(гН)}}$ при $H = 485$ на 2000 г. $\Delta B_{\text{у(гН)}}$ при $H = 485$ на 2000 г. $\Delta B_{\text{х(гН)}}$ при $H = 650$ на 2009 г. $\Delta B_{\text{у(гН)}}$ при $H = 650$ на 2009 г.	0.245 0.288	+0.413 +0.459
15	$\Delta B_{\text{х(гН)}}$ с 2000 по 2009 г., м $\Delta B_{\text{у(гН)}}$ с 2000 по 2009 г., м	+0.168 +0.171	

Таблица 6. Физико-механические свойства пород и руд

Table 6. Physical and mechanical properties of rocks and ores

Вид среды	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Деформационные свойства		$\varphi$ , град	С, МПа
		10 <sup>4</sup> МПа	$\mu$		
Породный массив	2.7	7.0	0.3	34	9

контур показывает углубку карьера на рис. 2. В качестве результатов расчетов выводились полные смещения по поверхности в виде изолиний с их привязкой к имеющейся сети реперов для оценки расчетных смещений с полученными результатами замеров в реальных условиях в эти интервалы времени. Результаты представлены в табл. 7. Математическое моделирование проводилось для однородного изотропного массива с модулем упругости 70 000 МПа.

Смещение реперов от углубки карьера при действии первоначальных напряжений, вызванных только собственной массой налегающих пород, составило  $\Sigma U_x = 0.02$  м и  $\Sigma U_y = 0.02$  м.

При действии астрофизических напряжений  $\sigma_{\text{АФ}} = -8.2$  МПа и модуле упругости  $E_m = 0.36 \cdot 10^5$  вместо заданных в граничных условиях при расчете  $\sigma_{(p)} = -10$  МПа и  $E_{m(p)} = 0.7 \cdot 10^5$  базисы, согласно зависимостям

$$\Delta B_{x(\text{АФ})} = \frac{\Sigma U_x \sigma_{\text{АФ}} E_m}{\sigma_{(p)} E_{m(p)}}, \quad (20)$$

$$\Delta B_{y(\text{АФ})} = \frac{\Sigma U_y \sigma_{\text{АФ}} E_m}{\sigma_{(p)} E_{m(p)}}, \quad (21)$$

изменяются на величину  $\Delta B_{x(\text{АФ})} = -0.436$  м,  $\Delta B_{y(\text{АФ})} = -0.451$  м.

При действии гравитационных напряжений в 2000 г. (среднее в Уральском регионе  $\sigma^{\text{П}} = -12.6$  МПа), когда глубина карьера составляла 485 м, базисы, согласно зависимостям (22), (23), увеличились на  $\Delta B_{2-1...5-1} = 0.245$  м и  $\Delta B_{1-1...4-6} = 0.288$  м:

$$\Delta B_{2-1...5-1} = \frac{\Sigma U_x E_m}{E_{m(p)}}, \quad (22)$$

$$\Delta B_{1-1...4-6} = \frac{\Sigma U_y E_m}{E_{m(p)}}. \quad (23)$$

В 2009 г. значение гравитационной составляющей напряжений должно было увеличиться в соответствии с величиной  $\sigma_{\text{ЗЛФ}}$ :

$$\sigma_z^{\text{П}} = \gamma H + \sigma_{\text{АФ}}. \quad (24)$$

Эта задача была решена следующим образом:

$$\Delta B_{X(\text{GPS})} = (\Delta B_{X(\gamma H)650} - \Delta B_{X(\gamma H)485}) + \Delta B_{X(\text{АФ})} + \Delta B_{X(\text{T})}, \quad (25)$$

$$\Delta B_{Y(\text{GPS})} = (\Delta B_{Y(\gamma H)650} - \Delta B_{Y(\gamma H)485}) + \Delta B_{Y(\text{АФ})} + \Delta B_{Y(\text{T})}. \quad (26)$$

В данных уравнениях  $\Delta B_{X(\text{T})}$  и  $\Delta B_{Y(\text{T})}$  были приняты равными нулю из-за прогнозируемого малого значения  $\sigma_{\text{T}}$  и еще меньшего его влияния на конвергенции бортов карьера. После подстановки найденных компонент из табл. 6 уравнения (25, 26) приняли вид:

$$-0.268 = (\Delta B_{X(\gamma H)650} - 0.245) - 0.436 + \Delta B_{X(\text{T})},$$

$$-0.280 = (\Delta B_{Y(\gamma H)650} - 0.288) - 0.451 + \Delta B_{Y(\text{T})},$$

$$\text{откуда } \Delta B_{X(\gamma H)650} = -0.245 + 0.436 + 0.503 = 0.413,$$

$$\Delta B_{Y(\gamma H)650} = -0.280 + 0.288 + 0.451 = 0.459.$$

Таблица 7. Смещения реперов по осям

Table 7. Axis offset

$\Delta U_{2-1}$	$\Delta U_{5-1}$	$\Sigma U_x$ , м	$\Delta U_{4-1}$	$\Delta U_{1-1}$	$\Sigma U_y$ , м
При действии $\gamma H$ до углубки карьера (H=485 м), 2000 г.					
-0.064	0.062	0.126	0.074	-0.074	0.148
При действии $\gamma H$ после углубки карьера (H=650 м), 2009 г.					
-0.073	0.072	0.145	0.088	-0.080	0.168
При действии только астрофизических напряжений (H=650 м)					
0.13	0.144	0.274	0.163	0.12	0.283

В то же время при расчете были получены изменения базисов ( $\Delta B_{X(\gamma H)}$ ,  $\Delta B_{Y(\gamma H)}$ ) после углубки карьера (до 650 м) с учетом соотношения, принятого в расчете ( $E_{M(P)} = 0.7 \cdot 10^5$  МПа) и найденного в массиве ( $E_M = 0.36 \cdot 10^5$  МПа) при  $\sigma_{AF} = 0$  (см. табл. 2):

$$\Delta B_{X(\gamma H)650} = \frac{\sum U_x E_M}{E_{M(P)}} = 0.287, \quad (27)$$

$$\Delta B_{Y(\gamma H)650} = \frac{\sum U_y E_M}{E_{M(P)}} = 0.327. \quad (28)$$

Следовательно, в результате изменения гравитационных напряжений под влиянием  $\sigma_{AF}$  изменение базисов увеличилось в 1.46 ( $\Delta B_{X(\gamma H)650}/\Delta B_{X(\gamma H)}$ ) и 1.4 ( $\Delta B_{Y(\gamma H)650}/\Delta B_{Y(\gamma H)}$ ) раза, а вертикальные гравитационные напряжения увеличились на  $\sigma_{ZAF} = 0.027$  (1.4–1.0) Н = 0.0108Н.

На практике вертикальные напряжения превышают гравитационные в 1.5–4 раза, к примеру в Североуральске – в 2.3 раза, в Кушве – в 1.24, в Ниж. Тагиле (Лебяжинское месторождение) – в 1.4, там же (Высокогорское месторождение) – в 1.9 раз, там же (Естюнинское месторождение) – в 4.3 раза.

В итоге на месторождении Удачное поле природных напряжений можно представить зависимостями

$$\sigma_z^{\Pi} = -0.026 + \sigma_{XAF} + \sigma_{XT}, \quad (29)$$

$$\sigma_z^{\Pi} = -0.026 + \sigma_{YAF} + \sigma_{YT}. \quad (30)$$

$$\sigma_z^{\Pi} = -0.026 + \sigma_{YAF} + \sigma_{YT}. \quad (31)$$

В 2009 г. при  $\sigma_{AF} = -8.2$  МПа и  $\sigma_T = -1.0$  МПа на глубине 650 м

$$\sigma_z^{\Pi} = -24 \text{ МПа},$$

$$\sigma_x^{\Pi} = \sigma_y^{\Pi} = -26.8 \text{ МПа}.$$

В 2020–2022 гг. при ожидаемом росте  $\sigma_{AF}$  на Урале до –24 МПа, а в осадочной толще на месторождении Удачное – до –12 МПа природные напряжения могут достигнуть следующих величин:

$$\sigma_z^{\Pi} = -27.7 \text{ МПа},$$

$$\sigma_x^{\Pi} = \sigma_y^{\Pi} = -30.6 \text{ МПа}.$$

Как видно из представленной методики определения составляющих напряженного состояния массива, при изменении деформации прикарьерного массива с использованием СНС были приняты ряд допущений и аналогий с другими регионами мира, поэтому обязателен контрольный эксперимент в шахте по измерению напряжений известными и проверенными методами [Зубков, 2001]

на специально выбранном участке, где ожидается минимум неконтролируемых возмущений массива. Это позволит скорректировать результаты для 2009 и 2020–2022 гг., полученные по зависимостям (30, 31), учитывая тот факт, что геологическое строение месторождения чрезвычайно сложное.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально обоснован физический закон о том, что природное напряженное состояние земной коры формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами Земли, а также астрофизическими силами, вызванными физическими процессами в космосе.

2. Установлено, что массив горных пород (земная кора) деформируется упруго и в 11-летних циклах океанические и континентальные литосферные плиты деформируются на одну и ту же величину.

3. Астрофизическую относительную деформацию земной коры  $\epsilon_{AF}$  необходимо учитывать для определения фактических координат и длин базисов при использовании СНС путем введения поправок.

4. При определении упругих характеристик массива необходимо учитывать его иерархическую блочность, используя экспериментально найденную зависимость.

5. При применении разработанного метода на месторождении Удачное определены параметры природного напряжения на глубине 650 м в 2009 г. и прогноз его изменения в 2020–2022 гг.

*Исследования выполнены по теме Государственного задания №0405-2019-0007.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Генике А.А., Побединский Г.Г. (1999) Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применения в геодезии. М.: Картгеоцентр; Геодезиздат, 272 с.
- Зубков А.В. (2001) Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 335 с.
- Зубков А.В. (2002) Напряженное состояние земной коры Урала. *Литосфера*, (3), 3–18.
- Зубков А.В. (2013) Периодическое расширение и сжатие Земли как вероятный механизм природных катаклизмов. *Литосфера*, (2), 145–156.
- Зубков А.В. (2016) Закон формирования природного напряженного состояния земной коры. *Литосфера*, (5), 145–150.
- Зубков А.В. Патент 2613929 Россия МКИ С2. Способ определения расстояния между пунктами на поверхности Земли / А.В. Зубков (Россия) №2015120788; Заявл. 01.06.2015. Оpubл. 22.03.2017. Бюлл. №9.
- Лухнев А.В., Санько В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. (2010) Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе

- по данным GPS-измерений. *Геология и геофизика*, (7), 1006-1017.
- Опарин В.И., Курленя М.В. (1994) О скоростном разрезе земли по Гутенбергу и возможном его геомеханическом объяснении. *ФТПРПИ*, (1), 14-27.
- Родионов В.Н. (1996) Очерк геомеханики. М.: Науч. мир, 64 с.
- Сашурин А.Д., Балек А.Е. (2014) Совершенствование методики натурных замеров напряженно-деформированного состояния больших участков горного массива. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегаз. и горн. дело.* (11), 34-47.
- Штенгелов Е.С. (1982) Современное раздвижение земной коры и гипотезы тектоники плит. *Бюлл. МОИП. Отд. геол.*, **57**(2), 3-17.
- Lean J.L. (2010) Cycles and trends in solar irradiance and climate. *John Wiley&Sons. Ltd. Climat Change*, (1), 111-122.
- Zubkov A.V., Sentyabov S.V. (2014) Forecast Stability of Mining Excavation and HPS's Dams After 2020. *East. Europ. Scientif. J.*, (1), 153-166.
- earth's surface in the Baikal-Mongolian region according to GPS measurements. *Geol. Geofiz.*, (7), 1006-1017. (In Russian)
- Oparin V.I., Kurlenya MV (1994) On the velocity section of the Earth according to Gutenberg and its possible geomechanical explanation. *FTPRPI*, (1), 14-27. (In Russian)
- Rodionov V.N. (1996) *Ocherk geomekhaniki* [Essay on geomechanics]. Moscow, Nauch. Mir Publ., 64 p. (In Russian)
- Sashurin A.D., Balek A.E. (2014) Improving the method of field measurements of the stress-strain state of large parts of the mountain range. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegaz. i Gorn. Delo.* (11), 34-47. (In Russian)
- Shtengelov E.S. (1982) Modern crust spreading and plate tectonics hypotheses. *Byull. MOIP. Otd. geol.*, **57**(2), 3-17. (In Russian)
- Zubkov A.V. (2001) *Geomekhanika i geotekhnologiya* [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg, IGD UB RAS, 335 p. (In Russian)
- Zubkov A.V. (2002) The stress state of the Ural crust. *Litosfera*, (3), 3-18. (In Russian)
- Zubkov A.V. (2013) Periodic expansion and contraction of the earth as a probable mechanism of natural disasters. *Litosfera*, (2), 145-156. (In Russian)
- Zubkov A.V. (2016) The law of formation of the natural stress state of the Earth's crust. *Litosfera*, (5), 145-150. (In Russian)
- Zubkov A.V. (2017) *Sposob opredeleniya rasstoyaniya mezhdru punktami na poverkhnosti Zemli* [The method of determining the distance between points on the surface of the Earth]. Patent RF №2015120788; 2017 (In Russian)
- Zubkov A.V., Sentyabov S.V. (2014) Forecast Stability of Mining Excavation and HPS' s Dams After 2020. *East. Europ. Scientif. J.*, (1), 153-166.

#### REFERENCES

- Genike A.A., Pobedinskii G.G. (1999) *Global'naya sputnikovaya sistema opredeleniya mestopolozheniya GPS i ee primeneniya v geodezii* [Global Satellite Positioning System GPS and its application in geodesy]. Moscow, Kartgeotsentr; Geodezizdat Publ., 272 p. (In Russian)
- Lean J.L. (2010) Cycles and trends in solar irradiance and climate. *John Wiley&Sons. Ltd. Climat Change*, (1), 111-122.
- Lukhnev A.V., San'ko V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Kale E. (2010) Rotations and deformations of the