

УДК 622.831.3:553.411

**Сосновская Елена Леонидовна**

кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории геодинамики и горного давления,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075 г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58

**Авдеев Аркадий Николаевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории геодинамики и горного давления,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [avd\\_8691@yandex.ru](mailto:avd_8691@yandex.ru)

**Васильев Денис Сергеевич**

горный инженер,  
научно-исследовательская часть,  
Иркутский национально-исследовательский  
технический университет,  
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

**ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД РУДНЫХ ТЕЛ  
ЦЕНТРАЛЬНОЕ И РАДУЖНОЕ  
КОНЕВИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

*Аннотация:*

Приведены результаты геомеханических исследований Коневинского золоторудного месторождения, расположенного в юго-западной части Хужирского рудного поля в пределах Сайлагского гранодиоритового массива. Основные запасы полезных ископаемых – маломощные жилы крутого падения. В 2011–2014 гг. проведены работы по изучению геомеханических условий и определены природные напряжения на нижних горизонтах. Установлены основные геомеханические факторы на исследуемых глубинах, влияющие на закономерности распределения природных напряжений: неоднородное криогенное состояние массива горных пород, наличие локальных участков естественно-сухих и обводненных горных пород, сложная тектоническая структура месторождения, гористый рельеф земной поверхности. Проведены лабораторные испытания физико-механических свойств горных пород и руд. Определены следующие показатели: предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение, сцепление, угол внутреннего трения, предел прочности на срез, крепость по М.М. Протодьяконову, средняя плотность, коэффициент Пуассона, модуль Юнга. Измерены величины природных напряжений на участках «Коневинский» и «Радужный» (рудные тела Центральное и Радужное) методом целевой разгрузки на основе методики ИГД УрО РАН. Установлены соотношения между вертикальными, горизонтальными продольными и горизонтальными поперечными напряжениями. Полученные закономерности распределения природных напряжений использованы в качестве граничных условий для определения параметров подземной геотехнологии на руднике при разработке «Временных указаний по определению параметров устойчивых целиков и обнажений горных выработок и очистных камер участка «Коневинский» и участка «Радужный» на месторождении Коневинское».

*Ключевые слова:* природные напряжения, массив горных пород, крутопадающие жилы, физико-механические свойства горных пород, золоторудные месторождения, многолетняя мерзлота

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.074

**Sosnovskaya Elena L.**

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
Senior Researcher of the Laboratory of Geodynamics  
and Mining Pressure,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075, Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiriyaka Str.

**Avdееv Arkady N.**

Candidate of Engineering Sciences,  
Senior Researcher of the Laboratory of Geodynamics  
and Mining Pressure,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
e-mail: [avd\\_8691@yandex.ru](mailto:avd_8691@yandex.ru)

**Vasilyev Denis S.**

Mining Engineer,  
Research Department  
of Irkutsk National Research Technical University  
Irkutsk, 83 Lermontov str.

**EVALUATION OF NATURAL STRESS  
OF ROCK MASS OF TSENTRALNOE  
AND RADUZHNOE OREBODIES  
OF KONEVINSKOYE GOLD DEPOSIT**

*Abstract:*

The paper presents the results of geomechanical studies of the Konevinskoye gold ore deposit located in the south-western part of the Khuzhirskeye ore field within the Sailaga granodioritic rock mass. The main reserves of mineral resources are narrow steeply dipping veins. In 2011–2014 the works were carried out to study the geomechanical conditions and to determine the natural stresses on the lower horizons. The following basic geomechanical factors on the investigated depths influencing the regularities of distribution of natural stresses have been established: heterogeneous cryogenic state of the rock mass, presence of local areas of natural-dry and water-flooded rocks, complex tectonic structure of the deposit, mountainous terrain of the earth's surface. The laboratory tests of physical and mechanical properties of rocks and ores have been carried out. The following parameters have been identified: compressive strength, tensile strength, adhesion strength, angle of internal friction, shear strength, Protodyakonov's strength index, average density, Poisson's coefficient, Young's module. The natural stress values have been measured at the Konevinsky and Raduzhny sections (Tsentralnoye and Raduzhnoye orebodies) using the method of slotted unloading based on the technique of the Institute of Mining, Ural Branch of RAS. The relations between vertical, horizontal longitudinal and horizontal transverse stresses have been established. The obtained regularities of natural stress distribution were used as boundary conditions for determining the parameters of underground geotechnologies at the mine during the development of "Temporary guidelines for determining the parameters of stable pillars and outcrops of mine workings and stopes of Konevinsky and Raduzhny sections at Konevinskoye deposit".

*Key words:* natural stresses, rock mass, steeply dipping veins, physical and mechanical properties of rocks, gold deposits, large depths, permafrost

### Введение

Коневинское месторождение ООО «Хужир Энтерпрайз» расположено в юго-западной части Хужирского рудного поля в пределах Сайлагского гранодиоритового массива. Разрабатываются крутопадающие жилы малой мощности.

Месторождение имеет сложное геологическое строение и тектоническую нарушенность, крайне неравномерное распределение запасов в недрах, ограниченный размер очистного пространства, многообразие условий по устойчивости руд и вмещающих пород. На устойчивость горных пород влияют физико-механические свойства руды и вмещающих пород, изменчивость формы рельефа кровли, угол падения жил, тектоническая нарушенность, наличие многолетней мерзлоты и др. Все это осложняет отработку месторождения. Авторы проводят на месторождении Коневинское исследования геомеханического состояния с 2011 г. [1 – 6].

По результатам исследований в 2011 г. были разработаны «Временные указания по определению параметров устойчивых целиков и обнажений горных выработок и очистных камер на месторождении Коневинское». В «Указаниях...» были рассмотрены вопросы определения параметров устойчивых целиков и обнажений камер системами разработки с магазинированием руды и комбинированными системами с креплением.

В 2014 г. горные работы на руднике достигли глубин 250 – 300 м. Вовлечены в отработку участки «Коневинский» и «Радужный». На этих участках отмечено изменение криогенного состояния массива горных пород. Мерзлые породы с понижением глубины горных работ в шахте оттаивают. Отмечены участки перехода мерзлых пород в талые. На руднике используются новые технологии выемки запасов с пониженной мощностью очистного пространства (1 – 0,5 м). Возникла актуальная необходимость уточнить горно-геологические, горно-технические и геомеханические условия выемки запасов в переходных зонах мерзлых пород в талые.

Одним из основных геомеханических факторов, влияющих на устойчивость горных выработок, обнажений камер и целиков является первоначальное (природное) поле напряжений.

### Исследования и результаты

Оценка природных напряжений на Коневинском месторождении осуществлялась натурными измерениями. Измерение напряжений горных пород производилось щелевой разгрузкой на основе методики ИГД УрО РАН [7 – 8] в авторском варианте.

Глубина горных работ на участках замеров составила, соответственно, 250 – 300 и 180 – 200 м. Всего измерены напряжения на участке Коневинский по 29 щелям (рис. 1), на участке «Радужный» – по 13 щелям (рис. 2).

Оценка действующего напряжения в элементе массива производилась путем изменения его напряженного состояния проходкой щелей и измерения при этом соответствующих реакций в виде деформаций по распорным реперам, установленным перпендикулярно щелям [1].

Напряжения, действующие на стенках выработок, вычислялись по формуле

$$\sigma_{\perp} = \frac{U_{AB} \cdot E \cdot \pi \cdot K_{\Pi}}{8R - \pi l [1 - k_{\perp(\perp)cp} + \mu \cdot k_{\parallel(\parallel)cp}]}, \quad (1)$$

где  $U_{AB}$  – деформация участка АВ после образования щели, см;  $E$  – модуль упругости массива горных пород, МПа;  $R$  – половина длины щели, см;  $l$  – расстояние между центрами отверстий для установки реперов, см;  $k_{\perp(\perp)cp}$ ,  $k_{\parallel(\parallel)cp}$  – средние значения коэффициентов концентрации напряжений на участках ОА и ОВ в направлениях, соответственно, перпендикулярно и параллельно щели;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_{\Pi}$  – поправочный коэффициент, зависящий от конкретных горно-геологических условий участка

месторождения, геометрических размеров щелей и пространственного их взаимного положения.

Модуль упругости массива горных пород и коэффициент Пуассона наряду с другими физико-механическими характеристиками определялись авторами на основании испытаний физико-механических свойств 10-ти образцов горных пород, отобранных на руднике, в том числе с участка «Коневинский» (рудное тело Центральное) – 7, с участка «Радужный» – 3. Испытания проводились в лаборатории геомеханики и физики горных пород ИРНТУ.

Следует уточнить, что породы и руды в массиве горных пород находятся в различных криогенных состояниях. Известно, что криогенное состояние пород оказывает существенное влияние на закономерности распределения поля природных напряжений и прочностные характеристики массивов горных пород [10 – 11].

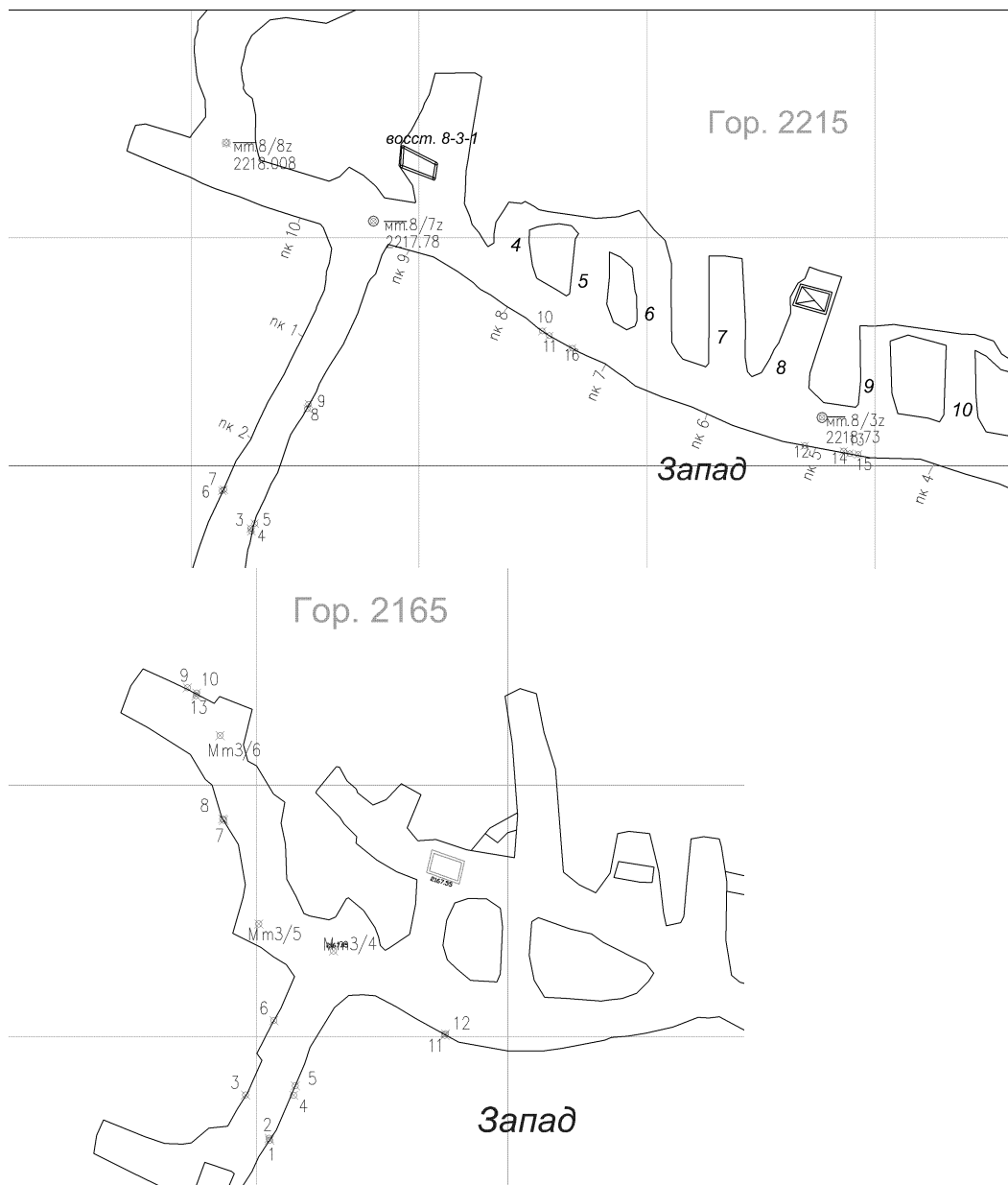


Рис. 1 – Станции измерения напряжений на участке «Коневинский»: 1-15 – номера измерительных щелей



Таблица 1

**Физико-механические свойства горных пород на участках «Радужный» и «Коневи́нский» в естественно-сухом состоянии**

№ п/п	Наименование породы	Предел прочности при растяжении $\sigma_r$ , МПа	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Предел прочности на срез, МПа	Крепость по М.М. Протодьяконову	Средняя плотность, г/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, ГПа
<b>Рудное тело Центральное</b>										
1	Березит	23,33	84,14	26,74	25,44	32,23	8	2,76	0,4	37,74
2	Березит	10,42	46,27	13,88	27,87	17,5	5	2,77	0,41	35,74
3	Березит	12,07	100,43	24,78	34,43	37,11	9	2,79	0,39	41,52
4	Гранодиорит	11,72	95,36	23,71	34,22	35,25	9	2,71	0,4	31,82
5	Гранодиорит	24,68	95,57	29,8	26,28	36,43	9	2,71	0,42	30,64
6	Гранодиорит	22,11	107,01	31,32	28,84	40,28	10	2,64	0,38	41,71
7	Гранодиорит	17,01	96,21	26,87	30,56	35,96	9	2,82	0,41	44,02
Среднее по рудному телу		<b>17,33</b>	<b>89,28</b>	<b>25,30</b>	<b>29,66</b>	<b>33,54</b>	<b>8</b>	<b>2,74</b>	<b>0,4</b>	<b>37,6</b>
<b>Рудное тело Радужное</b>										
8	Березитизированный гранодиорит	15,98	90,48	25,27	30,57	33,82	9	2,7	0,44	17,36
9	Гранодиорит	14,66	105,19	27,26	33,01	39	9	2,68	0,37	37,72
10	Гранодиорит	18,15	89,37	26,03	29,04	33,61	8	2,69	0,31	55,46
Среднее по рудному телу		<b>16,26</b>	<b>95,01</b>	<b>26,18</b>	<b>30,87</b>	<b>35,48</b>	<b>9</b>	<b>2,69</b>	<b>0,37</b>	<b>36,85</b>

Таблица 2

**Физико-механические свойства горных пород на участках «Радужный» и «Коневи́нский» в водонасыщенном состоянии**

№ п/п	Наименование пород	Предел прочности при растяжении $\sigma_r$ , МПа	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	Сцепление $\tau$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Коэффициент хрупкости
<b>Рудное тело Центральное</b>						
1	Березит	16,30	78,15	22,94	28,74	4,8
2	Березит	8,98	45,64	13,17	29,39	5,1
3	Березит	12,14	90,26	23,12	33,36	7,4
4	Гранодиорит	12,31	70,84	19,68	30,74	5,8
5	Гранодиорит	11,60	92,15	23,09	33,99	7,9
6	Гранодиорит	13,37	81,08	22,17	31,30	6,1
7	Гранодиорит	12,54	49,34	15,32	26,46	3,9
Среднее по рудному телу		12,46	72,49	19,93	30,57	5,86
<b>Рудное тело Радужное</b>						
8	Березитизированный гранодиорит	11,11	41,71	13,11	25,91	3,8
9	Гранодиорит	12,74	84,69	22,49	32,25	6,6
10	Гранодиорит	12,76	81,39	21,90	31,82	6,4
Среднее по рудному телу		12,20	69,26	19,17	29,99	5,60

Остальные исходные данные были приняты:  $l = 12,68$  см (с учетом диаметра шпуров);  $R = 4,5$  см,  $k_{\perp(\perp)ср} = 0,15$ ,  $k_{\parallel(\parallel)ср} = 0,01$ ,  $\mu = 0,26$  [2].

Расчеты напряжений на стенках выработки производились по формуле (1). Исходные данные для расчетов: на участке «Коневинский»  $E = 0,376 \cdot 105$  МПа, на участке «Радужный»  $\pi = 3,14$ ,  $l = 12,68$  см (с учетом диаметра шпуров),  $R = 4,5$  см,  $k_{\perp(\perp)ср} = 0,15$ ,  $k_{\parallel(\parallel)ср} = 0,01$ ,  $\mu = 0,3$ .  $K_{\pi}$  для условий участка «Коневинский» составил 0,0012, участка «Радужный» – 0,001.

Подставив исходные данные в (1), получим:

$$- \text{ для условий участка «Коневинский» } \sigma_{\perp} = -0,332 \times U_{AB};$$

$$- \text{ для условий участка «Радужный» } \sigma_{\perp} = -0,253 \times U_{AB},$$

где  $U_{AB}$  – деформация участка АВ после образования щели, микрон.

Результаты расчетов напряжений на стенках выработок приведены в табл. 3.

Чтобы перейти от напряжений на стенках выработок к напряжениям, действующим в массиве горных пород, вычисляем природные напряжения в массиве горных пород [3, 4]:

$$\begin{aligned} \sigma_{в} &= \frac{\sigma_{в}^{прi} - \sigma_{\pi}^i \cdot K_{\pi}}{K_{в(пр)}}; \\ \sigma_{в} &= \frac{\sigma_{в}^{pi} - \sigma_{пр}^i \cdot K_{пр}}{K_{в(п)}}; \\ \sigma_{пр} &= \sigma_{пр}^i - \mu(\sigma_{вср}^{прi} - \sigma_{вср} - \sigma_{\pi}^i); \\ \sigma_{\pi} &= \sigma_{\pi}^i - \mu(\sigma_{вср}^{pi} - \sigma_{вср} - \sigma_{пр}^i), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_{в}$ ,  $\sigma_{пр}$ ,  $\sigma_{\pi}$  – вертикальные, продольные и поперечные первоначальные напряжения, МПа;  $\sigma_{\pi}^i$ ,  $\sigma_{пр}^i$  – горизонтальные напряжения в  $i$ -той точке, соответственно действующие вкрест простирания и по простиранию рудного тела, МПа;  $\sigma_{в}^{прi}$ ,  $\sigma_{в}^{pi}$  – вертикальные напряжения в  $i$ -той точке, соответственно действующие по простиранию и вкрест простирания рудного тела, МПа;  $K_{\pi}$ ,  $K_{в(пр)}$ ,  $K_{пр}$ ,  $K_{в(п)}$  – коэффициенты концентрации напряжений;  $\sigma_{вср}$  – среднее значение вертикальных напряжений массива горных пород, МПа;  $\sigma_{вср}^{\pi}$  – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке квершлага, МПа;  $\sigma_{вср}^{пр}$  – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке штрека, МПа.

Значения  $K_{в(пр)}$  и  $K_{в(п)}$  при выбранном варианте щелевой разгрузки равны 1,91. Значения  $K_{\pi}$  и  $K_{пр}$  составляют –0,87. В целом величины напряжений составили: на участке «Коневинский» при глубине разработки 250 – 300 м  $\sigma_{в} = -8,1 \pm 0,7$  МПа;  $\sigma_{пр} = -11,9 \pm 2,0$  МПа;  $\sigma_{\pi} = -12,8 \pm 1,8$  МПа; на участке «Радужный» при глубине разработки 200 м  $\sigma_{в} = -5,4 \pm 0,6$  МПа;  $\sigma_{пр} = -6,6 \pm 1,9$  МПа;  $\sigma_{\pi} = -4,3 \pm 0,5$  МПа (табл. 4).

Анализ результатов измерений позволяет отметить следующее. Величины напряжений аппроксимируются формулами:

$$\begin{aligned} & \text{ на участке «Коневинский»} \\ & \sigma_{в} = -\gamma H, \quad \sigma_{пр} = -1,46\gamma H, \quad \sigma_{\pi} = -1,22\gamma H; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{ на участке «Радужный»} \\ & \sigma_{в} = -\gamma H, \quad \sigma_{пр} = -1,22\gamma H, \quad \sigma_{\pi} = -0,8\gamma H, \end{aligned}$$

где  $\gamma$  – плотность пород и руд,  $\text{МН/м}^3$ ;  $H$  – глубина горных работ, м.

Таким образом, на исследуемых участках, на нижних горизонтах рудника отношения продольного и поперечного напряжения к вертикальному  $K_{пр}$  и  $K_{\pi}$  изменяются от

1,22 до 1,46 и от 0,8 до 1,22, соответственно. В среднем эти коэффициенты составляют  $K_{пр} = 1,3$  и  $K_{п} = 1,0$ . Поэтому величины напряжений на нижних горизонтах Коневинского месторождения можно аппроксимировать формулами

$$\sigma_v = -\gamma H, \quad \sigma_{пр} = K_{пр} \sigma_v = -1,3\gamma H, \quad \sigma_{п} = -1,0\gamma H,$$

где  $\gamma$  – плотность пород и руд,  $\text{мН/м}^3$ ;  $H$  – глубина горных работ, м.

Таблица 3

**Расчет напряжений на стенках выработок**

№ щели	Вертикальные напряжения				Продольные напряжения		Поперечные напряжения	
	$U$ , мк	$\sigma_{пр}^v$ , МПа	$U$ , мк	$\sigma_{п}^v$ , МПа	$U$ , мк	$\sigma_{пр}$ , МПа	$U$ , мк	$\sigma_{п}$ , МПа
Участок замера «Коневинский» (рудное тело Центральное)								
1			-42	-13,9				
2							-80	-26,6
3			-40	-13,3				
4							-10	-3,3
5			-4	-1,3				
6			-5	-1,7				
7							0	0
8							-27	-9
9			-23	-7,6				
10					-15	-5		
11	-50	-16,6						
12	-18	-6						
13					-10	-3,3		
14					-12	-4		
15	-34	-11,3						
16	0	0					-29,2	-9,7
17							-10	-3,3
18			-20	-6,6				
19			-28	-9,3				
20			-16	-5,3				
21							-30	-10
22			0	0				
23	-12	-4						
24					-75	-24,9		
25					-48	-15,9		
26					-45	-14,9		
27					-45	-14,9		
28					12	4		
29	-40	-13,3					-20	-6,6
Среднее значение		-8,5		-6,6		-9,9		-8,6
Участок замера «Радужный» (рудное тело Радужное)								
1							-10	-2,5
2							-13	-3,3
3			-30	-7,6				
4			-20	-5,1				
5			-10	-2,5				
6							-8	-2
7					-10	-2,5		
8	-35	-8,9						
9					-20	-5,1		
10					-23	-5,8		
11	-30	-7,6						
12	-25	-6,3						
13					-50	-12,7		
Среднее значение		-7,6		-5,1		-6,5		-2,6

Таблица 4

## Результаты измерений природных напряжений

Оrientировка напряжения относительно рудного тела	Глубина разработки	Результаты натурных измерений напряжений горных массивов			
		Число единичных определений напряжения	Напряжение, МПа	Отношение продольного напряжения к вертикальному $\sigma_{пр}/\sigma_v$ (коэффициент $K_{пр}$ )	Отношение поперечного напряжения к вертикальному $\sigma_{п}/\sigma_v$ (коэффициент $K_{п}$ )
Рудное тело Радужное, полевой штрек 2-1 и квершлаг на БК-2 горизонта штольни № 2					
Вертикальное	180-	21	-5,4±0,6		
Продольное	200	12	-6,6±1,9	1,22	0,80
Поперечное		12	-4,3±0,5		
Рудное тело Центральное, гор. 2165 м и гор. 2215 м, район восстающего 8-3-1					
Вертикальное	250-	120	-8,1±0,7		
Продольное	300	64	-11,9±2,0	1,46	1,22
Поперечное		64	-12,8±1,8		

*Заключение*

Полученные закономерности распределения природных напряжений использованы в качестве граничных условий для определения параметров подземной геотехнологии на руднике при разработке Временных указаний по определению параметров устойчивых целиков и обнажений горных выработок и очистных камер (гор. 2215 – 2145 м) участков «Коневинский» и «Радужный» на месторождении Коневинское.

**Литература**

1. Сосновская Е.Л. Исследование природных напряжений массива горных пород на золоторудном Коневинском месторождении / Л.И. Сосновский, Е.Л. Сосновская, А.С. Сафьянов // Проблемы развития минеральной базы Восточной Сибири. - № 11. - Изд-во ИрГТУ, 2013. - С. 79 - 88.
2. Сосновская Е.Л. Геомеханические условия массива горных пород Коневинского золоторудного месторождения / Е.Л. Сосновская, А.С. Сафьянов // Вестник ИрГТУ. – 2014. - № 11. – С. 98 – 102.
3. Сосновская Е.Л. Исследование техногенных напряжений на контуре очистных камер при выемке маломощных рудных тел Коневинского месторождения / Е.Л. Сосновская, А.С. Сафьянов // Проблемы развития минеральной базы Восточной Сибири. - № 16. - Изд-во: ИрГТУ, 2016. - С. 38 - 47.
4. Сосновская Е.Л. Прогноз потенциальной удароопасности крутопадающих жильных золоторудных месторождений / Е.Л. Сосновская, А.Н. Авдеев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2016. - № 2. - С. 74 - 85.
5. Васильев Д.С. Влияние геологической среды на качество добываемой руды Коневинского месторождения / Д.С. Васильев, А.М. Павлов // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: Сборник статей. - 2017. - С. 42 - 48.
6. Васильев Д.С. Анализ устойчивости обнажений пород Коневинского месторождения / Д.С. Васильев, А.М. Павлов // Молодежный вестник ИрГТУ. - 2017. - № 4 (28). - С. 5.
7. Влох В.П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н.П. Влох. – М.: Недра, 1994. – 208 с.
8. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335 с.



9. Кузькин В.И. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке / В.И. Кузькин, Л.А. Ярг, М.В. Кочетков. - М., 2001. - 153 с.

10. Павлов А.М. Исследования криолитозоны и ее влияния на геомеханическое состояние массива горных пород при подземной разработке золоторудных месторождений Бурятии // Известия СО секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. - 2012. - Выпуск №1 (40). - С 53 - 60.

11. Сосновская Е.Л. Обоснование матрицы природных напряжений массива горных пород жильных месторождений Сибири и Дальнего Востока / Е.Л. Сосновская, В.Б. Ясыченко // Вестник ИрГТУ. - 2011. - № 11.- С. 74 - 78.