



Оригинальная статья / Original article  
УДК 622.831

## Естественное напряженно-деформированное состояние нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля

© А.Н. Авдеев<sup>а</sup>, Е.Л. Сосновская<sup>б</sup>, А.Ю. Болотнев<sup>с</sup>

<sup>а,б</sup>Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

<sup>с</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Проведено исследование естественного напряженно-деформированного состояния нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского месторождения с целью уточнения геомеханических условий для обеспечения безопасности ведения горных работ. Летом 2019 г. заложена серия наблюдательных станций горного давления. Проведены натурные измерения по заложенным станциям методом щелевой разгрузки по методике Института горного дела УрО РАН в авторском варианте сегментированной щели. В местах заложения станций отобраны образцы горных пород для испытаний прочностных и упругих свойств в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации. Методом решения обратной геомеханической задачи по зафиксированным проявлениям горного давления в динамических формах реконструировано напряженное состояние массива горных пород в потенциально удароопасных участках массива горных пород шахты. Проведен расчет гравитационных и тектонических компонент поля природных напряжений. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с ранее установленными для средних условий Дарасунского месторождения. По результатам исследований подтвержден гравитационно-тектонический характер естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород Дарасунского месторождения. Вместе с тем установлено, что поле природных напряжений дискретно рассредоточено: выделяются локальные участки повышенных тектонических напряжений с вероятностью проявления горного давления в динамических формах, средненапряженные участки без видимых проявлений горного давления и разгруженные участки приконтурного массива горных пород. Для инженерных геомеханических расчетов предложена дифференцированная оценка естественного напряженно-деформированного состояния. Напряжения рекомендуется рассчитывать в зависимости от конкретных горно-геологических условий на основе установленных зависимостей распределения природных напряжений.

**Ключевые слова:** естественное напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, гравитационные и тектонические компоненты напряжения, физико-механические свойства горных пород, геомеханические условия, проявления горного давления в динамических формах

**Информация о статье:** Дата поступления 10 июля 2019 г.; дата принятия к печати 22 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

**Для цитирования:** Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю. Естественное напряженно-деформированное состояние нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 324–335.

## Initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons (the Darasunsky deposit)

© Arkady N. Avdeev<sup>а</sup>, Elena L. Sosnovskaya<sup>б</sup>, Alexander Yu. Bolotnev<sup>с</sup>

<sup>а,б</sup>Mining Institute, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>с</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The article presents the study of the initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons, the Darasunsky gold deposit. The aim of the study has been to clarify the geotechnical conditions ensuring mining safety. A series of rock pressure monitoring stations have been installed, and in-situ measurements have been made using a slot discharge method based on the IGD UB RAS technique (segmented-slot version copyright). The rock samples taken at the stations' sites have been tested for their strength and elastic properties following the requirements of the standards of the Russian Federation. The inverse geo-mechanical problem-solution method based on the registered rock pressure manifestations has allowed reconstructing the stressed rock mass state in potentially bump-hazardous sections of the mine rock mass. The gravitational and tectonic components of the in-situ stress field have been calculated. The results have been compared with the ones previously obtained for the average conditions of the Darasunsky deposit. Based on the research results, the gravitational-tectonic nature of



the pre-mining stress-strain state of the rock mass of the Darasunsky field has been confirmed. At the same time, it has been found that the pre-mining stress field is discretely dispersed: there are localized high-stress areas where dynamic stress manifestation is probable, medium-stress areas without visible manifestations of rock pressure, and unloaded sections of the marginal rocks mass. For the engineering geotechnical calculation purposes, a differentiated assessment of the initial stress-strain state has been suggested. It is recommended that the stress be calculated for specific mining and geological conditions, based on the specified relations of the initial stress distribution.

**Keywords:** initial stress-strain state, rock mass, gravitational and tectonic stress components, physical and mechanical rock properties, geotechnical conditions, dynamic rock pressure manifestation

**Information about the article:** Received July 10, 2019; accepted for publication August 22, 2019; available online September 30, 2019.

**For citation:** Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Bolotnev A.Yu. Initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons (the Darasunsky deposit). *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):324–335. (In Russ.)

## Введение

При разработке месторождений подземным способом, особенно на больших глубинах, повышается вероятность вредных проявлений горного давления и горных ударов. Одной из основных причин данных проявлений является наличие в горных массивах высоконапряженных зон гравитационно-тектонических напряжений [1–4]. Необходимо учитывать, что горное давление может проявляться не повсеместно, а дискретно, с разной интенсивностью. В пределах одного месторождения могут быть зафиксированы как локальные участки повышенных природных напряжений, так и разгруженные области пониженных напряжений [5–7]. Поэтому для своевременного принятия мер безопасного ведения горных работ необходимо знать закономерности распределения естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород конкретного месторождения [8–10 и др.].

Дарасунское золоторудное месторождение разрабатывается подземным способом с 1930 г. Отрабатываются крутопадающие маломощные кварцевосульфидные жилы. Вмещающие породы – граниты, габбро- и гранодиориты, амфиболиты. Месторождение характеризуется сложной тектоникой: развиты многочисленные системы трещин, присутствуют зоны смятия и разрывов. На месторождении действуют гравитационно-тектонические первоначальные напряжения. Тектоническая составляющая естественных напряжений в среднем равняется -6,3...-16,6 МПа [11].

На месторождении с 1979 по 1991 г. было зафиксировано 36 случаев динамических проявлений горного давления в виде шелушения, «стреляния», заколообразования, толчков и микроударов. Тектоническая компонента природных напряжений на участках проявлений горного давления составляет в среднем - 40,5 МПа, что в 2,5–6,5 раза выше, чем на средненапряженных участках. На основании соответствующих исследований Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов и Всесоюзного научно-исследовательского маркшейдерского института (Ленинград) в 1978 г. месторождение отнесено к опасным по горным ударам, начиная с глубины 330 м [12, 13].

За годы эксплуатации на Дарасунском месторождении добыто более 120 т рудного золота. С 1992 г. началось устойчивое снижение золотодобычи, и в 2000 г. добыча золота на Дарасунском месторождении прекратилась. В 2002 г. горные работы на руднике начали восстанавливаться, но в 2006 г. на руднике произошла техногенная катастрофа. В результате пожара, повлекшего за собой многочисленные человеческие жертвы, а также разрушение и последующее затопление значительной части выработок, горные работы были прекращены и в течение многих лет не велись. Работы на руднике возобновились только в 2017–2018 гг. В настоящее время осуществляются работы по осушению нижних горизонтов рудника. Дарасунское месторождение отработывалось шахтами Центральная, Восточная, Юго-Западная. На данный



момент на руднике повторно введен в эксплуатацию только участок шахты Юго-Западная. Глубина горных работ на руднике в 90-е гг. прошлого века достигла 700 м.

С целью обеспечения безопасности горных работ в процессе уточнения геомеханических условий на восстановленных эксплуатационных горизонтах авторами в 2019 г. были проведены исследования по оценке естественного напряженно-деформированного состояния нижних горизонтов шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля.

### Материал и методы исследований

Для объективной оценки поля естественных напряжений был использован комплекс методов, включающий лабораторные испытания прочностных и упругих свойств горных пород, натурные измерения природных напряжений, аналитический расчет природных напряжений по зафиксированным проявлениям горного давления, анализ гравитационно-тектонической структуры измеренных и расчетных напряжений.

*Лабораторные исследования прочностных и упругих свойств горных пород.* Модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность пород, необходимые для оценки естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород, определялись авторами на базе лаборатории геомеханики и физики горных пород Иркутского национального исследовательского технического университета. Испытания производились в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации на методы испытаний горных пород.

*Натурные измерения естественного напряженно-деформированного состояния массива.* Измерение напряжений массива горных пород производилось натурными измерениями щелевой разгрузкой по методике Института горного дела УрО РАН [14, 15] в авторском варианте сегментированной щели. 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. Напряжения, действующие на стенках выработок, вычислялись по формуле:

$$\sigma_{\perp} = \frac{U \cdot E \cdot \pi \cdot K_c}{8R - \pi l [1 - k_{\perp} + \mu \cdot k_{//}]},$$

где  $U$  – деформация участка 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;  $k_{\perp}$ ,  $k_{//}$  – значения коэффициентов концентрации напряжений в направлениях соответственно перпендикулярно и параллельно щели;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_c$  – поправочный коэффициент перехода прочностных и упругих свойств от образца к массиву (коэффициент структурного ослабления).

В варианте щелевой разгрузки сегментированной щелью средний диаметр щели составляет 230 мм, глубина щели находится в диапазоне 50–70 мм; расстояние между центрами отверстий для установки реперов  $l = 9,5$ –10 см. Коэффициенты концентрации напряжений составят:  $k_{\perp} = 0,08$ ;  $k_{//} = 0,15$ . Коэффициент структурного ослабления для условий массива горных пород исследуемых горизонтов составит 0,51–0,65.

Переход от напряжений на стенках выработок к напряжениям, действующим в массиве горных пород, осуществлялся по формулам:

$$\sigma_B = \frac{\sigma_{B}^{Pi} - \sigma_{\Pi}^i \cdot K_{\Pi}}{K_{B(Pi)}};$$

$$\sigma_B = \frac{\sigma_B^{Pi} - \sigma_{PP}^i \cdot K_{PP}}{K_{B(\Pi)}};$$

$$\sigma_{PP} = \sigma_{PP}^i - \mu (\sigma_{Bcp}^{PP} - \sigma_{Bcp} - \sigma_{\Pi}^i);$$

$$\sigma_{\Pi} = \sigma_{\Pi}^i - \mu (\sigma_{Bcp}^{\Pi} - \sigma_{Bcp} - \sigma_{PP}^i),$$

где  $\sigma_B, \sigma_{PP}, \sigma_{\Pi}$  – вертикальные, продольные и поперечные первоначальные



напряжения, МПа;  $\sigma_{II}^i, \sigma_{II}^i$  – горизонтальные напряжения в расчетной точке, соответственно действующие вкрест простирания и по простиранию рудного тела, МПа;  $\sigma_B^{Pi}, \sigma_B^{Pi}$  – вертикальные напряжения в расчетной точке, соответственно действующие по простиранию и вкрест простирания рудного тела, МПа;  $K_{II}, K_{B(II)}, K_{II}, K_{B(II)}$  – коэффициенты концентрации напряжений;  $\sigma_{Bcp}$  – среднее значение вертикальных напряжений массива горных пород, МПа;  $\sigma_{Bcp}^{II}$  – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке квершлага, МПа;  $\sigma_{Bcp}^{II}$  – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке штофа, МПа.

Средние значения коэффициентов концентрации напряжений при используемом варианте щелевой разгрузки составляют:  $K_{B(II)}, K_{B(II)} = 1,91,$

$$K_{II}, K_{II} = -0,87.$$

*Оценка природных напряжений по проявлениям горного давления.* По зафиксированным проявлениям горного давления на основе решения обратной геомеханической задачи можно определять первоначальные природные напряжения по следующим зависимостям [11]:

$$\sigma_v = \gamma H;$$

$$\sigma_{np} = \frac{\sigma_{сж}^{об} \cdot K_{дин} - K_v \cdot \sigma_v}{K_{np}};$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{сж}^{об} \cdot K_{дин} - K_v \cdot \sigma_v}{K_n},$$

где  $\sigma_v, \sigma_{np}, \sigma_n$  – первоначальные напряжения горного массива, соответственно вертикальные, продольные (горизонтальные, ориентированные по простиранию рудного тела), поперечные (горизонтальные, ориентированные вкрест простирания рудного тела), МПа;  $\sigma_{сж}^{об}$  – предел прочности горной породы на сжатие, в образце МПа;  $K_v, K_{np}, K_n$  – коэффици-

енты концентрации соответственно вертикального и горизонтального продольного и поперечного напряжений на контуре выработки в месте проявления горного давления (стенки, почва, кровля, углы);  $K_{дин}$  – коэффициент удароопасности, зависящий от формы проявления горного давления.

Коэффициент удароопасности  $K_{дин}$  зависит от формы проявления горного давления и принимается при трещинообразовании и обрушении отдельных блоков пород равным 0,5–0,6; при интенсивном заколообразовании, «шелушении», «стрелянии» – 0,7–0,8; при толчках, микроударах, собственно горных ударах – 0,8 и выше.

Коэффициенты концентрации техногенных напряжений на контуре удароопасной выработки определяются любыми известными методами моделирования, физическими или численными, с использованием оптических материалов, на основе решения граничных сингулярных уравнений [16, 17] или конечноэлементного анализа [18, 19]. В настоящих исследованиях коэффициенты концентрации приняты по результатам исследований профессора Л.И. Сосновского [3] и профессора А.В. Зубкова [15], полученным на основе оптического моделирования, а также по результатам исследования кандидата геолого-минералогических наук Е.Л. Сосновской [20], полученным на основе конечноэлементного анализа с помощью программного комплекса FEM, разработанного профессором О.В. Зотеевым (Институт горного дела УрО РАН).

*Анализ гравитационно-тектонической структуры природных напряжений.* Одним из существенных факторов, влияющих на удароопасность горных выработок, является действие в массиве значительной тектонической составляющей напряжений. Измеренные и расчетные напряжения можно разделить на гравитационные и тектонические составляющие на основе выражений [15]:



$$\begin{aligned}\sigma_{\phi}^{\phi} &= \sigma_{\phi}^z + \sigma_{\phi}^T; \\ \sigma_{np}^{\phi} &= \sigma_{np}^z + \sigma_{np}^T; \\ \sigma_n^{\phi} &= \sigma_n^z + \sigma_n^T,\end{aligned}$$

где  $\sigma_{\phi}^{\phi}, \sigma_{np}^{\phi}, \sigma_n^{\phi}$  – фактические измеренные вертикальные, продольные, поперечные напряжения горных пород, МПа;  $\sigma_{\phi}^z, \sigma_{np}^z, \sigma_n^z$  – гравитационные вертикальные, продольные, поперечные напряжения массива горных пород по А.Н. Диннику, МПа;  $\sigma_{\phi}^T, \sigma_{np}^T, \sigma_n^T$  – тектонические вертикальные, продольные, поперечные напряжения массива горных пород, МПа.

Гравитационные компоненты можно определить из зависимостей:

$$\begin{aligned}\sigma_B^{Tp} &= \gamma H; \\ \sigma_{\Gamma}^{Tp} &= \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H,\end{aligned}$$

где  $\gamma$  – объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $H$  – глубина горных работ, м.

Тектонические составляющие напряжений после преобразования формулы можно вычислить из выражений:

$$\begin{aligned}\sigma_B^T &= \sigma_B^{\phi} - \gamma H; \\ \sigma_{\Gamma}^T &= \sigma_{\Gamma}^{\phi} - \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H.\end{aligned}$$

Таким образом, используя фактические значения природных напряжений, полученных натурными измерениями или из решения обратной геомеханической задачи, а также зная глубину залегания выработок, в которых происходили измерения или были зафиксированы проявления горного давления, учитывая коэффициент Пуассона и объемный вес горных пород, можно определять степень влияния тектонических компонент массива горных пород на первоначальное поле напряжений.

### Результаты исследований

*Натурные измерения напряженно-деформированного состояния массива.* В июне 2019 г. на вновь эксплуатируемых горизонтах 507 и 617 м шахты Юго-

Западная с целью оценки естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород были заложены три наблюдательные станции горного давления. Глубина горных работ до земной поверхности в районе станций № 1 и 2 равна 617–620 м. Глубина горных работ в районе заложения станции № 3 составляет 550 м. Общее количество разгрузочных щелей по станции № 1 – 15 шт., по станции № 2 – 9 шт., по станции № 3 – 7 шт. Горные породы в районе заложения станций – амфиболиты, габбро, лейкократовые граниты. Прочностные и упругие характеристики горных пород, необходимые для расчетов деформаций и напряжений, приняты по результатам лабораторных испытаний физико-механических свойств пород, отобранных в районе заложения станций (табл. 1). Модуль упругости горных пород в образце составил 0,12–0,80 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,15–0,31. Объемный вес пород – 0,027 МН/м<sup>3</sup>. Коэффициент структурного ослабления пород в районе заложения станций – 0,5–0,7. Следует отметить, что станции № 1 и 2 заложены в ранее затопленных горных выработках, которые в настоящее время находятся в обводненном, заиленном состоянии. Станция № 3, заложённая горизонтом выше станций № 1 и 2, находится в естественно-сухом состоянии, затоплению не подвергалась.

Следует отметить, что, так как результаты измерений по станциям № 1 и 2 практически совпадают, расположены сравнительно недалеко друг от друга (в пределах 400 м), результаты измерений по горизонту 617 м представилось возможным объединить для улучшения статистической достоверности результатов (табл. 2). По усредненным результатам произведен расчет тектонической компоненты поля естественных напряжений (табл. 3).

Сравнительный анализ результатов измерений на шахте Юго-Западная с ранее установленными закономерностями распределения природных



Таблица 1

**Основные характеристики  
наблюдательных станций горного давления**

Table 1

**Main characteristics of rock  
pressure monitoring stations**

Номер станции	1	2	3
Горизонт заложения станции, м	617	617	507
Глубина относительно земной поверхности, м	617	617	550
Количество разгрузочных щелей, шт.	15	9	7
Горные породы	Габбро	Лейкократовые граниты, амфиболиты	Амфиболиты
Модуль упругости в образце, ГПа	11,6	56,3	80,8
Коэффициент Пуассона	0,31	0,15	0,22
Средний размер структурного блока, м	0,55	0,55	0,30
Коэффициент структурного ослабления	0,65	0,65	0,51

Таблица 2

**Результаты натуральных измерений напряжений  
массива горных пород на шахте Юго-Западная**

Table 2

**Field measurement results for the initial rock  
mass stresses at the Yugo-Zapadnaya mine**

Напряжение	Глубина измерений, м	Результаты натуральных измерений напряжений горных массивов			
		Число единичных определений напряжения	Напряжение, МПа	Отношение продольного напряжения к вертикальному $K_{np} = \sigma_{np} / \sigma_v$	Отношение поперечного напряжения к вертикальному $K_n = \sigma_n / \sigma_v$
Горизонт 617 м					
Станция № 1					
Вертикальное	617	23	-16,8±2,1	0,7	0,6
Продольное		20	-11,7±1,3		
Поперечное		20	-10,2±3,8		
Станция № 2					
Вертикальное	617	9	-16,8±5,9	0,6	0,7
Продольное		9	-10,6±2,7		
Поперечное		9	-12,3±4,1		
Среднее по горизонту 617 м					
Вертикальное	617	61	-16,7±1,4	0,6	0,6
Продольное		47	-10,4±0,3		
Поперечное		47	-9,3±1,6		
Горизонт 507 м					
Станция № 3					
Вертикальное	550	5	-15,0±3	1	1,5
Продольное		6	-14,8±4,5		
Поперечное		6	-23,0±2,6		



Таблица 3

**Расчетные гравитационные и тектонические компоненты  
естественного напряженно-деформированного состояния  
массива горных пород шахты Юго-Западная**

Table 3

**Estimated gravitational and tectonic components of the initial  
stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine rock mass**

Глубина горных работ, м	Расчетные напряжения массива пород, МПа					
	Вертикальные		Продольные		Поперечные	
	Гравитаци- онные $\sigma_g^z$	Тектониче- ские $\sigma_g^T$	Гравитаци- онные $\sigma_{np}^z$	Тектониче- ские $\sigma_{np}^T$	Гравитаци- онные $\sigma_n^z$	Тектониче- ские $\sigma_n^T$
550	-14,9	-0,1	-5,2	-9,6	-5,2	-17,8
617	-16,7	–	-5,8	-4,6	-5,8	-3,5

напряжений в массиве Дарасунского месторождения [10–13] позволяет отметить следующее.

Измерения напряжений на верхнем горизонте 507 м по станции № 3 подтверждают тот факт, что на месторождении в целом действуют гравитационно-тектонические напряжения. Вертикальные напряжения характеризуются действиями в основном веса налегающих пород. Максимальные напряжения действуют вкрест простирания рудных структур. Коэффициент поперечного бокового распора  $K_n$  составляет 1,5, коэффициент продольного бокового распора  $K_{np}$  – 1. Ранними исследованиями для условий рудника  $K_{np}$  был получен в диапазоне 0,3–1,3,  $K_n$  – в диапазоне 1,7–1,9 [11]. Тектоническая компонента продольных напряжений равна -9,6 МПа, компонента поперечных напряжений равна -17,8 МПа. Эти значения близки к полученным ранее на самых нижних горизонтах Центрального и Восточного участков Дарасунского рудного поля (-12,9 и -18 МПа соответственно). Таким образом, результаты измерений, полученные по станции № 3, согласуются с ранее установленными на Дарасунском месторождении зависимостями в пределах погрешности измерений. На горизонте 507 м однозначно установлен гравитационно-тектониче-

ский характер распределения естественных напряжений.

Результаты измерений по станциям № 1 и 2, расположенным на нижнем горизонте 617 м, несколько отличаются. Горизонтальные напряжения значительно меньше вертикальных. Коэффициент бокового распора как вкрест, так и по простиранию рудных жил практически одинаков и равен 0,6–0,7. Тектоническая компонента горизонтальных напряжений значительно меньше установленных ранее и находится в диапазоне -3,5...-4,6 МПа. Таким образом, поле природных напряжений здесь близко к гравитационной теории Динника. Можно сделать вывод, что массив горизонта 617 м находится в разгруженном состоянии.

Однако следует учитывать, что наблюдательные станции № 1, 2 заложены в ранее затопленных выработках. В настоящее время стенки выработок находятся в заиленном водонасыщенном состоянии. Очевидно, что тектоническая составляющая горизонтальных природных напряжений на этих участках снизилась в результате разгрузки трещин массива под действием длительного гидравлического напора. Можно заключить, что в инженерных расчетах устойчивости элементов геоконструкций при восстановлении шахты Юго-Западная потребуются районирование массива горных пород по



степени сохранности выработок на разгруженные участки гравитационных напряжений и гравитационно-тектонические, средненапряженные области.

*Оценка природных напряжений по проявлениям горного давления.* В начале января 2005 г. на ООО «Дарасунский рудник» была создана служба по прогнозированию и предотвращению горных ударов (СППГУ). По данным «Книги наблюдений за состоянием удароопасности выработок за 2005–2006 гг.», предоставленным службой СППГУ в 2005–2006 гг., на шахте Юго-Западная было зафиксировано 13 случаев динамических проявлений горного давления. Затем шахта была затоплена. После осушения горных выработок в 2019 г. на горизонтах 357, 407, 457, 507, 617 м службой СППГУ рудника признаков динамических проявлений удароопасности не наблюдалось.

По зафиксированным случаям произведен расчет первоначальных напряжений высоконапряженных удароопасных участков для условий шахты Юго-Западная на основе решения обратной геомеханической задачи. По результатам расчетов можно отметить следующее.

Коэффициент бокового распора на высоконапряженных участках равен: продольный – 2,9, поперечный – 2,5. Средний коэффициент бокового распора составляет 2,7. Это соотношение близко к установленному ранее по проявлениям горного давления на Центральном и Восточном участках рудника, равному 3 [11]. Отклонение не превышает погрешности расчетов.

Расчетная тектоническая составляющая продольных напряжений на удароопасных участках в среднем составляет -50 МПа, тектоническая составляющая поперечных напряжений в среднем равна -37,5 МПа (табл. 4). Средняя тектоническая составляющая на высоконапряженных участках шахты Юго-Западная равна -39,6 МПа. Это значение также близко к установленному ранее среднему значению тектонических напряжений на удароопасных участках, равному -40,5 МПа [11].

## Заключение

На Дарасунском месторождении в целом действуют гравитационно-тектонические напряжения. Вместе с тем поле природных напряжений носит дискретно-фрактальный характер: выделяются локальные высоконапряженные участки с вероятностью проявления горного давления в динамических формах вплоть до микроударов, средненапряженные участки без видимых проявлений горного давления и разгруженные участки приконтурного массива горных пород.

Натурными измерениями на шахте Юго-Западная в 2019 г. был установлен средненапряженный характер распределения природных напряжений на незатопленных участках шахты и разгруженный – на подвергшихся осушению ранее обводненных участках. Высоконапряженных зон на эксплуатируемых в настоящее время горизонтах 507–617 м визуальными наблюдениями и инструментальными замерами не зафиксировано. Прочностных свойств горных пород, отобранных для лабораторных испытаний в 2019 г., существенно меньше установленных более ранними исследованиями, что также свидетельствует о пониженной по сравнению со средними условиями рудника удароопасности. Однако следует учесть, что при дальнейшем понижении горных работ геомеханическая ситуация может измениться. Могут появиться локальные высоконапряженные участки, как те, которые наблюдались в 2005–2006 гг.

В связи с этим в качестве граничных условий при инженерных геомеханических расчетах для условий шахты Юго-Западная Дарасунского месторождения предлагается дифференцированная оценка естественного напряженно-деформированного состояния. Вертикальные напряжения рекомендуется оценивать от веса массива налегающих пород. Горизонтальные напряжения рекомендуется рассчитывать в зависимости от конкретных горно-геологических условий участка месторождения на основе



Таблица 4

Расчетные первоначальные напряжения, их гравитационные и тектонические компоненты по данным проявлений горного давления на шахте Юго-Западная в 2005–2006 гг.

Table 4

Estimated initial stress and its gravitational and tectonic components based on the records of the dynamic rock pressure manifestation at the Yugo-Zapadnaya mine in 2005–2006

Глубина проявлений, м	Первоначальные напряжения массива пород, МПа								
	Вертикальные			Горизонтальные продольные			Горизонтальные поперечные		
	$\sigma_e^\phi$	$\sigma_e^z$	$\sigma_e^T$	$\sigma_{np}^\phi$	$\sigma_{np}^z$	$\sigma_{np}^T$	$\sigma_n^\phi$	$\sigma_n^z$	$\sigma_n^T$
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
717	-19,4	-19,4	–	-60,7	-6,8	-53,9	–	–	–
717	-19,4	-19,4	–	–	–	–	-67,5	-6,8	-60,7
667	-18	-18	–	–	–	–	-88,5	-6,3	-82,2
717	-19,4	-19,4	–	-52,8	-6,8	-46	–	–	–
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
717	-19,4	-19,4	–	–	–	–	-28,5	-6,8	-21,7
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
617	-16,7	-16,7	–	–	–	–	-31	-5,8	-25,2
667	-18	-18	–	–	–	–	-51,4	-6,3	-45,1
667	-18	-18	–	–	–	–	-45,4	-6,3	-39,1
Средние значения	-17,9	-17,9	–	-56,8	-6,8	-50	-43,6	-6,2	-37,5

установленных закономерностей:

– в обводненных, разгруженных, в том числе по технологическим причинам (сближенные выработки, накопление подземных пустот), участках

$$\sigma_{np} = \sigma_n - \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 4;$$

– в естественно-влажном массиве, при отсутствии видимых проявлений горного давления, сближенных выработок и близкорасположенных подземных пустот большого объема

$$\sigma_{np} = -\frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 9,6;$$

$$\sigma_n = -\frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 17,8;$$

– в высоконапряженных участках с зафиксированными проявлениями горного давления

$$\sigma_{np} = \sigma_n = -\frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma H - 39,5.$$

Полученные результаты отражают знания о месторождении на сегодняшний день и по мере развития горных работ и накопления новых данных могут быть скорректированы.

#### Библиографический список

1. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock mechanics for underground mining. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.
2. Jaeger J.C., Cook N.G.W. Fundamentals of rock mechanics. London: Chapman & Hall, 1979. 488 p.

3. Неганов В.П., Коваленко В.И., Зайцев Б.М., Казаченко Ю.А., Сосновский Л.И., Томилов В.Д. [и др.]. Технология разработки золоторудных месторождений / ред. В.П. Неганов. М.: Недра, 1995. 336 с.



4. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках: коллективная монография / под общ. ред. И.М. Петухова, А.Н. Ильина, К.Н. Трубецкого. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 377 с.

5. Сосновский Л.И., Филонюк В.А., Сосновская Е.Л. Механизм возникновения и закономерности пространственного распределения участков с относительно высокой и невысокой степенью естественной напряженности в горном массиве // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 2-1. С. 93–97.

6. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Прогноз потенциальной удароопасности крутопадающих жильных золоторудных месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 2. С. 74–85.

7. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 5. С. 21–29.

8. Amadei B., Stephansson O. Rock stress and its measurement. London: Chapman & Hall, 1997. 490 p.

9. Fairhurst C. Stress estimation in rock: a brief history and review. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. № 7-8. P. 957–973.

10. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. № 7-8. P. 975–989.

11. Сосновский Л.И. Геоинформационная модель напряженного состояния горного массива Дарасунского золоторудного месторождения // Маркшейдерия и недропользование. 2007. № 4. С. 61–64.

12. Сосновский Л.И., Егоров А.Л., Сосновская Э.М. Определение первоначальных напря-

жений массива горных пород одного из рудных месторождений Забайкалья // Проблемы горного производства Восточной Сибири: сб. науч. тр. Чита: Изд-во Читинского института природных ресурсов СО АН СССР, 1991. С. 3–6.

13. Сосновский Л.И., Рашкин А.В., Гараш Ю.Ю. Проявления горного давления на больших глубинах при ведении подземных горных работ на Дарасунском золоторудном месторождении // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2001. № 10 (34). С. 139–141.

14. Влох В.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 208 с.

15. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: Изд-во ИГД УрО РАН, 2001. 335 с.

16. Katsikadelis J.T. Boundary elements: theory and applications. Oxford: Elsevier, 2002. 336 p.

17. Машуков В.И. Численное решение некоторых двумерных задач теории упругости с помощью сингулярных интегральных уравнений // Динамика твердого тела: сб. науч. тр. Вып. 45. Новосибирск: Изд-во Института гидродинамики СО АН СССР, 1980. С. 130–140.

18. Rust W. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2015. 363 p.

19. Moatamedi M., Khawaja H.A. Finite element analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018. 154 p.

20. Сосновская Е.Л. Оценка техногенных напряжений на контуре очистных камер при разработке крутопадающих золоторудных жил малой мощности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 12. С. 82–88.

## References

1. Brady BHG, Brown ET. *Rock mechanics for underground mining*. Dordrecht: Springer; 2006. 628 p.

2. Jaeger JC, Cook NGW. *Fundamentals of rock mechanics*. London: Chapman & Hall, 1979. 488 p.

3. Neganov VP, Kovalenko VI, Zaitsev BM, Kazachenko YuA, Sosnovskii LI, Tomilov VD, et al. *Technology of developing gold deposits*. Moscow: Nedra; 1995. 336 p. (In Russ.)

4. Petukhov IM, Il'in AN, Trubetskoi KN. Prediction and prevention of rock burst at mines. Moscow: Academy of Mining Sciences; 1997. 377 p. (In Russ.)

5. Sosnovskii LI, Filonyuk VA, Sosnovskaya EL. Mechanism of occurrence and

patterns of spatial distribution of areas with a relatively-high and low natural stress in a mountain range. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2006;2-1:93–97. (In Russ.)

6. Sosnovskaya EL, Avdeev AN. The forecast of potential rock bump hazard of steeply pitching lode gold ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Proceedings of higher educational institutions*. Mining journal. 2016;2:74–85. (In Russ.)

7. Sosnovskaya EL, Avdeev AN. Control over the geotechnical processes at the gold-fields of Eastern Siberia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Proceedings of higher educational institutions*. Mining journal. 2019;5:21–29.



8. Amadei B, Stephansson O. *Rock stress and its measurement*. London: Chapman & Hall, 1997. 490 p.

9. Fairhurst C. Stress estimation in rock: a brief history and review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003;40(7-8):957–973.

10. Ljunggren C, Chang Y, Janson T, Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003;40(7-8):975–989.

11. Sosnovskii LI. Stress-strain geoinformation model of the Darasunsky gold mine rock mass. *Marksheideriya i nedropol'zovanie = Mining Survey and Subsoil Use*. 2007;4:61–64. (In Russ.)

12. Sosnovskii LI, Egorov AL, Sosnovskaya EM. Defining the initial stress of the rock mass of an ore deposit in Trans-Baikal region. *Problemy gornogo proizvodstva Vostochnoi Sibiri: sbornik nauchnykh trudov = Mining practice in Eastern Siberia: collection of scientific works*. Chita: Chita Institute of natural resources, the USSR's Academy of Sciences; 1991. p.3–6. (In Russ.)

13. Sosnovskii LI, Rashkin AV, Garash YuYu. Manifestations of rock pressure at great depths in underground mining at the Darasunsky gold mine. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii nauk ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of the*

*International Academy of Ecology and Life Safety*. 2001;10(34):139–141. (In Russ.)

14. Vlokh VP. *Rock pressure control at underground mines*. Moscow: Nedra; 1994. 208 p. (In Russ.)

15. Zubkov AV. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2001. 335 p. (In Russ.)

16. Katsikadelis JT. *Boundary elements: theory and applications*. Oxford: Elsevier; 2002. 336 p.

17. Mashukov VI. Numerical solution of some two-dimensional problems of elasticity theory by means of singular integral equations. In: *Solid body dynamics*. Vol. 45. Novosibirsk: Institute of Hydrodynamics, the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1980. p.130–140. (In Russ.)

18. Rust W. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer; 2015. 363 p.

19. Moatamedi M, Khawaja HA. *Finite element analysis*. Boca Raton: CRC Press; 2018. 154 p.

20. Sosnovskaya EL. Assessment of technogenic stresses in stopes when developing thin steeply dipping gold-ore veins. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;12:82–88. (In Russ.)

#### Критерии авторства / Authorship criteria

Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Arkady N. Avdeev, Elena L. Sosnovskaya and Alexander Yu. Bolotnev are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism

#### Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Сведения об авторах / Information about the authors



##### Авдеев Аркадий Николаевич,

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,  
✉ e-mail: avdeev0706@mail.ru

##### Arkady N. Avdeev,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher,  
Mining Institute, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
58, Mamina-Sibiryaka St., Yekaterinburg, 620075, Russia,  
✉ e-mail: avdeev0706@mail.ru



**Сосновская Елена Леонидовна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,  
e-mail: avdeev0706@mail.ru

**Elena L. Sosnovskaya,**  
Cand. Sci. (Geol. and Mineral.),  
Senior Researcher,  
Mining Institute, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
58, Mamina-Sibiryaka st., Yekaterinburg, 620075, Russia,  
e-mail: avdeev0706@mail.ru



**Болотнев Александр Юрьевич,**  
кандидат технических наук,  
технический руководитель лаборатории геомеханики и физики  
горных пород кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: abolotnev@mail.ru

**Alexander Yu. Bolotnev,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Technical Director, Laboratory of Rock Geomechanics and Physics,  
Department of Mineral Resource Development,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,  
e-mail: abolotnev@mail.ru