

УДК 662.831.3

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: avd8691@yandex.ru

ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА НИЖНИХ ГОРИЗОНТАХ ХОЛБИНСКОГО РУДНИКА

Аннотация:

Изложены результаты измерений природных напряжений на нижних горизонтах Холбинского рудника в 2017 г. Всего заложено 4 наблюдательных станции на гор. 1290 – 1190 м. Максимальная глубина измерений 940 м. Природные напряжения определялись методом целевой разгрузки на основе методики ИГД УрО РАН. В местах замера отобрано 7 проб горных пород и руд, проведены лабораторные испытания физических, прочностных и деформационных свойств. Установлено, что средняя плотность пород составила 2,75 г/см³, коэффициент Пуассона 0,18, модуль упругости 50,1 ГПа. Измеренные напряжения на глубине 860 – 940 м составляют: вертикальные – 3,6..25,8 МПа, горизонтальные продольные – 2,4..38,8 МПа, горизонтальные поперечные – 3,7..55,1 МПа. Установлено, что на величины измеренных напряжений значительное влияние оказывает тектоническая структура месторождения: максимальные значения горизонтальных напряжений зафиксированы по центру залежи между крупными тектоническими разломами, минимальные – на локально разрушенных участках. По результатам измерений предложены прогнозные зависимости для оценки первоначальных напряжений: вертикальные напряжения рассчитывать от веса налегающих пород, горизонтальные продольные напряжения оценивать как 80 % от вертикальных, горизонтальные поперечные – 170 % от вертикальных. Полученные закономерности использованы в качестве граничных условий для оценки напряженно-деформированного состояния горных выработок и целиков. Для практического применения разработано «Заключение об удороопасности и газодинамических проявлениях на Зун-Холбинском золоторудном месторождении».

Ключевые слова: природные гравитационно-тектонические напряжения, массив горных пород, крутопадающие жилы, физико-механические свойства горных пород, золоторудные месторождения, большие глубины

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.106

Sosnovskaya Elena L.

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Senior Researcher,
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,
Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: avd8691@yandex.ru

EVALUATION OF NATURAL STRESSES IN ROCK MASS AT LOWER HORIZONS OF KHOLBINSKY MINE

Abstract:

The paper presents the results of natural stress measurements at the lower horizons of the Kholbinsky mine in 2017. 4 observation stations have been laid down at the horizons 1290 – 1190 m. Maximum measurement depth is 940 m. Natural stresses were determined by the slot unloading method based on the method of the Institute of Mining of Ural Branch of RAS. 7 samples of rocks and ores were taken at the measuring sites to carry out the laboratory tests of physical, strength and deformation properties. It is established that the average rock density was 2.75 g/cm³, the Poisson's coefficient was 0.18 and the elastic modulus was 50.1 GPa. The measured stresses at a depth of 860 - 940 m are as follows: vertical -23,6..25,8 MPa, horizontal longitudinal -12,4..38,8 MPa, horizontal transverse -13,7..55,1 MPa. It is established that the values of measured stresses are significantly influenced by the tectonic structure of the deposit: the maximum values of horizontal stresses are fixed in the center of the deposit between large tectonic faults, and the minimum values are fixed on locally destroyed areas. Based on the measurement results, the forecasting dependences have been proposed to evaluate the initial stresses: to calculate vertical stresses from the weight of superimposed rocks, to estimate horizontal longitudinal stresses as 80 % of vertical ones and horizontal transverse as 170 % of vertical ones. The obtained regularities have been used as boundary conditions to evaluate the stress-deformed state of mine workings and pillars. The "Conclusion on Bump Hazard and Gas-Dynamic Aspects at Zun-Kholbinskoye Gold Ore Deposit" has been developed for practical application.

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

Введение

Сведения о месторождении. Зун-Холбинское золоторудное месторождение представлено крутопадающими жилами средней мощности. Геомеханические условия сложные. Массив горных пород нарушен тектоническими нарушениями и разломами. Имеются локальные обводненные участки. В настоящее время отрабатываются запасы на глубине 800 – 1000 м. Запасы металла в жилах распределены крайне неравномерно, контакты жил с вмещающими породами нечеткие и определяются по данным опробования. Рудные тела разрабатываются системами с магазинированием руды, с креплением выработанного пространства, с закладкой [1 – 4].

Сведения о ранее проведенных измерениях природных напряжений. Природное напряженное состояние массива горных пород на Зун-Холбинском месторождении с участием авторов исследовалось в 2002 – 2007 гг. В 2002 – 2003 гг. были измерены напряжения методом щелевой разгрузки на горизонтах 380 – 530 м в талых породах до подошвы горы. В 2007 г. службой СГС и РВР рудника при методическом руководстве специалистов ИрГТУ (ИРНИТУ) были измерены напряжения в талых породах значительно ниже подошвы горы на гор. 1490, 1440, 1390 м и вблизи земной поверхности в мерзлых породах (на глубине 50 м). По результатам этих измерений были установлены зависимости распределения первоначальных напряжений массива горных пород на месторождении (рис. 1).

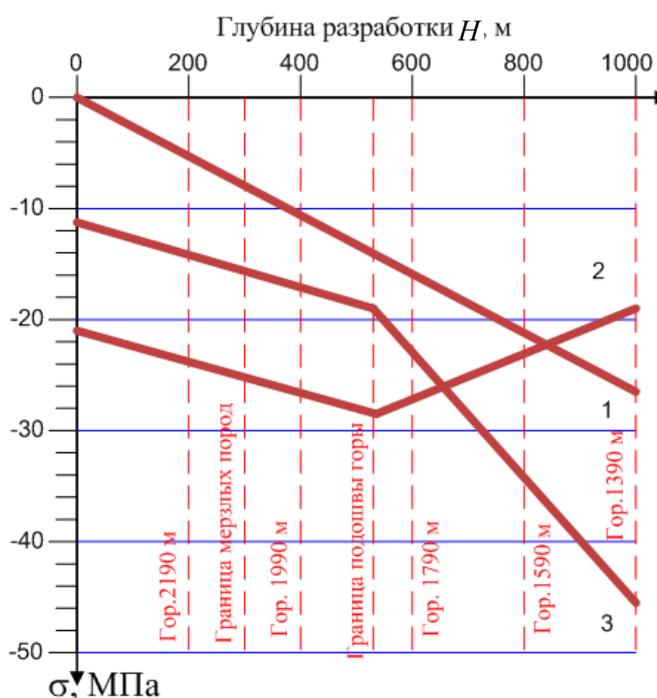


Рис. 1 – Зависимости распределения первоначальных напряжений массива горных пород на Зун-Холбинском месторождении по данным замеров 2002 – 2007 гг.:

1 – вертикальное напряжение, 2 – горизонтальное по простиранию рудных тел (продольное);
3 – горизонтальное вкрест простирания рудных тел (поперечное)

Для условий глубоких горизонтов, расположенных ниже подошвы горы, были установлены следующие закономерности распределения природных напряжений. Вертикальные напряжения характеризуются действиями только гравитационных сил, их тектоническая составляющая очень мала и не превышает 0,5. Горизонтальные продольные и поперечные напряжения имеют как гравитационную, так и тектоническую составляющие. Продольные напряжения $\sigma_{\text{пр}}$ имеют тектоническую составляющую -21,1 МПа, поперечные – -11,6 МПа.

В 2016 – 2017 гг. на нижних горизонтах рудника были отмечены вредные проявления горного давления в виде отслоения и обрушения блоков пород на локальных участках. В связи с этим возникла актуальная необходимость исследовать геомеханические условия на руднике с целью уточнения степени опасности для действующих и вновь проводимых горных выработок. С этой целью в 2017 г. авторами были проведены исследования геомеханических условий нижних горизонтов Холбинского рудника. В процессе исследований были уточнены как прочностные и упругие свойства горных пород, так и природное напряженное состояние их массива.

Методика исследований

Измерение напряжений горных пород производилось натурными измерениями щелевой разгрузкой по методике Института горного дела УрО РАН [5, 6] 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

$$\sigma_{\perp} = \frac{U \cdot E \cdot \pi \cdot K_n}{8R - \pi l [1 - k_{\perp} + \mu \cdot k_{\parallel}]}, \quad (1)$$

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_{\parallel} – значения коэффициентов концентрации напряжений в направлениях, соответственно, перпендикулярно и параллельно щели; μ – коэффициент Пуассона; K_n – поправочный коэффициент, зависящий от конкретных параметров щелей и пространственного их положения.

В применяемом варианте щелевой разгрузки диаметр щели составляет 230 мм, глубина щели находится в диапазоне 50..70 мм; расстояние между центрами отверстий для установки реперов $l = 9..11$ см. Коэффициенты концентрации напряжений составят $k_{\perp} = 0,15..0,8$; $k_{\parallel} = 0,01$, коэффициент $K_n = 1,84..6,14$.

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

$$\sigma_v = \frac{\sigma_v^{pri} - \sigma_{\pi}^i \cdot K_{\pi}}{K_{v(p)}}; \sigma_{\pi} = \frac{\sigma_v^{pi} - \sigma_{\pi}^i \cdot K_{\pi}}{K_{v(\pi)}}; \quad (2)$$
$$\sigma_{\pi} = \sigma_{\pi}^i - \mu (\sigma_{vcp}^{pri} - \sigma_{vcp} - \sigma_{\pi}^i); \sigma_{\pi} = \sigma_{\pi}^i - \mu (\sigma_{vcp}^{pi} - \sigma_{vcp} - \sigma_{\pi}^i)$$

где $\sigma_v, \sigma_{\pi}, \sigma_{\pi}^i$ – вертикальные, продольные и поперечные первоначальные напряжения, МПа; $\sigma_{\pi}^i, \sigma_{\pi}^i$ – горизонтальные напряжения в расчетной точке, соответственно, действующие вкrest простирания и по простиранию рудного тела, МПа; $\sigma_v^{pri}, \sigma_v^{pi}$ – вертикальные напряжения в расчетной точке, соответственно, действующие по простиранию и вкrest простирания рудного тела, МПа; $K_{\pi}, K_{v(p)}, K_{\pi}, K_{v(\pi)}$ – коэффициенты концентрации напряжений; σ_{vcp} – среднее значение вертикальных напряжений массива горных пород, МПа;

σ_{vcp}^{π} – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке квершлага, МПа; σ_{vcp}^{pi} – среднее значение вертикальных напряжений, измеренных на стенке штрека, МПа.

Средние значения коэффициентов концентрации напряжений при используемом варианте щелевой разгрузки составляют: $K_{v(p)}$ и $K_{v(\pi)} + 1,91$, K_{π} и $K_{\pi} - 0,87$.

Модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность пород и прочие физико-механические характеристики горных пород, необходимые для оценки геомеханических условий на руднике, были определены авторами на основании испытаний физико-механических свойств семи образцов горных пород, отобранных на нижних горизонтах рудника в местах заложения наблюдательных станций. Определение показателей физико-механических свойств горных пород производилось в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации на методы испытаний горных пород: ГОСТ 5180-84, ГОСТ 21153.3-85, ГОСТ 21153.2-84, ГОСТ 28985-91 и др. Деформационные характеристики определялись в диапазоне осевых напряжений от 5 до 50 % от величины предела прочности при одноосном сжатии.

Результаты исследований

Физико-механические свойства горных пород. Лабораторными испытаниями горных пород и руд, отобранных на нижних горизонтах рудника, установлено, что они характеризуются высокими прочностными и упругими свойствами (табл.1). По результатам испытаний определена средняя плотность пород нижних горизонтов, равная $2,75 \text{ г/см}^3$, пределы прочности при сжатии и растяжении в естественно-сухом состоянии – 69,6 и 11,3 МПа, в водонасыщенном состоянии – 53,2 и 11,5 МПа, соответственно. Угол внутреннего трения пород в сухом состоянии составляет в среднем 28° , во влажном состоянии 24° . Сцепление пород в сухом состоянии – 20,3 МПа, во влажном состоянии – 16,6 МПа. Степень размягчаемости варьируется в широких пределах от 0 до 60 %. Исследуемые породы характеризуются высокими упругими характеристиками. Статический модуль деформации горных пород равен 43,3 ГПа, коэффициент Пуассона 0,18, модуль Юнга 50,1 ГПа.

Таблица 1

Упругие и прочностные свойства горных пород Зун-Холбинского месторождения по данным испытаний 2017 г.

Наименование пород	Плотность, ρ , г/см^3	В воздушно-сухом состоянии		В водонасыщенном состоянии		Модуль упругости (Юнга) E_y , ГПа	Коэффициент Пуассона, μ	Модуль общей деформации статический, ГПа
		Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности при растяжении σ_r , МПа	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Предел прочности при растяжении σ_r , МПа			
Известняки	2,74	46,12	9,70	31,37	10,96	13,40	0,22	34,2
Метапесчаники	2,715	51,13	11,70	49,96	10,31	49,52	-	39,8
Диориты	2,84	93,68	11,13	58,61	12,37	91,73	0,38	62,0
Гранодиориты	2,78	114,70	14,14	80,20	14,52	46,40	-	49,9
Среднее	2,75	69,63	11,30	53,25	11,48	50,11	0,30	43,3

Природные напряжения. Летом 2017 г. на нижних горизонтах рудника заложено 4 наблюдательных станции горного давления (табл. 2). Первые три станции на гор. 1290 м, четвертая – на спиральном съезде горизонтом выше. Максимальная глубина измерений составила 940 м.

Первая станция расположена на левом фланге месторождения. Вторая станция заложена по центру месторождения, между двумя тектоническими разломами. Третья станция – на правом фланге месторождения, в районе влияния тектонического нарушения. Вблизи отмечена зона вывала на расстоянии примерно 100 м. Четвертая станция находится горизонтом выше первых трех, во фланговой части месторождения.

Таблица 2

Характеристики наблюдательных станций

№ станции	Дата закладки	Место заложения	Глубина заложения, м	Количество щелей, штук
1	4-5 августа 2017 г.	Квершлаг 31, штрек 7-2100, гор. 1290 м	940	13
2	4-5 августа 2017 г.	Квершлаг 11-бис 2, штрек 7-2100, гор. 1290 м	930	12
3	14 августа 2017 г.	Квершлаг на МТВ штрек 7-2100, гор. 1290 м	940	12
4	15 августа 2017 г.	НТС, рассечка пред поворотом на спиральный съезд, в районе МТ 8/С	860	6

Сводная таблица результатов натуральных измерений первоначального напряженного состояния массива горных пород на исследуемых глубинах приведена в табл. 3. Сравнительный анализ результатов измерений с ранее установленными закономерностями распределения природных напряжений в массиве Зун-Холбинского месторождения (см. рис. 1) позволяет отметить следующее.

Измерения напряжений на станциях 1, 2, 4 подтверждают тот факт, что ниже границы подошвы горы максимальные напряжения действуют вкрест простирания рудных структур. На участках измерений действуют гравитационно-тектонические напряжения. Поперечный коэффициент бокового распора $K_{\text{поп}}$ (вкрест простирания рудных тел) составляет 1,4 – 2,2, в среднем 1,8. Напряжения, действующие по простиранию рудных тел меньше, продольный коэффициент бокового распора $K_{\text{пр}}$ составляет 0,7 – 1,5, в среднем 1,0. Вертикальные напряжения характеризуются в основном действием веса налегающих пород.

Таблица 3

Результаты определения природных напряжений массива горных пород на нижних горизонтах рудника

Оrientировка напряжения	Результаты			
	Число единичных пределений напряжения	Значение напряжения, МПа	Отношение продольного напряжения к вертикальному $\sigma_{\text{пр}}/\sigma_{\text{в}}$	Отношение поперечного напряжения к вертикальному $\sigma_{\text{п}}/\sigma_{\text{в}}$
Станция 1				
Вертикальное	18	-25,8±3,5	0,7	1,4
Продольное	20	-16,8±1,5		
Поперечное	20	-32,5±3,7		
Станция 2				
Вертикальное	16	-25,6±2,4	1,5	2,2
Продольное	16	-38,8±1,6		
Поперечное	16	-55,1±1,4		
Станция 3				
Вертикальное	16	-25,9±8,7	0,5	0,6
Продольное	16	-12,4±3,9		
Поперечное	16	-13,7±1,3		
Станция 4				
Вертикальное	4	-23,6±7,5	0,9	1,8
Продольное	4	-20,8±3,3		
Поперечное	16	-43,8±3,2		

Станция № 3 заложена в районе вывалов горных пород, т. е. в зоне разгрузки массива горных пород. Коэффициенты бокового распора на этой станции приблизительно одинаковы и равны 0,5 – 0,6.

Такое распределение напряжений соответствует теории Динника (гравитационные напряжения). Величины первоначальных напряжений по теории Динника аппроксимируются формулами:

$$\sigma_v = \gamma H; \sigma_{пр} = \sigma_{п} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H = \frac{0,3}{1-0,3} \cdot \gamma H = 0,42 \cdot \gamma H,$$

где γ – плотность пород и руд, мН/м³; H – глубина горных работ, м.

Таким образом, теоретический коэффициент бокового распора равен 0,42.

Можно предположить, что тектоническая составляющая природных напряжений на участке измерений № 3 отсутствует в результате разгрузки массива горных пород близлежащими очистными выработками и вывалами горных пород.

Результаты измерений, полученные по станциям 1, 2, 4 хорошо согласуются с установленными закономерностями для жильных золоторудных месторождений, залегающих в талых породах сейсмически неактивных зон [7 –10]. Средние коэффициенты бокового распора для таких условий равны $K_{пр} = 1,2$, $K_{поп} = 1,7$. Повышение этого коэффициента в районе заложения станции 2 связано, очевидно, с наличием тектонических разломов и влиянием близлежащих очистных выработок. Следует отметить, что замерные станции 1 и 4 находятся во фланговых частях месторождения, поэтому в них влияние очистных выработок минимально и измеренные напряжения наиболее близки к природным. Поэтому для прогноза природного напряженного состояния при расчетах устойчивости подземных геоконструкций при дальнейшем понижении горных работ рекомендуется использовать следующие зависимости:

$$\sigma_v = -\gamma H, \quad \sigma_{пр} = K_{пр} \sigma_v = -0,8 \gamma H, \quad \sigma_{п} = K_{поп} \sigma_v = -1,6 \gamma H.$$

Естественно, полученные результаты отражают знания о месторождении на сегодняшний день и при получении новых данных могут быть скорректированы.

Заключение

Результаты исследований использованы в качестве граничных условий для оценки напряженно-деформированного состояния горных выработок и целиков при разработке «Заключения об удароопасности и газодинамических проявлениях на Зун-Холбинском золоторудном месторождении в 2017 г.».

Литература

1. Павлов А.М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота: монография / А.М. Павлов. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. - 128 с.
2. Павлов А.М. Геомеханическое обоснование от селективной к валовой выемки сближенных рудных тел на Зун-Холбинском месторождении / А.М. Павлов, Е.А. Мильшин, Л.И.Сосновский // Горный информационно-аналитический бюллетень - 2008. - № 5. - С.136 - 142.
3. Павлов А.М. Повышение эффективности подземной разработки золоторудных месторождений Восточной Сибири / А.М. Павлов, А.А. Федоляк // Известия Сибирского отделения РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. - 2018. - Т. 41. № 4 (65). - С. 97-106.
4. Филонюк В.А. О некоторых причинах низкой эффективности геолого-методического обеспечения современных поисково-разведочных и эксплуатационных техноло-

гий в золотодобывающей отрасли / В.А. Филонюк, И.А. Дубовская // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. - 2016. - № 3 (56). - С. 29 – 43.

5. Влох В.П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н.П. Влох. – М.: Недра, 1994. - 208 с.

6. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335 с.

7. Технология разработки золоторудных месторождений / В.П. Неганов, В.И. Коваленко, Л.И. Сосновский и др.; под редакцией В.П. Неганова - М.: Недра, 1995. – 336 с.

8. Sosnovskaia E.L. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia (in eng.) / Sosnovskaia E.L., Avdeev A.N. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2019. - № 5. - С. 21 - 29.

9. 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.

10. Закономерности структурной взаимосвязи природных полей напряжений и аномальных концентраций рудного вещества в пределах золоторудных месторождений / В.А. Филонюк, В.В. Корнаков, Л.И. Сосновский, Е.Л. Сосновская // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. - 2014. - № 5 (48). - С. 88 - 101.