УДК 622.831 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37

Прогноз потенциальной удароопасности нижних горизонтов Холбинского рудника

Сосновская Е. Л.[1]*, Авдеев А. Н.[1]
[1] Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: stress.igd@mail.ru

Реферат

Введение. *В 2016–2017 гг. на нижних горизонтах рудника Холбинский были отмечены вредные проявления горного давления в виде отслоений и обрушений блоков пород. Возникла актуальная необходимость уточнить геомеханические условия на руднике с целью оценки степени опасности действующих и вновь проводимых горных выработок.*

Методология. *В процессе исследований был использован комплекс методов и методик, включающий лабораторные исследования прочностных и упругих свойств горных пород; пространственно-статистический анализ трещиноватости; анализ степени дискования керна в приконтурном массиве разведочных выработок; натурные измерения природных напряжений методом щелевой разгрузки по методике ИГД УрО РАН; инженерно-математические расчеты техногенных напряжений в конструктивных элементах геотехнологий по авторским методикам; математическое моделировние методом конечных элементов; визуальные наблюдения степени устойчивости обнажений выработок и др.*

Результаты. *Установлено, что массив горных пород нижних горизонтов Холбинского рудника характеризуется категорией удароопасности «неопасно». Горные выработки и целики находятся в неустойчивом состоянии. Зафиксированы проявления горного давления в статических формах. Для повышения устойчивости конструктивных элементов систем разработки рекомендуется комплекс инженерно-технических мероприятий, в том числе: своевременное погашение междуэтажных и междукамерных целиков; сокращение срока выемки запасов блока; переход на ударобезопасные системы с закладкой; крепление стенок очистного пространства анкерами и др. По результатам исследований разработано Заключение об удароопасности и газодинамических проявлениях на Зун-Холбинском золоторудном месторождении (2017).*

Ключевые слова: *золоторудные жилы малой и средней мощности; устойчивость; удароопасность; горные выработки; целики; физико-механические свойства горных пород; природные и техногенные напряжения.*

Введение. Зун-Холбинское золоторудное месторождение представлено крутопадающими жилами малой и средней мощности. Геомеханические условия сложные. В массиве горных пород присутствуют тектонические нарушения и разломы. Имеются локальные обводненные участки. В настоящее время отрабатываются запасы на глубине 860–940 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, 2].

В 2016–2017 гг. на отдельных участках нижних горизонтов рудника были отмечены вредные проявления горного давления в виде отслоений и обрушений блоков пород. В связи с этим возникла актуальная необходимость уточнить гео-

механические условия на руднике с целью оценки степени опасности действующих и вновь проводимых горных выработок.

Методики. В процессе исследований были уточнены прочностные и упругие свойства горных пород, проведен анализ трещиноватости по керну разведочных скважин, определены природные и техногенные напряжения в приконтурном массиве, проведена оценка устойчивости и удароопасности конструктивных элементов систем разработки: междуэтажных и междукамерных целиков, стенок (бортов) очистных камер, подготовительных выработок.

Определение показателей физико-механических свойств горных пород производилось в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации на методы испытаний горных пород: ГОСТ 518084, ГОСТ 21153.3-85, ГОСТ 21153.2-84, ГОСТ 28985-91 и др. Анализ склонности горных пород к хрупкому разрушению под нагрузкой был проведен по двум методикам: критерию запредельного деформирования (соотношению модулей упругости E и спада M) и коэффициенту хрупкости (соотношению пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении $\sigma_{сж}/\sigma_{р}$). С целью уточнения категории устойчивости горных пород в массиве проведен пространственно-статистический анализ тектонических структур по керновому материалу разведочных скважин, пробуренных на нижних горизонтах рудника. Произведена оценка категории удароопасности базовым прогнозным методом – по степени дискования керна [3].

Определение напряжений горных пород производилось натурными измерениями щелевой разгрузкой по методике Института горного дела УрО РАН [4, 5]. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов систем разработки проведено Е. Л. Сосновской по комбинированной авторской методике Л. И. Сосновского. [3, 6, 7]. Методика подразумевает инженерный расчет техногенных напряжений в геоконструкциях с определением коэффициентов концентрации напряжений на основе конечно-элементного моделирования. Расчетные напряжения сравниваются с допустимыми напряжениями по проявлениям горного давления в статической и динамической форме. Такой подход позволяет оперативно оценивать конструктивные параметры геотехнологий в различных комбинациях и выбирать из них наиболее безопасные и эффективные.

Основные используемые формулы следующие:

$$\sigma_{мэц} = \left\{\left[\left(K_{вц}\sigma_{в} + K_{пц}\sigma_{п}\right) - \sigma_{п}\right]K_{об} + \sigma_{п}\right\}\Big/K_{Ц} \le \sigma_{доп};$$

$$\sigma_{мкц} = \left\{\left[\left(K_{пц}\sigma_{п} + K_{пр.ц}\sigma_{пр}\right) - \sigma_{пр}\right]K_{об} + \sigma_{пр}\right\}\Big/K_{Ц} \le \sigma_{доп};$$

$$\sigma_{с} = \left(K_{вс}\sigma_{в} + K_{гс}\sigma_{г}\right)K_{об} = \left(K_{пс}\sigma_{п} + K_{пр.с}\sigma_{пр}\right)K_{об} \le \sigma_{доп};$$

$$\sigma^{ст}_{доп} = \frac{\sigma^{об}K_{с}}{K_{дл}}; \qquad \sigma^{дин}_{доп} = K_{уд}\sigma^{об}; \qquad K_{Ц} = \sqrt{b_{ц}/m},$$

где $\sigma_{мэц}$, $\sigma_{мкц}$, $\sigma_{с}$ – техногенные напряжения в междуэтажном целике (потолочине), междукамерном целике, стенке (бортах) очистной камеры соответственно, МПа; $\sigma^{ст}_{доп}$, $\sigma^{дин}_{доп}$ – допустимые напряжения в массиве горных пород по статическим и динамическим проявлениям горного давления соответственно, МПа; $K_{вц}$, $K_{пц}$, $K_{пр.ц}$ – коэффициенты концентрации техногенных напряжений в целиках от действия единичных нагрузок, соответственно вертикальных, поперечных (горизонтальных, направленных вкрест простирания жилы) и продольных (горизонтальных, направленных по простиранию жилы); $K_{вс}$, $K_{гс}$, $K_{пс}$, $K_{пр.с}$ – коэффициенты концентрации техногенных напряжений в стенках камеры от действия

единичных нагрузок, соответственно вертикальных, горизонтальных, поперечных и продольных; $\sigma_в$, $\sigma_г$, $\sigma_п$, $\sigma_{пр}$ – напряжения в нетронутом массиве (первоначальные), действующие соответственно вертикально, горизонтально, вкрест простирания, по простиранию, МПа; $K_{об}$ – коэффициент перехода от плоской к объемной геомеханической задаче (коэффициент объемности); $K_Ц$ – коэффициент Церна; $\sigma_{об}$ – предел прочности горных пород в образце, МПа; $K_с$ – коэффициент структурного ослабления; $K_{дл}$ – коэффициент длительной прочности; $K_{уд}$ – коэффициент удароопасности; $b_ц$ – толщина целика, м; m – выемочная мощность жилы, м.

Коэффициент объемности, определяемый по методике А. В. Зубкова [4], для средних условий рудника составляет 0,63. Коэффициент длительной прочности в соответствии с расчетным временем службы подготовительных горных выработок и целиков принимается равным 1,4–1,5 [6]. Коэффициенты концентраций напряжений определялись методом конечных элементов [8–11] с использованием программного сертифицированного комплекса FEM, разработанного О. В. Зотеевым. Коэффициент удароопасности в соответствии с действующими в РФ нормативно-техническими документами составляет 0,7 (70 % от прочности образца в массиве на сжатие).

Результаты. В 2017 г. заложено 4 наблюдательных станции горного давления на гор. 1290–1190 м. Глубина заложения станций 860–940 м. На этих же горизонтах отобраны образцы горных пород, по которым проведены лабораторные испытания физических, прочностных и деформационных свойств. Вмещающие породы представлены известняками, алевролито-песчаниками, диоритами, гранодиоритами, гнейсами, плагиогранитами. Рудные тела – кварц-сульфидные жилы. Лабораторными испытаниями установлено, что средняя плотность горных пород нижних горизонтов равна 2,75 г/см^3. Пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении получены: в естественно сухом состоянии 69,6 и 11,5 МПа, в водонасыщенном состоянии 53,2 и 11,3 МПа соответственно. Следует отметить, что прочность кварц-сульфидных руд выше, чем вмещающих пород, и составляет в среднем 131 МПа, при водонасыщении прочность руды практически не снижается. Угол внутреннего трения пород в сухом состоянии составляет в среднем 31°, во влажном состоянии – 27°. Сцепление пород в сухом состоянии – 15,8 МПа, во влажном – 13,7 МПа. Исследуемые породы характеризуются высокими упругими характеристиками. Статический модуль деформации горных пород равен 43,3 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,18, модуль Юнга – 50,1 ГПа.

Следует отметить, что степень размягчаемости горных пород в результате водонасыщения отдельных проб варьируется в широких пределах – от 0 до 60 %. Очевидно, высокая степень размягчаемости горных пород в приконтурном массиве будет отрицательно влиять на устойчивость локальных обводненных участков нижних горизонтов рудника. Этот вывод подтверждается петрографическим анализом исследуемых образцов. Вследствие наличия хрупких обломочных и разноразмерных зерен кварца и кальцита, скрепленных размягчаемым углеродистым и глинистым цементом, в естественно сухом состоянии породы будут иметь высокие прочностные и упругие свойства, склонность к хрупкому разрушению под нагрузкой, в то же время под воздействием воды прочностные свойства и склонность к хрупкому разрушению пород будут существенно снижаться.

Для оценки потенциальной удароопасности массива месторождения большое значение имеет выявление склонности горных пород к хрупкому разрушению под нагрузкой. Оценка потенциальной удароопасности по критерию запредельного деформирования показала, что коэффициент удароопасности горных пород нижних горизонтов рудника в среднем равен 0,47, что меньше критерия ударо-

опасности $E/M = 1$ и отвечает характеристике массива «неудароопасный». Коэффициент хрупкости составляет в среднем для сухих пород 5,8, для водонасыщенных – 4,6, что отвечает категории массива горных пород «неудароопасный» как по критерию Г. Н. Кузнецова (т. е. соотношение меньше 6), так и по критерию Я. А. Бича (т. е. меньше 10).

Анализ трещиноватости массива горных пород по керну разведочных скважин, пробуренных на нижних горизонтах, позволил определить среднестатистическое значение интенсивности трещиноватости, равное 12,2±1,6 трещин на 1 м. Средний размер структурного блока составляет 7–8 см, коэффициент структурного ослабления – 0,36–0,40, модуль деформации с учетом структурного ослабления пород в массиве – 5–8 ГПа. Более половины объема проходки горных выработок осуществляется в тектонически ослабленных зонах и обводненных породах. С учетом значительной трещиноватости и обводненности горных пород нижних горизонтов рудника установлены основные категории горных пород по устойчивости: «средней устойчивости» (43 % массива нижних горизонтов) и «неустойчивые» (57 %).

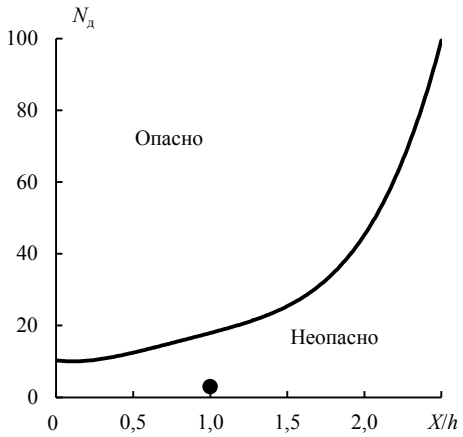

Рис. 1. Номограмма определения категории удароопасности по дискованию керна. Скважина РС-875. Отмечены диски при $X = 5{,}2$ м; $N_д = 3$

Fig. 1. Nomogram of determining the category of rockburst hazard of a mine working by core disking. Drillhole RS-875. Marked discs at $X = 5.2$ m, $N_d = 3$

Анализ дискообразования керна позволил отметить следующее. Зафиксированы отдельные участки дискообразования с ограниченной протяженностью, не превышающей 0,20–0,25 м, характеризующие наличие контактов крепких и слабых пород (рис. 1, где X – расстояние от устья шпура до максимума напряжений, h – высота выработки; $N_д$ – количество дисков на 1 м). Дискования толщиной 1–5 мм в количестве более 5–10 дисков на этих участках не отмечается. Отношение средней толщины диска к его диаметру в зоне максимума опорного давления составляет в среднем 1 и более. Анализ керна по степени дискования подтверждает вывод, что горные выработки на нижних горизонтах Холбинского рудника имеют категорию «неопасно» по горным ударам.

На месторождении действуют высокие природные гравитационно-тектонические напряжения. По результатам натурных измерений на глубинах 860–940 м они составляют: вертикальные –23,6…–25,8 МПа, горизонтальные продольные –12,4…–38,8 МПа, поперечные –13,7...–55,1 МПа. Знак «минус» означает сжатие пород. На величины измеренных напряжений значительное влияние оказывает тектоническая структура месторождения: максимальные значения напряжений зафиксированы по центру залежи между крупными тектоническими разломами, минимальные – на локальных разрушенных участках. Тектоническая компонента природных напряжений находится в диапазоне –8…–34 МПа. Для средних условий нижних горизонтов рудника предложены следующие прогнозные зависимости первоначальных напряжений:

$$\sigma_в = -\gamma H; \qquad \sigma_п = -1{,}6\gamma H; \qquad \sigma_{пр} = -0{,}8\gamma H,$$

где γ – объемный вес пород и руд, МН/м^3; H – глубина горных работ, м.

Полученные зависимости использованы в качестве граничных условий для оценки напряженно-деформированного состояния горных выработок и целиков.

НДС в конструктивных элементах системы разработки. Установлено, что техногенные напряжения в потолочине очистных камер и междукамерных целиках носят сжимающий характер (табл. 1). Их величины (–141…–228 МПа) значительно превышают допустимые на сжатие, равные 18 МПа. Принятые на руднике междуэтажные целики высотой 6 м и междукамерные целики шириной 9 м являются неустойчивыми, склонными к проявлениям горного давления как в статической, так и в динамической формах. Такие целики рекомендуется своевременно погашать, снижая опасную концентрацию напряжений.

Таблица 1. Результаты расчетов НДС в конструктивных элементах систем разработки
Table 1. The calculations results of induced stresses in the geotechnologies structural elements

Глубина горных работ, м	Техногенные напряжения, МПа		
	в междуэтажном целике	в междукамерном целике	в стенках очистных камер
800	–125	–141	+6,7
900	–141	–158	+7,5
1000	–228	–176	+8,4

Знак «–» означает сжатие пород, знак «+» – растяжение.

Напряжения на контуре стенок камер носят, наоборот, растягивающий характер. Значения их превышают допустимые на растяжение, равные 3 МПа. Ранее проведенными исследованиями [1, 2] установлено наличие в бортах очистных камер слоя пород, которые претерпевают растягивающие напряжения толщиной до 4,5–5,0 м. Таким образом, стенки очистных камер на нижних горизонтах Холбинского рудника являются неустойчивыми.

НДС в окрестности подготовительных выработок. Известно, что в зоне влияния очистных камер подготовительные выработки становятся неустойчивыми и удароопасными, особенно на больших глубинах [12]. Поэтому для уменьшения концентраций техногенных напряжений и повышения устойчивости горных выработок в настоящее время на руднике применяется полевая подготовка рудных тел.

Для оценки устойчивости подготовительных выработок проведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния с применением метода конечных элементов. В процессе установлены основные закономерности распределения техногенных напряжений в кровле, углах кровли и стенках полевых откаточных штреков в зависимости от глубины горных работ (800–1000 м) и расстояния D между очистной камерой и откаточным штреком (рис. 2).

Напряжения в кровле и углах кровли полевых штреков носят сжимающий характер и значительно превышают допустимые на сжатие. В стенках выработок при D менее 15 м отмечен разрушающийся слой растягивающих напряжений толщиной 0,5–1,5 м, при D более 30 м напряжения в стенках сжимающие, превышающие допустимые. Наиболее значительное влияние очистная камера оказывает на устойчивость углов кровли и стенок подготовительных штреков.

Установлена область перегиба графиков изменения полных напряжений на контуре полевых штреков, характеризующая границу зоны опорного давления очистных камер, при увеличении которой техногенные напряжения в полевых штреках уменьшаются незначительно. Расчетная зона опорного давления составляет в среднем D = 20–30 м.

Расчет критических глубин по горным ударам. В процессе исследований установлено, что на руднике потенциально удароопасными являются подготовительные выработки, междукамерные и междуэтажные целики. Для средних горнотехнических и горно-геологических условий отработки нижних горизонтов рудника критические глубины по проявлениям горного давления в динамических формах составят: для подготовительных выработок $H_{кр} = 9{,}7\sigma^{об} \approx 537$ м; для междуэтажных и междукамерных целиков $H_{кр} = 4{,}1\sigma^{об} \approx 514–680$ м. В настоящее время глубина горных работ на руднике превысила расчетные критические значения.

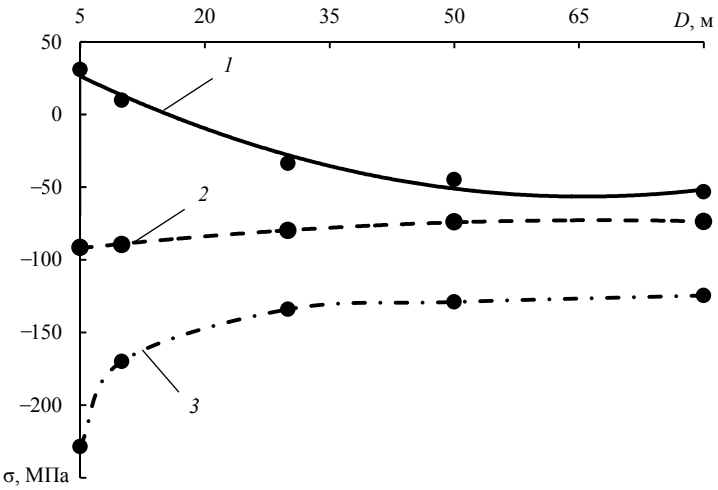

Рис. 2. Техногенные напряжения на контуре полевых штреков:
1, *2*, *3* – стенки, кровля, углы кровли штрека соответственно; *D* – расстояние между штреком и очистной камерой
Fig. 2. Mining-induced stresses in the drift surrounding rock:
1, *2*, *3* – respectively the walls, roof, roof corners of the drift; *D* – distance between the drift and the productivity room

Выводы и рекомендации. На основании всего изложенного можно заключить, что горные выработки и целики на нижних горизонтах Холбинского рудника находятся в неустойчивом, потенциально удароопасном состоянии. На месторождении действуют высокие природные гравитационно-тектонические напряжения. В то же время проведенный на нижних горизонтах рудника визуальный осмотр горных выработок подтвердил наличие проявлений горного давления только в статических формах, проявляющихся в виде отслоения пород по естественной трещиноватости и нарушении элементов крепления. Признаков проявлений горного давления в динамических, удароопасных формах не выявлено. Характерных дисков по керну разведочных скважин не наблюдается. Это можно объяснить тем, что на нижних горизонтах горные породы в основном не имеют склонности к хрупкому разрушению под нагрузкой (по результатам лабораторных исследований) или теряют ее вследствие обводненности или повышенной трещиноватости в массиве. То есть массив горных пород становится более неустойчивым, но вместе с тем менее удароопасным.

Таким образом, несмотря на то что в настоящее время горные выработки и целики нижних горизонтов Холбинского рудника находятся в неустойчивом состоянии, массив горных пород в целом характеризуется категорией удароопасности «неопасно». Естественно, при дальнейшем понижении работ геомеханическая ситуация может ухудшиться.

Для повышения устойчивости конструктивных элементов геотехнологий и безопасности горных работ при отработке нижних горизонтов рудника рекомендуется комплекс мероприятий, в том числе: придание потолочине шатровой формы; проходка полевых подготовительных выработок шатровой формы с анкерным креплением или разгрузкой углов кровли щелями; проектирование расстояния между камерами и полевыми выработками за пределами зоны опорного давления не менее 25 м; создание в потолочине разгрузочных щелей; создание элементов искусственной податливости в потолочине и междукамерных целиках; крепление разрушающегося слоя в стенках камер анкерами; сокращение срока выемки запасов в блоке до 1–2 мес.; своевременное погашение междуэтажных и междукамерных целиков, переход на ударобезопасные системы с закладкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов А. М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2013. 128 с.

2. Павлов А. М., Федоляк А. А. Повышение эффективности подземной разработки золоторудных месторождений Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 4(65). С. 97–106.

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

4. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 335 с.

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

6. Технология разработки золоторудных месторождений / под ред. В. П. Неганова. М.: Недра, 1995. 336 с.

7. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Управление геомеханическими процессами на золоторудных жильных месторождениях Восточной Сибири // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 5. С. 21–29 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-21-29

8. Reddy J. N. An introduction to nonlinear finite element analysis. Oxford: Oxford University Press, 2004. 488 p.

9. Kattan P. I., Voyiadjis G. Z. Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools. Berlin: Springer, 2002. 113 p.

10. Wilhelm Rust. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 363 p.

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

12. Сосновская Е. Л., Васильев Д. С., Лхамсурэн Бямбасурэн, Ляхович В. И. Оценка напряженно-деформированного состояния подготовительных выработок при полевой подготовке крутопадающих рудных тел // Проблемы развития минеральной базы Восточной Сибири. 2016. № 16. С. 56–62.

Поступила в редакцию 12 июля 2019 года

Сведения об авторах:

Сосновская Елена Леонидовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: stress.igd@mail.ru

Авдеев Аркадий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: avdeev0706@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37

Forecasting potential rockburst hazard of Kholbinsky mine lower horizons

Elena L. Sosnovskaia[1], Arkadii N. Avdeev[1]
[1] Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *In 2016–2017 the lower horizons of Kholbinsky mine showed harmful rock pressure manifestation in the shape of detachment and caving of rock blocks. There is a critical need to specify geomechanical conditions in the mine in order to estimate the hazard level of currently operating and new mine workings.*

Methodology. *In the course of the research, a complex of methods and techniques including laboratory experiments on strength and elastic properties of rocks; spatial and statistic analysis of rock jointing; analysis of the level of kern disking in the marginal massif of prospecting holes; in-situ measurement of*

natural stresses by the method of crack release by the method of IM UB RAS; engineering and mathematical calculations of technogenic stresses in design elements of geotechnologies by proprietary techniques; mathematical modelling by the finite element method; visual observations of mine workings baring stability level, etc.

Results. *It has been stated that a massif of rocks of Kholbinskymine lower horizons is caregorized as "non-hazardous". Mine workings and pillars are in the unstable state. Statistic forms of rock pressure manifestation have been recorded. In order to improve the stability of support systems design elements, a complex of engineering-technical measures is required, including: well-timed extraction floor and intervening pillars; block reserves extraction term reduction; switch to rockburst-safe systems with backfilling; excavation walls supporting with anchors, etc. A final Report on rockbust hazard and gas-dynamic manifestations at Zun-Kholba goldmine has been worked out according to the results of the research (2017).*

Key words: *narrow and large gold lodes; stability; rockburst hazard; mine workings; pillars; physical-mechanical properties of rocks; natural and technogenic stresses.*

REFERENCES

1. Pavlov A. M. *Improving the technologies of lode goldfields underground mining: monograph*. Irkutsk: INRTU Publishing; 2013. (In Russ.)
2. Pavlov A. M., Fedoliak A. A. Improving efficiency of gold deposit underground mining in Eastern Siberia. *Izvestiia Sibirskogo otdeleniia RAEN. Geologiia, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2018; 41; 4(65): 97–106. (In Russ.)
3. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. The forecast of potential rock bump hazard of steeply pitching lode gold ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 2: 74–85. (In Russ.)
4. Zubkov A. V. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)
5. Vlokh N. P. *Rock pressure control in underground mines*. Moscow: Nedra Pushing; 1994. (In Russ.)
6. Neganov V. P. (ed.) *Goldfields development technique*. Moscow: Nedra Pushing; 1995. (In Russ.)
7. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Control over the geomechanical processes at the goldfields of Eastern Siberia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 5: 21–29. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-21-29
8. Reddy J. N. *An introduction to nonlinear finite element analysis*. Oxford: Oxford University Press, 2004. 488 p.
9. Kattan P. I., Voyiadjis G. Z. *Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools*. Berlin: Springer; 2002. 113 p.
10. Wilhelm Rust. *Non-linear finite element analysis in structural mechanics*. Switzerland: Springer International Publishing; 2015. 363 p.
11. M. Moatamedi, Hassan A. Khawaja. *Finite element analysis*. Boca Raton: CRC Press; 2018. 154 p.
12. Sosnovskaia E. L., Vasiliev D. S., Lkhamsuren Biambasuren, Liakhovich V. I. Estimation of stress-strain state of development headings at in-stone development of steeply-pitching ore bodies. *Problemy razvitiia mineralnoi bazy Vostochnoi Sibiri = Eastern Siberia Mineral Resource Development Problems*. 2016; 16: 56–62. (In Russ.)

Received 12 July 2019

Information about authors:

Elena L. Sosnovskaia – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher of the Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: stress.igd@mail.ru
Arkadii N. Avdeev – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: avdeev0706@mail.ru

Для цитирования: Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Прогноз потенциальной удароопасности нижних горизонтов Холбинского рудника // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 8. С. 30–37. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37
For citation: Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Forecasting potential rockburst hazard of Kholbinsky mine lower horizons. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 8: 30–37 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37