

# ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.032.2:622.831.3

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-72-81

## Прогнозирование напряженных зон на различных этапах отработки золоторудного месторождения

**Мороз Н. Е.<sup>1\*</sup>, Белова М. В.<sup>1</sup>, Рукавишников Г. Д.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ),  
г. Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

### Реферат

**Актуальность работы.** Традиционной проблемой, возникающей при разработке золоторудного месторождения подземным способом, является проявление горного давления в виде интенсивной трещиноватости массива горных пород, внезапных вывалов и обрушений, нередко в динамической форме в виде горных ударов. Для обеспечения безопасности ведения горных работ в подобной обстановке необходима оценка текущего напряженного состояния и прогнозирование дальнейшего изменения напряженно-деформированного состояния массива.

**Цель работы.** Выявление напряженных зон при разработке золоторудных месторождений. Оценка склонности месторождений к горным ударам.

**Метод и методология.** Для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород применяется метод конечных элементов, базирующийся на решении упруго-пластической задачи. Для ее решения использовано программное обеспечение Fidesys Bundle 1.6 Professional.

**Результаты работы.** Оконтуривание потенциально опасных зон выполнено по критическим значениям коэффициента удароопасности, полученным на основе величин максимальных сжимающих напряжений, возникающих в горном массиве в результате отработки рудного тела системой разработки с магазинированием руды.

**Область применения результатов.** Результаты, изложенные в статье, могут быть использованы при инструментальном мониторинге геомеханического состояния на рудниках-аналогах.

**Вывод.** Представленный в статье подход к оценке напряженного состояния массива горных пород позволяет повысить безопасность горных работ за счет расширения систем геомеханического мониторинга.

**Ключевые слова:** массив горных пород; золоторудное месторождение; магазинирование руды; безопасность горных работ; геомеханика; численное моделирование; метод конечных элементов; максимальные сжимающие напряжения; коэффициент удароопасности.

**Постановка задачи.** Рассматривается вопрос идентификации проблемных, с геомеханической точки зрения, зон на золоторудных месторождениях [1, 2]. Одним из подходов к решению данного вопроса является численное моделирование напряженно-деформированного состояния [3]. Представленное в работе моделирование выполнено с использованием программного обеспечения САЕ Fidesys [4]. Геометрия модели отражает «усредненную» горно-геологическую ситуацию, которая встречается при подземной разработке жильного золота [5–7].

Данная модель является достаточной для оценки характера распределения напряжений вокруг извлекаемого крутопадающего рудного тела и подготовительных выработок. Параметры модели представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Параметры модели**  
**Table 1. Model parameters**

Угол падения рудного тела .....	70°
Мощность рудного тела .....	2 м
Расстояние между штреем и рудным телом .....	10 м
Площадь сечения полевого штреека .....	12 м <sup>2</sup>
Высота междуэтажной потолочкины .....	6 м

Границы расчетной области заданы на достаточном расстоянии, чтобы не повлиять на перераспределение напряжений вокруг выработанного пространства. Необходимые для моделирования физико-механические свойства пород и руд отражены в табл. 2 и также являются обобщенными по известным золотым месторождениям [7–9].

**Таблица 2. Физико-механические свойства пород и руд в модели**  
**Table 2. Physical and mechanical properties of rock and ore in the model**

Параметр	Вмещающая порода	Руда	Обрушеннная порода	Руда в магазине
Модуль упругости, ГПа	45,0	40,0	0,35	0,15
Коэффициент Пуассона	0,20	0,20	0,15	0,15
Удельный вес, кг/м <sup>3</sup>	2700	2800	1800	2100

На рис. 1 показана расчетная область условной модели с высотными отметками земной поверхности и подземных горизонтов, а также распределение максимальных напряжений в расчетной области на момент подготовки этажа между горизонтами +350 и +300 м.

В расчетной области заданы граничные условия на ребрах:

$$\text{AD: } u_y = 0; \quad \text{AB: } u_x = 0; \quad \text{CD: } u_x = 0.$$

На нижнем ребре AD задавалось условие равенства нулю вертикальной компоненты перемещений. На боковых ребрах AB и CD задавалось нулевое равенство перемещений по горизонтали. Подобная система связей необходима для исключения свободных перемещений или вращения области в поле координат [10]. Далее расчетная область разбивается на сетку конечных элементов.

**Этапы моделирования.** В заданной горно-геологической обстановке наибольшее распространение получила система разработки с магазинированием руды в различных технических исполнениях [11–13]. Таким образом, рассматривается данная система разработки с характерными горно-техническими параметрами и рассчитывается для следующих ситуаций:

- подготовленный этаж до начала ведения очистных работ;
- начало разработки этажа;
- подход очистных работ к середине этажа;
- отработка этажа до потолочкины;

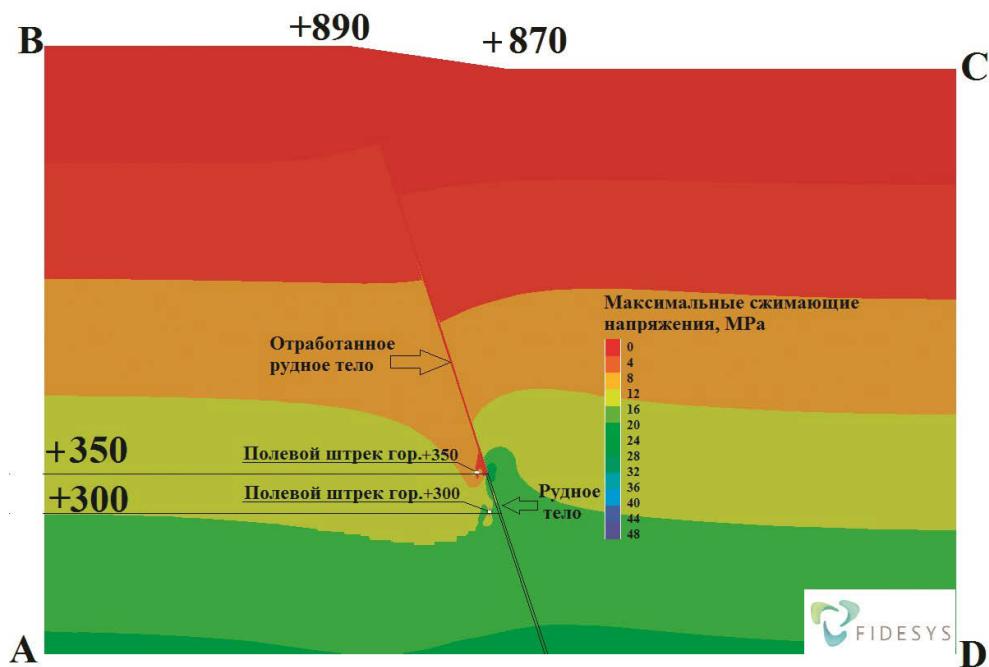


Рисунок 1. Расчетная область модели  
Figure 1. Computational domain of the model

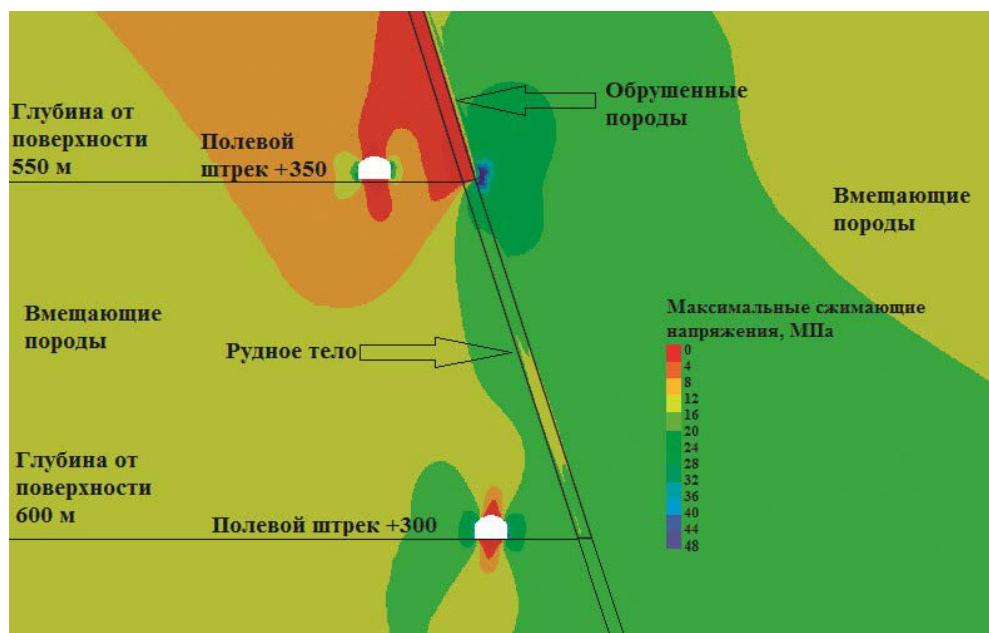


Рисунок 2. Подготовленный этаж для отработки рудного тела  
Figure 2. A level prepared for ore body mining

– выпуск магазина;  
 – подсечка потолочины и обрушение вмещающих пород.  
 Поскольку из всех подземных горных выработок, пройденных во время подготовительных и нарезных работ на горизонте, только откаточный и вентиляционный

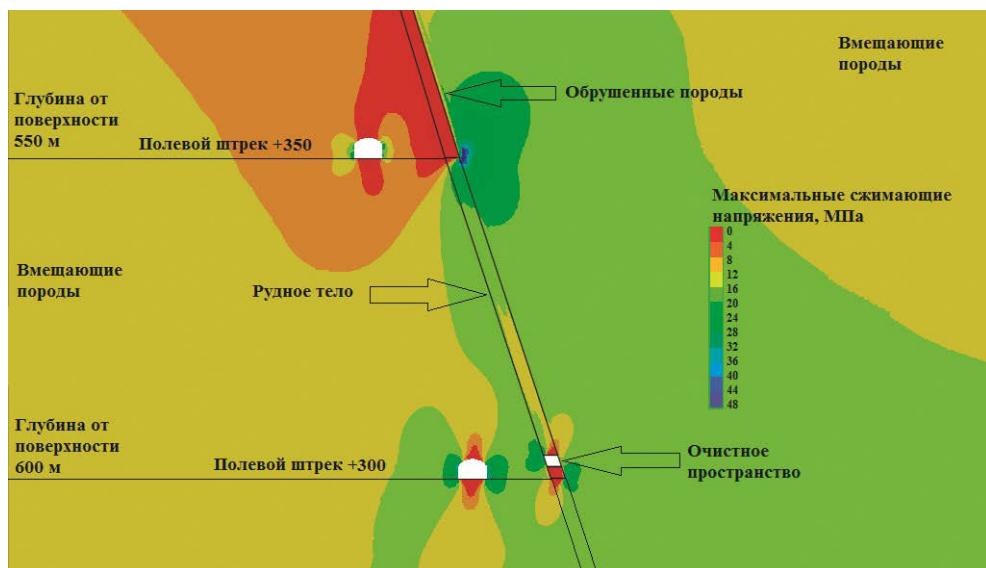


Рисунок 3. Распределение максимальных напряжений в начале отработки этажа  
 Figure 3. Maximum stresses distribution at the beginning of the level's development

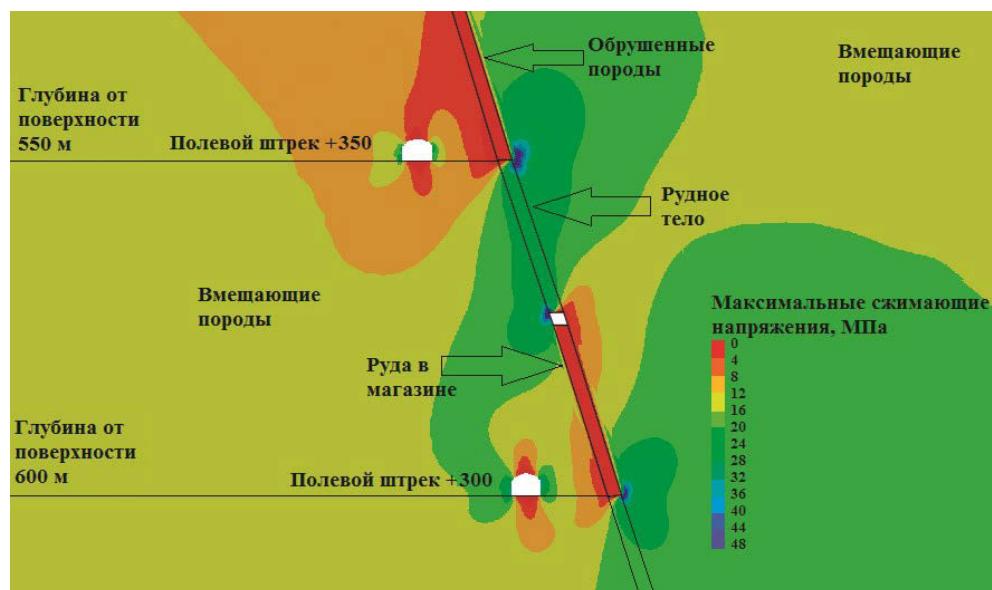


Рисунок 4. Середина отработки этажа  
 Figure 4. The middle of the level's development

онный полевые штреки имеют срок службы, равный сроку отработки горизонта, то именно эти выработки и включены в исследуемую модель.

На представленных моделях (рис. 2–7) демонстрируется, как значительная глубина ведения горных работ и площадь выработанного пространства создают

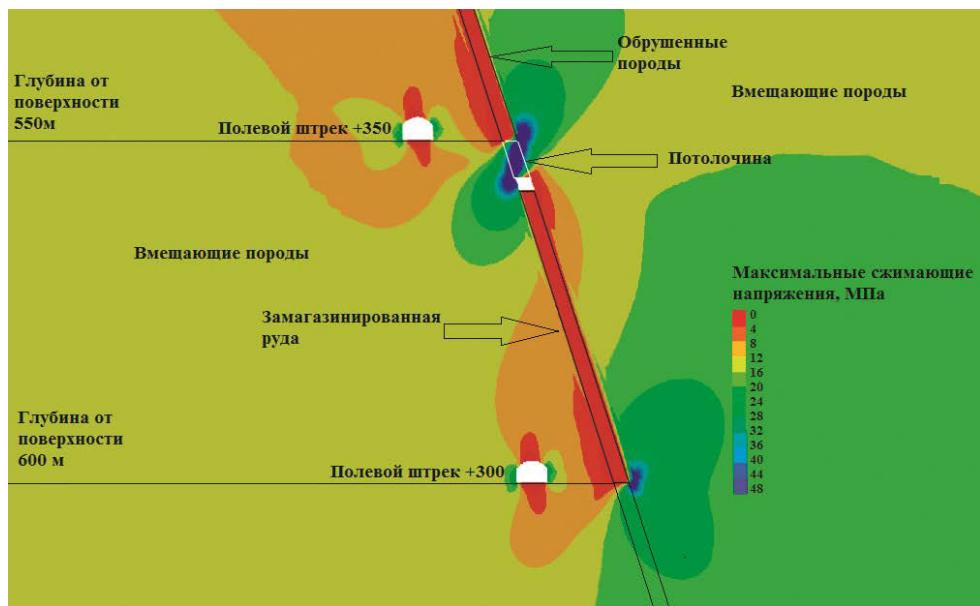


Рисунок 5. Распределение максимальных напряжений в потолочине, в нижней части отработанного пространства и у полевого штрека при отработке рудного тела в этаже до потолочины

Figure 5. Maximum stresses distribution in the floor pillar, in the lower part of the goaf and near the lateral drift when developing the ore body in the level to floor pillar

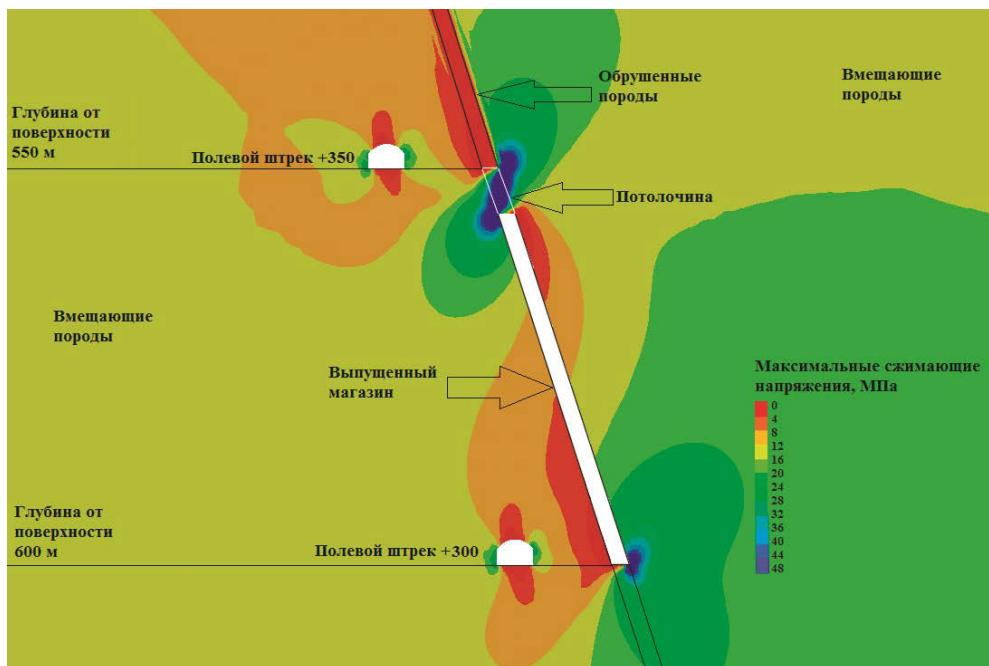


Рисунок 6. Распределение максимальных напряжений в потолочине, в нижней части отработанного пространства и у полевого штрека после выпуска замагазинированной руды

Figure 6. Maximum stresses distribution in the floor pillar, in the lower part of goaf and near the lateral drift after stored ore drawing

условия для формирования энергоактивных зон, которым необходима количественная и качественная оценка устойчивого состояния [14].

При анализе хрупких пород и руд рассчитывается коэффициент удароопасности:

$$K_y = \frac{\sigma_3}{\sigma_c},$$

где  $\sigma_3$  – максимальные сжимающие напряжения, действующие в моделируемом массиве;  $\sigma_c$  – предел прочности образца пород на сжатие.

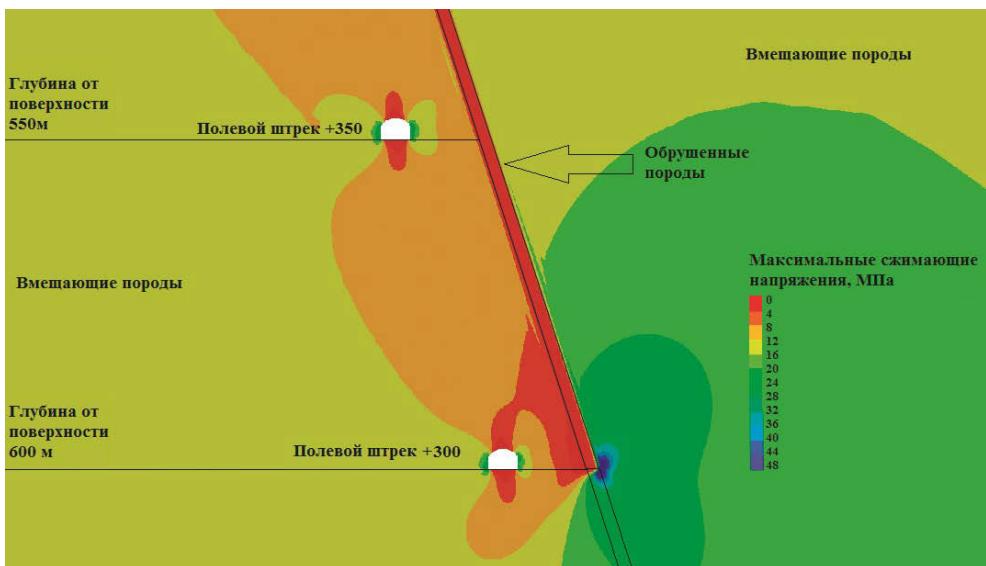


Рисунок 7. Распределение максимальных напряжений после подсечки потолочины, заполнения отработанного пространства породой от проходческих работ и от самообрушающихся пород с висячего и лежачего боков рудного тела

Figure 7. Distribution of maximum stresses after the floor pillar under-mining and goaf backfilling with the rock from tunneling operations and mashing down rock from the hanging and lying sides of the ore body

Согласно «Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности...» (*Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности, утв. приказом № 505 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 08.12.2020 г. URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/mining/acts/general/> (дата обращения: 8 декабря 2020 г.)*) при значениях параметра  $K_y \geq 0,8$  массив считается склонным к горным ударам.

На практике разработки золотых месторождений значение предела прочности на сжатие вмещающих рудное тело пород значительно варьируются – в диапазоне от 60 до 200 МПа [7–9]. В расчетной модели максимальные сжимающие напряжения составили 48 МПа. Отношение  $\sigma_3/\sigma_c$  в таком случае составляет от 0,8 до 0,24, что говорит о несклонности породного массива к горным ударам при пределе прочности более 60 МПа.

**Анализ результатов численного моделирования.** В данном исследовании оценено перераспределение техногенного напряжения в рудо-породном массиве в период ведения горных работ (рис. 8).

Максимальные сжимающие напряжения возникают на границе упругих сред в междуэтажной потолочине и почвенной части висячего бока отрабатываемой жилы (показаны эпюры синего цвета), при подходе очистных работ к потолочине и после выпуска магазина, и составляют 44–48 МПа. Напряжения у подготовительных (полевых) выработок варьируются в диапазоне 20–32 МПа. Такие напряжения начинают появляться в боках полевого штрека горизонта +300 м в начальный период отработки и действуют до конца отработки этажа.

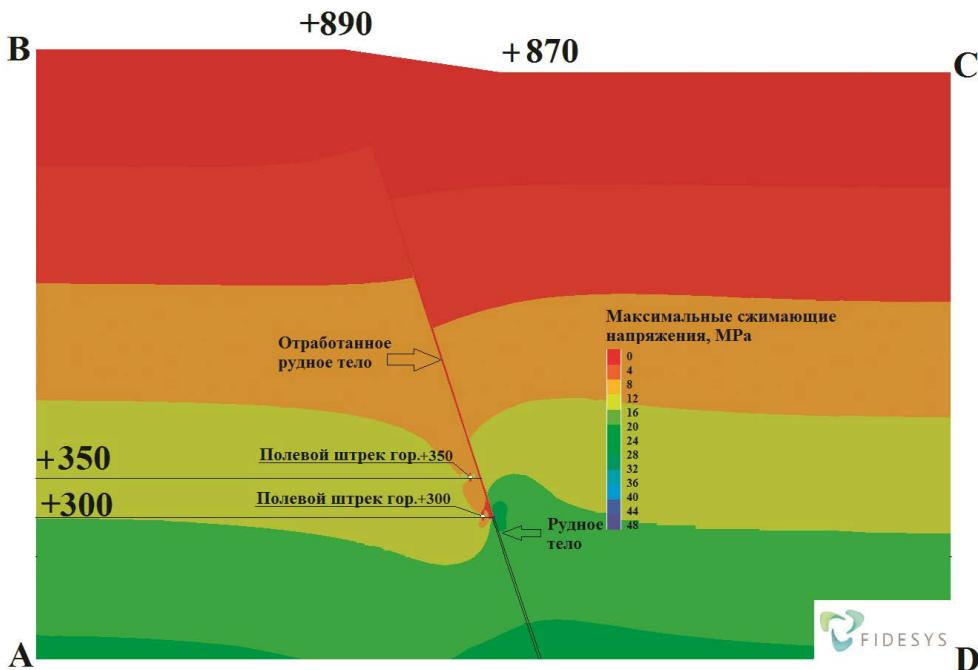


Рисунок 8. Общая картина распределения максимальных напряжений в расчетной области после отработки этажа между гор. +300 м и +350 м

Figure 8. A general picture of maximum stresses distribution in the computational domain after mining the level between hor. +300 m and +350 m

Для сравнения скажем, что, согласно формуле А. Н. Динника, величина вертикальных напряжений в нетронутом массиве на глубине 600 м равна 16 МПа. Таким образом, коэффициент концентрации напряжения в исследуемой области равен 3.

**Вывод по результатам моделирования.** Наиболее опасный с геомеханической точки зрения этап отработки рудного тела наступает на момент полной отработки этажа и выпуска замагазинированной руды (рис. 6).

По опыту разработки месторождений золота на больших глубинах в местах концентрации напряжений можно ожидать локальное трещинообразование и вывалообразование [15].

При проходке полевых штреков на меньшем расстоянии от лежачего бока возможна концентрация напряжений сверх обозначенных в модели, что в свою очередь может привести к процессу деформирования крепи [16, 17].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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

2. Murwanashyaka E., Li X. A review on rockburst as a serious safety problem in deep underground mines and other excavation projects // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2019. Vol. 8. Issue 11. P. 419–426.
3. Сидоров Д. В., Потапчук М. И., Сидляр А. В., Курсакин Г. А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 392–398. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.392
4. Вершинин А. В., Левин В. А., Морозов Е. М. Прочностной анализ: Фидесис в руках инженера. М.: ЛЕНАНД, 2015. 408 с.
5. Avdeev A., Sosnovskaya E. Geomechanical conditions of vein gold deposits in permafrost zone // E3S Web of Conferences. 192, 01026 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202019201026
6. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Никитин И. В., Рожков А. А., Соломеин Ю. М., Дедов О. Ю. Особенности подземной разработки Ветренского золоторудного месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 12–22. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22
7. Сафьянов А. С., Сосновская Е. Л. Геомеханические условия массива горных пород Коневинского золоторудного месторождения // Вестник ИрГТУ. 2014. № 11(94). С. 98–103.
8. Сосновская Е. Л., Сосновский Л. И., Авдеев А. Н. Оценка геомеханических условий отработки пологих и наклонных жил Ирокиндинского золоторудного месторождения в криолитозоне // Вестник ИрГТУ. 2015. № 10(105). С. 99–107.
9. Рассказов М. И., Потапчук М. И., Цой Д. И., Терешкин А. А., Гладырь А. В. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного месторождения Делькен // Проблемы недропользования. 2020. № 2(25). С. 116–126. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.116
10. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.
11. Технология разработки золоторудных месторождений / В. П. Неганов [и др.]. М.: Недра, 1995. 336 с.
12. Лизункин В. М., Погудин А. А. Усовершенствованная система разработки с магазинированием руды для выемки маломощных крутопадающих жил в условиях повышенного горного давления // ГИАБ. 2010. № 1. С. 193–197.
13. Пирогов Г. Г. Новая технология очистной выемки маломощных крутопадающих жил сплошным этажным магазинированием руды // Вестник ЧитГУ. 2011. № 8(75). С. 104–109.
14. Сидоров Д. В., Потапчук М. И., Сидляр А. В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 604–611. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.604
15. Li C. C., Principles and methods of rock support for rockburst control // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.001>
16. Ghorbani M., Shahriar K., Sharifzadeh M., et al. A critical review on the developments of rock support systems in high stressground conditions // International Journal of Mining Science and Technology. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.002>
17. Kaiser P. K., Cai M. Design of rock support system under rockburst condition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. URL: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00215>

Поступила в редакцию 5 октября 2021 года

#### Сведения об авторах:

**Мороз Никита Евгеньевич** – студент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4401-1989>

**Белова Маргарита Владимировна** – ведущий инженер отдела слаботочных сетей Санкт-Петербургского горного университета. E-mail: mbelova194@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7051-278X>

**Рукавишников Георгий Дмитриевич** – заведующий центром геодинамического мониторинга Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела. E-mail: geodmiruk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8228-2870>

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-72-81

#### Predicting stress zones at various stages of goldfield development

Nikita E. Moroz<sup>1</sup>, Margarita V. Belova<sup>1</sup>, Georgii D. Rukavishnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

<sup>2</sup> Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying (VNIMI), St. Petersburg, Russia.

#### Abstract

**Research relevance.** Rock pressure manifestations are a common problem occurring when developing a goldfield by underground mining. Rock pressure manifests as intense rock mass fracturing, sudden

*rockfall, and caving, often dynamic and taking the form of rock bursts. It is essential to assess the current stress state of the rock mass and predict further changes in its stress-strain state to ensure safe mining in these kinds of conditions.*

**The research objective** is to identify stressed zones occurring during goldfield development and assess the fields' tendency to rock bursts.

**Methods of research.** The finite element method based on an elastic-plastic problem is used to assess the stress-strain state of a rock mass. Fidesys Bundle 1.6 Professional software was used to solve the problem.

**Research results.** Potentially hazardous zones were outlined by the ultimate values of the rock burst hazard coefficient that were obtained from maximum compressive stress values that develop within the rock mass because of shrinkage mining.

**Scope of results.** The research results can be used for geomechanical state instrumental control at similar mines.

**Conclusion.** The presented approach to assessing the stress state of a rock mass makes it possible to increase the safety of mining operations by expanding the geomechanical monitoring systems.

**Keywords:** rock mass; goldfield; shrinkage; mining safety; geomechanics; numerical modeling; finite element method; maximum compressive stresses; rock burst hazard coefficient.

#### REFERENCES

1. 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.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-8-30-37
2. Murwanashyaka E., Li X. A review on rockburst as a serious safety problem in deep underground mines and other excavation projects. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).* 2019; 8(11): 419–426.
3. Sidorov D. V., Potapchuk M. I., Sidliar A. V., Kursakin G. A. Analysing rock hazard when developing deep levels of Nikolaevsky deposit. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute.* 2019; 238: 392–398 (In Russ.). Available from: doi: 10.31897/PMI.2019.4.392
4. Vershinin A. V., Levin V. A., Morozov E. M. *Strength analysis: Fidesys in the hands of an engineer.* Moscow: LENAND Publishing; 2015. (In Russ.)
5. Avdeev A., Sosnovskaya E. Geomechanical conditions of vein gold deposits in permafrost zone. In: *E3S Web of Conferences.* 192, 01026 (2020). Available from: doi: 10.1051/e3sconf/202019201026
6. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Iu. G., Baranovskii K. V., Nikitin I. V., Rozhkov A. A., Solomein Iu. M., Dedov O. Iu. Peculiarities of underground mining of Vtrensky gold mine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2018; 4: 12–22 (In Russ.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22
7. Safianov A. S., Sosnovskaia E. L. Geomechanical conditions of the Konevinskoe gold deposit rock massif. *Vestnik IrGTU = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2014; 11(94): 98–103. (In Russ.)
8. Sosnovskaia E. L., Sosnovskii L. I., Avdeev A. N. Study of geomechanical mining conditions of steeply pitching and low pitched ore veins in the Irokindinskoye permafrost gold mine. *Vestnik IrGTU = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2015; 10(105): 99–107. (In Russ.)
9. Rasskazov M. I., Potapchuk M. I., Tsoi D. I., Tereshkin A. A., Gladyr A. V. Study of mining and geological features and definition of physical and mechanical properties of rocks of Delken gold deposits. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use.* 2020; 2(25): 116–126 (In Russ.). Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2020.02.116
10. Fadeev A. B. *Finite element method in geomechanics.* Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)
11. Neganyov V. P. et al. *Gold field development technology.* Moscow: Nedra Publishing; 1995. (In Russ.)
12. Lizunkin V. M., Pogudin A. A. Improved shrinkage stoping method for thin rake veins extraction in the conditions of excessive rock pressure. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2010; 1: 193–197. (In Russ.)
13. Pirogov G. G. New technology of sewage pit low-power steep lived a solid story stockpiling of ore. *Vestnik ChitGU = Bulletin of Chita State University.* 2011; 8(75): 104–109. (In Russ.)
14. Sidorov D. V., Potapchuk M. I., Sidliar A. V. Forecasting rock burst hazard of tectonically disturbed ore massif at the deep horizons of Nikolaevskoe polymetallic deposit. *Zapiski gornogo instituta = Journal of Mining Institute.* 2018. Vol. 234. P. 604–611 (In Russ.). Available from: doi: 10.31897/PMI.2018.6.604
15. Li C. C., Principles and methods of rock support for rockburst control. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.001>
16. Ghorbani M., Shahriar K., Sharifzadeh M., et al. A critical review on the developments of rock support systems in high stressground conditions. *International Journal of Mining Science and Technology.* Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.002>
17. Kaiser P. K., Cai M. Design of rock support system under rockburst condition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* Available from: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00215>

**Information about authors:**

**Nikita E. Moroz** – student, Mining Department, Saint Petersburg Mining University. E-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4401-1989>

**Margarita V. Belova** – leading engineer, Department of Low Voltage Systems, Saint Petersburg Mining University. E-mail: mbelova194@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7051-278X>

**Georgii D. Rukavishnikov** – Head of Geodynamic Monitoring Center, Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying (VNIMI). E-mail: geodmiruk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8228-2870>

**Для цитирования:** Мороз Н. Е., Белова М. В., Рукавишников Г. Д. Прогнозирование напряженных зон на различных этапах отработки золоторудного месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 8. С. 72–81. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-72-81

**For citation:** Moroz N. E., Belova M. V., Rukavishnikov G. D. Predicting stress zones at various stages of goldfield development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii = Minerals and Mining Engineering*. 2021; 8: 72–81 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-8-72-81