

Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при отработке месторождений Урала

Р.В. Криницын

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ Roman_krinitcyn@mail.ru

Резюме: Горные удары, происходящие на горнодобывающих предприятиях Урала, заставляют обратить пристальное внимание на мероприятия по их прогнозу и профилактике. С целью снижения риска их проявления ведутся работы по оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород для задания граничных условий при расчете распределения напряженно-деформированного состояния в конструктивных элементах системы отработки при очистной выемке полезных ископаемых. Такие расчеты позволяют оценить устойчивость массива горных пород, от которой напрямую зависят эффективность и безопасность ведения работ, разрушения и потеря устойчивости конструктивных элементов которой принято называть проявлениями горного давления. Как правило, разработка мощных месторождений полезных ископаемых подземным способом осложняется наличием в комплексе слагающих их руд и пород тектонических нарушений различного ранга, которые являются концентраторами напряжений, формирующими в прилегающем массиве зоны повышенного напряжения с уровнем, превышающим фоновый. Несмотря на постоянный рост профилактических мероприятий, количество аварийных ситуаций при проходке и эксплуатации выработок различного назначения практически не снижается, что говорит как об ухудшающихся горнотехнических условиях разработки, так и о недостаточной изученности воздействующих факторов и низком качестве их прогноза.

Ключевые слова: горный удар, напряженное состояние, подземная разработка, метод конечных элементов

Благодарности: Исследования выполнены в рамках государственного задания № 075-00412-22 ПР. Тема 3 (2022-2024). (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.

Для цитирования: Криницын Р.В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при отработке месторождений Урала. *Горная промышленность*. 2022;(5):79–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-79-82>

Stress-and-strain state of the rock mass in mining deposits in the Urals

R.V. Krinitcyn

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ v.b.kondr@imemo.ru

Abstract: Rock bursts that occur in mines in the Urals make it crucial to pay close attention to measures for their prediction and prevention. In order to reduce the risk of their manifestation, efforts are made to assess the stress-and-strain state of the rock mass in order to set the boundary conditions when calculating the distribution of the stress-and-strain state in the structural elements of the mining system when excavating the minerals. Such calculations enable assessment of the rock mass stability, which directly affects the efficiency and safety of operations, the destruction and loss of stability of structural elements of which is commonly referred to as the rock pressure manifestation. As a rule, underground mining of mineral deposits with thick beds is complicated by the presence of tectonic faults of various grades in their host ores and rocks, which are stress concentrators that form zones of increased stress in the adjacent rock mass to a level exceeding the background stress. Despite a steady increase in preventive measures, the number of accidents during the development and operation of underground workings of various purposes has not practically decreased, which indicates both the deteriorating mining and technical conditions and the insufficient study of the impact factors and the poor quality of their prediction.

Keywords: rock bursts, stress state, underground mining, finite element method

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the State Contract No. 075-00412-22 ПР. Topic 3 (2022-2024). (FUWE-2022-0003), claim №1021062010536-3-1.5.1.

For citation: Krinitcyn R.V. Stress-deformed state of the rock mass in the development of deposits in the URALS. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):79–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-79-82>



Криницын Роман Владимирович – заведующий лабораторией, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Введение

Одним из способов снижения рисков проявления геодинамических событий является их прогноз и профилактика. Выполняется прогнозный расчет, особенностью которого является то, что на любой рассматриваемый момент ведения горных работ оценивается напряженное состояние конструктивных элементов системы разработки, которое сравнивается с прочностными параметрами вмещающего массива пород. Сложность задачи заключается в том, что при ведении горных работ изменяется как сама картина горных конструкций, так и естественное поле напряжений, а с развитием фронта горных работ изменяются от участка к участку и прочностные характеристики массива пород и руд.

Геомеханическая ситуация

Особенностью ведения горных работ на некоторых месторождениях является рассредоточение участков добычи на нескольких залежах в силу их заблаговременной подготовки и значительной степени выемки. Часто это мощные и слепые рудные залежи месторождений, которые залегают в комплексе крепких скальных пород. Порядок отработки залежей формирует ступенчатое нагружение массива горных пород и формирование потенциальных очагов горных ударов в соответствии с установленными закономерностями роста напряжений в горных породах с глубиной и перераспределение их первоначально вокруг выработок. Вокруг выработанных пространств с окружающими их выработками принимается потенциально равновесное напряженное состояние. Неравномерность распределения напряженного состояния в массиве и залежах пород, находящихся под воздействием как техногенных, так и неотектонических процессов, накладывает отпечаток на геомеханическую ситуацию, а следовательно, и на характер проявления горного давления и удароопасность. С помощью различных наблюдательных

станций лабораторией геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН получены результаты, позволяющие выполнять прогноз геодинамических явлений и аварийных ситуаций для предотвращения этих событий в сфере недропользования. Возникают динамические формы горного давления, причинами возникновения которых являются склонность массива горных пород к хрупкому разрушению и концентрации сжимающих напряжений, причем, как справедливо отмечают авторы [1–10], «динамическое разрушение горных пород происходит на всех иерархических масштабных уровнях – от зарождения дислокаций до прорастания крупных трещин, образования трещин сдвига и отрыва и перехода в лавинное разрушение с объединением отдельных областей проявления динамических явлений в единую масштабную систему».

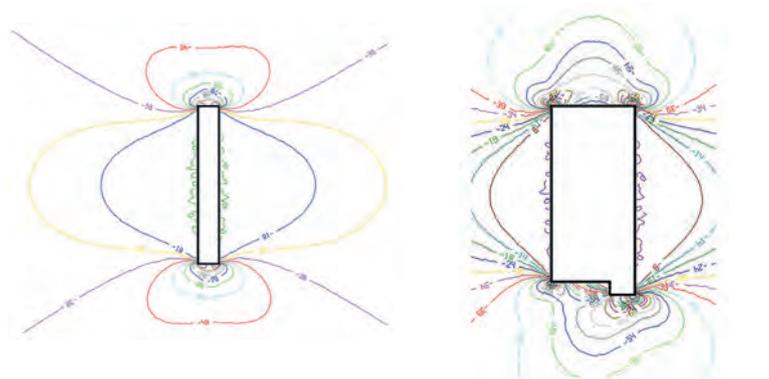
Поэтому при подземной геотехнологии обязательными элементами добычи полезных ископаемых являются как контроль изменения напряженно-деформированного состояния массива пород, так и прогноз его изменения.

В процессе исследований установлен дискретный характер распределения природных (первоначальных) напряжений на уральских месторождениях [11]. Имеют место как средне-, так и высоконапряженные участки [12]. При оценке природных напряжений одной из главных проблем является определение изменяющихся во времени напряжений, величина которых под влиянием различных факторов изменяется с различной периодичностью. От данных, полученных при измерениях уровня напряжений в массиве горных пород, а также от принятого метода управления горным давлением зависят эффективность и безопасность разработки месторождений подземным способом.

Полученные экспериментально данные применяются в качестве граничных условий для решения прикладных задач, связанных с расчетом напряженно-деформированного состояния горных конструкций, определением параметров конструктивных элементов системы разработки, а также разработкой мероприятий по обеспечению их устойчивости и сохранности в условиях изменяющегося с глубиной горного давления и его перераспределения при очистной выемке.

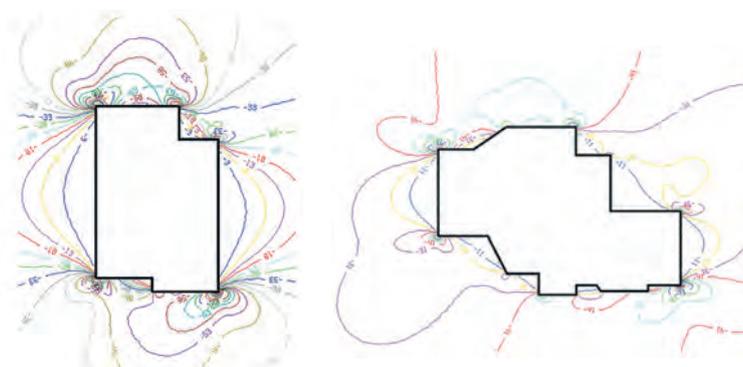
Моделирование напряженно-деформированного состояния

Для прогнозирования устойчивости и удароопасности массива горных пород при отработке месторождения проведено моделирование постадийного увеличения очистного пространства. Геомеханическая модель представляет собой однородную изотропную среду. Задачи решались в плоской постановке. Физико-механические свойства вмещающего массива учитывают трещиноватость и нарушение массива: модуль деформации 40 000 МПа; коэффициент Пуассона 0,3; плотность среды 2,8 т/м³; начальный угол внутреннего трения 30 град; начальное сцепление 15 МПа; начальная прочность на растяжение 5 МПа; а также остаточные прочностные характеристики – угол трения 30 град; сцепление 2; прочность на растяжение 0,6; минимально возможный модуль деформации этой среды 1000 МПа. Напряжения заданы: вкрест простирания – 27,8 МПа, по простиранию – 16,7 МПа. Расчет напряженно-деформированного состояния проводился методом конечных элементов с помощью пакета программ FEM [13].



а – распределение напряжений на первой стадии отработки

б – распределение напряжений на второй стадии отработки



в – распределение напряжений на третьей стадии отработки

г – распределение напряжений на четвертой стадии отработки

Рис. 1
Распределение напряжений при увеличении выработанного пространства

Fig. 1
Distribution of stresses with the increase of the mined space

Результаты моделирования показывают возникновение незначительных растягивающих напряжений на стенках камеры на второй и третьей стадии отработки. Учитывая результаты расчета по разрезу, они будут компенсированы сжимающими напряжениями, но при отработке удароопасных месторождений требуется постоянный контроль изменения напряжений при очистной выемке.

Заключение

1. При ведении горных работ на удароопасных месторождениях с высоким уровнем напряжений в массиве горных пород отмечаются случаи шелушения, интенсивного заколообразования и стреляния пород. Эти внешние признаки удароопасности происходят в основном при проведении выработок на участках ведения очистных работ. Во всех случаях необходимо применять меры контроля удароопасности и профилактики для предупреждения геодинамических событий.
2. Аналитические расчеты и моделирование показывают, что наиболее проблемным участком часто является район перехода очистных работ на большую глубину, где очистные работы и высокие напряжения приводят к проблемам с устойчивостью массива горных пород.
3. Геомеханическая ситуация в недрах, по результатам исследований, диктует в дальнейшем адаптацию параметров геотехнологии к горно-геологическим условиям. Это требует тщательных геомеханических проработок, в которые необходимо включать натурные измерения и скрупулезное изучение имеющейся документации, а также прогнозные расчеты распределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород при дальнейшей отработке.

Список литературы

1. Курленя М.В., Миренков В.Е., Сердюков С.В. Взгляд на природу напряженно-деформированного состояния недр земли и техногенные динамические явления. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(8):5–20. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2008/8/1_Kurlenya.pdf?ysclid=17rffiqc59139991805
2. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А., Просекин Б.А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(3):3–13.
3. Косых В.П. Влияние слабых динамических воздействий на эволюцию напряжений в сыпучей среде. В кн.: Фомин В.М. (ред.) *Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: материалы 24-й Всерос. конф., г. Омск, 2–4 июня 2015 г.* Омск: ОмГТУ; 2015. С. 114–117.
4. Иванов В.И. К прогнозу и предупреждению горных ударов на рудниках Кольского полуострова. В кн.: Горбунов Г.И. (ред.) *Механика горных пород при подземном строительстве и освоении месторождений на больших глубинах: сборник научных трудов*. Ленинград: Наука; 1983. С. 96–103.
5. Сидоров Д.В. Методология снижения удароопасности при применении камерно-столбовой системы разработки Североуральских бокситовых месторождений на больших глубинах. *Записки Горного института*. 2017;223:58–69. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.58>
6. Мухамедиев Ш.А. О дискретном строении геосреды и континуальном подходе к моделированию ее движения. *Геодинамика и тектонофизика*. 2016;7(3):347–381. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0213>
7. Lovchikov A.V. A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):30–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-30-38>

8. Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. *Труды Геологического института*. 2008;582:1–379.
9. Зубков А.В., Бирючев И.В., Креницын Р.В. Исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. *Горный журнал*. 2012;(1):44–47. Режим доступа: <https://rudmet.ru/journal/820/article/12495/>
10. Креницын Р.В., Липин Я.И., Сентябов С.В. Исследование вариаций поля упругих напряжений массива пород при отработке Песчанского месторождения. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2020;(5):19–28. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-19-28>
11. Липин Я.И., Креницын Р.В. Актуальные вопросы оценки напряжений при прогнозе удароопасности на современном этапе. *Современные проблемы механики*. 2018;(33):410–418.
12. Бодин В.В. Влияние локально-напряженных зон тектонических нарушений на пространственное распределение спектров сейсмических волн. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(4):5–10. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2014/04/5-10_Bodin_-_6_str.pdf
13. Зотеев О.В. Моделирование трещин при расчетах напряженно-деформированного состояния скальных массивов. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2000;(11):252–259. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-treschin-pri-raschetah-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-skalnyh-massivov?ysclid=17riyq50f3850128662>

References

- Kurlenya M.V., Mirenkov V.E., Serdyukov S.V. A look at the nature of the stress-strain state of the Earth's interior and technogenic dynamic phenomena. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(8):5–20. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2008/8/1_Kurlenya.pdf?ysclid=17rffiq59139991805
2. Rasskazov I.Y., Saksin B.G., Petrov V.A., Prosekin B.A. Geomechanics and seismicity of the Antey deposit rock mass. *Journal of Mining Science*. 2012;48(3):405–412. <https://doi.org/10.1134/S106273914803001X>
 3. Kosykh V.P. The influence of weak dynamic influences on the evolution of stresses in a loose medium. In: Fomin V.M. (ed.). *Numerical methods for solving problems of the theory of elasticity and plasticity: materials of the 24th All-Russian Conference, Omsk, June 2–4, 2015*. Omsk: Omsk State Technical University; 2015, pp. 114–117. (In Russ.)
 4. Ivanov V.I. To the forecast and prevention of mining impacts at the mines of the Kola Peninsula. In: Gorbunov G.I. (ed.). *Mechanics of rocks during underground construction and development of deposits at great depths: collection of scientific papers*. Leningrad: Nauka; 1983, pp. 96–103. (In Russ.)
 5. Sidorov D.V. Methodology of reducing rock bump hazard during room and rillar mining of North Ural deep bauxite deposits. *Journal of Mining Institute*. 2017;223:58–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/pmi.2017.1.58>
 6. Mukhamediev S.A. On discrete structure of geologic medium and continual approach to modeling its movements. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016;7(3):347–381. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0213>
 7. Lovchikov A.V. A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):30–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-30-38>
 8. Ponomarev V.S. Energy saturation of geological medium. *Transactions of the Geological Institute*. 2008;582:1–379.
 9. Zubkov A.V., Biryuchev I.V., Krinitsyn R.V. The investigations of stressed-deformed rock mass state modifications in the time domain. *Gornyi Zhurnal*. 2012;(1):44–47. (In Russ.) Available at: <https://rudmet.ru/journal/820/article/12495/>
 10. Lipin I.I., Sentiabov S.V., Krinitsyn R.V. Investigating the variation of the fields of elastic stresses in the rock mass when developing the Peschanskoye deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;(5):19–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-19-28>
 11. Lipin Ya.I. Krinitsyn R.V. Topical issues of stress estimation under the forecast of the shock hazard at the present stage. *Sovremennye problemy mekhaniki*. 2018;(33):410–418. (In Russ.)
 12. Bodin V.V. Influence of local and intensezones of tectonic faults on spatil distribution of spectrum of seismic waves. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(4):5–10. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2014/04/5-10_Bodin_-_6_str.pdf
 13. Zoteev O.V. Modeling of cracks in the calculations of the stress-strain state of rock massifs. *News of the Ural State Mining University*. 2000;(11):252–259. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-treschin-pri-raschetah-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-skalnyh-massivov?ysclid=17riyq50f3850128662>

Информация об авторе

Креницын Роман Владимирович – заведующий лабораторией, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: Roman_krincyn@mail.ru

Information about the author

Roman V. Krinitsyn – Head of laboratory, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: Roman_krincyn@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.08.2022
 Поступила после рецензирования: 06.09.2022
 Принята к публикации: 07.09.2022

Article info

Received: 08.08.2022
 Revised: 06.09.2022
 Accepted: 07.09.2022