

Методика оценки напряженного состояния горного массива многокомпонентным датчиком смещений методом overcoring

Никита Андреевич БЕЛЯКОВ*
Иван Андреевич ЕМЕЛЬЯНОВ**

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Актуальность. В настоящее время горнодобывающая промышленность находится в начале нового этапа развития, которому соответствует добыча полезных ископаемых на больших глубинах в осложненных условиях. Исходя из этого формируется неопределенность в оценке параметров напряженного состояния горного массива, в котором ведутся горные работы, что способствует росту чрезвычайных ситуаций в подземных условиях. Метод кольцевой разгрузки (overcoring) способен дать количественную и качественную информацию о напряженном состоянии.

Цель работы – обоснование методики оценки напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (overcoring), включающей в себя два основных этапа: 1 – полевые испытания; 2 – обработка данных полевых испытаний.

Методы исследования. Метод кольцевой разгрузки (overcoring) основан на измерении перемещений точек стенок измерительной скважины многокомпонентным датчиком смещений в результате создания кольцевой щели (формирование полной разгрузки). Обработка данных производится двумя основными подходами: 1 – численное моделирование; 2 – аналитический расчет.

Результаты исследования. Описана концепция проведения работ по оценке напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (overcoring). Представлена подробная информация о проведении полевых испытаний, а именно о последовательности измерений и необходимого оборудования. Создан пошаговый алгоритм обработки данных, полученных в результате проведения полевых испытаний, основанный на численном моделировании и аналитическом анализе.

Выводы. Представленная в настоящей работе методика была опробована на месторождениях компаний АО «Апатит» и ПАО «Норильский никель» и показала корректные количественные и качественные результаты по оценке напряженного состояния горного массива.


Ключевые слова: напряженное состояние горного массива, кольцевая разгрузка, многокомпонентный датчик смещений, численное моделирование, аналитический расчет.

Введение


Разработка рудных месторождений – это основа экономического развития минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации. Добыча полезных ископаемых связана с ведением работ в условиях повышенной опасности. Степень опасности в основном зависит от сложности и неопределенности горно-геологических условий, в которых выполняются работы. Так, различного рода нарушения горного массива (трещиноватость, блочность, слоистость), обводненные и ослабленные породы оказывают негативное влияние на операции, проводимые на каждом этапе строительства и эксплуатации горного предприятия [1]. Помимо этого, существует ряд не менее важных, решенных не в полной степени задач, связанных с оценкой напряженного состояния горного массива, в котором ведутся работы по добыче полезного ископаемого. Для того чтобы решить эти задачи, необходимо проводить специальные мероприятия по определению напряженного состояния горного массива [2–4].

Горный массив рассматривается как сплошная однородная среда в пределах некоторого объема (одна высотная отметка в масштабе рудного месторождения) с совокупностью точек внутри него. Определимся с понятием напряженного состояния в точке горного массива. Напряженное состояние – это тензорная величина. На рис. 1 показаны ориентации нормальных, касательных и главных напряжений (направления главных осей приняты произвольно). Считается, что для напряженного состояния выполняется закон парности касательных напряжений ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$), согласно которому необходимо знать шесть независимых компонент – три нормальных напряжения и три касательных, чтобы определить напряженное состояние в любой точке горного массива. Также важной задачей является определение ориентации главной системы координат по отношению к системе, в которой выполнено измерение компонент напряженного состояния [5–7].

✉ Belyakov_NA@pers.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-9754-501X>

**s215065@stud.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-8512-3629>

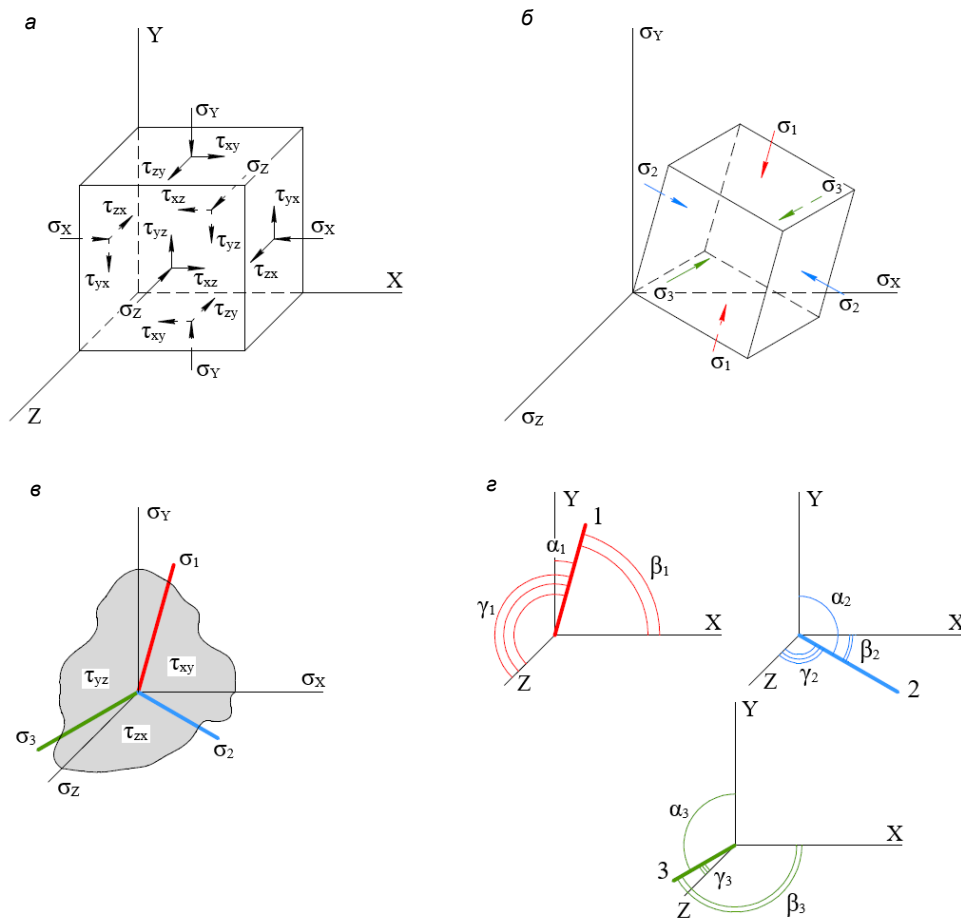


Рисунок 1. Ориентация нормальных, касательных и главных напряжений: а – напряженное состояние в произвольной декартовой системе координат; б – напряженное состояние в главной системе координат; в – ориентация главных напряжений относительно напряжений в произвольной системе координат; г – направляющие косинусы главных осей
Figure 1. Orientation of normal, shear and principal stresses: a – stress state in an arbitrary Cartesian coordinate system; b – stress state in the main coordinate system; c – orientation of principal stresses relative to stresses in an arbitrary coordinate system; d – direction cosines of the principal axes



Рисунок 2. Геомеханические методы оценки напряженного состояния
Figure 2. Geomechanical methods for assessing the stress state

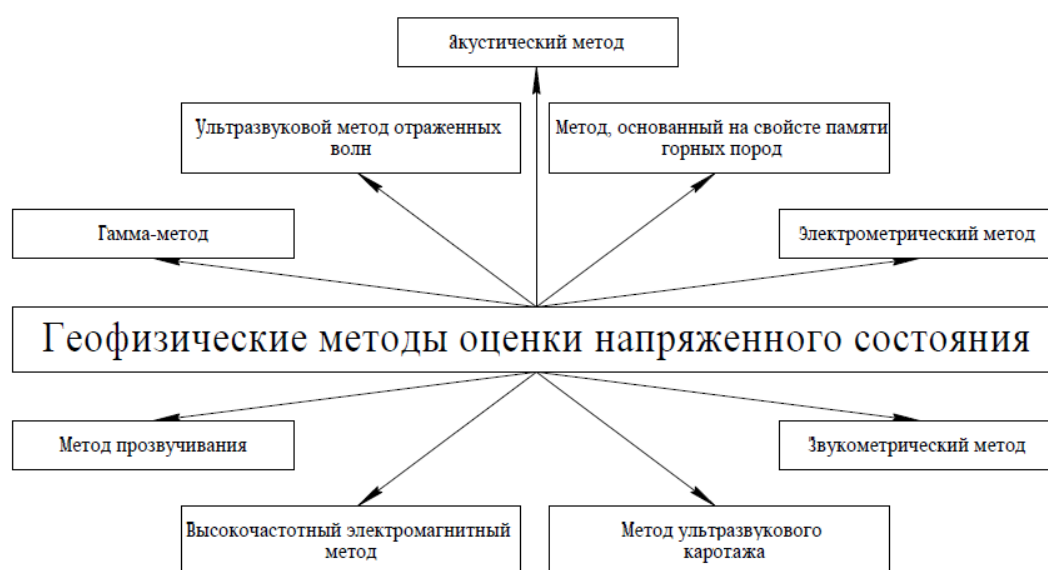


Рисунок 3. Геофизические методы оценки напряженного состояния
Figure 3. Geophysical methods for assessing the stress state

Для решения поставленных задач существуют как уже действующие методы, так и разрабатываются новые. На данный момент можно выделить три основные группы методов оценки напряженного состояния горного массива: геомеханические, геологические и геофизические.

Геомеханические методы оценки напряженного состояния горного массива включают в себя методы (рис. 2), основанные на определении степени деформирования горного массива в месте проведения измерений. Данная группа методов является высокоточной, однако существует ряд сложностей, связанных с высокой трудоемкостью при проведении работ, а также требуются дополнительные лабораторные испытания по определению деформационных свойств горных пород в замерных точках [8–10].

Геофизические методы – методы (рис. 3), определяющие взаимосвязь между искусственными и естественными физическими полями и напряжениями, действующими в горном массиве. Данная группа методов позволяет оценить изменение напряженного состояния в заданном временном промежутке [11, 12].

Основой геологических методов оценки напряженного состояния горного массива является анализ общей геологической обстановки исследуемого участка горной выработки (рис. 4). Согласно этому, методы, входящие в группу, способны предоставить лишь упрощенную качественную оценку и не способны дать точные количественные данные о напряженном состоянии горного массива [13, 14].

В настоящее время методы, представленные ранее, нашли широкое применение в различных прикладных исследованиях, связанных с оценкой напряженного состояния. Однако существует ряд нерешенных задач, которые не позволяют использовать некоторые методы для того, чтобы корректно определить естественное напряженное состояние горного массива. Группы геологических и геофизических методов являются вспомогательными, так как не способны предоставить точную количественную оценку в отличие от геомеханических методов.

В настоящей работе подробно рассмотрен один из наиболее распространенных геомеханических методов полной разгрузки – метод кольцевой разгрузки (overcoring) ввиду того, что он имеет высокую точность измерений и способен предоставить как качественную, так и количественную оценку естественного напряженного состояния горного массива [15].

Описание метода кольцевой разгрузки и основных этапов работ при его выполнении. Метод кольцевой разгрузки относится к группе методов, связанных с проведением буровых работ для создания измерительной (пилотной) скважины. Сущность метода кольцевой разгрузки заключается в измерении перемещения точек стенок пилотной скважины, где установлен многокомпонентный датчик смещений, в результате ее обуривания. Таким образом оценивается упругое восстановление элемента горного массива в процессе обуривания измерительной скважины, т. е. в процессе создания искусственного нарушения его связи вмещающим массивом.

Измерение перемещения точек стенок пилотной скважины выполняются с использованием многокомпонентного датчика смещений, схема которого представлена на рис. 5. Высокочувствительные элементы, установленные на датчике, позволяют получить значения в девяти различных направлениях. Важно отметить, что перед выполнением измерений датчик должен быть полностью проверен на предмет неисправностей и откалиброван.

Порядок проведения работ по оценке напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (рис. 6):

1. Перед началом выполнения полевых работ необходимо выбрать место измерений, обращая особое внимание на нарушенность горного массива (трещиноватость, блочность, слоистость); данный этап является одним из наиболее важных, так как если место будущих измерений будет определено неверно, то это может повлечь за собой как получение недостоверных результатов, так и невозможность выполнения работ; однако полевые работы мо-

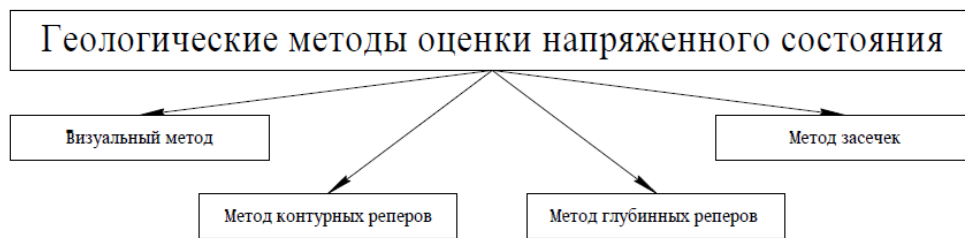


Рисунок 4. Геологические методы оценки напряженного состояния
Figure 4. Geological methods for assessing the stress state

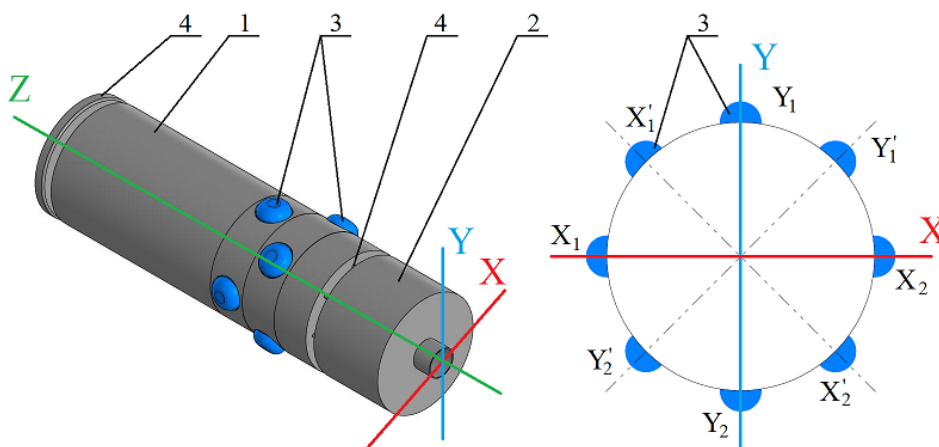


Рисунок 5. Схема многокомпонентного датчика смещений: 1 – корпус; 2 – блок хранения данных; 3 – высокочувствительные измерительные элементы (инденторы); 4 – элементы крепления и фиксации датчика
Figure 5. Scheme of a multicomponent displacement sensor: 1 – body; 2 – data storage block; 3 – highly sensitive measuring elements (indenter); 4 – elements of fastening and fixing the sensor

гут быть выполнены в нарушенном горном массиве при условии, что это будет отражено в журнале выполнения работ и учтено в процессе моделирования на этапе обработки полученных данных с места замера;

2. После определения места проведения устанавливается буровое оборудование;

3. Бурение пилотной (измерительной) скважины; размеры и протяженность скважины обусловлены измерительным и буровым оборудованием; в процессе бурения и извлечения керна из скважины необходимо внимательно следить за его состоянием; если вынимаемый из скважины керн не имеет видимых повреждений, то можно выполнять измерения на данной глубине; если вынимаемый керн «выходит» кольцами – высоконапряженный горный массив, необходимо увеличить глубину измерения;

4. Установка многокомпонентного датчика смещений; после того как измерительная скважина пробурена на проектное расстояние, начинаются работы по установке заранее подготовленного многокомпонентного датчика смещений. В момент установки датчик подключен к компьютерной программе, в которой отображены его основные параметры (номер, вводная информация, заряд, время, расположение чувствительных элементов относительно оси Z (рис. 5)); с использованием программы необходимо выполнить позиционирование датчика, после чего он отключается от программы;

5. Обуривание измерительной скважины; для того чтобы создать зону разгрузки горного массива, вокруг

измерительной скважины формируется кольцевая щель; в момент обуривания (формирование полной разгрузки) датчик записывает показания перемещений точек стенок измерительной скважины;

6. Извлечение многокомпонентного датчика смещений; после обуривания измерительной скважины датчик снова подключается к программе, выполняется первичный анализ полученных данных и датчик извлекается;

7. Выполняются измерения на следующем интервале либо на следующей точке.

В настоящей работе описана методика выполнения полевых работ по оценке напряженного состояния горного массива с применением определенного измерительного и бурового оборудования. Это обуславливает следующие параметры пилотной скважины и кольцевой щели:

- диаметр пилотной скважины: 82 мм;
- наружный диаметр кольцевой щели: 132 мм;
- толщина кольцевой щели: 4 мм.

Также необходимо отметить два важных примечания. Первое – измерения производятся на различных интервалах (глубинах). Это необходимо для определения зоны влияния горной выработки. Второе – в процессе обуривания пилотной скважины происходит повышение температуры, которое оказывает влияние на измеряемые датчиком перемещения точек стенок пилотной скважины. Для того чтобы свести температурное влияние к минимуму, производится охлаждение пилотной скважины водой.

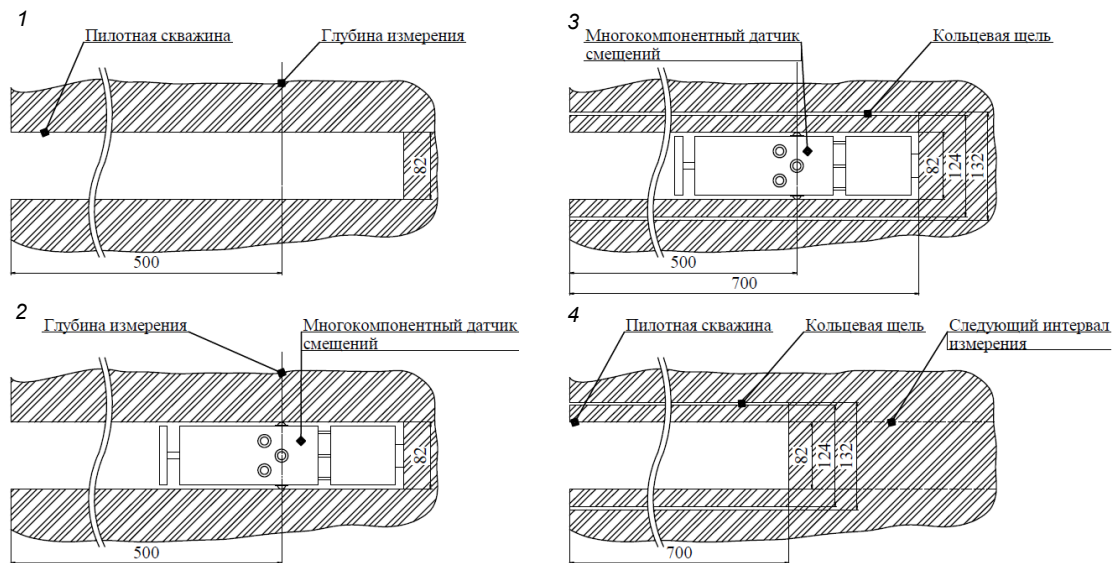


Рисунок 6. Порядок проведения работ по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки: 1 – бурение пилотной (измерительной) скважины; 2 – установка многокомпонентного датчика; 3 – обуривание измерительной скважины; 4 – извлечение датчика и начало проведения работ на следующем интервале

Figure 6. The procedure for assessing the natural stress state of the rock mass using the overcoring method: 1 – drilling a pilot (measuring) well; 2 – installation of a multicomponent sensor; 3 – drilling around a measuring well; 4 – removal of the sensor and the start of work at the next interval

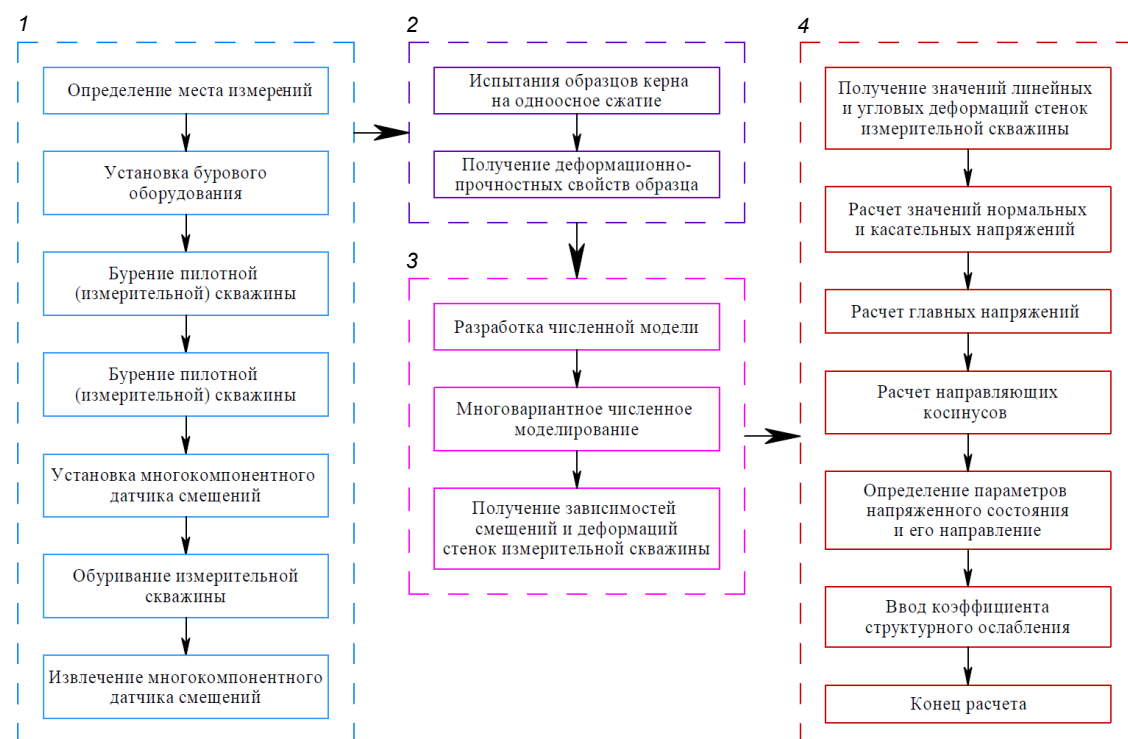


Рисунок 7. Этапы ведения работ по оценке напряженного состояния горного массива: 1 – полевые работы; 2 – лабораторные испытания; 3 – численное моделирование; 4 – аналитический расчет

Figure 7. Stages of work on the assessment of the stress state of the rock mass: 1 – field work; 2 – laboratory tests; 3 – numerical modelling; 4 – analytical calculation

Измерения, описанные ранее, проводятся в условиях повышенной опасности, так как все работы выполняются в подземных условиях. Согласно этому, все участники данного процесса должны иметь соответствующую квалификацию. Помимо этого, со стороны горного предприятия, на территории которого ведутся работы, должен присутствовать сопровождающий. Это необходимо для

предотвращения непредвиденных экстренных ситуаций, а также для совместного решения задач, возникающих в процессе выполнения полевых работ.

После выполнения запланированных полевых работ образцы керна (цилиндрическая форма), полученные в результате полевых замеров, направляются в лабораторию для проведения различных испытаний, основная

цель которых – получение деформационно-прочностных свойств. Далее производится обработка данных, полученных в результате проведения полевых работ, а именно – величин перемещений точек стенок измерительной скважины в процессе ее разгрузки.

Методика обработки данных полевых работ. Основная задача, которую необходимо решить в процессе обработки данных, – это подбор параметров напряженного состояния горного массива, которые соответствуют значениям смещений, замеренных в процессе проведения полевых работ (создание полной разгрузки части горного массива методом кольцевой разгрузки). После решения данной задачи можно сделать вывод о том, что подобранные параметры напряженного состояния горного массива соответствуют исходному, сформировавшемуся в горном массиве до начала горнопроходческих работ.

Данная методика включает в себя два основных подхода: 1 – численное моделирование; 2 – аналитический расчет [16, 17]. Основные этапы ведения работ по оценке напряженного состояния горного массива представлены в виде блок-схемы на рис. 7.

После получения исходных данных (деформационно-прочностные свойства пород и положение места измерения) разрабатывается численная конечно-элементная модель, в которой учитываются геометрия горной выработки и этапы проведения полевых замеров. Результатом многовариантного численного моделирования являются зависимости смещений и деформаций стенок измерительной скважины.

Далее на основе аналитического подхода выполняется расчет нормальных и касательных напряжений, исходя из чего определяются главные напряжения и их ориентация.

На данном этапе важно отметить, что предоставленные в качестве исходных данных деформационно-прочностные свойства, полученные в результате проведения лабораторных испытаний керна, не соответствуют свойствам горного массива. Проблема перехода от свойств образца к свойствам горного массива относительно размеров пилотной скважины и горной выработки (масштабный эффект) [18] в настоящий момент времени решена не в полной мере. Поэтому в процессе обработки данных, полученных в ходе выполнения полевых работ, необходимо вводить поправочные коэффициенты структурного ослабления на деформационные и прочностные свойства, для получения корректных данных.

Заключение

В настоящей работе представлена методика по оценке напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки (overcoring), включающая в себя полевые работы и обработку полученных данных. Выполнение полевых работ подразумевает в себе измерение перемещений точек стенок пилотной скважины в результате создания вокруг нее зоны разгрузки горного массива. В предложенную концепцию по обработке данных входят три основные составляющие: лабораторные испытания образцов керна, численное моделирование и аналитический расчет.

Необходимо отметить, что описанная методика была опробована на месторождениях компаний АО «Апатит» и ПАО «Норильский никель» и показала корректные результаты.

В дальнейших исследованиях будет более подробно описана методика обработки данных полевых работ, а также даны рекомендации по введению поправочных коэффициентов структурного ослабления на деформационные и прочностные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сашурин А. Д., Панжин А. А. Современные проблемы и задачи геомеханики // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 188–198. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198>
2. Zubkov A. V., Sentyabov S. V., Selin K. V. A technique for determination of natural stresses in rock masses by surface deformation using satellite navigation systems // Lithosphere. 2019. Vol. 19. No. 5. P. 767–779. <http://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779>
3. Протосеня А. Г. Моделирование геомеханических процессов в рудном массиве с использованием модели физически нелинейного тела // Записки Горного института. 2015. Т. 214. С. 13–22.
4. Mazurov B. T., Mustafin M. G., Panzhin A. A. Estimation method for vector field divergence of earth crust deformations in the process of mineral deposits development // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 238. P. 376–382. <http://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.376>
5. Abirov R., Adilov F., Khodzhaev D., Ishmatov A., Zokirov I. On one approach in underground mining modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 883. No. 1. P. 1–7. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012210>
6. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве // ГИАБ. 2022. № 6-1. С. 100–113. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_100
7. Hudson J. A., Cornet F. H., Christiansson R. ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. Issues 7–8. P. 991–998. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.011>
8. Fairhurst C. Stress estimation in rock: a brief history and review // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. Issues 7–8. P. 957–973. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.002>
9. Scelsi G., De Bellis M. L., Pandolfi A., Musso G., Della Vecchia G. A step-by-step analytical procedure to estimate the in-situ stress state from borehole data // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 176. P. 994–1007. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.100>
10. Seryakov V. M. Stress Determination in Rock Mass with Regard to Sequence of Deep-Level Cut-and-Fill // Journal of Mining Science. 2021. Vol. 57. No. 6. P. 894–900. <http://doi.org/10.1134/S1062739121060028>
11. Pudov E., Kuzin E., Efremenkov A. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 939. No. 1. P. 1–9. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012063>
12. Баженова Е. А. Выделение тектонически нарушенных зон в пределах рудного месторождения по комплексу геофизических методов // ГИАБ. 2022. № 5. С. 67–83. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_67
13. Баделло В. А., Бейдин А. В., Овсейчук В. А., Смолич С. В. Оценка состояния горного массива на основе анализа горно-геологической обстановки и моделирования его напряженности // ГИАБ. 2019. № 12. С. 41–54. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54>
14. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Прогноз устойчивости массива горных пород на основе анализа кернового материала разведочных скважин // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 216–223. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223>
15. Sjöberg J., Christiansson R., Hudson J. A. ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 2: Overcoring methods // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. Issues 7–8. P. 999–1010. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.012>
16. Liu J., Ding W., Yang H., Wang R., Yin S., Li A., Fu F. 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: A case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China // Tectonophysics. 2017. Vol. 712–713. P. 663–683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.030>
17. Rálek P., Sosna K., Hokr M., Franěk J. In situ measurements of thermally loaded rock and evaluation of an experiment with a 3D numerical model // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 105. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.042>
18. Протосеня А. Г., Вербило П. Э. Определение масштабного эффекта прочностных свойств трещиноватого горного массива // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2016. № 1. С. 167–176.

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2022 года

Technique for assessing the stress state of a rock mass by a multicomponent displacement sensor using the overcoring method

Nikita Andreevich BELYAKOV*
Ivan Andreevich EMEL'YANOV**

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Relevance. Currently, the mining industry is at the beginning of a new stage of development, which corresponds to the extraction of minerals at great depths in difficult conditions. Based on this, an uncertainty is formed in the assessment of the parameters of the stress state of the rock mass in which mining operations are carried out, which contributes to the growth of emergency situations in underground conditions. The method of overcoring is able to provide quantitative and qualitative information about the stress state.

The purpose of the research – substantiation of the methodology for assessing the stress state of the rock mass by the method of overcoring, which includes two main stages: 1 – field tests; 2 – processing of field test data.

Research methodology. The method of overcoring is based on measuring the displacements of the points of the walls of the measuring well with a multicomponent displacement sensor as a result of creating an annular gap (formation of complete unloading). Data processing is carried out by two main approaches: 1 – numerical modelling; 2 – analytical calculation.

Results. The concept of carrying out work on the assessment of the stress state of the rock mass by the method of overcoring is described. Detailed information about the field test is provided, namely the sequence of measurements and the necessary equipment. A step-by-step algorithm for processing data obtained as a result of field tests based on numerical modelling and analytical analysis has been created.

Conclusion. The technique presented in this paper was tested at the deposits of AO Apatit and PAO Norilsk Nickel and showed correct quantitative and qualitative results, according to the stress state of the rock mass.

Keywords: stressed state of a rock mass, overcoring, multicomponent displacement sensor, numerical modelling, analytical calculation.


REFERENCES

1. Sashurin A. D., Panzhin A. A. 2020, Current problems and objectives in geomechanics. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 3-1, pp. 188–198. (*In Russ.*) <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198>
2. Zubkov A. V., Sentyabov S. V., Selin K. V. 2019, A technique for determination of natural stresses in rock masses by surface deformation using satellite navigation systems. *Lithosphere*, vol. 19, no. 5, pp. 767–779. <http://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779>
3. Protosenya A. G. 2015, Modeling of geomechanical processes in an ore massif using a model of a physically nonlinear body. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of mining institute], vol. 214, pp. 13–22. (*In Russ.*)
4. Mazurov B. T., Mustafin M. G., Panzhin A. A. 2019, Estimation method for vector field divergence of earth crust deformations in the process of mineral deposits development. *Journal of Mining Institute*, vol. 238, pp. 376–382. <http://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.376>
5. Abirov R., Adilov F., Khodzhaev D., Ishmatov A., Zokirov I. 2020, On one approach in underground mining modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 883, no. 1, pp. 1–7. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012210>
6. Protosenya A. G., Katerov A. M. 2022, Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 6-1, pp. 100–113. (*In Russ.*) http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_100
7. Hudson J. A., Cornet F. H., Christiansson R. 2003, ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, issues 7–8, pp. 991–998. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.011>
8. Fairhurst C. 2003, Stress estimation in rock: a brief history and review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, issues 7–8, pp. 957–973. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.002>
9. Scelsi G., De Bellis M. L., Pandolfi A., Musso G., Della Vecchia G. 2019, A step-by-step analytical procedure to estimate the in-situ stress state from borehole data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 176, pp. 994–1007. <http://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.100>
10. Seryakov V. M. 2021, Stress Determination in Rock Mass with Regard to Sequence of Deep-Level Cut-and-Fill. *Journal of Mining Science*, vol. 57, no. 6, pp. 894–900. <http://doi.org/10.1134/S1062739121060028>
11. Pudov E., Kuzin E., Efremenkov A. 2020, Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 939, no. 1, pp. 1–9. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012063>
12. Bazhenova E. A. 2022, Identification of fault zones within an orebody using a set of geophysical methods. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 5, pp. 67–83. (*In Russ.*) http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_67

✉ Belyakov_NA@pers.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-9754-501X>

**s215065@stud.spmi.ru

 <http://orcid.org/0000-0002-8512-3629>

13. Babello V. A., Beydin A. V., Ovseychuk V. A., Smolich S. V. 2019, Assessment of rock mass behavior based on its geology analysis and stress state modeling. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 12, pp. 41–54. (In Russ.) <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54>
14. Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. 2020, Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)], no. 3-1, pp. 216–223. (In Russ.) <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223>
15. Sjöberg J., Christiansson R., Hudson J. A. 2003, ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 2: Overcoring methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 40, issues 7–8, pp. 999–1010. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.012>
16. Liu J., Ding W., Yang H., Wang R., Yin S., Li A., Fu F. 2017, 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: A case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen'gong block, South China. *Tectonophysics*, vol. 712–713, pp. 663–683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.030>
17. Rálek P., Sosna K., Hokr M., Franěk J. 2018, In situ measurements of thermally loaded rock and evaluation of an experiment with a 3D numerical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 105, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.042>
18. Protosenya A. G., Verbilo P. E. 2016, Determine scale effect of strength properties in jointed rock mass. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [News of TulGU. Earth sciences], no. 1, pp. 167–176. (In Russ.)

The article was received on November 11, 2022