

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ПОРОД ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДОМ РАЗГРУЗКИ (ТОРЦЕВОЙ ВАРИАНТ)

Д. Н. Мельников

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Ждановское месторождение медно-никелевых руд относится к Печенгскому рудному полю, находится на северо-западе Мурманской обл. и отрабатывается подземным рудником «Северный». В настоящее время при отработке запасов месторождения наблюдается ухудшение геологических и горнотехнических условий, поэтому детальное изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива является актуальной задачей для обеспечения эффективности и безопасности горных работ. Ранее различными исследователями выполнялись работы по определению действующих в массиве напряжений, однако были получены противоречивые данные. Одни исследователи утверждают, что в массиве преобладает вертикальная (гравитационная) составляющая тензора напряжений, другие — говорят о наличии в массиве тектонических напряжений, которые значительно превышают гравитационную составляющую. С 2016 г. на Ждановском месторождении силами Горного института КНЦ РАН выполняются инструментальные исследования НДС массива горных работ. Один из методов, который использовался при исследовании, — это измерение напряжений методом разгрузки в торцевом варианте. Данный метод, позволяющий определить значение и направление действия напряжений, хорошо себя зарекомендовал, давно и широко используется у нас и за рубежом. В результате измерений были получены параметры поля напряжений, действующих в массиве Ждановского месторождения, то есть были определены значения всех трех главных компонент тензора напряжений и направление их векторов. Установлено, что максимальные показатели напряжения превышают значения гравитационной составляющей и действуют субгоризонтально. Данный факт свидетельствует о наличии в массиве тектонических напряжений, что характеризует тип поля напряжений как гравитационно-тектонический. На следующем этапе исследований планируется разработка объемной численной геомеханической модели Ждановского месторождения, в которой полученные данные о действующих в массиве напряжений будут использованы при задании граничных условий.

Ключевые слова:

Ждановское месторождение, измерения напряжений, метод разгрузки в торцевом варианте, напряженно-деформированное состояние, гравитационно-тектонический тип поля напряжений.

STRESS MEASUREMENTS IN ROCK MASS OF THE ZHDANOVSKOE DEPOSIT BY THE DOORSTOPPER METHOD

Dmitriy N. Melnikov

Mining Institute of KSC RAS

Abstract

Zhdanovsky deposit of copper-nickel ores refers to the Pechenga ore field. It is in the north-west of the Murmansk region and mined by the underground mine “Severnyi”. At present, the deposit development causes the deterioration of geological and mining conditions, therefore the detailed study of rock mass stress-strain state is actual task to ensure the efficiency and safety of mining operations. A number of researchers have previously defined the rock mass stresses, however, conflicting data have been obtained. Some researchers showed that the vertical (gravitational) component of the stress tensor prevails in the rock mass. Other researchers say about the presence of tectonic stresses in the rock mass, which significantly exceed the gravitational component. Since 2016, the Mining Institute of KSC RAS has been carrying out the instrumental studies of rock stress state at the Zhdanovskoye deposit. One of the methods that was used

in the study is doorstopper method. This method allows obtaining the value and direction of stresses. It is well-proven, long and widely used in our country and abroad. As a result of the measurement, the parameters of the stress field acting in the Zhdanovskoye deposit were obtained, namely, the values of all three main components of the stress tensor and the direction of their vectors were determined. It was established that the maximum stress exceeds the value of the gravitational component and acts subhorizontally. This fact indicates the presence of tectonic stresses in the rock mass, so the type of stress field is gravitational-tectonic. At the next stage of our research we are planning to develop a 3D numerical geomechanical model of the Zhdanovskoye deposit, in which the obtained data on the rock mass stresses will be used for setting the boundary conditions.

Keywords:

Zhdanovskoye deposit, stress measurements, doorstopper method, stress-strain state, gravitational-tectonic type of stress field.



Введение

Ждановское месторождение медно-никелевых руд располагается в северо-западной части Кольского п-ова и разрабатывается рудником «Северный», входящим в состав АО «Кольская ГМК». В геологическом отношении оно представлено несколькими рудными телами, имеющими пластообразную форму. Средняя мощность рудных тел — 23 м, средний угол падения — 40°. Руда с повышенным содержанием полезного компонента приурочена к лежащему боку, где богатые эпигенетические руды граничат с вмещающими туфогенно-осадочными породами. Руда и вмещающие породы разбиты

дизъюнктивными нарушениями и межпластовыми тектоническими зонами.

На месторождении осуществлен переход от открытого способа разработки месторождения к подземному. При этом увеличение интенсивности эксплуатации месторождения и значительное понижение подземных горных работ приводит к ухудшению геологических и горнотехнических условий отработки запасов рудных тел. Таким образом, задача исследования НДС массива месторождения с целью обеспечения безопасности и эффективности горных работ является актуальной и важной.

Ранее исследователями выполнялись работы по определению напряжений в массиве Ждановского месторождения. Применялся ультразвуковой метод [1] и метод щелевой разгрузки [2]. В результате ультразвуковых исследований был сделан вывод о преобладании в массиве вертикальных напряжений, соответствующих гравитационной составляющей. Измерения напряжений методом щелевой разгрузки [2] свидетельствуют о наличии горизонтальной составляющей тензора напряжений, превышающей вертикальную. В 2016 г. сотрудниками Горного института были выполнены исследования состояния массива различными методами [3], в результате которых была высказано предположение о преобладании в массиве горизонтальных напряжений.

В статье представлены результаты определения напряжений методом разгрузки, полученные в 2017 г.

Методика измерений

При измерениях напряжений, действующих в массиве, применялся метод разгрузки в торцевом варианте. В основе метода лежат измерения упругих деформаций восстановления при отделении породы от массива и разгрузке от действовавших на нее напряжений. По измеренным деформациям, зная модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν , можно вычислить действовавшие в массиве напряжения, используя математический аппарат теории упругости. В работах Е. Р. Лимана [Leeman] методика измерений изложена более подробно [4–6]. Данный метод хорошо себя зарекомендовал за десятилетия его применения и широко используется при измерениях напряжений в массиве [7–11].

Измерения проводились на трех станциях — на горизонтах –440, –680, –780 м. Выбранные места были удалены от влияния фронтов горных работ и каких-либо крупных геологических нарушений, которые могли бы привести к искажениям в результатах измерений природных напряжений.

Результаты и обсуждение

Исследования состояния массива горных пород Ждановского месторождения проводились в 2016–2017 гг. на глубоких горизонтах. Расположение измерительных станций было выбрано таким образом, чтобы они были удалены от влияния фронтов подземных горных работ и каких-либо крупных геологических нарушений, которые могли бы привести к искажениям в результатах измерений природных напряжений. Первая станция располагалась на гор. –440 м рудника «Северный» в погрузочно-разгрузочной камере транспортного штрека в миндалекаменных мелкозернистых диабазах. Первоначально была пробурена вертикальная скважина 01-зп, в которой были определены относительные значения главных напряжений, а также азимут их направлений. В данном случае замеры показали, что азимут вектора максимальных напряжений составил 124° . Для определения остальных компонент тензора напряжений горизонтальная скважина 02-зп была пробурена перпендикулярно направлению действия максимальных напряжений σ_{\max} , т. е. азимут скважины составил 215° . Затем в результате аналогичных измерений методом разгрузки по скважине 02-зп были получены остальные значения главных напряжений и данные о их направлениях относительно горизонтали. После отбора керна и его дальнейшего испытания в лабораторных условиях были определены модуль Юнга и коэффициент Пуассона и рассчитаны значения главных напряжений по данной станции. Значение минимальных напряжений σ_{\min} составило 6 МПа, максимальных σ_{\max} — 43 МПа, при этом угол наклона вектора σ_{\max} составил 23° относительно линии горизонта, что свидетельствует о преобладании субгоризонтальных напряжений в массиве Ждановского месторождения.

Вторая станция на гор. –780 м станция была заложена в погрузочно-разгрузочной камере автоуклона в массивных среднезернистых диабазах. В результате натурных измерений, последующей обработки керна и расчетов по данной станции были получены следующие данные: азимут вектора максимальных напряжений составил 149° , азимут вектора минимальных напряжений — 60° , σ_{\max} — 57 МПа, σ_{\min} — 4 МПа. Угол наклона вектора σ_{\max} равен 27° к горизонту.

Необходимо отметить, что в начале бурения вертикальной скважины отмечались признаки дискования керна (рис. 1), что свидетельствует о наличии высоких горизонтальных сжимающих напряжений и косвенным образом подтверждает результаты измерений.



Рис. 1. Керна, полученный при бурении вертикальной скважины

Fig. 1. Core sample obtained by drilling a vertical borehole

Третья станция располагалась на гор. –680 м рудника «Северный» в погрузочно-разгрузочной камере автоуклона в миндалекаменных и массивных диабазах с прослоями шаровой лавы. Аналогичный первым двум станциям комплекс работ дал следующие результаты: азимут вектора максимальных напряжений составил 125° , азимут вектора минимальных

напряжений — 35° , σ_{\max} — 54 МПа, σ_{\min} — 9 МПа. Угол вектора главных максимальных напряжений к линии горизонта составил 16° , что также подтверждает преобладание горизонтальных напряжений в массиве. Полные данные приведены в сводной таблице.

Результаты измерения напряжений на Ждановском месторождении
The results of stress measurements at the Zhdanovskoe deposit

Глубина, м Depth, m	Максимальная компонента главных напряжений σ_{\max} Maximum principal stresses σ_{\max}			Минимальная компонента главных напряжений σ_{\min} Minimum principal stresses σ_{\max}		
	Значение, МПа Value, MPa	Азимут, град. Azimuth, degrees	Угол наклона к горизонту, град. Angle of inclination to the horizon, degrees	Значение, МПа Value, MPa	Азимут, град. Azimuth, degrees	Угол наклона к горизонту, град. Angle of inclination to the horizon, degrees
740	43	123	23	6	33	67
970	54	125	16	9	35	74
1080	57	149	27	4	60	63

На рис. 2 представлен график изменения максимальных напряжений с глубиной. Сплошной линией показано изменение σ_{\max} , полученных при измерениях методом разгрузки, пунктирной — гравитационная составляющая поля напряжений.



Рис. 2. Зависимость максимальных напряжений σ_{\max} от глубины

Fig. 2. Dependence of σ_{\max} on depth

Как видно из графика (рис. 2), значения максимальных напряжений растут с глубиной, при этом максимальные напряжения, действующие в массиве, превышают гравитационную составляющую примерно в 2 раза. Данный факт дает основание утверждать, что в массиве действуют тектонические напряжения, а тип поля напряжений относится к гравитационно-тектоническому типу.

Закключение

По результатам измерений напряжений методом разгрузки на трех замерных станциях можно утверждать, что в массиве пород Ждановского месторождения действуют высокие субгоризонтальные напряжения, значения которых существенно превышают вертикальную гравитационную составляющую и увеличиваются с глубиной в диапазоне отметок проведения

измерений (рис. 2). При этом азимут максимальных напряжений колеблется от 123° до 149°. Полученные данные измерений хорошо согласуются с данными визуального обследования, которые показали, что в большей степени разрушаются выработки штрекового направления, при этом основные разрушения контура локализируются в кровле штреков. С большой вероятностью напряженное состояние Ждановского месторождения можно отнести к гравитационно-тектоническому типу, что будет являться определяющим геомеханическим фактором и должно учитываться при проектировании и ведении горных работ. Для подтверждения сделанного предположения о наличии в массиве тектонических напряжений и уточнения их зависимости от глубины необходимо продолжить измерения на других участках и высотных отметках Ждановского месторождения.

На следующем этапе исследований планируется создание объемной численной геомеханической модели Ждановского месторождения, при этом полученные результаты измерений будут использоваться в качестве граничных условий.

Благодарности

Автор считает своим долгом выразить благодарность за помощь в подготовке статьи и ценные советы д. т. н., проф. А. А. Козыреву, к. т. н., старшему научному сотруднику А. В. Земцовскому, ведущим технологам И. В. Данилову и М. И. Потокину, а также главному маркшейдеру АО «Кольская ГМК» С. В. Временкову за помощь в организации измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловчиков А. В., Удалов А. Е., Белявский Ю. Г. Напряженное состояние пород в верхних слоях земной коры по данным натуральных измерений в рудниках вблизи скважины СГ-3 // Вестник МГТУ. 2007. Т 10, № 2. С. 267–272. 2. Геомеханическая оценка состояния массива при ведении горных работ на Ждановском месторождении подземным способом / В. А. Еременко [и др.] // Горн. информ.-аналит. бюл. 2010. № 11. С. 271–282. 3. Козырев А. А., Семенова И. Э., Земцовский А. В. Об оценке удароопасности массива горных пород Ждановского месторождения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты, 2017. № 14. С. 300–303. 4. Leeman E. R. The measurement of stress in rock: a review of recent developments (and a bibliography) // Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lab. Nac. de Eng. Civil. Lisbon. 1971. P. 200–229. 5. Leeman E. R., Hayes D. J. A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole // Proc. 1st Congo Int. Soc. Rock Mech. (ISRM). Lisbon, Lab. Nac. de Eng. Civil. Lisbon. 1966. Vol. II. P. 17–24. 6. Leeman E. R. The 'Doorstopper' and triaxial rock stress measuring instruments developed by the C.S.I.R. // J. South African Institute of Mining and Metallurgy. 1969. February. P. 305–339. 7. Kozыrev A. A., Semenova I. E., Zemtsovskiy A. V. Investigation of Geomechanical Features of the Rock Mass in Mining of Two Contiguous Deposits under Tectonic Stresses // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 324–331. 8. Stress measurements in soft rocks / R. Corthésy [et al.] // Engineering Geology. 2003. Vol. 69, Iss. 3–4. P. 381–397. 9. Guo R., Thompson P. Influences of changes in mechanical properties of an overcored sample on the far-field stress calculation // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2004. Vol. 41, Iss. 7. P.1153–1166. 10. Рыбин В. В., Козырев А. А., Данилов И. В. Определение параметров напряженного состояния приконтурного массива пород на карьерах Кольского полуострова // Горн. информ.-аналит. бюл. 2009. № 10. С. 402–405. 11. Экспериментальные определения параметров напряженного состояния прибортового массива пород карьера «Восточный» Олимпиадинского золоторудного месторождения / А. А. Козырев [и др.] // Проблемы недропользования. 2018. № 3 (18). С. 61–69.

Сведения об авторе

Мельников Дмитрий Николаевич — младший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН
E-mail: hibini-trans@mail.ru

Author Affiliation

Dmitriy N. Melnikov — Junior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS
E-mail: hibini-trans@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Мельников, Д. Н. Измерение напряжений в массиве пород Ждановского месторождения методом разгрузки (торцевой вариант) / Д. Н. Мельников // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 1 (11). — С. 57–61.

Reference

Melnikov Dmitriy N. Stress Measurements in Rock Mass of the Zhdanovskoe Deposit by the Doorstopper Method. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 1 (11), pp. 57–61. (In Russ.).