

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД УДАРООПАСНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ОЛЕНИЙ РУЧЕЙ» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ

А. А. Самсонов

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород месторождения «Олений ручей». Апатит-нефелиновое месторождение «Олений ручей» располагается на северо-востоке Хибинского массива, в центре Мурманской обл. Его запасы обрабатываются карьером и подземным рудником. Подземные горные работы ведутся в сложных геологических и горнотехнических условиях. Кроме того, месторождение отнесено к склонным и опасным по горным ударам. Данные факты свидетельствуют о необходимости детального изучения состояния массива горных пород месторождения «Олений ручей». В 1980-х гг. проводилась оценка действующих напряжений в массиве месторождения по данным геологического бурения, по результатам которого было установлено, что там действуют горизонтальные напряжения и они значительно превышают гравитационную составляющую. Это свидетельствует о наличии в массиве тектонических напряжений. С 2012 по 2018 гг. сотрудниками Горного института КНЦ РАН проводились измерения напряжений в горных выработках подземного рудника для получения более детальной информации о параметрах действующих полей напряжений. Для исследований применялся метод разгрузки в торцевом варианте, который хорошо себя зарекомендовал и применяется как у нас, так и за рубежом. По итогам измерений были определены значения и векторы главных компонент тензора напряжений на различных глубинах и участках месторождения «Олений ручей». Установлено, что в массиве преобладают горизонтальные напряжения, значения которых превышают гравитационную составляющую напряжений. Данный факт подтверждает высказанное ранее предположение о наличии в массиве тектонических напряжений. Полученные данные применялись для создания численной геомеханической модели, которая позволила обосновать безопасный и эффективный способ подземной отработки запасов месторождения.

Ключевые слова:

месторождение «Олений ручей», измерение напряжений, метод разгрузки в торцевом варианте, тектонические напряжения, напряженно-деформированное состояние.

ASSESSMENT OF ROCK MASS STATE OF OLENIY RUCHEY ROCK BURST DEPOSIT BASED ON THE RESULTS OF STRESS MEASUREMENTS

Alexander A. Samsonov

Mining Institute of KSC RAS

Abstract

The paper presents the results of the rock mass stress-strain state study of the Oleniy Ruchey deposit. Apatite-nepheline deposit Oleniy Ruchey is located in the northeast of the Khibiny massif, in the center of Murmansk region. The deposit reserves are mined by an open-pit and an underground mine. Underground mining is carried out in difficult geological and mining conditions. In addition, the deposit is classified as prone and hazardous to rock bursts. These facts indicate the need for a detailed rock mass state study. In the 1980s, the assessment of the acting stresses in the rock mass was carried out according to geological drilling. It was found that horizontal stresses acts on the deposit. The stresses significantly exceed the gravitational component, and this indicates the presence of tectonic stresses in the rock mass. From 2012 to 2018, the researchers of the Mining Institute of KSC RAS were carrying out the stress measurements in the underground mine excavations in order to obtain more detailed information about the parameters of the acting stress fields. Doorstopper method was applied. This method is well established and used both in our country and abroad. So the values and directions of the principal stress were determined on different depths and areas of Oleniy Ruchey deposit.

It was established that the horizontal stresses prevail in the rock mass, the values of which exceed the gravitational component of the stresses. This fact confirms the previously stated assumption about the presence of tectonic stresses in the rock mass. The obtained data were used to create a numerical geomechanical model, which allowed justifying a safe and effective method of underground mining of the deposit reserves.

Keywords:

Oleniy Ruchey deposit, stress measurements, doorstopper method, tectonic stresses, stress-strain state.

**Введение**

Месторождение «Олений ручей» имеет сложное многоярусное строение, обусловленное чередованием в разрезе пластообразных тел апатит-нефелиновых руд, трахитоидных уртитов, ийолитов, мельтейгитов, массивных уртитов и ювитов, нефелиновых сиенитов. Рудные залежи представляют собой самостоятельные тела пластообразной формы, которые располагаются в двух рудных ярусах — верхнем (мощностью 200 м) и нижнем (мощностью 50–330 м) и разделяются безрудной толщей мощностью 200–300 м. Вмещающие породы месторождений, а в большинстве своем и руды, являются хрупкими и крепкими с коэффициентом хрупкости больше 10. Основные физико-механические и прочностные свойства пород месторождений представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Физико-механические и прочностные свойства пород
Physical-mechanical and strength properties of rocks

Параметры Parameter	Вмещающие породы Enclosing rocks	Апатит-нефелиновые руды Apatite-nepheline ores
Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа Compressive strength $\sigma_{сж}$, МПа		
пределы вариации / limits of variation	80–340	60–120
среднее значение / average value	210	95
Прочность при растяжении σ_p , МПа Compressive strength $\sigma_{сж}$, МПа		
пределы вариации / limits of variation	8–37	5–8
среднее значение / average value	19	5
Коэффициент хрупкости $\sigma_{сж}/\sigma_p$ Fragility coefficient $\sigma_{сж}/\sigma_p$	11	19
Скорость продольных волн, среднее значение, км/с Speed of longitudinal waves, average value, km/s	4,6	4,0
Модуль продольной упругости $E \cdot 10^4$, МПа Modulus of longitudinal elasticity $E \cdot 10^4$, МПа		
пределы вариации / limits of variation	1,3–9,0	1,5–6,0
среднее значение / average value	5,5	3,8

В конце 1980-х гг. были выполнены исследования состояния массива месторождения по данным геологического бурения [1]. В результате анализа данных было установлено, что в массиве действуют высокие горизонтальные напряжения. Выделено три зоны по глубине месторождения:

I — до глубины 400 м, слабонапряженная зона, $\sigma_{max} \leq 20$ МПа;

II — с глубины 400 до 1000 м, средненапряженная зона $20 \text{ МПа} < \sigma_{max} < 40 \text{ МПа}$;

III — с глубины свыше 1000 м, сильнонапряженная зона $\sigma_{max} \geq 40 \text{ МПа}$.

Представленные выше свойства пород свидетельствуют о их склонности к хрупкому разрушению. Кроме этого установлено, что в массиве действуют высокие тектонические напряжения. Данные факты свидетельствуют о том, что месторождение «Олений ручей» является удароопасным. В соответствии с нормативными источниками [2, 3] месторождение отнесено к склонным, а ниже глубины 400 м — к опасным по горным ударам. Таким образом, малоизученность и удароопасность месторождения «Олений ручей» обуславливают необходимость детального исследования параметров поля напряжений, действующих в массиве.

Методика измерений

Для исследования состояния массива выполнялись измерения напряжений методом разгрузки в торцевом варианте. В основе метода лежат измерения упругих деформаций восстановления при отделении породы от массива и разгрузке от действовавших на нее напряжений. Если известен модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν , то, используя математический аппарат теории упругости, по измеренным деформациям мы можем вычислить действовавшие в массиве напряжения. Более подробно методика представлена в работах [4–8]. Данный метод измерений широко применяется при исследовании состояния массива как у нас [9, 10], так и за рубежом [11, 12] и хорошо себя зарекомендовал за десятилетия его применения.

Измерения проводились в тупиковых выработках на горизонтах +240, +100, +40 м. Для того чтобы получить данные о природных напряжениях, действующих в нетронутом массиве, расположение измерительных станций выбиралось вдали от горных работ и каких-либо крупных геологических нарушений, которые могли бы повлиять на результаты измерений.

Результаты и обсуждение

Измерения напряжений проводились с 2012 по 2018 гг. на четырех станциях [13]. Первая станция располагалась на гор. +240 м в тупиковом забое воздухоподающей штольни. В результате измерений на первой станции было установлено, что максимальная компонента главных напряжений σ_{\max} на гор. +234 м составляет 25 МПа, азимут вектора максимальной компоненты равен приблизительно 75° . Минимальная компонента σ_{\min} равна 2 МПа, азимут вектора σ_{\min} равен -15° .

В декабре 2013 г. были проведены измерения на второй измерительной станции, которая располагалась на пересечении сбойки № 10 и транспортной штольни. Состояние керна, полученного при бурении измерительных скважин, свидетельствует о малой нарушенности массива в месте проведения измерений, а дискование керна в пределах первых метров указывает на наличие концентрации напряжений на контуре выработок. В результате измерений были получены следующие значения компонент главных напряжений: σ_{\max} — 31 МПа, σ_{\min} — 15 МПа.

Измерения напряжений в 2018 г. проводились на двух станциях: третья станция на гор. +40 м и четвертая — на гор. +100 м. Выбор местоположения станций осложнялся наличием на исследуемом участке массива взаимно пересекающихся геологических структур разной мощности, формирующих отдельные блоки.

Измерения на третьей станции проводились на гор. +100 м в забое породного бурового штрека. По данным сотрудников Службы прогноза и профилактики горных ударов АО «СЗФК», здесь не наблюдалось проявлений горного давления в динамической форме. Значения напряжений по измерительной скважине являются достаточно однородными после ее выхода за пределы нарушенной зоны на контуре выработки, что говорит о надежности полученных результатов. В основном керн этой станции представлен апатит-нефелиновой рудой, выраженного дискования не отмечено. Более низкий уровень максимальных напряжений $\sigma_{\max} \approx 21$ МПа, по сравнению с предыдущими станциями, скорее всего, связан именно с местоположением станции в руде, упругие свойства которой значительно ниже, чем свойства пород вмещающего массива, при этом значение минимальной компоненты составило 8 МПа.

Четвертая измерительная станция располагалась в забое подэтажного штрека на гор. +40 м. Керн по скважинам четвертой станции представлен вмещающими породами — рихчорритами с признаками содовой минерализации. При проходке подэтажного штрека проявления горного

давления отмечались на кровле и сопряжении с юго-восточной стенкой. Общая геомеханическая ситуация была подтверждена инструментальными результатами. Здесь зафиксирован наиболее высокий уровень сжимающих напряжений по всем имеющимся на сегодня данным натурных измерений на месторождении «Олений ручей» — приблизительно 42 МПа на глубине 600 м от дневной поверхности. Более детально результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты измерения напряжений на месторождении «Олений ручей»
The results of stress measurements at Oleniy Ruchey deposit

Компонента главных напряжений Principal stresses component	Глубина, м Depth, m			
	340	400	540	600
Максимальная σ_{\max} Maximum σ_{\max}				
значение, МПа value, MPa	25	31	21	42
азимут, град. azimuth, degrees	75	90	111	72
угол наклона к горизонту, град. angle of inclination to the horizon, degrees	33	13	1	8
Минимальная σ_{\min} Minimum σ_{\min}				
значение, МПа value, MPa	2	15	8	14
азимут, град. azimuth, degrees	-15	0	21	-18
угол наклона к горизонту, град. angle of inclination to the horizon, degrees	57	77	89	82

На рисунке представлен график изменения максимальных напряжений с глубиной. Значения на третьей станции не учтены, так как измерения проведены в рудном теле и величины максимальных напряжений значительно ниже, чем во вмещающем массиве. Линией показано изменение максимальных напряжений σ_{\max} , полученных при измерениях методом разгрузки. Как видно из графика (рис.), эти значения растут с глубиной.



Зависимость максимальных напряжений σ_{\max} от глубины
Dependence of σ_{\max} on depth

В целом, если анализировать измеренные *in situ* данные о параметрах поля напряжений, то полученные величины максимального сжатия соответствуют уровню, который прогнозировался по полученным ранее результатам оценки действующих напряжений в массиве месторождения [1]. Что касается направления, то оно во всех точках измерений отлично от предполагаемого (по простиранию рудной залежи). Векторы σ_{\max} действуют в направлении, диагональном к выделяемой рудной зоне, и направления варьируются в достаточно широких пределах от 72° до 110° курсом на север.

Заключение

В результате инструментальных измерений была получена закономерность изменения максимальных напряжений с глубиной, которая подтверждает сделанное ранее предположение о действии в массиве месторождения «Олений ручей» высоких тектонических напряжений. Полученные результаты хорошо согласуются с данными визуального обследования состояния подземных горных выработок, которые также свидетельствуют о действии в массиве высоких горизонтальных напряжений. Таким образом, как и на других апатит-нефелиновых месторождениях Хибинского массива, тип поля напряжений, действующих на месторождении «Олений ручей», можно отнести к гравитационно-тектоническому.

Результаты измерений напряжений применялись при создании численной геомеханической модели месторождения, которая позволила выбрать наиболее безопасный и эффективный способ отработки запасов подземным рудником.

В будущем планируется продолжить данные исследования для получения более полной информации о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород месторождения «Олений ручей».

Благодарности

Автор считает своим долгом выразить благодарность за помощь в подготовке статьи и за ценные советы д. т. н., проф. А. А. Козыреву, к. т. н., ведущему научному сотруднику И. Э. Семеновой, к. т. н., старшему научному сотруднику А. В. Земцовскому, ведущим технологам И. В. Данилову и М. И. Потокину, а также начальнику службы прогноза и предотвращения горных ударов АО «СЗФК» П. Ю. Меньшикову за помощь в организации измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах: в 2 т. / А. А. Козырев [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Т. 2.
2. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам»: приказ от 2 декабря 2013 года № 576 / Федер. служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499086982>.
3. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (месторождение Олений ручей) / А. А. Козырев [и др.]; Горный ин-т КНЦ РАН, АО «СЗФК». Апатиты, 2015. 101 с.
4. Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геолого-разведочного процесса / науч. ред. Е. И. Шемякин. М.: ВНИИгеоинформсистем, 1987. 116 с.
5. Турчанинов И. А., Иванов В. И., Марков Г. А. Руководство по измерению напряжений в массиве скальных пород методом разгрузки. Апатиты: КФ АН СССР, 1970. 48 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Stress measurements in soft rocks / R. Corthésy // Engineering Geology. 2003. Vol. 69, Iss. 3–4. P. 381–397.
12. 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.
13. Семенова И. Э., Земцовский А. В., Павлов Д. А. Комплексное геомеханическое исследование массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» при ведении подземных горных работ // Горн. информ.-аналит. бюл. 2014. № 4. С. 46–55.

Сведения об авторе

Самсонов Александр Анатольевич — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН
E-mail: hibini-trans@mail.ru

Author Affiliation

Alexander A. Samsonov — Researcher of the Mining Institute of KSC RAS
E-mail: hibini-trans@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Самсонов, А. А. Оценка состояния массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» по результатам измерений напряжений / *А. А. Самсонов* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 1 (11). — С. 62–67.

Reference

Samsonov Alexander A. Assessment of Rock Mass State of Oleniy Ruchey Rock Burst Deposit Based on the Results of Stress Measurements. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 1 (11), pp. 62–67. (In Russ.).