

Рыбин Вадим Вячеславович

старший научный сотрудник, доцент,
кандидат технических наук,
ГоИ КНЦ РАН,
184209, Мурманская область,
г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24
e-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru

Потапов Даниил Андреевич

аспирант,
ГоИ КНЦ РАН,
184209, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24;
e-mail: potapovd@goi.kolasc.net.ru

Калюжный Антон Сергеевич

аспирант,
ГоИ КНЦ РАН,
184209, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24
e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru

**РАЙОНИРОВАНИЕ КАРЬЕРНОГО
ПОЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛЕНИЙ
РУЧЕЙ ПО ГЛУБИНЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ
КЛАССИФИКАЦИИ
ПРОФЕССОРА Д. ЛОБШИРА**

Аннотация:

Проанализированы физико-механические свойства, структурную нарушенность, напряженно-деформированное состояние массива пород месторождения «Олений ручей», расположенного в юго-восточной части Хибинского массива. На основе проведенного анализа геомеханического состояния выполнена оценка рейтинга геомеханической классификации (MRMR) проф. Д. Лобшира, что в свою очередь позволило выполнить районирование карьерного поля месторождения по глубине. На основе проведенных исследований в первом приближении рекомендованы устойчивые углы откоса борта карьера в пределах различных его участков.

Ключевые слова: геомеханическая классификация проф. Д. Лобшира, MRMR, месторождение «Олений ручей», Хибинский массив, борт карьера

Vadim V. Rybin – PhD (Eng.), Senior Researcher
The Mining Institute of Kola Scientific Center,
Russian Academy of Sciences
24 Fersman st., 184209
the Apatites, Murmansk region, Russia
e-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru

Daniil A. Potapov – Ph.D. student
The Mining Institute of Kola Scientific Center,
Russian Academy of Sciences
24 Fersman st., 184209
the Apatites, Murmansk region, Russia
e-mail: potapovd@goi.kolasc.net.ru

Anton S. Kaliuzhnyi – Ph.D. student
The Mining Institute of Kola Scientific Center,
Russian Academy of Sciences
24 Fersman st., 184209
the Apatites, Murmansk region, Russia
e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru

**ZONING OF THE «OLENIY
RUCHEY» OPEN PIT FIELD BY DEPTH
USING PROF. D. LAUBSCHER ROCK
MASS CLASSIFICATION**

Abstract:

The article analyzes physical and mechanical properties, structural failure, stressed-strained rocks state, of the "Oleniy Ruchey" deposit located in the south-eastern part of the Khibinsky massif. Based on the data of geo-mechanical state analysis, D. Laubscher rock mass classification (MRMR) has been carried out thus allowing to perform zoning of the deposit's open pit field's depth. On the basis of these studies in the first approximation the stable slope angles of the open pit walls within its different parts are recommended.

Key words: D. Laubscher Rock Mass Classification (MRMR), the «Oleniy Ruchey» deposit, Khibinsky massif, open-pit wall

Уже на протяжении 7 лет в Хибинах осуществляется крупный инновационный проект по освоению месторождения апатит-нефелиновых руд Олений ручей. Его отработка в настоящий момент проводится открытым способом, одновременно осуществляется строительство подземного рудника [1].

значения свидетельствуют о том, что по классификации по прочности породы и руды месторождения Олений Ручей можно отнести к III категории (крепкие породы).

Анализируя данные, приведенные в табл. 1 и 2, очевидно, что значения прочностных показателей, определенных в 80-е годы прошлого века, значительно выше по сравнению с данными 2010 г. Наиболее вероятной причиной этого является то, что в определениях 2010 г. отбор проб производили в верхней части месторождения, т. е. в выветрелых и трещиноватых скальных породах. Также установлено, что с глубиной нарушенность и трещиноватость массива пород уменьшается, что приводит к более высоким параметрам физико-механических свойств пород в массиве. Помимо вышеприведенного факта, следует учитывать, что произошло изменение ГОСТа на определение прочностных свойств образцов.

По данным определений физических свойств горных пород 2010 г. был проведен анализ изменения предела прочности на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) в пределах Главного разлома, который является основным крупным структурным элементом в пределах карьерного поля месторождения Олений ручей.

На графиках (рис. 2 и 3) представлена зависимость между средним, по каждой выборке, пределом прочности на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) по породе и глубиной, где нулевая отметка соответствует устью скважины. Для наглядности точки соединены между собой.

На обоих графиках отчетливо видно, что на глубине ≈ 200 м идет изменение предела прочности на одноосное сжатие. При этом для ювита среднее значение предела прочности на одноосное сжатие на отметке 195 м составляет 120 МПа, а на отметке 203 м – 90 МПа, что на 25 % меньше. Для мальтейгита на глубине 190 м среднее значение $\sigma_{сж}$ составляет 135 МПа, а на глубине 200 м – 80 МПа, что на 40 % меньше. Примерно на этой же глубине относительно исследуемых скважин располагается Главный разлом (пунктирная линия).

Вышеизложенное свидетельствует о том, что горные породы, находящиеся в зоне влияния Главного разлома, могут иметь гораздо меньшие прочностные характеристики, что необходимо учитывать при формировании конечного контура карьера.

Для учета влияния параметров напряженно-деформированного состояния на устойчивость прибортового массива в середине 1980-х годов был выполнен прогноз естественного напряженного состояния массива горных пород месторождения. В результате по уровню действующих напряжений были выделены три характерные зоны [4]:

I – слабонапряженная зона ($\sigma_3 \leq 20$ МПа), от поверхности до глубины 400 м;

II – средненапряженная зона ($20 \text{ МПа} < \sigma_3 < 40 \text{ МПа}$), от 400 до 1000 м;

III – сильнапряженная зона ($\sigma_3 \geq 40$ МПа), свыше 1000 м.

По показателям трещиноватости керна и характеру его дискования было также выделено 3 зоны по глубине месторождения [3]: до 400 м; от 400 до 1000 м, более 1000 м.

Верхняя зона глубиной до 400 м характеризуется повышенным значением трещиноватости, что, вероятнее всего, обусловлено наличием зоны выветривания, т. е. зоны ослабленных пород, отмеченной по материалам сейсмических исследований. Значения действующих напряжений в этой зоне существенно ниже, чем на больших глубинах.

Во второй зоне, на глубине от 400 до 1000 м, проявляется дискование керна, которое приурочено в основном к зонам высокопрочных пород (уртиты, ийолиты). Породы в этой зоне менее трещиноватые.

В пределах третьей зоны, на глубинах свыше 1000 м, дискование керна проявляется на значительно больших интервалах, что свидетельствует о более высоком значении действующих напряжений в массиве пород и гораздо меньшей интенсивности трещиноватости.

Таблица 1

Некоторые физические свойства основных типов горных пород месторождения Олений ручей по данным 1985 г.

Наименование пород	Интервал опробования, м	Плотность, г/см ³	Скорость продольных волн, км/с	Коэффициент вариации, %	Скорость поперечных волн, км/с	Коэффициент вариации, %	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент вариации, %	Прочность при растяжении, МПа	Коэффициент вариации, %	Коэффициент крепости по Протодьякову	Модуль продольной упругости, Е×10 ⁴ МПа	Коэффициент хрупкости пород
Нефелиновый сиенит среднезернистый массивный	482-483	2.63	<u>4.37-5.11</u> 4.79	4	2.11-2.53 2.40	7	<u>200-300</u> 250	17	<u>17-24</u> 20	15	14	4.08	12
Уртит полевопшатный, неравнозернистый массивный	671-672	2.72	<u>3.40-4.93</u> 4.01	9	<u>1.71-2.26</u> 2.05	11	<u>170-220</u> 200	11	<u>10-18</u> 12	28	11	3.1	16
Малинит массивный	776-777	2.97	<u>2.71-3.26</u> 3.02	7	<u>1.65-1.76</u> 1.70	7	<u>150-200</u> 180	12	<u>10-14</u> 12	15	10	2.18	15
Уртит мелкозернистый массивный	817-818	2.96	<u>2.68-4.08</u> 3.69	6	<u>1.32-2.14</u> 1.80	19	<u>80-180</u> 130	30	<u>6-13</u> 11	17	8	2.63	11
Ийолит-уртит среднезернистый слаботрахитоидный	300-301	2.84	<u>5.53-5.86</u> 5.71	2	<u>2.14-3.12</u> 2.77	15	<u>240-340</u> 300	15	<u>22-32</u> 27	16	14	6.02	11
Ийолит среднезернистый трахитоидный	398-399	3.00	<u>3-73-5.09</u> 4.64	8	<u>2.02-2.25</u> 2.16	4	<u>160-520</u> 270	25	<u>18-25</u> 20	16	13	3.85	14
Мончикит	418-419	3.00	<u>5.44-5.75</u> 5.63	1	<u>2.68-3.08</u> 2.87	6	<u>160-260</u> 220	18	<u>30-37</u> 33	9	15	6.65	6
А-Н руда пятнистополосчатая	566-568	3.22	<u>2.17-3.74</u> 2.89	15	<u>0.89-1.92</u> 1.43	26	<u>70-120</u> 90	24	<u>5-8</u> 6	22	6	1.77	15
А-Н руда блоковая	576-578	3.09	<u>2.34-4.49</u> 3.17	13	<u>1.26-1.91</u> 1.49	15	<u>80-100</u> 90	13	<u>4-6</u> 5	16	6	1.84	19
Нефелиновый сиенит	704-706	2.70	<u>4.13-4.71</u> 4.44	4	<u>1.97-2.74</u> 2.29	14	<u>190-260</u> 230	13	<u>14-21</u> 16	16	12	3.85	14
Ийолит мелкозернистый	596-597	2.88	<u>2.69-4.78</u> 3.94	13	<u>1.56-2.05</u> 1.93	8	<u>100-250</u> 230	9	<u>18-24</u> 21	12	13	2.73	11
Уртит неравнозернистый массивный	1576-1578	2.73	<u>3.66-5.48</u> 4.60	10	<u>1.93-2.25</u> 2.06	7	<u>140-240</u> 190	11	<u>11-24</u> 17	34	12	3.2	11
Уртит неравнозернистый	958-960	2.63	<u>4.69-5.42</u> 4.90	5	<u>1.87-2.41</u> 2.21	11	<u>180-250</u> 200	14	<u>14-22</u> 18	21	12	3.51	13

Таблица 2

**Некоторые физические свойства основных типов пород апатитнефелинового месторождения Олений ручей
по данным 2010 г.**

Наименование породы	Плотность, ρ , г/см ³	Скорость продольных волн, V_p , км/с	Скорость поперечных волн, V_s , км/с	Коэффициент Пуассона (динамический) ν	Модуль упругости (динамический) $E \times 10^{-4}$, МПа	Коэффициент Пуассона (статический) μ	Модуль упругости (статический) $E \times 10^{-4}$, МПа	Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Прочность при растяжении σ_p , МПа	Коэффициент хрупкости $\sigma_{сж}/\sigma_p$
Уртит неоднородно-зернистый	<u>2,65 - 3,11</u> 2,86	<u>4,109 - 6,071</u> 5,111	<u>2,646 - 3,303</u> 2,886	<u>0,10 - 0,30</u> 0,21	<u>5,00 - 9,65</u> 6,72	<u>0,23 - 0,28</u> 0,26	<u>6,62 - 7,93</u> 7,34	<u>84,3 - 213,4</u> 136,3	<u>6,8 - 18,2</u> 12,1	11
Уртит полевошпатовый со сфеном	<u>2,70 - 2,90</u> 2,79	<u>4,930 - 6,024</u> 5,427	<u>2,833 - 3,175</u> 2,996	<u>0,15 - 0,28</u> 0,23	<u>6,42 - 8,51</u> 7,15	<u>0,20 - 0,30</u> 0,24	<u>5,58 - 7,93</u> 6,72	<u>70,3 - 163,5</u> 114,7	<u>7,2 - 13,6</u> 9,8	12
Уртит до ювита	<u>2,60 - 3,04</u> 2,98	<u>4,328 - 6,285</u> 5,312	<u>2,704 - 3,419</u> 2,957	<u>0,10 - 0,30</u> 0,20	<u>5,03 - 8,93</u> 7,34	<u>0,18 - 0,27</u> 0,22	<u>6,15 - 7,38</u> 6,99	<u>70,1 - 190,0</u> 116,3	<u>6,5 - 16,4</u> 11,1	10
Ийолит	<u>2,76 - 3,38</u> 2,96	<u>4,581 - 6,501</u> 5,616	<u>2,723 - 3,598</u> 3,154	<u>0,15 - 0,27</u> 0,22	<u>5,58 - 11,84</u> 8,45	<u>0,20 - 0,26</u> 0,23	<u>6,50 - 11,70</u> 9,49	<u>107,0 - 293,3</u> 183,0	<u>12,6 - 20,8</u> 16,7	11
Мельтейгит	<u>2,98 - 3,37</u> 3,19	<u>4,788 - 6,228</u> 5,585	<u>2,793 - 3,362</u> 3,031	<u>0,12 - 0,30</u> 0,24	<u>7,25 - 10,26</u> 8,46	<u>0,21 - 0,28</u> 0,24	<u>5,75 - 9,63</u> 7,20	<u>87,4 - 226,1</u> 152,1	<u>11,3 - 23,2</u> 16,0	10
Малиньит	<u>2,92 - 3,05</u> 2,99	<u>5,743 - 5,860</u> 5,799	<u>3,068 - 3,068</u> 3,068	<u>0,26 - 0,27</u> 0,27	<u>8,09 - 8,41</u> 8,27	<u>0,22 - 0,33</u> 0,27	<u>6,25 - 8,77</u> 7,92	<u>84,0 - 162,2</u> 124,0	<u>20,3 - 20,3</u> 20,3	6
Ювит	<u>2,58 - 2,92</u> 2,74	<u>4,306 - 5,986</u> 5,308	<u>2,695 - 3,155</u> 2,966	<u>0,10 - 0,27</u> 0,22	<u>4,85 - 8,50</u> 6,85	<u>0,21 - 0,26</u> 0,23	<u>4,74 - 7,75</u> 6,03	<u>73,0 - 192,2</u> 118,3	<u>8,8 - 21,4</u> 14,4	8
Рисчоррит	<u>2,61 - 2,71</u> 2,67	<u>4,248 - 4,451</u> 4,359	<u>2,555 - 2,682</u> 2,632	<u>0,13 - 0,16</u> 0,15	<u>4,68 - 5,08</u> 4,92	<u>0,19 - 0,26</u> 0,23	<u>6,94 - 8,95</u> 7,72	<u>97,2 - 195,0</u> 128,3	<u>9,2 - 12,0</u> 10,5	12
Апатит - нефелиновая руда	<u>2,89 - 3,16</u> 3,00	<u>4,267 - 5,590</u> 5,006	<u>2,632 - 3,049</u> 2,874	<u>0,10 - 0,27</u> 0,19	<u>5,25 - 8,01</u> 6,87	<u>0,22 - 0,29</u> 0,25	<u>6,80 - 7,75</u> 7,17	<u>83,0 - 198,8</u> 126,8	<u>9,0 - 11,8</u> 10,2	12

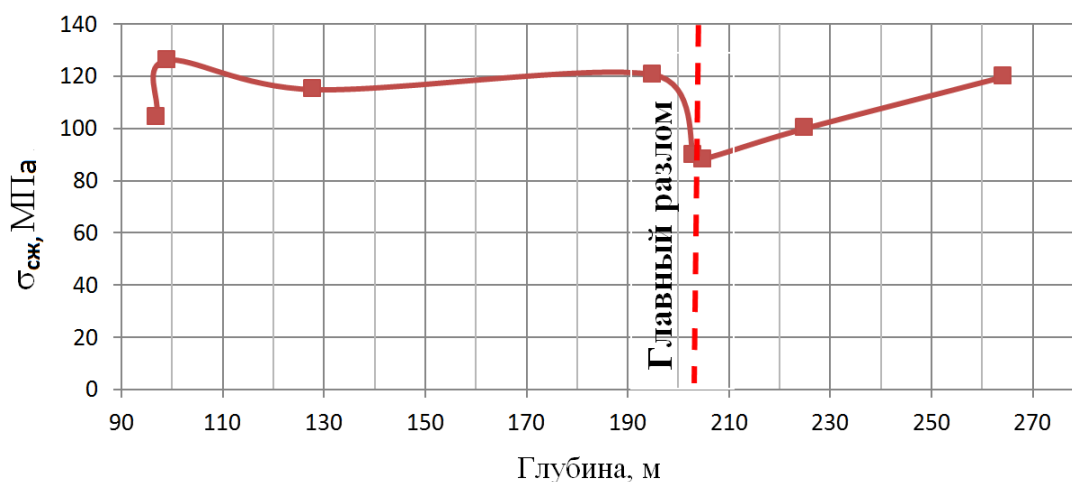


Рис. 2 – График зависимости предела прочности на сжатие от глубины для ювита

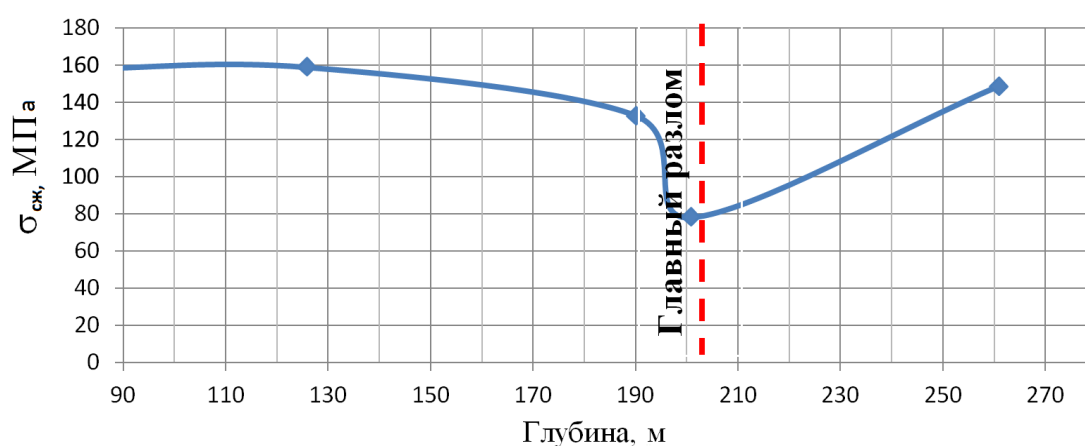


Рис. 3 – График зависимости предела прочности на сжатие от глубины для мальтейгита

На базе имеющихся материалов о геомеханическом состоянии месторождения можно определить геомеханический рейтинг массива пород. Последнее время большое распространение получила разработанная за рубежом геомеханическая рейтинговая классификация MRMR (далее R_L) проф. Д. Лобшира, широко применяемая в западных странах с середины 70-х годов прошлого столетия [6 – 8]. Методика позволяет на предварительном этапе определить основные параметры горных работ по результатам геологоразведочных работ, что является весьма полезным для предварительной оценки параметров устойчивости горных выработок, в том числе предварительной оценки устойчивости бортов карьеров.

Алгоритм определения показателя рейтинга R_L представлен на рис. 4. Из схемы видно, что величина рейтинга R_L определяется суммой частных рейтингов, учитывающих прочностные характеристики массива, количественные и качественные характеристики трещиноватости, которые в дальнейшем умножаются на поправочные коэффициенты выветривания, ориентации трещин, напряженного состояния, гидрогеологии и др.

Величина рейтинга R_L выражается следующей формулой:

$$R_L = (R_{\sigma_{\text{бл}}} + R_{\text{кт}} + R_{\text{ут}}) \times k,$$

где $R_{\sigma_{\text{бл}}}$ – прочность породного блока; $R_{\text{кт}}$ – рейтинг по количеству трещин; $R_{\text{ут}}$ – рейтинг условий трещиноватости; k – коэффициенты, учитывающие выветривание, ориентацию трещин, напряжения в массиве, взрывание, наличие подземных водопритоктов.

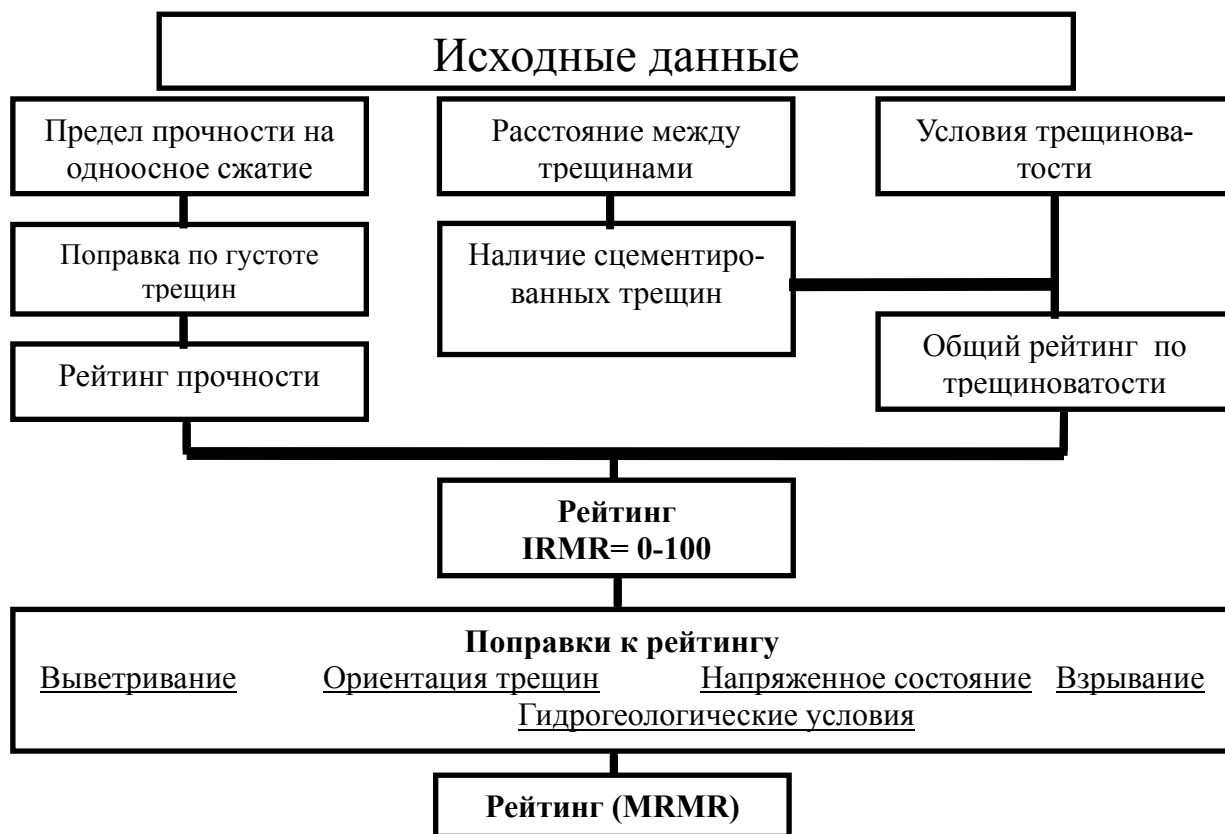


Рис. 4 – Алгоритм определения рейтингового показателя R_L по классификации профессора Д. Лобшира

Исходными данными по физико-механическим свойствам пород для выполнения расчетов являлись результаты исследований, проведенных Геологическим и Горным институтами КНЦ РАН [5]. Исходя из зональности уровня напряженности массива пород и данных о трещиноватости, свидетельствующих о зависимости их от глубины, расчет рейтинга производился для трех зон месторождения Олений ручей по формуле (1):

- 1) для верхней части массива (до глубины 100 м)

$$R_L = (R\sigma_{\text{бл}} + R_{\text{кт}} + R_{\text{ут}}) \times k \approx 38;$$

- 2) для глубины 100 – 300 м

$$R_L = (R\sigma_{\text{бл}} + R_{\text{кт}} + R_{\text{ут}}) \times k \approx 54 \div 65;$$

- 3) глубже 300 м

$$R_L = (R\sigma_{\text{бл}} + R_{\text{кт}} + R_{\text{ут}}) \times k \approx 60 \div 72.$$

В соответствии с разработанной проф. Д. Лобширом табл. 3, результаты расчета рейтинга R_L показывают, что горные породы месторождения Олений ручей в верхней части до глубины 100 м, кроме покрывных моренных отложений, принадлежат к 4 классу пород и характеризуются низкой устойчивостью. Породы, залегающие на глубине от 100 до 300 м, при действии низких значений тектонических напряжений – к третьему классу и характеризуются средней устойчивостью, но при действии высоких тектонических напряжений будут принадлежать ко второму классу и характеризоваться хорошей устойчивостью. На глубине 300 и более метров горные породы имеют хорошую устойчивость и относятся в большей степени ко второму классу.

Таблица 3

Величины рейтинга R_L в соответствии с классом горных пород по Лобширу

Рейтинг R_L	81÷100	61÷80	41÷60	21÷40	5÷20
Класс пород по Лобширу	1	2	3	4	5

А. Хайнсом и П. Тербрюгге [8] разработаны рекомендации по выбору приближенных значений углов откосов бортов карьеров на основе рассчитанного рейтинга MRMR. Данные рекомендации представлены в табл. 4.

Таблица 4

Приблизительные значения углов откосов бортов карьеров в соответствии с классом горных пород по А. Хайнсу и П. Тербрюгге

Класс пород	1	2	3	4	5
Угол откоса борта карьера	$75^\circ \pm 5^\circ$	$65^\circ \pm 5^\circ$	$55^\circ \pm 5^\circ$	$45^\circ \pm 5^\circ$	$35^\circ \pm 5^\circ$

На основе рассчитанного рейтинга R_L горных пород месторождения Олений ручей для карьера, в первом приближении можно рекомендовать к рассмотрению следующие варианты углов откоса борта:

- для глубины до 100 м – $35^\circ \div 50^\circ$,
- для глубины от 100 до 300 м – $50^\circ \div 60^\circ$,
- глубже 300 м – до 65° .

Графически районирование результатов рейтингов по глубине представлено на одном из разрезов (рис. 5).

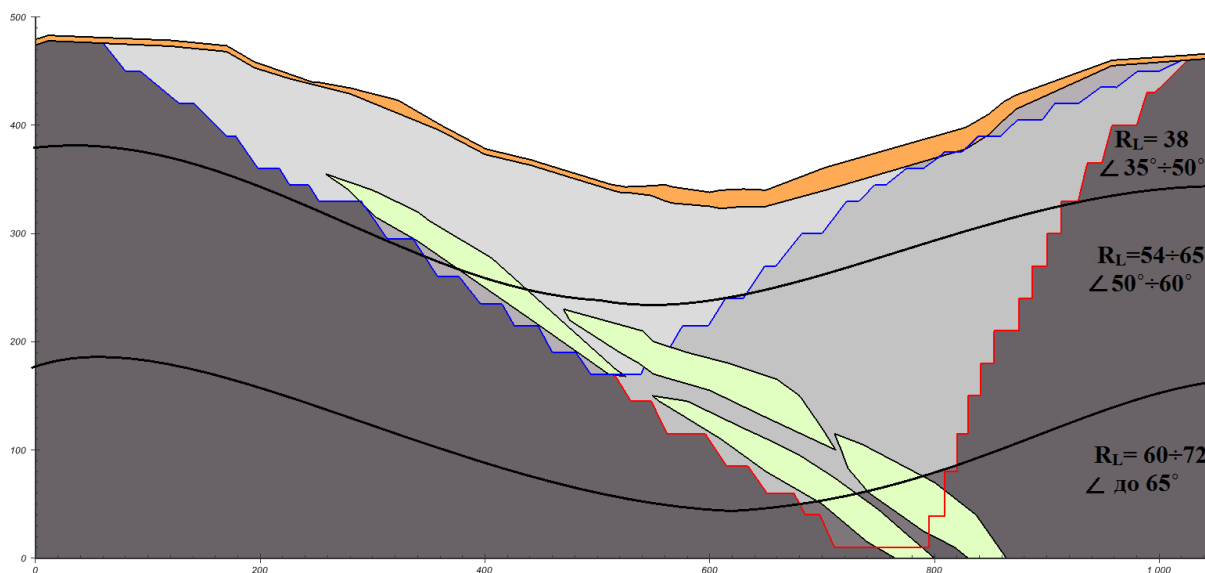


Рис. 5 – Разрез 32+50 м с положением условных границ рейтингов
(оранжевый – слой моренных отложений, синий и красный – возможные контуры карьера, светло-зеленый – рудные тела, черный – условная граница деления показателя рейтинга, темно-серый – вмещающие породы)

Необходимо отметить, что при расчете рейтингов R_L не учитывался вид буровзрывных работ. Применение контурного взрывания будет способствовать соответствию реального состояния приконтурной части массива горных пород приведенным результатам расчета рейтингов.

Таким образом, горные породы верхней части месторождения до глубины 100 м относительно дневной поверхности относятся ко второму классу, и борт карьера может быть сформирован под углом до 50°. На глубинах от 100 до 300 м от дневной поверхности горные породы принадлежат ко 2 – 3 классу и формирование борта возможно под углом до 60°. В случае, если глубина карьера составит более 300 м (2 класс), формирование борта возможно под углом до 65°.

Значения углов откоса борта карьера могут быть рекомендованы в первом приближении лишь для висячего борта карьера, т. к. со стороны лежащего борта имеется крупное структурное нарушение (Главный разлом) с углами падения ориентировочно 40 – 45° в сторону северо-запада.

Литература

1. Федоров С.Г. Создание рудно-сырьевой базы – важный шаг на пути вертикальной интеграции Группы «Акрон» / С.Г. Федоров // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 4. – С. 45 - 50.
2. Технологические и геомеханические проработки по границам карьера месторождения Олений ручей: отчет о НИР (заключительный) по х/д № 2256 от 30.03.2007 г. между Горным ин-том КНЦ РАН и ЗАО «СЗФК», фонды Горного института КНЦ РАН, Инв. № 1046 / отв. исп. Козырев А.А.; исп. Решетняк С.П., Билин А.Л., Рыбин В.В., Любин А.Н., Чуркин О.Е., Наговицын О.В., Смагин А.В., Родина А.В., Каспарьян Э.В., Жиров Д.В. (отв. исп. раздела). – Апатиты: 2007. - 127 с. с прил.
3. Отчет о результатах детальной разведки месторождения апатито-нефелиновых руд Олений ручей за 1980-85 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 1 октября 1985 года и поисково-оценочных работ на юго-западном фланге за 1982-1984 гг. РСФСР, Мурманская область. Т. 1. Кн. 1: Текст отчёта / отв. исп. Фаныгин А.С. и др. – Апатиты: Севзапгеология, 1985. – 354 с.
4. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах / Козырев А.А. и др. – Апатиты, КНЦ РАН, 1996. – Ч. I. - 159 с. - Ч. II. - 162 с.
5. Исследование физико-механических свойств прибортового массива карьера и прогноз напряженного состояния глубинных горизонтов по материалам геолого-разведочного бурения для обеспечения геодинамической безопасности месторождения Олений ручей: отчет о НИР (2 этап) по х/д № 2652 между Горным институтом КНЦ РАН и ЗАО «СЗФК» / рук. Козырев А.А.; исполн. Панин В.И., Рыбин В.В., Губинский Н.О., Потокин М.И., Данников И.В., Жиров Д.В., Климов С.А., Тележкина Н.С., Трошкова А.В. – Апатиты, 2010. - 64 с.
6. Laubscher D.H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design / D. H. Laubscher // Journal South African Inst. of Mining and Metallurgy. - 1990. - No. 10. - P. 257 - 273.
7. Jacubec J., Laubscher D.H. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice. Brisbane. - 2000. – P. 413 - 421
8. Laubscher D.H., Jacubec J. The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses. Foundations for Design. Brisbane. - 2000. – P. 475-481
9. Haines A. & Terbrugge P.J. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems. Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics. - ISRM. Aachen, Germany. 2, ed. Wittke W. publ. Balkema, Rotterdam. - 1991. - P. 887 - 892