

УДК 622.271.3

**ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВ КАРЬЕРА  
НА ОСНОВЕ РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ МАССИВА**

**А. А. Панжин<sup>1</sup>, Т. Ф. Харисов<sup>2</sup>, О. Д. Харисова<sup>3</sup>**

*Институт горного дела УрО РАН,*

E-mail: <sup>1</sup>panzhin@igduran.ru, <sup>2</sup>timur-ne@mail.ru, <sup>3</sup>OlgaZheltysheva@gmail.com,  
*ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

Выполнен комплекс геомеханических исследований для обоснования углов устойчивых откосов Джетыгаринского карьера, включающих испытания физико-механических свойств горных пород, изучение структуры прибортового массива, определение значений рейтинговой оценки массивов горных пород MRMR, районирование поверхности карьера по классификации профессора Лобшира. Рекомендованы значения углов откоса уступов карьера, а также разработаны мероприятия по обеспечению их устойчивости. В процессе классификации пород поверхности карьера выявлены факторы, оказывающие наиболее негативное воздействие на прибортовой массив. Установлено, что влияние некоторых факторов может быть значительно снижено, что позволит повысить значения углов заоткоски уступов при сохранении должной степени безопасности ведения горных работ.

*Джетыгаринский карьер, физико-механические свойства пород, склерометр, трещиноватость массива, фотограмметрия, беспилотный летательный аппарат, классификация Лобшира, рейтинговые оценки*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190402

Увеличение углов заоткоски бортов карьеров ведет к снижению объемов вскрышных работ и повышает экономическую эффективность разработки месторождения. Однако при этом повышается риск обрушения откосных сооружений в карьере в результате снижения устойчивости, деформаций прибортового массива, связанных с горным давлением и влиянием кратковременных импульсных нагрузок, вызванных ведением взрывных работ.

Существующие методы оценки устойчивости основываются на расчете коэффициентов запаса устойчивости бортов и уступов карьеров с учетом вида и формы нарушения по наиболее вероятной поверхности деформирования. При этом отношение удерживающих сил, действующих по наименее устойчивой поверхности в прибортовом массиве, к сдвигающим силам по этой поверхности должно быть не ниже нормативного коэффициента запаса устойчивости. Используемые в данных методиках способы алгебраического сложения сил и многоугольника сил являются наиболее простыми и наглядными для оценки устойчивости по методу предельного равновесия, но имеют ряд существенных недостатков, особенно для условий скальных прибортовых массивов с иерархически-блочным строением, находящихся под воздействием сложного напряженно-деформированного состояния.

Проблема обеспечения устойчивости уступов актуальна для карьера Джетыгаринского месторождения хризотил-асбеста, расположенного на севере Казахстана. Месторождение приурочено к южной части Джетыгаринского ультраосновного массива и представлено четырьмя асбестовыми залежами, из которых разрабатывается наиболее крупная, содержащая около 80% запасов месторождения. Залежь имеет пластообразную форму и простирается в меридиональном направлении на 3,9 км при мощности 100–260 м. Асбестоносная залежь имеет восточное падение под углами 30–60°, на глубине около 300 м местами сменяющееся на вертикальное. Лежащий бок сложен перидотитами, висячий — различными видами серпентинитов.

Отработку данного участка месторождения планируется выполнить в несколько этапов. В настоящее время горные работы ведутся открытым способом на глубине 290–300 м от земной поверхности. Текущий проект предполагает отработку карьера до глубины 390 м, последующие очереди отработки — до 550 м. Эксплуатация карьера будет проводиться еще более 10 лет.

Несмотря на то, что принятые параметры ведения горных работ обеспечивают общую устойчивость бортов Джетыгаринского карьера, на ряде участков проектные значения углов погашения уступов не могут быть достигнуты по соображениям безопасности, что в свою очередь препятствует выходу на проектный контур борта карьера. С целью определения значений устойчивых углов откоса уступов карьера, разработки мероприятий по обеспечению их устойчивости, а также выявления основных факторов, приводящих к ослаблению устойчивости массива на данных локальных участках, выполнен комплекс геомеханических исследований.

Поскольку физико-механические свойства массива горных пород и его структура, определяющие устойчивость откосных сооружений, различаются в широких пределах, для описания их характеристик возникла необходимость систематизации и сведения к общим численным показателям [1]. В мировой практике широкое распространение получила рейтинговая классификация Д. Лобшира (MRMR — Mining Rock Mass Rating) [2]. Рейтинг MRMR позволяет дать количественную оценку устойчивости массива горных пород и рекомендовать значения конструктивных параметров бортов карьеров.

Комплекс исследований, выполненных для обоснования углов устойчивых откосов уступов, включал определение физико-механических свойств горных пород, изучение структуры прибортового массива карьера, а также определение значений рейтинга MRMR и геомеханическое районирование поверхности карьера.

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Необходимость проведения исследований по определению физико-механических свойств пород, слагающих прибортовой массив Джетыгаринского карьера, вызвана недостаточностью информации о прочностных характеристиках пород, а также целью актуализации результатов по испытанию образцов пород, полученных в 1967 г. на первоначальном этапе разработки карьера.

На основании анализа геологического строения массива Джетыгаринского месторождения совместно с геологической службой карьера определен список пород, подлежащих лабораторным испытаниям, состоящий из 11 разновидностей перидотитов и серпентинитов, а также сланца и родингита. На бермах восточного и западного бортов карьера выполнен отбор проб в виде штуфового материала размером, позволяющим выпилить необходимое число образцов для испытаний. Наиболее подходящие куски горной породы маркировались, запаковывались в герметичную пленку для последующей транспортировки в лабораторию.

В процессе отбора измерялся предел прочности пород на сжатие с помощью склерометра Proseq Rock Schmidt (молоток Шмидта) для последующего сопоставления полученных результатов с лабораторными. Замеры выполнялись по международной методике ASTM (American

Society for Testing and Materials) на локальных участках обнаженного массива согласно петрографическим особенностям отобранного штуфового материала. Данный метод измерений позволяет оперативно оценить прочностные характеристики горных пород в полевых условиях, однако точность результатов ниже в сравнении с полученными в лабораторных испытаниях с использованием специализированных прессов [3, 4].

Все дальнейшие исследования проводились в лаборатории испытаний физико-механических свойств геоматериалов ИГД УрО РАН, оснащенной современным оборудованием. Согласно действующим нормативным документам, подготовлено по десять образцов на каждую пробу со следующими параметрами: длина  $L = 65$  мм; диаметр  $D = 44$  мм; соотношение высоты к диаметру 1.5 : 1.0; отклонение от плоскости — не более 0.05 мм; отклонение от параллельности — не более 0.1 мм; отклонение от перпендикулярности образующей по высоте — не более 0.3 мм.

Испытания образцов горных пород на предел прочности при одноосном сжатии осуществлялись при естественной влажности и в водонасыщенном состоянии с помощью современной сервогидравлической испытательной системы Wille Geotechnik, оборудованной деформационными датчиками для фиксации продольных и поперечных деформаций. Сущность метода заключается в измерении максимальной разрушающей силы, приложенной к торцам образца через стальные плоские плиты, оснащенные сферическим шарниром.

Испытания образцов горных пород на предел прочности при одноосном растяжении выполнялись с помощью прибора сосредоточенного нагружения ПСН-0.13.10. Образцы помещались между инденторами так, чтобы обеспечивалось равномерное нагружение образца со скоростью 0.1 – 0.5 кН/с в требуемом направлении до момента разрушения. При нагружении определялись максимальная разрушающая сила и площадь фактической поверхности разрыва образца, а также удельный вес образцов.

Обработка результатов испытаний проводилась в программных комплексах АСИС 4.2 и PG-TEST.0.13.10. Результаты измерений, расчетов прочностных характеристик пород представлены в табл. 1. Видно, что породы, слагающие прибортовой массив Житикаринского карьера, относятся к породам средней и слабой прочности. Серпентинизированные породы отличаются низкими показателями предела прочности при растяжении 1.5–4.8 МПа. Наиболее прочными породами при одноосном сжатии являются перидотиты, серпентинизированные перидотиты, родингиты и серпентиниты аппоперидотитовые хризотил лизардитовые. Их предел прочности на сжатие достигает 157–166 МПа. Особенно низкие показатели отмечены у серпентинитов с заполнителем трещин в виде асбеста, талька и серпофита. Стоит отметить влияние воды на прочностные характеристики исследуемых пород, а именно снижение предела прочности пород при одноосном сжатии в среднем на 17–18 %.

Результаты натурных измерений предела прочности горных пород на сжатие, выполненных с помощью склерометра, и данные лабораторных испытаний на прессах имеют расхождение, обусловленное наличием неоднородностей структуры и текстуры исследуемых пород. Результаты, полученные в лабораторных условиях, являются наиболее точными и достоверными, но преимущество склерометра — оперативность измерений в полевых условиях. На основании сравнительного анализа и статистической обработки данных установлены градуировочные зависимости и выделен коэффициент перехода для прочности на сжатие  $K_{\text{н}}$  от результатов показаний склерометра к лабораторным значениям (табл. 1).

Сравнительный анализ полученных результатов лабораторных испытаний 2018 г. и ранее выполненных исследований (1967 г.) прочностных характеристик некоторых типов горных пород Джетыгаринского месторождения показывает определенное соответствие (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. Результаты определения физико-механических свойств горных пород Джетыгаринского месторождения

Порода	$R_{сж}$ , МПа	$K_{п}$	$E$ , МПа	$\nu$	$R_c$ , МПа	$R_b$ , МПа	$R_p$ , МПа
Перидотит	$\frac{60.50 - 79.00}{67.9}$	1.65	$\frac{7257 - 49050}{34815}$	$\frac{0.09 - 0.31}{0.19}$	$\frac{68.20 - 157.40}{112.00}$	$\frac{58.10 - 117.80}{95.46}$	$\frac{5.29 - 6.93}{6.25}$
Дунит-перидотитовый полосчатый комплекс	$\frac{55.50 - 68.50}{61.55}$	1.03	$\frac{5230 - 12041}{10774}$	$\frac{0.06 - 0.25}{0.18}$	$\frac{45.90 - 76.20}{63.58}$	$\frac{32.40 - 52.20}{45.14}$	$\frac{2.17 - 4.33}{3.1}$
Родингит	$\frac{59.00 - 69.00}{61.53}$	2.01	$\frac{22602 - 54746}{39641}$	$\frac{0.06 - 0.39}{0.25}$	$\frac{74.70 - 150.20}{123.70}$	$\frac{55.10 - 181.40}{118.27}$	$\frac{7.06 - 12.45}{11.00}$
Серпентинит апподунитовый хризотил лизардитовый	$\frac{55.50 - 68.00}{62.00}$	0.43	$\frac{7012 - 14146}{11933}$	$\frac{0.10 - 0.20}{0.15}$	$\frac{20.20 - 30.70}{26.50}$	$\frac{7.60 - 40.40}{21.89}$	$\frac{1.01 - 1.84}{1.50}$
Серпентинизированный перидотит	$\frac{62.00 - 70.00}{65.65}$	1.75	$\frac{17876 - 41889}{34547}$	$\frac{0.06 - 0.27}{0.20}$	$\frac{46.30 - 128.90}{114.85}$	$\frac{37.90 - 114.30}{102.43}$	$\frac{4.36 - 6.18}{5.4}$
Серпентинит апподунитовый лизардитовый асбестоночность	$\frac{39.00 - 62.50}{50.45}$	0.38	$\frac{4736 - 6855}{6390}$	$\frac{0.06 - 0.20}{0.13}$	$\frac{5.90 - 24.00}{19.08}$	$\frac{11.40 - 16.10}{13.69}$	$\frac{0.98 - 2.42}{1.80}$
Серпентинит апоперидотит лизардитовый	$\frac{64.00 - 72.00}{67.75}$	0.72	$\frac{10353 - 22917}{16986}$	$\frac{0.07 - 0.38}{0.20}$	$\frac{25.70 - 74.50}{48.66}$	$\frac{22.80 - 71.10}{38.93}$	$\frac{3.14 - 4.47}{3.70}$
Серпентинит апоперидотит хризотил лизардитовый	$\frac{65.50 - 81.50}{76.70}$	1.57	$\frac{28636 - 83740}{43377}$	$\frac{0.06 - 0.38}{0.16}$	$\frac{68.20 - 166.20}{120.41}$	$\frac{50.10 - 110.20}{79.80}$	$\frac{5.89 - 9.74}{7.3}$
Серпентинит лизардитовый оталькованный	$\frac{59.00 - 75.50}{65.10}$	0.50	$\frac{6338 - 14300}{11741}$	$\frac{0.04 - 0.38}{0.22}$	$\frac{24.40 - 39.10}{32.41}$	$\frac{13.90 - 35.30}{20.35}$	$\frac{1.60 - 2.66}{2.20}$
Серпентинит лизардитовый асбестоночность	$\frac{50.00 - 62.50}{57.35}$	0.40	$\frac{3501 - 10426}{8891}$	$\frac{0.14 - 0.27}{0.22}$	$\frac{14.70 - 29.90}{23.18}$	$\frac{15.60 - 64.40}{21.63}$	$\frac{1.60 - 2.29}{2.20}$
Серпентинит лизардитовый	$\frac{63.00 - 73.50}{66.25}$	0.76	$\frac{6017 - 18234}{12419}$	$\frac{0.07 - 0.15}{0.10}$	$\frac{35.80 - 62.30}{50.37}$	$\frac{25.70 - 63.10}{48.53}$	$\frac{1.71 - 4.61}{3.40}$
Серпентинит апоперидотитовый	$\frac{59.00 - 71.50}{66.45}$	0.58	$\frac{9104 - 21948}{15062}$	$\frac{0.12 - 0.31}{0.18}$	$\frac{27.80 - 53.00}{38.58}$	$\frac{21.50 - 40.40}{32.64}$	$\frac{4.15 - 6.07}{4.8}$
Сланец	$\frac{27.50 - 45.50}{37.75}$	3.66			$\frac{64.80 - 160.50}{138.20}$	$\frac{118.80 - 136.40}{127.23}$	$\frac{2.59 - 6.42}{5.5}$

Примечание.  $R_{сж}$  — предел прочности на одноосное сжатие (измерение склерометром);  $E$  — модуль деформации (естественная влажность);  $\nu$  — коэффициент поперечной деформации (естественная влажность);  $R_c$  — предел прочности на одноосное сжатие (естественная влажность);  $R_b$  — предел прочности на одноосное сжатие (водонасыщенные);  $R_p$  — предел прочности на растяжение

По прочностным характеристикам отличаются лишь перидотиты и серпентинизированные перидотиты. Значения предела прочности и сцепления, полученные в настоящей работе, превышают значения, полученные в 1967 г.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение результатов лабораторных исследований 2018 и 1967 гг.

Порода	$R_{сж}$ (естественная влажность), МПа		Сцепление, МПа		Угол внутреннего трения, град		Удельный вес сухого образца, кН/м <sup>3</sup>	
	2018 г.	1967 г.	2018 г.	1967 г.	2018 г.	1967 г.	2018 г.	1967 г.
Серпентиниты	34.11	39.20	7.30	7.40	31	36	25.5	25.6
Перидотиты	112.00	31.55	20.90	6.70	35	32	28.3	24.9
Серпентинизированные перидотиты	114.85	70.60	20.10	6.75	36	37	27.6	22.9

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЙТИНГА ПОРОД ПРИБОРТОВОГО МАССИВА КАРЬЕРА

Для оценки геомеханического состояния массивов горных пород в мировой практике широкое распространение получили рейтинговые классификации, основанные на эмпирических данных. В настоящее время разработано значительное количество рейтинговых систем оценки, каждая из которых имеет специфические особенности и определенную область применения [5]. В отечественной практике также имеется некоторый опыт использования различных рейтинговых систем для обоснования параметров ведения горных работ, в основном при подземной разработке [6–9]; встречаются отдельные примеры их применения и для открытых горных работ [10, 11].

Система рейтинговой оценки MRMR предложена Д. Х. Лобширом в качестве дополнения к системе RMR Беньявского, разработанной для геомеханических изысканий в проектах гражданского строительства [12]. Со времени разработки в 1977 г. данная система претерпела ряд изменений. Порядок определения рейтинга MRMR соответствует последней версии системы [2].

Данная система классификации учитывает четыре базовых параметра:

- прочность ненарушенной породы IRS (Intact Rock Strength) — определяется как прочность при одноосном сжатии образца породы непосредственно по результатам лабораторных испытаний;
- прочность породного блока RBS (Rock Block Strength) — представляет собой прочность исходного блока, ограниченного трещинами, откорректированную с учетом масштабного фактора, а также наличия жил и трещин внутри блока;
- блочность породного массива  $J_s$  (Joint Spacing) — контролируется количеством систем трещин и расстояниями между ними;
- состояние трещин  $J_c$  (Joint Condition) — определяется в категориях геомеханического описания трещин [13].

Сумма частных рейтингов — прочности породного блока, расстояния между трещинами и состояния трещин — позволяет вычислить рейтинг массива RMR:

$$RMR = R_{RBS} + J_s + J_c. \quad (1)$$

Значение рейтинга MRMR находится путем корректировки величины RMR соответствующими коэффициентами, учитывающими влияние выветривания, ориентации трещин, взрывных работ и водопритоков:

$$MRMR = RMR A_{выв} A_{ор.т} A_{взр} A_{вод}, \quad (2)$$

где  $A_{выв}$  — коэффициент, учитывающий влияние выветривания пород;  $A_{ор.т}$  — коэффициент, учитывающий влияние ориентации трещин;  $A_{взр}$  — коэффициент, учитывающий влияние взрывных работ;  $A_{вод}$  — коэффициент, учитывающий влияние водопритоков.

Значения частных рейтингов, а также поправочных коэффициентов рассчитываются по специальным таблицам и диаграммам, представленным в [2, 13]. Значения рейтинга MRMR варьируют в диапазоне от 0 до 100. Классификация пород по устойчивости, согласно методике Д. Лобшира, включает пять классов по 20 единиц рейтинга: 0–20 (очень низкая); 21–40 (низкая); 41–60 (средняя); 61–80 (высокая); 81–100 (очень высокая).

Определение значений рейтинга MRMR для массива Джетыгаринского карьера сопровождалось выполнением ряда натурных и лабораторных исследований. По результатам лабораторных испытаний установлена прочность ненарушенной породы IRS как прочность образца при одноосном сжатии. Для дальнейших расчетов по каждой породе использовались усредненные значения, вычисленные по данным многократных испытаний.

Трещиноватость, оказывающая большое влияние на устойчивость массива горных пород, в оценке MRMR учитывается в нескольких параметрах – при определении прочности породного блока RBS, рейтингов блочности массива  $J_s$  и состояния трещин  $J_c$ , а также поправки за ориентацию трещин  $A_{ор.т}$ .

Породы прибортового массива Джетыгаринского карьера на разных участках соответствуют I–IV категориям трещиноватости. В исследуемой зоне карьера выбрано четыре площадки с характерными обнажениями массива разных категорий трещиноватости. Локальные участки изучались методом наземной фотограмметрической съемки, а также аэрофотосъемкой высокого разрешения с малой высоты квадрокоптером DJI Phantom 4. В результате для площадки каждой категории получены средние значения количества трещин на 1 м:

- чрезвычайно трещиноватые (I категория) — 10 трещин;
- сильнотрещиноватые (II категория) — 5 трещин;
- среднетрещиноватые (III категория) — 2 трещины;
- малотрещиноватые (IV категория) — 1 трещина.

Кроме того, с помощью аэрофотосъемки с большой высоты обследована полная поверхность карьера и установлены категории трещиноватости пород для всей исследуемой области путем сопоставления с данными съемки локальных участков.

По результатам исследований составлена карта распределения трещиноватости поверхности прибортового массива карьера: I категория трещиноватости приурочена к выходам тектонических нарушений и зон дробления на поверхность борта, по мере удаления от них трещиноватость уменьшается; II категория трещиноватости наблюдается в основном у серпентинитов верхних горизонтов, более подверженных выветриванию. С глубиной степень трещиноватости уменьшается. Наименьшей трещиноватостью обладают перидотиты и серпентинизированные перидотиты III и IV категории.

Рейтинг состояния трещин  $J_c$  определяется в зависимости от их формы, состояния стенок, прочности заполнителя и пр. Заполнитель трещин устанавливался по данным геологической службы. У различных видов пород он представлен тальком, серпофитом, немалитом, магнетитом и асбестом. Геомеханическое описание трещин выполнено по данным натурных обследований, а также по результатам наземной фотосъемки, проведенной на локальных участках. Даны следующие характеристики трещин согласно классификации [2]:

- крупномасштабные трещины — прямые / слегка волнистые;
- мелкомасштабные трещины – ступенчатые с плоскостями скольжения;
- изменения пород стенок трещин и раздувов — не установлено;
- твердость заполнителя трещин по шкале Мооса — от 1 до 5.

На основании полученных частных рейтингов по (1) вычислены значения RMR, которые затем были скорректированы понижающими коэффициентами (2) для рейтинга MRMR.

Определение поправки на выветривание  $A_{\text{выв}}$  проводилось по геологическим материалам, а также по результатам анализа развития горных работ, так как данный коэффициент зависит не только от степени выветренности пород, но и от времени подверженности выветриванию. По результатам анализа массив горных пород условно разделен на глубине 150 м на верхнюю зону выветрелых трещиноватых пород и нижнюю зону монолитных коренных пород, не затронутых выветриванием. На нижних горизонтах карьера контур борта меняется более интенсивно, а следовательно, уменьшается время обнажения поверхности. С учетом этого установлены различные поправки  $A_{\text{выв}}$ : для пород верхнего комплекса снижение рейтинга RMR составило 10%, для нижнего комплекса понижающий коэффициент не вводился.

Поправка  $A_{\text{ор.г}}$ , зависящая от количества систем трещин и их ориентации, вычислена по результатам аэро- и наземной фотосъемки поверхности карьера. Снижение рейтинга для всего массива карьера за счет данной поправки составило 10%.

Месторождение приурочено к скальному комплексу пород, требующих применение буровзрывных работ. Фактические горно-геологические условия разрабатываемых участков массива не всегда соответствуют принятому паспорту буровзрывных работ, в результате чего их воздействие можно охарактеризовать как чрезмерное. В связи с этим выбрана максимальная понижающая поправка буровзрывных работ, составившая 20%.

Поправки на влияние подземных вод  $A_{\text{вод}}$  вводились в зависимости от интенсивности водопритоков, имеющих различное значение на большей части исследуемой поверхности и на обводненных участках бортов. Снижение рейтинга RMR за счет учета влияния подземных вод составило от 5 до 10%.

#### **ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ПРИБОРТОВОГО МАССИВА ПО КЛАССИФИКАЦИИ ЛОБШИРА**

Классификация горных пород прибортового массива проводилась для рабочей зоны карьера. В соответствии с геологической моделью выделено семь основных типов пород, участвующих в строении прибортового массива исследуемой части карьера, представленных в основном различными разновидностями перидотитов и серпентинитов, приуроченных к западному и восточному бортам соответственно. Расчеты значений рейтинга MRMR выполнены для всех возможных в условиях массива Джетыгаринского карьера вариантов геомеханической обстановки — для каждого типа породы, категории трещиноватости, степени обводненности и горизонта залегания. Полученные значения рейтинга MRMR находились в пределах от 17 до 40.

Районирование поверхности массива осуществлялось по блокам  $50 \times 25$  м. Общее количество блоков составило 1505. При наличии на одном блоке участков с различными показателями MRMR (например, пород различных типов или категорий трещиноватости и т. п.), их значения усреднялись в зависимости от площади, занимаемой каждым из участков. Схема районирования прибортового массива Джетыгаринского карьера по классификации Лобшира представлена на рис. 1.

Полученные значения рейтинга MRMR составили 20–40, что в большинстве случаев соответствует 4-му классу — породы низкой степени устойчивости. При этом MRMR = 20, соответствующее 5 классу (очень низкой степени устойчивости), зафиксировано всего на двух блоках. Диаграмма распределения значений рейтинга MRMR приведена на рис. 2.

Наиболее распространенные значения рейтинга, зафиксированные на серпентинитах восточного борта, составили 24 и 27 для верхних и нижних горизонтов соответственно, на перидотитах западного борта — 33 и 40.

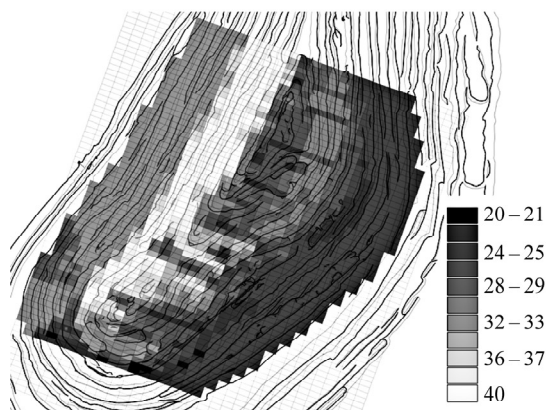


Рис. 1. Районирование поверхности карьера в зависимости от значений рейтинга MRMR

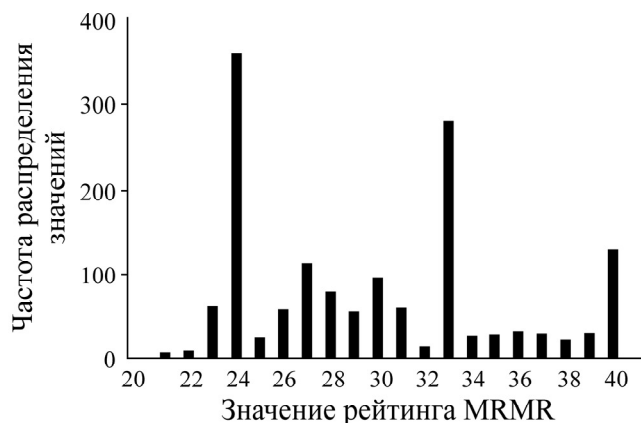


Рис. 2. Диаграмма распределения значений рейтинга MRMR

Можно сделать вывод, что восточный борт характеризуется более низкими значениями рейтинга MRMR по сравнению с западным. В первую очередь это обусловлено пониженными значениями прочностных характеристик некоторых видов серпентинитов, а также наличием на восточном борту участков повышенной трещиноватости, приуроченной к выходам тектонических нарушений. Участки выхода воды также фиксируются в основном на серпентинитах восточного борта. Наиболее низкие значения рейтинга отмечены преимущественно в южной части карьера на обводненных участках серпентинитов верхних горизонтов в зонах выхода тектонических нарушений (рис. 1). Участки с пониженными значениями рейтинга MRMR (20–22) составляют менее 1 % от исследуемой площади поверхности карьера.

Для массивных перидотитов нижних горизонтов западного борта, обладающих повышенной прочностью и низкой трещиноватостью, в условиях невысокой обводненности значения рейтинга достигают 40 и находятся на границе с 3-м классом по Лобширу, соответствующим средней степени устойчивости пород.

Профессор Д. Лобшир разработал рекомендации по выбору приблизительных значений углов откосов бортов карьеров на основе рассчитанного рейтинга MRMR в зависимости от класса устойчивости пород [14]. А. Хайнс и П. Тербрюгге [15] дополнили его рекомендации на основе опыта исследований различных карьеров в Африке и Южной Америке. Ниже приведены приблизительные значения углов откосов уступов в соответствии со значениями рейтинга горных пород по Лобширу:

Рейтинг MRMR	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Угол откоса, град	> 75	75	70	65	60	55	50	45	40	35	< 35

Для массива Джетыгаринского карьера при значениях рейтинга MRMR от 20 до 40 соответствующие углы откосов уступов составляют от 40 до 50°. Учитывая наиболее распространенные значения рейтинга, характерные для восточного и западного бортов, рекомендованы углы откосов уступов, представленные в табл. 3.

Полученные результаты согласуются с фактическим состоянием устойчивости уступов карьера. Несмотря на принятый проектом отработка угол погашения уступов 60°, в настоящее время на восточном борту по соображениям безопасности уступы отстраиваются под меньшими углами (до 45° на некоторых участках), чтобы обеспечить их устойчивость. Добиться повышения значений рейтинга MRMR, а следовательно, более высоких углов заоткоски уступов можно за счет повышения качества ведения взрывных работ, а также степени осушения массива.



ТАБЛИЦА 3. Рекомендуемые значения углов откосов уступов Джетыгаринского карьера

Борт	Горизонт, м	Текущее значение		Гладкое взрывание + осушение	
		Рейтинг MRMR	Угол откоса уступа, град	Рейтинг MRMR	Угол откоса уступа, град
Восточный	230–140	24	42	37	48
	140–0	27	43	41	50
Западный	230–140	33	46	42	51
	140–0	40	50	52	56

В условиях Джетыгаринского карьера возможно применение альтернативных способов ведения буровзрывных работ. Значительно меньшее негативное воздействие на массив оказывает метод так называемого гладкого или контурного взрывания, при котором проводится предварительное образование плоскости отрыва по контуру выработки в массиве перед началом обрушивания и взрывания зарядов рыхления [16]. При этом повышение значения рейтинга произойдет за счет не только увеличения коэффициента  $A_{взр}$ , но и снижения степени трещиноватости, вызванной взрывным воздействием.

Значения рейтинга MRMR при максимальной степени осушения массива и использовании метода гладкого взрывания повышаются на 9–14 ед., составляя 37–52, что в большинстве случаев соответствует 3-му классу по классификации Лобшира — породы средней степени устойчивости. По сравнению с текущими значениями углы заоткоски уступов могут быть увеличены на 5–7°, достигая 48–56°. Эти данные основаны на результатах эмпирических исследований и носят рекомендательный характер.

### ВЫВОДЫ

Выполненные полевые и лабораторные исследования физико-механических свойств основных типов пород Джетыгаринского месторождения, слагающих прибортовой массив, позволили получить данные об их фактических прочностных характеристиках и дать практические рекомендации по методике экспресс-оценки с помощью склерометра.

Натурные исследования трещиноватости прибортового массива, осуществленные методами наземной и аэрофотосъемки, а также результаты лабораторных испытаний образцов горных пород определили значения рейтинга MRMR для всех возможных в условиях Джетыгаринского карьера вариантов геомеханической обстановки, которые соответствуют породам низкой степени устойчивости. Проведено районирование поверхности рабочей зоны карьера по классификации Д. Лобшира.

На основании полученных значений рейтинга MRMR рекомендованы углы устойчивых откосов уступов. Результаты сопоставления фактических углов наклона со значениями углов, определенными по рейтинговой системе оценки, показали хорошее соответствие, что доказывает возможность использования не только традиционных методов, основанных на учете баланса сдвигающих и удерживающих сил, но и рейтинга MRMR для более достоверной оценки устойчивости прибортового массива на проблемных участках.

Предложенный подход не только впервые применяется на данном месторождении, но и является достаточно новым для отечественной практики, особенно в области ведения открытых горных работ. Результаты исследований имеют важное значение для внедрения рейтинговых систем в практику оценки устойчивости прибортовых массивов карьеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин Е. В., Узбекова А. Р. Рейтинговые классификации массивов скальных пород: предпосылки создания, развитие и область применения // ГИАБ. — 2004. — № 4. — С. 201–203.
2. Laubscher D. H. and Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses, In Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullock), Society of Mining Metallurgy and Exploration, SME, 2001. — P. 475–481.
3. Прокопов А. Ю., Гергарт Ю. А. Апробация и оценка точности неразрушающего экспресс-метода определения прочностных свойств породного массива в условиях реконструкции Рокского тоннеля // Горн. журн. — 2015. — № 4. — С. 101–107.
4. Карташов С. А., Прокопов А. Ю. Применение экспресс-метода контроля прочности скальных пород при проходке тоннелей // Механизмы управления процессами внедрения технических новшеств: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 15 октября 2017 г. — Уфа, 2017. — С. 55–57.
5. Аксой С. О. Системы классификации массивов горных пород: историческое развитие, области применения, ограничения // ФТПРПИ. — 2008. — № 1. — С. 56–68.
6. Козырев А. А., Губинский Н. О. Определение рейтинга вмещающих пород и руд алмазного месторождения в соответствии с классификацией Д. Лобшира // ГИАБ. — 2011. — № 8. — С. 89–99.
7. Макаров А. Б. Обоснование допустимых параметров очистных камер и целиков // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — № 2. — С. 261–267.
8. Макаров А. Б., Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Ливинский И. С., Потапчук М. И. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки при переходе на подземный способ добычи руд // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 27–38.
9. Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г., Бабкин Е. А. Оценка состояния массива горных пород на рудниках ЗФ ОАО “ГМК “Норильский никель” // ГИАБ. — 2017. — № 1. — С. 5–17.
10. Рыбин В. В., Калюжный А. С., Потапов Д. А. Геомеханическое обоснование параметров борта карьера на месторождении “Олений ручей” и мониторинг его устойчивости // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 24–27 сентября 2013 г. — Апатиты, 2013. — С. 180–187.
11. Рыбин В. В., Губинский Н. О. Определение рейтинга массива горных пород по классификации Д. Лобшира для условий карьеров ОАО “Апатит” // ГИАБ. — 2012. — № 3. — С. 140–143.
12. Laubscher D. H. Geomechanics classification of jointed rock masses – mining applications, Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry, 1977, Vol. 86, A1-A8.
13. Read J. R. L. and Stacey P. F. Guidelines for open pit slope design, CSIRO, Collingwood, Australia, 2010. — 496 p.
14. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design, J. South African Inst. of Min. and Metallurgy, 1990, Vol. 90, No. 10. — P. 257–273.
15. Haines A. and Terbrugge P. J. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems, Proc. 7<sup>th</sup> Congr. Rock Mechanics, ISRM, Aachen, Germany, 1991, Vol. 2. — P. 887–892.
16. Флягин А. С., Жариков С. Н. Контурное взрывание при разработке месторождений полезных ископаемых // Проблемы недропользования. — 2016. — № 3 (10). — С. 70–73.

*Поступила в редакцию 23/V 2019  
После доработки 27/V 2019  
Принята к публикации 03/VII 2019*