



## СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-192>

УДК 622.02

**Оценка рейтинговых показателей состояния горного массива глубоких горизонтов подземного рудника Удачный**Е. В. Серебряков<sup>1</sup>  , И. А. Зайцев<sup>2</sup>, А. А. Потака<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация<sup>2</sup> Удачинский горно-обогатительный комбинат, ПАО «АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация [serebryakov.e.v@mail.ru](mailto:serebryakov.e.v@mail.ru)**Аннотация**

Геомеханические рейтинговые классификации массивов являются важным инструментом при проектировании подземных технологий отработки месторождений. Особенно актуальны они на ранних стадиях разработки проекта, когда первичная горно-геологическая информация доступна в ограниченном объеме. В представляемой работе показан подход к сбору исходной информации и расчету рейтинга RMR и индекса Q для массива горных пород глубоких горизонтов подземного рудника Удачный, обрабатывающего одноименную кимберлитовую трубку. Поскольку классификации являются многокомпонентными системами, они предъявляют высокие требования по объему и качеству первичной информации, выполнение которых возможно путем применения комплексной системы сбора данных. Основной их объем получен посредством акустического телевьюверного каротажа, совмещенного с геолого-структурной документацией неориентированного керна. Также использованы данные о физико-механических свойствах пород, напряженно-деформированном состоянии и гидрогеологических условиях. Расчет рейтингов произведен поинтервально вдоль стволов скважин, в которых производился акустический каротаж. В качестве одного из критериев для выделения геомеханических интервалов предложен параметр амплитуды акустической волны, зависящий от физических свойств породного массива и степени его структурной нарушенности. Установлен средний уровень связи между Q и RMR, что обусловлено разной «чувствительностью» и структурой входных параметров. С помощью рассчитанных рейтингов массив рудных тел и вмещающих отложений оценен по степени устойчивости (присвоены классы/категории), а также определены оптимальные способ и параметры крепления выработок. Накопленная в процессе проведения исследований база геомеханических данных обеспечивает возможность расчета альтернативных рейтингов, таких как MRMR, Rmi, GSI и др., без использования переходных уравнений.

**Ключевые слова**

рейтинговая классификация, RMR, Q, кимберлитовая трубка Удачная, телевьювер, трещиноватость, устойчивость массива, крепление

**Для цитирования**Serebryakov E. V., Zaytsev I. A., Potaka A. A. Assessment of rating parameters of the rock mass conditions at Udachny underground mine deep levels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3)206–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-192>

## MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Assessment of rating parameters of the rock mass conditions at Udachny underground mine deep levels**E. V. Serebryakov<sup>1</sup>  , I. A. Zaytsev<sup>2</sup>, A. A. Potaka<sup>2</sup><sup>1</sup> Institute of Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation<sup>2</sup> Udachny Mining and Processing Complex, PJSC AK ALROSA, Mirny, Russian Federation [serebryakov.e.v@mail.ru](mailto:serebryakov.e.v@mail.ru)**Abstract**

Geotechnical rating classification systems of rock masses are an important tool in the design of underground mining systems. They are especially relevant at the early stages of project development, when primary mining and geological information is available to a limited extent. The presented work shows an approach to the collection of initial information and calculation of RMR (Rock Mass Rating) and Q Index for the rock mass



of deep levels of the Udachny underground mine exploiting the kimberlite pipe of the same name. Since the classifications are multi-component systems, they impose heavy demands on the scope and quality of primary data, which can be met by applying an integrated data collection system. The bulk of these were obtained by acoustic televiewer tool (ATV) combined with geologic and structural logging of non-oriented core. Data on physical and mechanical properties of rocks, stress-strain state, and hydrogeological conditions were also used. The ratings were calculated interval by interval along holes, in which acoustic logging was performed. The acoustic wave amplitude parameter, which depends on the physical properties of a rock mass and the degree of its structural disturbance, was proposed as one of the criteria for distinguishing geotechnical intervals. The moderate level of correspondence between Q and RMR systems was established to be due to the different “sensitivity” and structure of the input parameters. Using the calculated ratings, the rock masses of ore bodies and host sediments were evaluated for stability (classes/categories have been assigned), and the optimal method and parameters of workings support were determined. The geotechnical database accumulated during the research process provides the feasibility of calculating alternative ratings such as MRMR, RMI, GSI, etc., without the use of transient equations.

### Keywords

rating classification, RMR, Q, Udachnaya kimberlite pipe, televiewer, jointing, rock mass stability, supports

### For citation

Serebryakov E.V., Zaytsev I.A., Potaka A.A. Assessment of rating parameters of the rock mass conditions at Udachny underground mine deep levels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3)206–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-12-192>

## Введение

Рейтинговые классификации в их нынешнем виде сформированы как результат аккумуляции огромного практического опыта специалистов, накопленного в ходе всестороннего изучения горных массивов в самых разнообразных горно-геологических условиях. Несмотря на повсеместное внедрение методов численного моделирования, разработанные еще в 1970-е годы, рейтинговые классификации не теряют своей актуальности и в настоящее время, используя как средство краткосрочного прогноза поведения массива. В мировой практике горного дела наиболее широко применяются следующие геомеханические классификации: рейтинг массивов горных пород RMR (Rock MASS Rating) [1, 2], индекс качества горного массива при подземной разработке Q [3, 4], горный рейтинг MRMR (mining rock mass rating) [5, 6], индекс геологической прочности GSI (geological strength index) [7, 8]. В своей структуре классификации в той или иной мере учитывают все характеристики массива, которые потенциально могут снизить его прочность по сравнению с исходной прочностью ненарушенной горной породы. Эти характеристики включают: физико-механические свойства пород, степень нарушения массива структурными дефектами (разломы, трещины, элементы слоистости), фрикционные свойства структурных дефектов, а также степень обводненности и напряженно-деформированное состояние массива.

Являясь многокомпонентными, рейтинговые классификации предъявляют высокие требования по объему и качеству первичной информации, выполнение которых возможно путем применения комплексной системы сбора данных. Для ранних стадий проектирования высокий уровень качества и оперативность в их сборе обеспечивает комплекс, включающий телевизорный каротаж, совмещенный с результатами документации неориентированного керна [9, 10]. Подобный комплекс применен при сборе первичной

информации для расчета рейтинговых показателей RMR и Q для глубоких горизонтов подземного рудника Удачный. Основные результаты проведенных исследований отражены в представляемой работе.

## Объект исследования

Кимберлитовая трубка Удачная – одно из наиболее крупных месторождений алмазов, которое в настоящее время обрабатывается подземным способом. Месторождение представлено двумя столбообразными рудными телами – Удачная-Западная (ЗРТ) и Удачная-Восточная (ВРТ), сложенными типичным для трубок Якутской алмазоносной провинции комплексом образований: порфировый кимберлит ранних генераций и автолитовая кимберлитовая брекчия заключительных стадий магматизма [11]. В качестве ксенолитов выступают породы осадочного комплекса, вмещающего трубку, а также галогенные отложения. Ксенолиты осадочных пород распространены преимущественно в пределах ЗРТ, где формируют так называемые плавающие рифы [12]. Мощные залежи солей в пределах кимберлитовой трубки являются уникальной особенностью строения западного рудного тела. Возможным процессом, ответственным за присутствие солей в трубке, является изменение кимберлитов месторождения внешними солеными грунтовыми водами [13]. Вмещают трубку карбонатные и карбонатно-глинистые породы (известняки, доломиты, мергели) раннего-позднего кембрия.

Открытая разработка месторождения осуществлялась до 2014 г., глубина карьера составила 640 м, отметка подошвы –320 абс. м. Вскрытие и отработка запасов первой очереди ниже дна карьера до отметки –580 абс. м производится в настоящее время подземным способом системой этажного/подэтажного принудительного обрушения. Подготовка запасов второй очереди в границе между горизонтами –580 и –1080 м осуществляется путем бурения глубоких скважин из подземных горных выработок.

### Методика сбора и анализа данных

Порядок определения рейтинговых показателей массива достаточно прост и сводится к присвоению определенного балла (из существующих табличных форм) для того или иного типа исходных данных и проведению требуемых математических операций с этими значениями для получения искомым величин итогового рейтинга. Система классификации RMR разработана в 1973 г. З. Бенявски [1] и за годы существования претерпела несколько модификаций, последняя из которых введена в 2014 г. [14]. Рейтинг RMR рассчитывается по следующей формуле:

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B, \quad (1)$$

где  $J_{A1}$  – рейтинг прочности породного массива;  $J_{A2}$  – рейтинг качества породного массива;  $J_{A3}$  – рейтинг расстояния между трещинами в массиве;  $J_{A4}$  – рейтинг характеристик трещин;  $J_{A5}$  – рейтинг обводненности массива;  $J_B$  – рейтинг ориентировки трещин к оси выработки.

Рейтинг, характеризующий трещиноватость массива  $J_{A4}$ , определяется следующим выражением:

$$J_{A4} = J_{A4/1} + J_{A4/2} + J_{A4/3} + J_{A4/4} + J_{A4/5}, \quad (2)$$

где  $J_{A4/1}$  – рейтинг шероховатости трещин;  $J_{A4/2}$  – рейтинг длины трещин;  $J_{A4/3}$  – рейтинг раскрытия трещин;  $J_{A4/4}$  – рейтинг минерального заполнителя трещин;  $J_{A4/5}$  – рейтинг выветрелости стенок трещин.

Индекс качества горного массива при подземной разработке  $Q$  был предложен Н. Бартоном, Р. Лиеном и Дж. Люндом в 1974 г. [3]. Значение показателя  $Q$  варьирует от 0,001 до 1000 по логарифмической шкале и определяется по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \quad (3)$$

где  $RQD$  – качество породного массива;  $J_n$  – количество систем трещин;  $J_r$  – шероховатость трещин;  $J_a$  – степень измененности стенок трещин и минеральный заполнитель (сцепление трещин);  $J_w$  – обводненность массива;  $SRF$  – фактор снижения напряжения.

Простота расчетной части в определении рейтинговых показателей подразумевает высокие требования к качеству и полноте исходных данных. В настоящей работе сбор первичной геолого-структурной информации осуществлялся посредством бурения 73 вертикальных и слабонаклонных скважин в пределах рудных тел с выходом во вмещающие отложения (рис. 1). Скважины пробурены с горизонта –465 абс. м. Бурение произведено с полным отбором неориентированного керна.

Прочностные свойства массива кимберлитов и вмещающих отложений определялись исходя из результатов лабораторных исследований образцов из керна скважин. Образцы отбирались из кимберлита, вмещающих отложений (доломит, известняк) и ксенолитов вмещающих отложений. Испытания проводились в лаборатории геомеханики института Якутнипроалмаз по методикам, изложенным в ГОСТ (ГОСТ 21153.2–84 Породы горные).

Структурная нарушенность массива устанавливалась посредством проведения телевьюверного (акустического) каротажа геомеханических скважин. Полевые геофизические работы выполнены специалистами Ботубинской геологоразведочной экспедиции с применением зонда QL-40ABI совместного производства компаний Advanced Logic Technology и Mount Sopris Instruments.

Принцип работы акустического телевьювера заключается в непрерывном ультразвуковом сканировании стенки скважины по всей ее глубине [15, 16]. Акустическая волна, сгенерированная излучателем, проходит путь от прибора до контакта с горной породой, отраженный эхо-сигнал возвращается и, проходя через акустическое окно, улавливается акустическим датчиком (рис. 2).

Прибор в процессе сканирования фиксирует амплитуду акустической волны и время, за которое испущенный сигнал проходит от акустического окна до стенки скважины и обратно, и записывает эти данные в виде журналов вдоль ствола скважины (см. рис. 2).

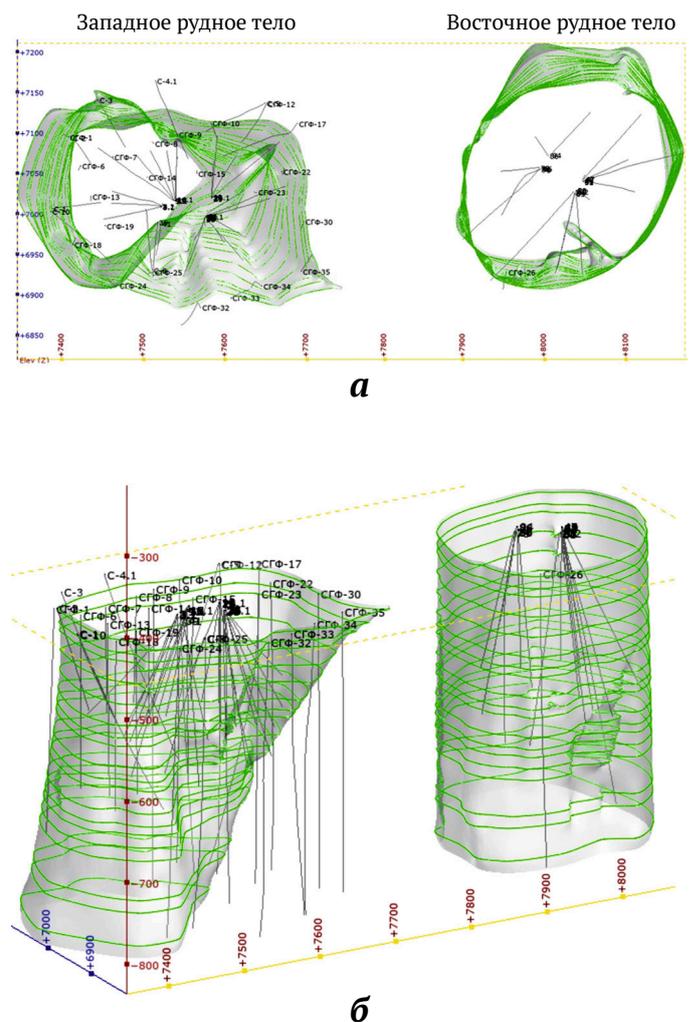


Рис. 1. Положение скважин, по которым выполнен телевьюверный каротаж: а – вид сверху; б – вид с юго-запада. Интервал глубин: –465 ... –850 абс. м

Плоские структуры (трещины, прожилки, слои и т.д.) в результате развертки цилиндра скважины в процессе обработки журналов преобразуются в синусоиды (рис. 2, 3), амплитуда которых указывает на угол падения структуры. Чем больше амплитуда, тем круче угол падения. За счет встроенного модуля высокоточного позиционирования, включающего трехкоординатный феррозондовый магнитометр и акселерометр, получают ориентированное по сторонам света изображение, что позволяет в автоматическом режиме определять истинные элементы залегания трещинных структур.

Интерпретация результатов телевидеоверных исследований осуществлялась авторами статьи в программном комплексе WellCAD<sup>1</sup>. Помимо собственно журналов каротажа в обработку вовлекались также результаты структурной и фотодокументации керна. С использованием последней в модуле Core Image Stopper формировался единый журнал фотографий, спозиционированных вдоль ствола скважины и имеющих привязку по глубине. Это позволяло в дальнейшем сопоставлять результаты каротажа с данными бурения и отбраковывать некорректно зафиксированные трещины. Непосредственное выделение и характеристика трещин осуществлялись в модуле ISI (Image & Structure Interpretation). Определялись четыре основных типа структур и первый из них – открытая трещина. Для нее характерны низкая амплитуда вол-

ны и повышенное время, за которое волна проходит путь от прибора до стенки скважины и обратно, по сравнению с ненарушенным фрагментом [17]. При этом на графике акустического каверномера участку открытой трещины будет соответствовать крупная аномалия (рис. 3, а).

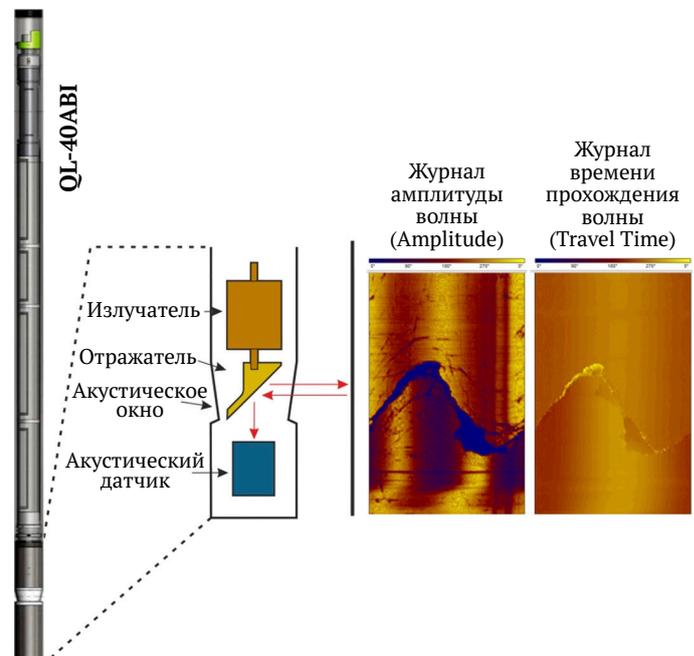


Рис. 2. Принципиальная схема акустического телевидеоера

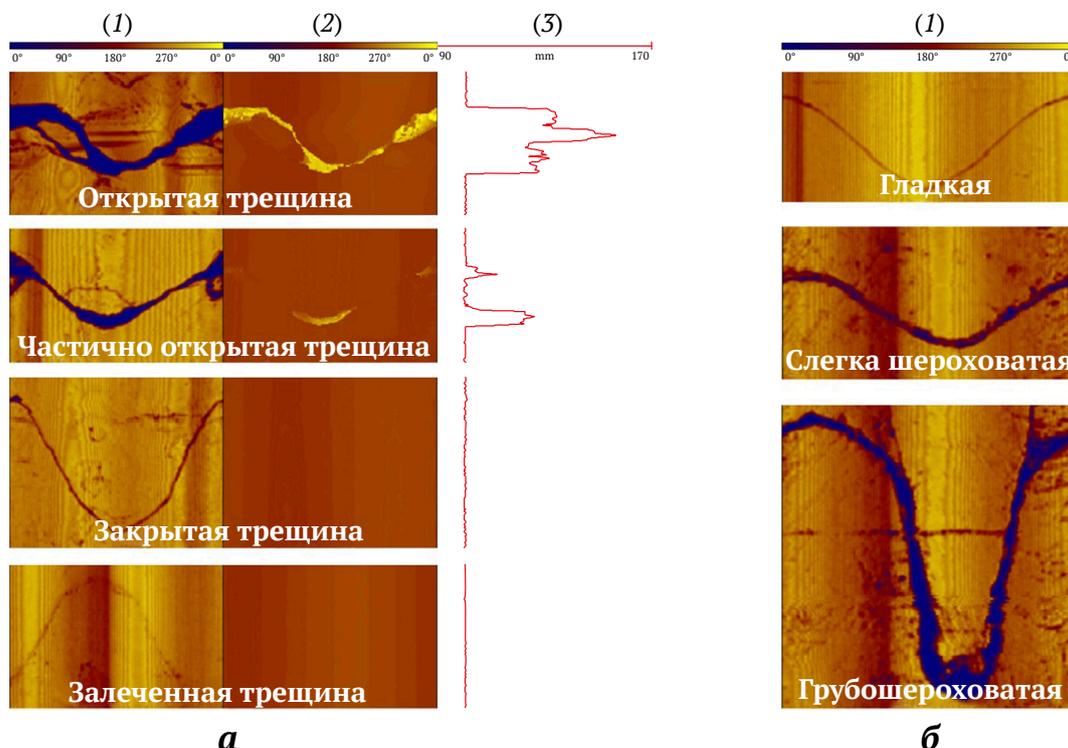


Рис. 3. Классификация трещин по типу (а) и шероховатости стенок (б):

1 – отображение стенки скважины, выраженное в амплитуде акустической волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 2 – отображение стенки скважины, выраженное во времени прохождения волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 3 – журнал акустического каверномера

Второй тип структур – частично открытая трещина. Визуально в поле амплитуды она аналогична полностью открытой, однако во временном поле не имеет единой ярко выраженной аномалии. Для третьего типа структур – закрытых трещин – характерно отсутствие каких-либо аномалий в журнале времени прохождения волны и журнале каверномера. При этом такие трещины отображаются в виде тонких линий пониженных значений амплитуды. Заполнитель трещин также влияет на их визуализацию в каротажных журналах. Так, структуры, заполненные твердыми минералами, за счет разницы импедансов зачастую имеют повышенные значения амплитуды, но в то же самое время не выделяются на временных журналах. Глинистый или гипсовый заполнитель выражается в виде низкоамплитудных аномалий. В случае его частичного вымывания из трещин в процессе бурения время прохождения волны будет увеличено, что будет отражено появлением аномалий в соответствующем журнале.

Фрикционные свойства трещинных структур и в первую очередь шероховатость стенок могут быть определены по амплитудным изображениям [18, 19]. При этом наиболее точно и надежно их можно установить для гладких, слегка шероховатых и грубо шероховатых трещин [17, 20] (рис. 3, б). С целью заверки фрикционных свойств трещин и их более тонкой градации использовалась структурная документация

керн [21]. Помимо шероховатости с ее помощью определены тип и мощность минерального заполнителя, достоверно установить которые посредством каротажа скважин достаточно сложно.

Численная оценка степени нарушенности массива трещинами осуществлялась путем определения параметра RQD и количества трещин на погонный метр исследуемой скважины. Для этого в программе WellCAD имеются соответствующие модули, которые для расчета используют данные о трещинах (глубина, элементы залегания), выделенных в процессе интерпретации каротажных журналов (рис. 4).

## Результаты

Породный массив исследуемого месторождения состоит из трех литологических доменов первого порядка – вмещающих терригенно-карбонатных отложений, а также собственно кимберлитовых тел диаметром. В пределах выделенных крупных единиц оценка рейтинговых показателей по скважинным данным производилась для отдельных геомеханических интервалов, представляющих собой участки массива, имеющие выдержанную литологию, физико-механические свойства и структурное строение. Как правило, при геомеханическом документировании керна литология и структурное строение определяются уверенно, однако с выделением интервалов схожих

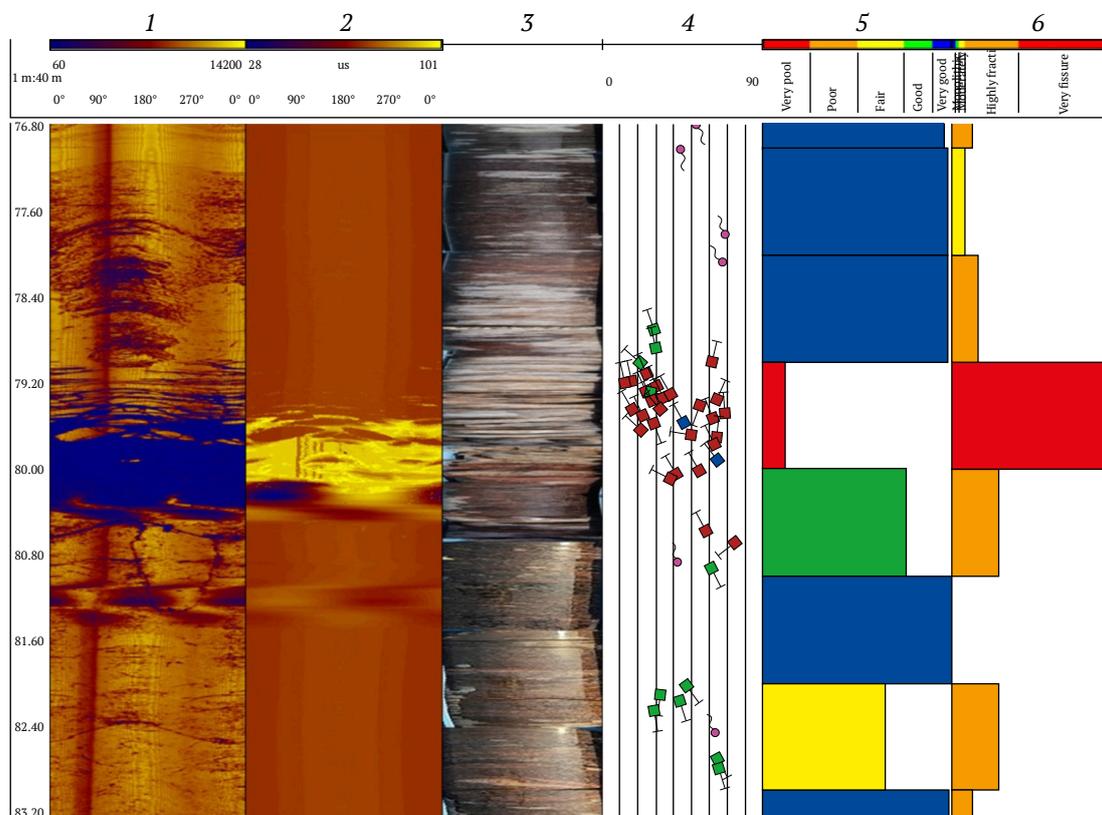


Рис. 4. Расчет количественных показателей структурной нарушенности массива:

- 1 – отображение стенки скважины, выраженное в амплитуде акустической волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие);
- 2 – отображение стенки скважины, выраженное во времени прохождения волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие);
- 3 – фото керна;
- 4 – «головастиковая» диаграмма трещиноватости;
- 5 – частота трещин на погонный метр;
- 6 – RQD. Вертикальный масштаб 1 : 40

физико-механических свойств пород зачастую возникает проблема, поскольку даже в границах одной литологии может наблюдаться широкая вариация прочностных свойств. Для решения проблемы в рамках данного исследования использовано свойство горных пород отражать акустические волны. Степень такого отражения напрямую зависит от физических свойств и состояния поверхности скважины. Гладкая стенка, сформированная в плотных породах, отражает больше энергии и, соответственно, имеет более высокую амплитуду, чем шероховатая. Отражающая способность стенок, сформированных в твердых и/или монолитных породах, выше, чем пройденных в мягких или интенсивно трещиноватых. Породы, имеющие в своем составе большую долю глинистой компоненты, за счет поглощения энергии характеризуются наименьшими амплитудами. То же касается и трещин, и в особенности зияющих трещин либо имеющих мягкий наполнитель. В журналах амплитуды они показаны синими оттенками в соответствии с принятой цветовой гаммой (см. рис. 3). Пример выделения интервалов по амплитуде акустической волны показан на рис. 5.

На рис. 5, а наблюдается достаточно четкая зависимость амплитуды волны (столбцы 1 и 3) от степени нарушенности массива трещинами, выраженной через количество трещин на погонный метр скважины

(столбец 4). Наиболее структурно нарушенные участки, имеющие высокие значения показателя частоты трещин (интервалы 4 и 6), характеризуются низкими значениями амплитуды. На рис. 5, б, напротив, представлен относительно монолитный, практически не нарушенный трещинами фрагмент. В интервале 140–154 м по амплитуде акустической волны (столбцы 1 и 3) отчетливо выделяется участок с существенно более высокими значениями, который соответствует ксенолиту осадочных пород в основной массе кимберлитовой брекчии, зафиксированному по результатам геологической документации керна скважины (столбец 2). На отметках 125 и 150 м из кимберлита и ксенолита отобраны образцы, показавшие значения прочности на одноосное сжатие (UCS) 8,95 и 30,51 МПа соответственно, что указывает на наличие связи между прочностными свойствами пород и амплитудой акустической волны, которая показана в ряде работ [22, 23].

Всего по 73 скважинам выделено 4636 геомеханических интервалов. Длина интервала колеблется от одного метра для участков со сложным строением до шести метров – с относительно простым. Результаты оценки каждого входного параметра отдельно по выделенным литологическим доменам представлены в виде гистограмм на рис. 6 и 7.

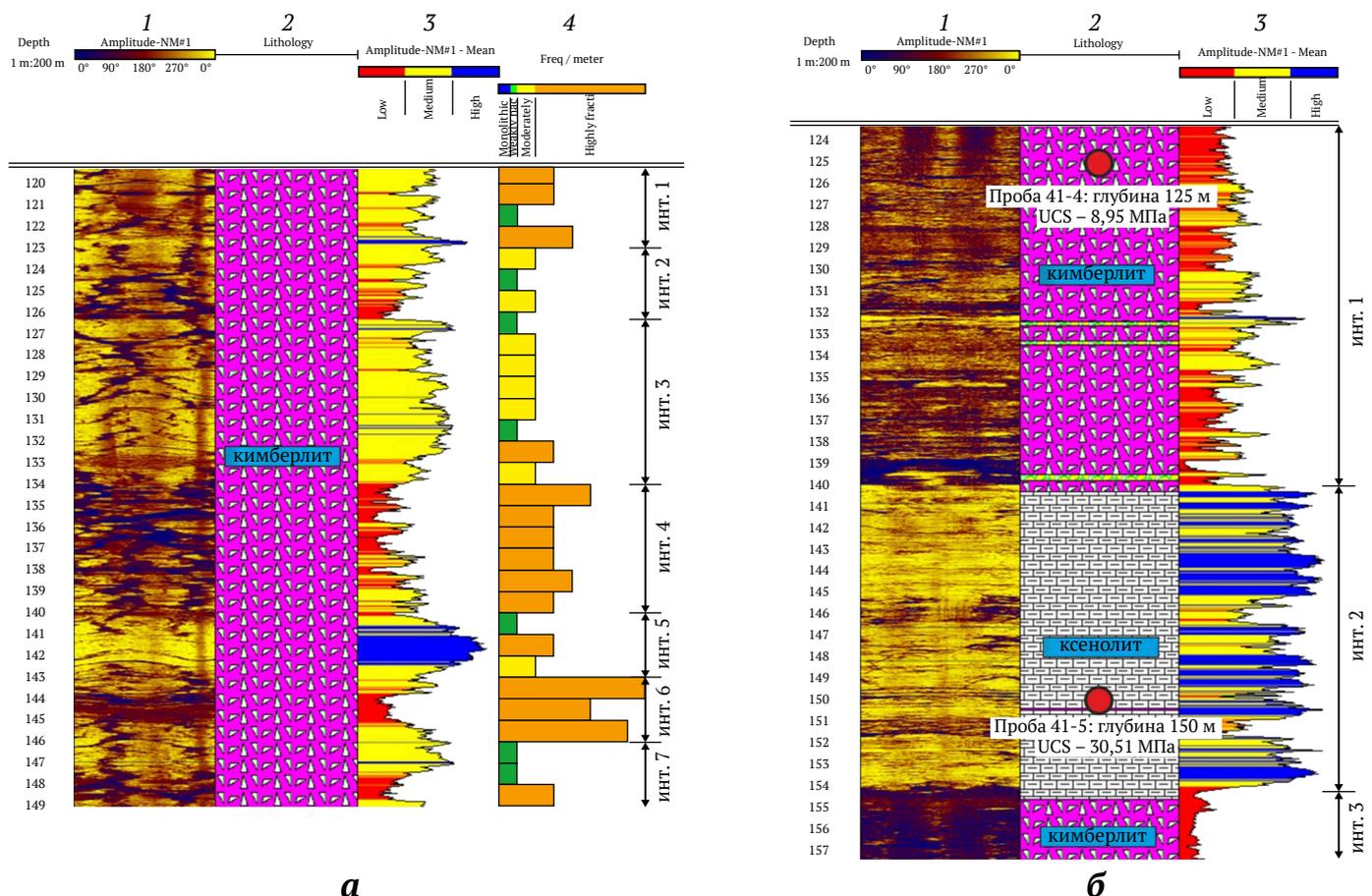
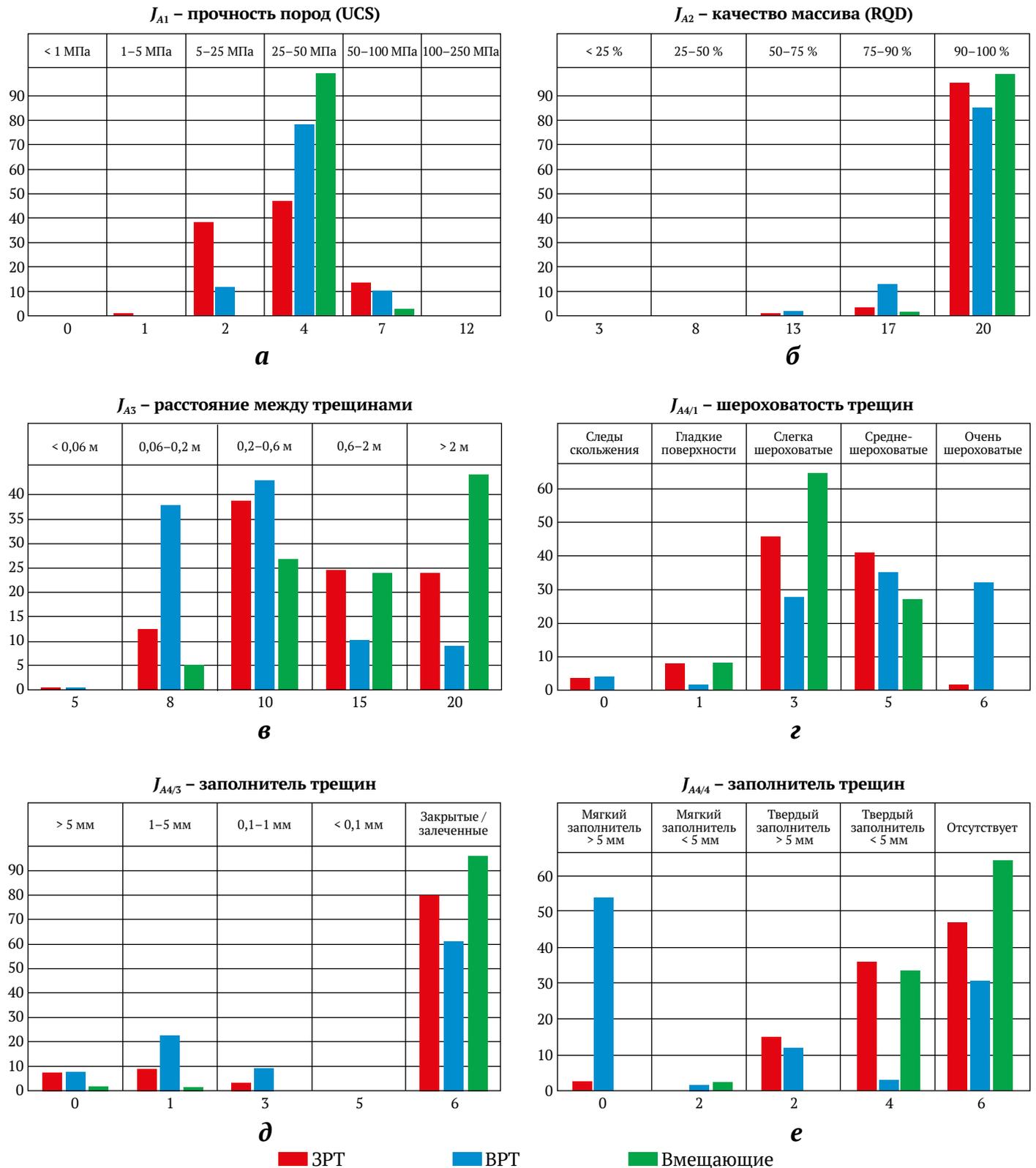


Рис. 5. Пример выделения геомеханических интервалов по амплитуде акустической волны:

1 – отображение стенки скважины, выраженное в амплитуде акустической волны (желтый цвет – высокие значения, синий – низкие); 2 – колонка литологии; 3 – средняя амплитуда акустической волны, рассчитанная на один оборот излучателя; 4 – частота трещин на погонный метр. Вертикальный масштаб 1 : 200



Константы:

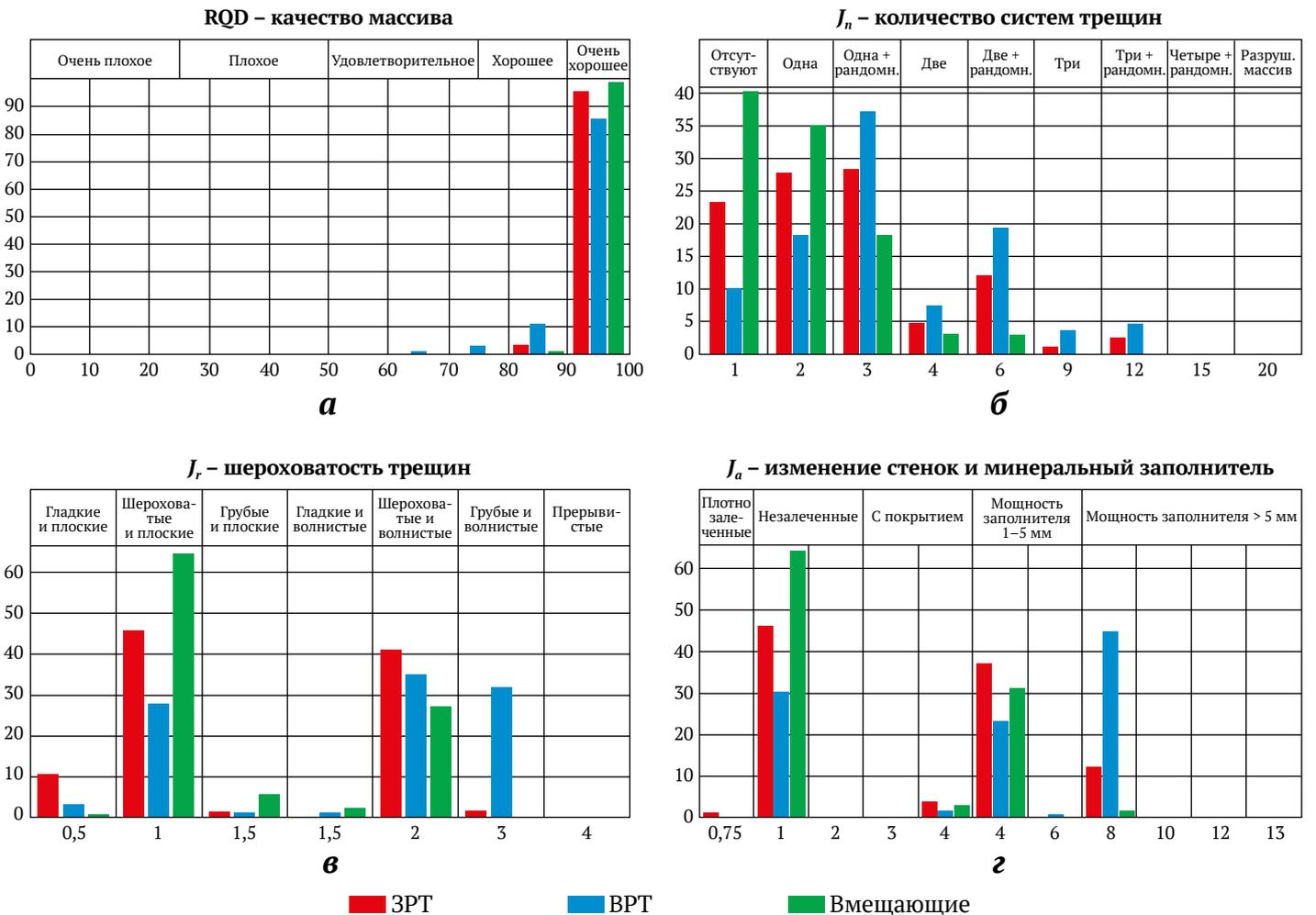
Параметр	Значение
$J_{A4/2}$ – длина трещины	2 (3–10 м)
$J_{A4/5}$ – выветренность стенок трещин	6 (невыветренные)
$J_{A5}$ – водопристок	4 (капез)
$J_B$ – ориентировка трещин к оси выработки	–5 (среднеблагоприятные)

Рис. 6. Гистограммы распределения входных параметров для расчета рейтинга RMR

Для пород, вмещающих трубку, диапазон прочности на одноосное сжатие колеблется в пределах 28,14–71,73 МПа со средним значением 41,05 МПа (рис. 6, а). Наиболее высокая степень изменчивости прочностных свойств характерна для кимберлитовой брекчии ЗРТ и ВРТ (включая порфиновый кимберлит и автолитовую брекчию). Интервал измеренных значений прочности колеблется от 2,15 до 119,48 МПа со средним значением 32,54 МПа. Большой разброс значений прочности при одноосном сжатии кимберлитов объясняется тем, что их физико-механические и прочностные свойства зависят от минералогического, химического и гранулометрического состава. Эти характеристики у кимберлитов значительно варьируются как по площади, так и на глубину. Кроме того, кимберлиты подвержены гипергенным преобразованиям, что приводит к изменениям их минерального состава и, соответственно, к колебаниям прочностных характеристик [24]. В целом полученные значения прочностных характеристик соответствуют скальным

породам низкой, умеренной, средней и высокой прочности согласно существующей классификации [25]. При этом подавляющий объем рудных тел занимают кимберлиты низкой и умеренной прочности.

Значения RQD колеблется в широких пределах, от 50 и до 100 % (рис. 6, б, рис. 7, а), при этом средние значения с низким коэффициентом вариации превышают 90 %, что отвечает очень хорошему качеству массивов для всех литологических разновидностей [26]. Следует отметить, что на итоговое значение RQD существенно влияют качество бурения, ориентировка скважины по отношению к трещинам, а также различия в расстояниях между трещинами. Например, RQD = 0, когда расстояние между трещинами составляет 100 мм или меньше, в то время как RQD = 100, когда расстояние составляет 110 мм или больше. Другим недостатком является то, что RQD не дает информации о фрагментах керна <10 см, т.е. не придается значение тому, являются ли отбракованные фрагменты длиной до 10 см дисперсными или плотными (скальными) породами.



Константы:

Параметр	Значение
$J_w$ – водоприток	0,66 (средний)
SRF – фактор снижения напряжений	2,5 (низкое напряжение, одиночные тектонические зоны)

Рис. 7. Гистограммы распределения входных параметров для расчета рейтинга Q

Расстояние между трещинами определялось как величина, обратная модулю трещиноватости (количество трещин, приходящихся на единицу длины (погонный метр)). Для корректной оценки данного параметра важным является ориентировка скважины по отношению к трещинам массива, что продемонстрировано на рис. 8, где показаны три задокументированных интервала, нарушенных трещинами, с одинаковым расстоянием между ними, равным 0,1 м.

По первому интервалу (50–51 м), в пределах которого трещины располагаются перпендикулярно оси керна, модуль трещиноватости равен 10 тр/пог. м. По второму интервалу (51–52 м) с трещинами, располагающимися под углом  $45^\circ$  к оси, получен модуль равный 7 тр/пог. м. И, наконец, для третьего интервала (52–53 м) с углом между осью керна и трещинами  $20^\circ$  модуль равен 4 тр/пог. м. Истинный модуль трещиноватости получен только для первого интервала, на двух других идет искусственное занижение значения. При этом в примере рассмотрена только одна система трещин, в то время как в реальном массиве, как правило, развиты две и более систем и несколько рандомных (бессистемных) трещин, которые влияют на конечное значение модуля. Поэтому при расчетах данного показателя использовался весовой коэффициент Терцаги (Terzaghi weighting) [27]. Он пропорционально увеличивает в выборке «вес» трещин (средневзвешенное значение каждой трещины от их общего количества), которые располагаются под углом, отличным от прямого, к оси скважины. Чем более острый угол между трещиной и осью скважины, тем больше значение коэффициента Терцаги.

Массив вмещающих трубку отложений может быть отнесен к практически монолитным (I класс трещиноватости по СНИП II-94–80) со средним размером отдельностей более 1,5 м (рис. 6, в). Для массивов кимберлитовых тел наблюдается практически трехкратное превышение показателя частоты встречаемости трещин в массиве ВРТ, что свидетельствует о его существенно большей нарушенности. Это подтверждает ранее сделанные выводы по результатам структурного документирования стенок горных выработок рудника [28]. Кимберлиты ЗРТ являются среднетрещиноватыми породами (III класс, размер отдельностей

0,5–1 м), кимберлиты ВРТ – сильнотрещиноватыми (IV класс, размер отдельностей 0,1–0,5 м).

Пониженные значения частоты трещин наблюдаются для галогенных отложений, что связано с их реологическими свойствами, а именно повышенной пластичностью, которая компенсирует прилагаемые тектонические и литостатические нагрузки. Для ксенолитов в пределах кимберлитовых тел характерна более высокая нарушенность трещинами, чем для материнской толщи вмещающих пород. По всей видимости, это связано с процессами дополнительной деструкции в период внедрения кимберлитового расплава.

Оценка истинной протяженности трещинных структур из-за их трехмерного характера, ограниченной проявленности, а также высокой изменчивости параметров – весьма нетривиальная задача, особенно по скважинным данным. Наиболее точно данный параметр может быть получен при визуальном прослеживании нарушений по стенкам обнажений или горных выработок. Однако зачастую размеры выработок меньше протяженности трещин/разломов, что не позволяет точно определить их длину. Статистический анализ замеров трещин, выполненный в пределах подземных горных выработок рудника [28], показал, что в массиве преобладают трещины протяженностью до трех метров. Следует отметить, что данная цифра во многом приблизительная, т.к. оценка протяженности более крупных трещин и локальных разломов ограничена сечением выработок (около 5 м). Принимая во внимание данные, полученные при структурных исследованиях в карьере Удачный, в качестве расчетной усредненная длина трещин принята равной 3–10 м.

По результатам документации керна установлено, что в массивах как вмещающих отложений, так и кимберлитовых тел существенно преобладают трещины шероховатые, плоской, волнистой и ступенчатой конфигураций (см. рис. 6, з, рис. 7). Причем трещины в кимберлите чаще характеризуются более грубой шероховатостью, чем трещины в осадочных породах. Шероховатость трещин без заполнителя увеличивает угол трения по ним и, следовательно, увеличивает сопротивление сдвигу в плоскости дефекта. Также в пределах массива и особенно в зоне эндо/экзоконтакта отмечены трещины с зеркалами скольжения. Наличие

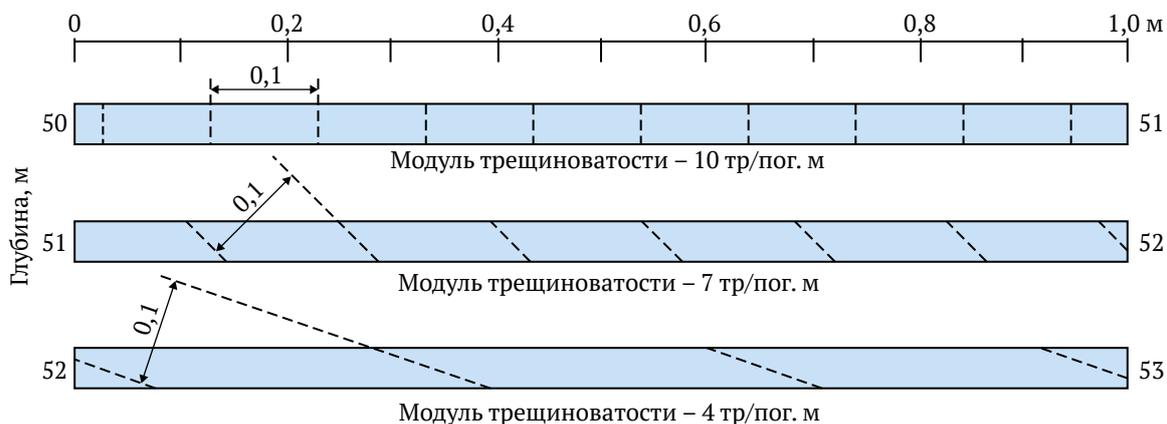


Рис. 8. Пример расчета модуля трещиноватости по керну скважины



на плоскостях трещин следов перемещения, таких как зеркала и борозды скольжения, имеющих погружение по падению плоскостей трещин, существенно снижает сопротивление сдвигу.

При низких степенях шероховатости наибольшее влияние на сдвиговую прочность по трещинам оказывают прочностные свойства минерального заполнителя. Большая часть трещин в кимберлите западного рудного тела и вмещающих отложениях не имеет минерального заполнителя (см. рис. 6, е). Главным заполнителем трещин являются карбонаты с подчиненным значением сульфатов и галогенных пород. По трещинам ЗРТ существенно более часто встречаются трещины с проявлениями сульфидов, в то время как для ВРТ достаточно большое число трещин имеет ожелезнение стенок. В качестве главного заполнителя трещин кимберлита восточного рудного тела выступает каменная соль. Для вмещающих пород заполненность трещин солью не имеет повсеместного распространения, хотя четверть всех трещин, зафиксированных в глинистом известняке на контакте с ВРТ, выполнены солью. Также в единичных трещинах отмечаются глина и кварц. Последний чаще встречается в виде друз и жезд и связан с гидротермальной стадией кимберлитового преобразования [29]. Подавляющее большинство заполненных трещин имеют мощность от 1 до 5 мм, реже от 5 до 10 мм. Наибольшая мощность характерна для трещин, выполненных солью и кальцитом.

По результатам анализа поинтервальных диаграмм трещиноватости установлено, что для исследуемого массива характерно преобладание одной, реже двух систем трещин, осложненных единичными бессистемными (рандомными) разрывами (см. рис. 7, б). Обусловлено это низкой тектонической активностью на участке локализации месторождения (центральная часть Сибирской платформы) и отсутствием крупных разломных структур высоких рангов. Наибольшее количество систем трещин фиксируется в зоне экзо-эндоконтакта, имеющей повышенную деструкцию вследствие термодинамического воздействия от внедрения нескольких порций кимберлитового расплава.

Основным источником обводнения месторождения является Среднекембрийский водоносный комплекс (СВК) с двумя водоносными горизонтами, обладающими повышенными фильтрационными свойствами [12]. Подземные воды СВК высокоминерализованные, газонасыщенные, приурочены к известняково-доломитовым отложениям среднего-нижнего кембрия [30]. Значения пластовых давлений изменяются от 4,5 до 15,6 МПа, а водопритоки колеблются в пределах 0,6–228 л/мин, что позволяет предпо-

ложить средний уровень водопритока в подземные горные выработки на глубоких горизонтах рудника. Следовательно, параметр  $J_{A5}$  из системы RMR принят равным 4, что отвечает капезу, а параметр  $J_w$  системы Q принят равным 0,66 – уровень водопритока средний.

Данные о действующих в массиве напряжениях, которые можно использовать для оценки фактора SRF при расчете рейтинга Q, получены по результатам исследований методом измерительного гидроразрыва. По действующим напряжениям массив может быть условно отнесен к классу Б (прочные породы, имеющие проблемы с напряжением (давлением))<sup>2</sup>. В этом случае оценка фактора SRF осуществляется по соотношению  $\sigma_c/\sigma_1$ , где  $\sigma_c$  – прочность на одноосное сжатие,  $\sigma_1$  – максимальное напряжение (табл. 1).

Полученные высокие значения SRF указывают на потенциально удароопасные условия отработки месторождения в изучаемом интервале глубин. В то же время, по свидетельству специалистов геологической службы рудника, динамических проявлений горного давления (щелчки и треск в массиве пород, интенсивное заколообразование, «шелушение» пород на контуре и в целике, «стреляние») во время проходки подготовительных горных выработок на горизонтах –480, –580 (–630) не наблюдалось. Анализ фотодокументации керна геомеханических скважин показал отсутствие больших объемов дискования керна, характерного для хрупко-упругих пород в условиях высоких напряжений, что также свидетельствует о низком потенциале удароопасности массива в исследуемых глубинах. Противоречивость расчетных данных и поведения массива на практике может быть объяснена тем, что в качестве необходимых условий возникновения горных ударов помимо превышения действующими нагрузками предела прочности пород на сжатие требуется превышение скорости нагружения пород скорости развития пластических или упруго-вязких деформаций [31]. В отсутствие прямых данных, подтверждающих наличие высоких напряжений в массиве, в качестве расчетного принято значение SRF, равное 2,5.

### Обсуждение результатов

Применение описанного выше подхода к сбору и анализу горно-геологической информации по исследуемому месторождению позволило произвести расчеты рейтингов RMR и Q и на их основе выполнить категоризацию состояния породного массива (рис. 9).

<sup>2</sup> Using the Q-system. Rock mass classification and support design. NGI. 2015. 56 p.

Таблица 1

Оценка фактора снижения напряжения SRF

Горизонт	Породы	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$\sigma_c/\sigma_1$	SRF
–465	Кимберлит (ЗРТ)	22,75	2,15–119,48	0,09–5,25	0,5–400
–465	Кимберлит (ВРТ)	20*	3,89–98,11	0,19–4,9	5–400
–480	Вмещающие	26,8	27,9–71,3	1,04–2,66	50–400
–580	Вмещающие	31,35	27,9–71,3	0,89–2,27	50–400

\* натуральных измерений напряжения в ВРТ не проводилось

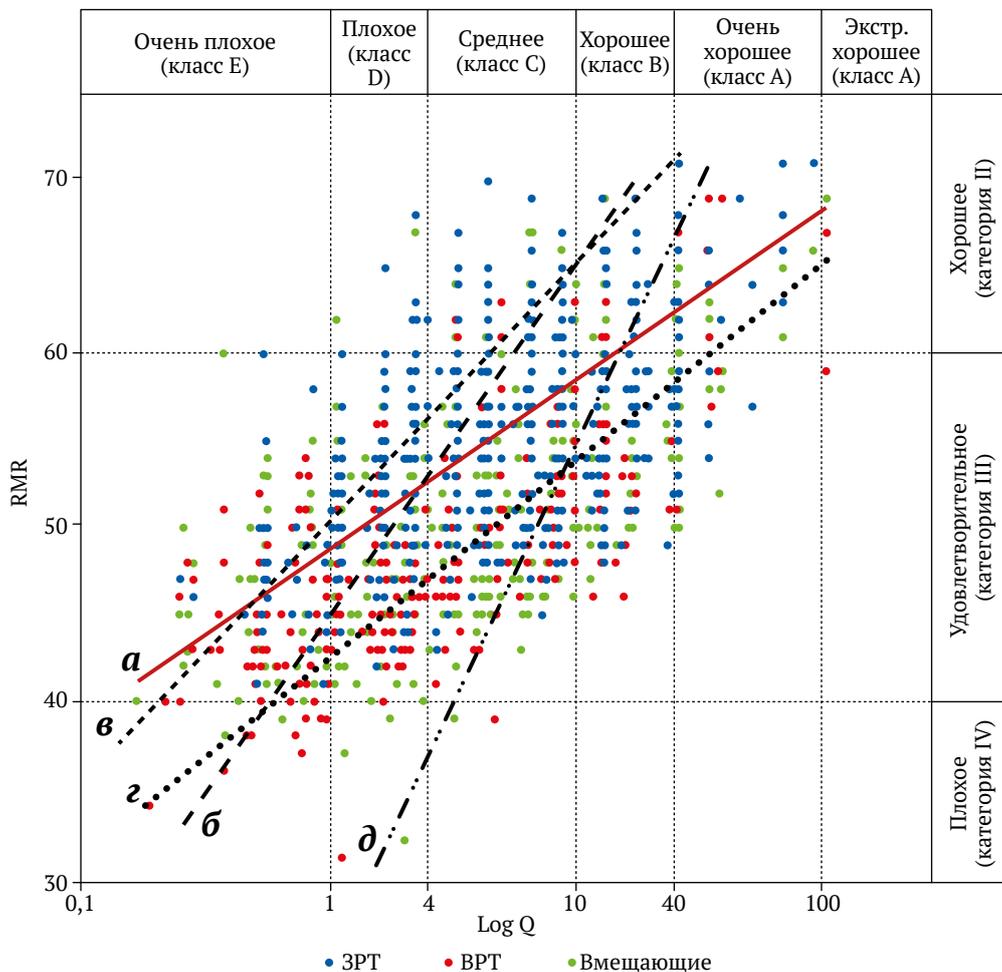
Согласно классификации Бенъявски [2] рассмотренные литологические домены включают участки плохого, удовлетворительного и хорошего состояния, что соответствует IV, III и II категориям массивов по устойчивости. По средним значениям кимберлиты ЗРТ и ВРТ относятся к третьей категории, в то время как вмещающие отложения имеют пограничное значение между второй и третьей категорией. Среднее время устойчивого состояния колеблется от 6 мес (при пролете до 8 м) до 10 ч (при пролете до 2,5 м).

Рейтинг  $Q$  характеризуется диапазоном величин от 0,18 до 105,6. Такой разброс минимального и максимального значений обусловлен тем, что в классификации Бартона используется логарифмическая шкала с размахом в  $10^6$ . По медианным значениям кимберлиты ВРТ относятся к классу  $D$  с плохим состоянием породного массива. Большая часть массива ЗРТ может быть отнесена к классу  $C$  со средним состоянием. Породы, вмещающие трубку, преимущественно попадают в класс  $C$  со средним состоянием массива.

Полученные расчетные значения рейтинговых показателей являются предварительными и достаточно консервативными, требующими заверки в процессе ведения горных работ. Обусловлено это тем, что сбор необходимой для расчета геолого-геомеха-

нической информации в нужном объеме и с требуемым уровнем надежности данных сопряжен с многочисленными ограничениями. Так, часть вводных составляющих для расчета рейтингов были оценены по косвенным данным и приняты константами для всего массива. Это касается протяженности трещин, обводненности массива на проектных глубинах, ориентировки трещин по отношению к проектным выработкам, действующим в массиве напряжениям. В отсутствие возможности точной оценки недостающих параметров использование двух или более систем классификаций при проектировании технологий обработки месторождений обеспечивает более полное и всестороннее представление о геомеханическом состоянии массива и потенциальных рисках при его разработке, о чем говорят сами авторы рейтинговых систем [2, 35].

Хотя между системами классификации RMR и  $Q$  есть много общего, разная «чувствительность» используемых параметров и их структура приводят к тому, что одни и те же участки массива, охарактеризованные разными классификациями, могут иметь существенные отличия в итоговых значениях, что показано на корреляционной диаграмме рассеяния (см. рис. 9). Как можно видеть, для  $Q = 1$  RMR



варьирует в широком диапазоне – от 32 до 62, а при значении RMR 50 рейтинг Q изменяется от 0,5 до 45. Грубая корреляция обусловлена несколькими причинами. Рейтинг Q напрямую не учитывает прочностную характеристику горных пород. Хотя в работе [36] предпринималась попытка ввести прочность на одноосное сжатие в схему расчета рейтинга  $Q_c$ , широко применения данная поправка не нашла. Система RMR не учитывает условия перенапряжений (горные удары) и рассчитана для применения с напряжениями до 25 МПа, в то время как для системы Q активные напряжения в массиве определяются по соотношению показателей  $J_w$  и SRF. Также системы Q и RMR по-разному характеризуют разломные зоны. В системе RMR специальный параметр не используется, а в системе Q влияние разломов учитывается опосредованно через показатель SRF. Кроме того, корреляция зависит от типа и структуры массива, что продемонстрировано в многочисленных работах [2, 32–34]. Некоторые из корреляционных кривых приведены на рис. 9. Поскольку рассматриваемый массив является комбинированным, т.е. состоящим из слоистой и неслоистой компоненты, влияние структуры массива будет максимальным.

Системы RMR и Q лучше всего работают в блочном массиве, поэтому степень его нарушенности, выраженная через показатель RQD, или расстояние между трещинами, часто является наиболее важным

входным параметром, от которого зависит результирующее значение обоих рейтингов. Учитывая упомянутые ранее недостатки показателя RQD как меры структурной нарушенности массива, следует принимать во внимание и оценивать потенциальную ошибку, которую привносит данный показатель в итоговые значения рейтингов.

Несмотря на указанные выше расхождения каждая из систем позволяет дать характеристику геомеханического состояния массива, определить категорию массива по устойчивости, время устойчивого стояния, тип проходки и систему крепления выработок. Выбор базовой классификационной системы должен осуществляться исходя из решаемых задач и набора исходных данных. На практике большей популярностью при выборе систем крепления подземных горных выработок пользуется система Q с использованием номограммы, разработанной Норвежским геомеханическим институтом (рис. 10).

Оценка оптимальных характеристик крепи осуществляется с помощью дополнительных параметров: «эквивалентный размер» выработки (ED, Equivalent dimension) и «коэффициент крепления выработки» ESR (Excavation Support Ratio) [3]. Для рудника Удачный рассмотрены два варианта выработок: капитальные, с ESR равным 1,6, а также сопряжения выработок, для которых ESR равен 1. Пролет выработок принят равным 5 м, отсюда отношение



Рис. 10. Номограмма выбора параметров крепления выработок по рейтингу Q  
 Источник: Using the Q-system. Rock mass classification and support design. NGI. 2015. 56 p.



пролет/ESR (вертикальная шкала слева на рис. 10) для капитальных выработок равно 3,1, для сопряжений – 5. Благодаря полученному диапазону значений рейтинга  $Q$  на номограмме (рис. 10) были предложены следующие рекомендации по креплению. Для капитальных выработок рекомендованы 4 типа крепления. Локальное (рассредоточенное) крепление железобетонными анкерами длиной 2 м с расстоянием между анкерами 1–4 м для участков с очень крепкими, крепкими и средними массивами по категории устойчивости (классы  $A$ ,  $B$  и  $C$ ). Систематическое анкерное крепление с аналогичными параметрами анкеров в сочетании с дисперсно-армированным набрызгбетоном толщиной 5–6 см для пород класса  $D$ . Для участков очень слабых пород (зоны разломов, области приконтактных изменений) рекомендуется уменьшение расстояний между анкерами с одновременным увеличением слоя набрызгбетона до 9–12 см. Для сопряжений горных выработок определены схожие параметры крепи в зависимости от категории массива, но при этом рекомендуется увеличение до 2,5 м длины анкеров, а также последовательное уменьшение расстояния между анкерами и увеличение толщины слоя торкретбетона по мере ухудшения категории устойчивости массива.

### Заключение

Применение комплексной системы сбора данных, включающей акустический телевьюерный каротаж скважин и геолого-структурную документацию неориентированного керна, а также использование результатов лабораторных исследований физико-ме-

ханических свойств пород, натуральных измерений НДС и водопритоков позволили произвести расчеты рейтинговых показателей состояния горного массива по классификациям RMR и  $Q$  для глубоких горизонтов подземного рудника Удачный. С их помощью массив рудных тел и вмещающих отложений оценен по степени устойчивости (присвоены классы/категории), а также определены оптимальные способ и параметры крепления выработок. Накоплена база геомеханических данных, которая при необходимости может быть использована для расчета других рейтингов, таких как MRMR [5], RMI [37], GSI [7] и др., без переходных уравнений.

Следует отметить, что расчет рейтингов является итеративной процедурой, повторяющейся по мере появления новых данных и длящейся весь период функционирования рудника, а полученные на текущем этапе исследования требуют актуализации в процессе ведения горных работ.

Рейтинговые классификации являются важным инструментом оценки состояния породного массива и во многом используются как средство краткосрочного прогноза его поведения. Эмпирическая база рейтинговых систем вводит ограничение на их применение в качестве ключевых источников данных при принятии инженерных решений, особенно в сложных горно-геологических условиях. Интегрирование рейтингов с аналитическими методами и методами численного моделирования выглядит наиболее перспективным подходом для учета неопределенности и изменчивости свойств массива при проектировании и эксплуатации подземных технологий.

### Список литературы / References

1. Bieniawski Z.T. Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*. 1973;15(12):335–344.
2. Bieniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley;1989. 251 p.
3. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics*. 1974;6:189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
4. Barton N. Some new  $Q$ -value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002;39:185–216.
5. Laubscher D.H. Geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990;90(10):257–273. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90830-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90830-F)
6. Laubscher D.H., Jakubec J. The MRMR Rock mass classification for jointed rock masses. In: Hustrulid W.A., Bullock R.L. (Eds.) *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Histories*. Littleton, Colorado: SME; 2001. Pp. 475–481.
7. Hoek E. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*. 1994;2(2):4–16.
8. Hoek E., Brown E.T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(3):445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
9. Gwynn X., Brown M.C., Mohr P.J. Combined use of traditional core logging and televiewer imaging for practical geotechnical data collection. In: Dight P.M. (ed.) *Slope Stability 2013: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2013. Pp. 261–272. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1308\\_13\\_Mohr](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1308_13_Mohr)
10. Серебряков Е.В., Гладков А.С., Гапфаров Т.Д. Обзор современных методов сбора данных для оценки структурной нарушенности горного массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9):160–177. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_9\\_0\\_160](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160)  
Serebriakov E.V., Gladkov A.S., Gapfarov T.D. Modern methods of data collection for structural damage assessment in rock mass: Review. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9):160–177. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_9\\_0\\_160](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_0_160)



11. Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А. и др. *Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции*. Мирный: ООО «МГТ»; 2015. 480 с.  
Kostrovitsky S.I., Spezicius Z.V., Yakovlev D.A. et al. *Atlas of primary diamond deposits of the Yakutsk kimberlite province*. Mirny: MGT LLC Publ.; 2015. 480 p. (In Russ.)
12. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. *Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии*. Мирный: АК «АЛРОСА», Институт «Якутнипроалмаз»; 2013. 568 с.  
Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Mining and geologic features of primary diamond deposits of Yakutia*. Mirny: ALROSA, Yakutnioproalmaz Institute Publ.; 2013. 568 p. (In Russ.)
13. Копылова М.Г., Kostrovitsky S.I., Egorov K.N. Salts in southern Yakutian kimberlites and the problem of primary alkali kimberlite melts. *Earth-Science Reviews*. 2013;119:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.007>
14. Celada B., Tardáguila I., Varona P. et al. Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a Better Life*. Foz do Iguaçu, Brazil, 9–15 May 2014. Pp. 1–9.
15. Peyras L., Rivard P., Breul P. et al. Characterization of rock discontinuity openings using acoustic wave amplitude – Application to a metamorphic rock mass. *Engineering Geology*. 2015;193:402–411. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.014>
16. McKenna G.T.C., Roberts-Kelly S.L. Televierer imaging of boreholes; benefits and considerations for interpretation in the absence of physical rock core. In: Lehane B., Acosta-Martinez H.E., Kelly R. (Eds.) *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC'5*. Sydney, Australia: Australian Geomechanics Society; 2016. Pp. 291–296.
17. Серебряков Е.В., Гладков А.С. Применение акустического телевьюера при оценке структурной нарушенности и геомеханического состояния горного массива. В: *Инженерная и рудная геофизика 2023. Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки*. М.: ООО «EAGE ГЕОМОДЕЛЬ»; 2023. С. 329–333.  
Serebriakov E.V., Gladkov A.S. Application of acoustic televierer in the assessment of structural disturbance and geomechanical state of the rock mass. In: *Engineering and Ore Geophysics 2023. Collection of papers of the 19<sup>th</sup> scientific and practical conference and exhibition*. Moscow: EAGE GEOMODEL LLC; 2023. Pp. 329–333. (In Russ.)
18. Bae D.S., Kim K., Koh Y., Kim J. Characterization of joint roughness in granite by applying the scan circle technique to images from a borehole televierer. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2011;44:497–504. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0134-9>
19. Thomas R.D.H., King A.M., Neilsen J.M. Assessing waviness from televierer for incorporation within defect plane shear strength models. In: *Proceedings of the 48-th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. 1–4 June 2014, Minneapolis, Minnesota.
20. Barton N., Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*. 1977;10:1–54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
21. Fredrick F.D., Nguyen T., Seymour C., Dempers G. Geotechnical data from optical and acoustic televierer surveys. *The AusIMM Bulletin*. 2014;62–66.
22. Katic N., Chalmers R., Christensen H.F. OATV for strength estimations in Copenhagen Limestone. In: *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic*. 2016. Pp. 169–176.
23. Kao H.-Ch., Chou P.-Y., Lo H.-Ch. An innovative application of borehole acoustic image and amplitude logs for geotechnical site investigation. *Acta Geophysica*. 2020;68(6):1821–1832. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00493-2>
24. Подгаецкий А.В. Влияние минерального состава на формирование физико-механических свойств кимберлита. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(8):105–110.  
Podgaetskiy A.V. The influence of the mineralogical compound on the formation of physical and mechanical properties of kimberlites. *Mining Informational and analytical bulletin*. 2011;(8):105–110. (In Russ.)
25. Palmstrom A. Measurement and characterization of rock mass jointing. In: Sharma V.M., Saxena K.R. *In-situ Characterization of Rocks*. A.A. Balkema Publishers; 2001.
26. Deere D.U. *Rock quality designation (RQD) after twenty years*. U.S. Army Corps of Engineers Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station; 1989. 93 p.
27. Terzaghi R. Sources of error in joint surveys. *Géotechnique*. 1965;15(3):287–304. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>
28. Серебряков Е.В., Гладков А. С. Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная». *Записки Горного института*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>  
Serebryakov E.V., Gladkov A.S. Geological and structural characteristics of deep-level rock mass of the Udachnaya pipe deposit. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>



29. Филиппов А. Г. Гидротермальный кварц из кимберлитов Якутии. *Геология и геофизика*. 1992;(11):108–115. Filippov A. G. Hydrothermal quartz from kimberlites of Yakutia. *Geologiya i Geofizika*. 1992;(11):108–115. (In Russ.)
30. Алексеев С. В., Алексеева Л. П., Гладков А. С. и др. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная. *Геодинамика и тектонофизика*. 2018;9(4):1235–1253. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>  
Alekseev S. V., Alekseeva L. P., Gladkov A. S. et al. Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(4):1235–1253. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>
31. Петухов И. М. *Горные удары на угольных шахтах*. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: ФГУП «Гос. НИИ горн. геомеханики и маркшейд. дела – МНЦ ВНИМИ»; 2004. 238 с.  
Petukhov I. M. *Rock bursts at coal mines*. 2<sup>nd</sup> revised and enlarged edition. St. Petersburg: FGUP “State Research Institute of Mining Geotechnics and Mine Surveying – MSC VNIMI” Publ.; 2004. 238 p. (In Russ.)
32. Barton N. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. In: *8<sup>th</sup> ISRM Congress*. September 25–29, 1995. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. Pp. 1023–1032.
33. Sayeed I., Khanna R., Empirical correlation between RMR and Q systems of rock mass classification derived from Lesser Himalayan and Central crystalline rocks. In: *International Conference on «Engineering Geology in New Millennium»*. New Delhi, 27–29 October, 2015. Pp. 1–12.
34. Sadeghi S., Sharifi Teshnizi E., Ghoreishi B. Correlations between various rock mass classification/characterization systems for the Zagros tunnel-W Iran. *Journal of Mountain Science*. 2020;17(1):1790–1806. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5665-7>
35. Barton N., Bieniawski Z. T. RMR and Q-Setting records. *Tunnels and Tunnelling International*. 2008:26–29.
36. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002;39(2):185–216. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4)
37. Palmstrom A. Characterizing rock masses by the Rmi for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (Rmi). *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1996;11(2):175–188.

### Информация об авторах

**Евгений Валерьевич Серебряков** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории инженерной геологии и геоэкологии, Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7280-7784](https://orcid.org/0000-0001-7280-7784); e-mail [serebryakov.e.v@mail.ru](mailto:serebryakov.e.v@mail.ru)

**Илья Анатольевич Зайцев** – главный геолог, Удачный горно-обогатительный комбинат, ПАО «АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail [zaytsevia@alrosa.ru](mailto:zaytsevia@alrosa.ru)

**Андрей Анатольевич Потака** – начальник отдела геотехнического мониторинга, Удачный горно-обогатительный комбинат, ПАО «АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail [potakaaa@alrosa.ru](mailto:potakaaa@alrosa.ru)

### Information about the authors

**Evgeny V. Serebryakov** – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher at the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology, Institute of Earth Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7280-7784](https://orcid.org/0000-0001-7280-7784); e-mail [serebryakov.e.v@mail.ru](mailto:serebryakov.e.v@mail.ru)

**Ilya A. Zaytsev** – Chief Geologist, Udachny Mining and Processing Complex, PJSC AK ALROSA, Mirny, Russian Federation; e-mail [zaytsevia@alrosa.ru](mailto:zaytsevia@alrosa.ru)

**Andrey A. Potaka** – Head of the Geotechnical Monitoring Department, Udachny Mining and Processing Complex, PJSC AK ALROSA, Mirny, Russian Federation; e-mail [potakaaa@alrosa.ru](mailto:potakaaa@alrosa.ru)

Поступила в редакцию 14.12.2023

Поступила после рецензирования 21.02.2024

Принята к публикации 02.04.2024

Received 14.12.2023

Revised 21.02.2024

Accepted 02.04.2024