

УДК 622.28; 622.831

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТОННЕЛЬНОЙ КРЕПИ  
В ТРЕЩИНОВАТОМ МАССИВЕ ГИМАЛАЙСКОЙ ГОРНОЙ СИСТЕМЫ**

**Наем Аббас<sup>1,2</sup>, К. Г. Ли<sup>1</sup>, М. З. Эмад<sup>3</sup>, Назир Аббас<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Куньминский университет науки и технологии,*

*E-mail: likegang\_78@163.com, Куньмин, пров. Юньнань, 650093, Китай*

<sup>2</sup>*Каракорумский международный университет (KIU),*

*E-mail: naem.abbas@kiu.edu.pk, г. Гилгит, Пакистан*

<sup>3</sup>*Университет нефти и полезных ископаемых им. короля Фахда (KFUPM),  
г. Дахран, Саудовская Аравия*

Проектирование крепи подземных горных или тоннельных выработок зависит от геологического и горнотехнического поведения породного массива, при этом ключевыми параметрами являются значения рейтингов их устойчивости. Выполнен анализ существующей крепи в тоннелях, расположенных в Гималайской горной системе. Выявлено, что несущая способность крепи неодинакова: в некоторых случаях чрезмерная, в других — недостаточная. На основе измерений горнотехнических параметров в режиме реального времени и фактических геологических условий осуществлена проверка устойчивости крепи с помощью обратных расчетов, включающих классификацию горного массива по Беньявскому и индекс качества породы, найдена эмпирическая корреляция между ними. Существующие и модифицированные значения рассматриваемых рейтингов устойчивости пород показали значительный коэффициент корреляции.

*Строительство тоннелей, рейтинг горных пород, коэффициент снижения напряжения, крепь*

DOI: 10.15372/FTPRPI20250306

EDN: MYDXMO

В настоящее время существует ряд классификационных систем горных массивов, к которым относят рейтинг пород (RMR) [1–3], индекс качества породы (Q) [4], индекс устойчивости породы (RMi) [5] и индекс геологической прочности (GSI) [6]. Эти классификационные системы широко применяются для планирования и проектирования горнотехнических инженерных сооружений с учетом локальных условий и требований. В начале 1970-х гг. система RMR активно использовалась для анализа устойчивости бортов. Позже предложенная З. Т. Беньявским модифицированная система RMR стала использоваться при строительстве тоннелей и проходки выработок [2]. Между этими системами имеются отличия: минимальное значение RMR 1973 г. составляет 18, RMR 1989 г. — 23 [7]. Для решения этой проблемы в 1994 г. предложен индекс геологической прочности [6, 8], с помощью которого достигается количественная оценка [9, 10].

В [11] изучено применение  $Q$ -рейтинга и RMR при проектировании крепи тоннеля с помощью обратного анализа для условий Гималайской горной системы. Гималаи — регион, предрасположенный к серьезным оползневым явлениям. Критические области сконцентрированы вдоль Гималайского орогенного пояса, простирающегося с востока на запад. В Гималайских хребтах находится большое количество крупномасштабных геологических разломов. Угрозы сейсмических и оползневых явлений возникают по причине неравномерных топографических факторов, сложных геологических и климатических условий [12]. Обводнения и геотермальное воздействие, слабая порода, горные удары, а также значительная мощность налегающих пород и частая сейсмическая активность — основные проблемы при строительстве тоннелей в Гималаях. Классификация горных пород для геологических условий рассматриваемой области недостаточна. При проектировании крепи необходимо выполнять численное моделирование для получения полной геологической картины [13].

Геологическое состояние массивов в Гималаях характеризуется изменяющейся мощностью налегающих пород, что создает сложные условия для подземных сооружений. В результате возможны значительные деформации на стадии строительства тоннелей или других подземных сооружений [14]. Большое количество гидротехнических тоннелей, построенных в этой области, подверглось разрушению из-за существенного сжатия, обрушения кровли и затопления [13]. Зафиксированы обрушения породы в нескольких тоннелях по причине значительных атмосферных осадков [15]. В [16] изучено 4 подземных сооружения, расположенных на территории Непала, и сделан вывод, что для оценки их устойчивости и прогноза качества породного массива необходим анализ геологической информации и рисков. В [17] выполнена горнотехническая оценка склонов Гималайских гор и предложен модифицированный показатель RMR.

Строительство тоннелей в Гималаях сопровождается следующими проблемами: наличие областей высоких напряжений, сжатие/набухание породного массива, складчатость, проникновение воды и газа в массив. Породный массив в данном регионе существенно трещиноватый, в нем присутствуют разломы, переслоения и признаки эрозии, часто встречаются грунтовые включения в результате активного тектонического влияния муссонов. Таким образом, ввиду сложившихся геологических условий, требуется пересмотр параметров крепи для трещиноватого массива, находящегося под воздействием высоких локальных напряжений.

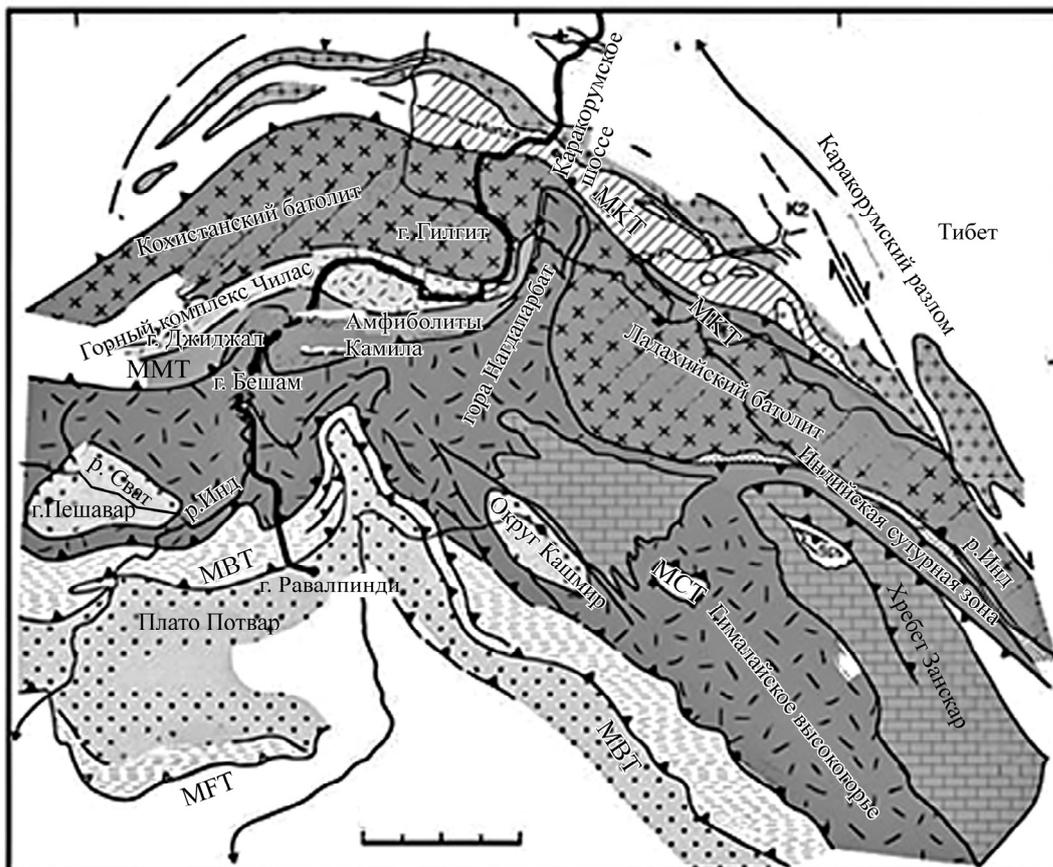
Цель настоящей работы — изучение параметров крепи в тоннелях, расположенных в Гималаях ( $RMR_{19}$ ), на основе учета локальных горнотехнических параметров в контексте существующих классификационных систем. В соответствии с данными, полученными в режиме реального времени со строительства плотины Диамер–Бхаша, выполнена корректировка коэффициента снижения напряжения в RMR и  $Q$ -рейтинге. Система RMR модифицирована для реалий Гималаев. Выполнен пересмотр существующей крепи путем включения коэффициента снижения напряжения через обратный анализ с помощью  $RMR_{19}$

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

На исследуемой территории расположено большое количество локальных и региональных разломов, залегают формации значительно трещиноватой породы (рис. 1). Кохистанская дуга возникла в результате субдукции Индостанской плиты под Евразийскую. Основная порода — мафический интрузивный габбронорит с ключевыми минералами: амфиболы, пироксен и плагиоклазы. Помимо габбронорита в районе встречаются ультрамафические соединения. Плотина

Диамер – Бхаша на реке Инд в Пакистане — крупный проект, в рамках которого ведется строительство нескольких тоннелей. Проект реализуется в районе Большого тектонического разлома (ММТ) на юге и разлома Райкот на севере.

Для оценки особенностей породного массива в рамках работы выполнен детальный геологический анализ, включающий лабораторные испытания, керновое бурение и оценку нарушений сплошности. Выявлено, что массив горных пород трещиноватый и обладает низким показателем качества по системе RQD (показатель качества породы).



Азиатская тектоническая плита

- Каракорумский батолит
- Комплекс метаморфических пород на юге Каракорума
- Главный Каракорумский разлом (МКТ)
- Батолиты и вулканы Кохистана и Ладаха
- Горный комплекс Чилас
- Амфиболиты Камила
- Горный комплекс Джиджал — Сапат
- Большой тектонический разлом (ММТ)

Индостанская тектоническая плита

- Шельф Занскар
- Занскарская сдвиговая зона (нормальный разлом)
- Метаморфическая порода и лейкогранит Гималайского высокогорья
- Главный центральный разлом (МСТ)
- Молассовые породы хребта Сивалик
- Основной пограничный разлом (МВТ)
- Массовые породы хребта Сивалик
- Главный фронтальный разлом (МФТ)

Рис. 1. Геологическая карта Кохистанской дуги [18]

## МЕТОДОЛОГИЯ

Определены параметры  $Q$ -рейтинга и RMR, полученные в результате геологического картирования исследуемого района для разных участков строительства тоннеля. Выполнена модификация параметров  $RMR_{89}$  и  $RMR_{14}$  с помощью обратного расчета и проанализирована их корреляции с параметрами  $Q$  и  $\ln Q$  методами статистики [11]. Рассмотрен коэффициент снижения напряжения (SRF) относительно других параметров.

Обратный расчет  $RMR^*$  выполнен согласно уравнениям, предложенным Беньавским [19]:

$$Sb = 0.5 + \frac{2.5(RMR - 20)}{65}, \text{ если } 20 < RMR \leq 85, \quad (1)$$

$$Sb = 0.25 + \frac{(RMR - 10)^{1.5}}{140}, \text{ если } 10 < RMR \leq 20, \quad (2)$$

$$Sb = 0.25, \text{ если } RMR \leq 10, \quad (3)$$

$$Span = \frac{(Lb + 2.5)^{\frac{RMR+25}{52}}}{3.6}. \quad (4)$$

где  $Sb$  — расстояние между анкерами;  $Lb$  — длина анкера;  $Span$  — длина пролета.

Таким образом, при расчете  $RMR^*$  используются показатели длины анкера, толщины слоя торкрет-бетона и длины пролета выработки. С учетом того, что коэффициент напряжения определяется как  $RMR^* - RMR$ , то после корректировки можно записать

$$RMR_{89} = RMR_{89} + \text{Коэффициент напряжения},$$

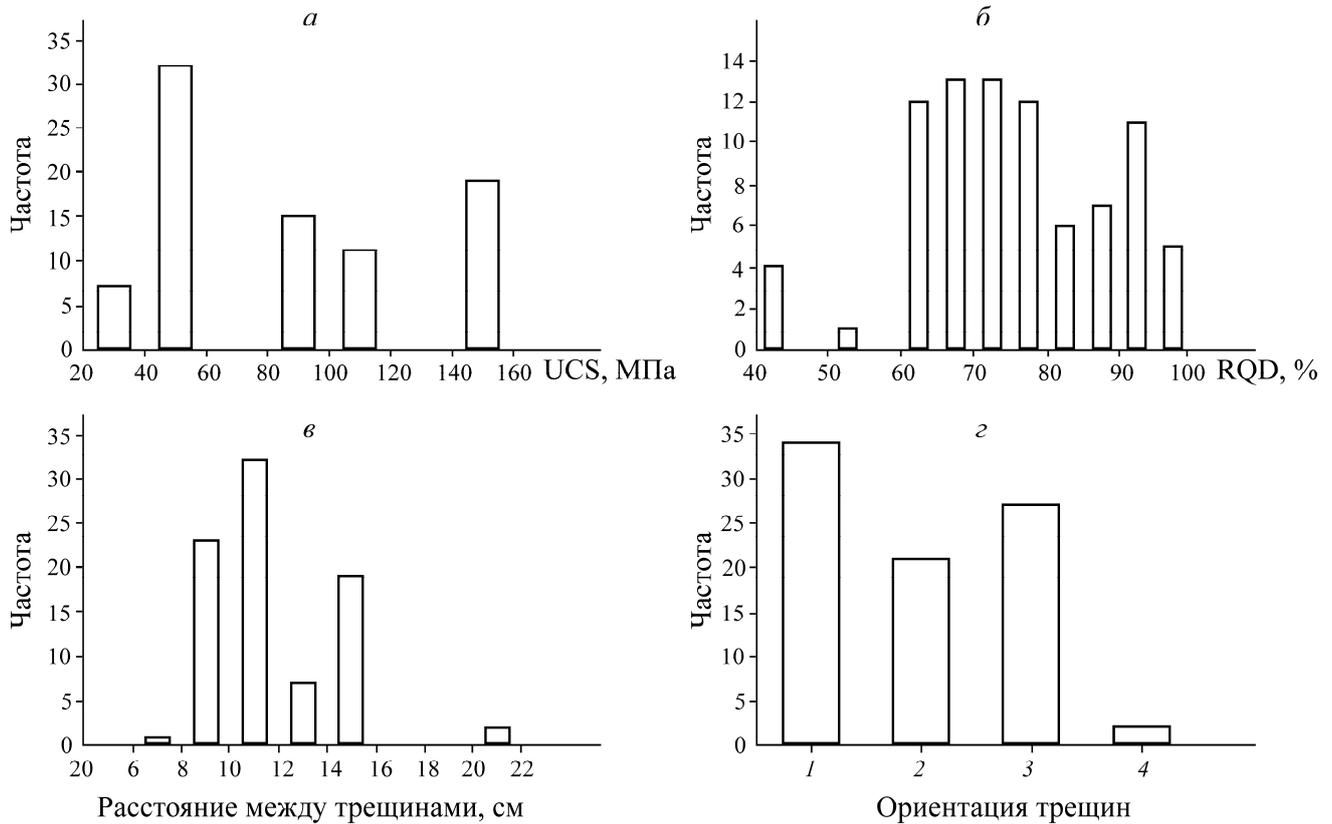
$$RMR_{14} = RMR_{14} + \text{Коэффициент напряжения}.$$

В соответствии со значениями  $Q$  разработана классификация породы исследуемого района:  $Q_1$  —  $> 40$ ,  $Q_2$  —  $10-40$ ,  $Q_3$  —  $4-10$ ,  $Q_4$  —  $1-4$ ,  $Q_5$  —  $0.1-1$ . Система крепи спроектирована для каждого класса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В основном прочность породы на одноосное сжатие в исследуемой области составляет  $\sim 50$  МПа, в нескольких случаях —  $\sim 150$  МПа. Породный массив является значительно трещиноватым. Значение  $RMR_{89}$  находится в диапазоне  $30-75$  и преимущественно  $< 50$ . Прокладываемый тоннель проходит через массив средневыветренных горных пород, иногда со значительным влагонасыщением. Индекс качества породы составляет  $1-10$ , в некоторых случаях  $Q > 20$ . Большая часть исследованных массивов относится к  $Q_3$ .

На рис. 2 представлено статистическое распределение ключевых параметров породного массива. Видно, что большинство образцов имеет среднюю прочность  $40-60$  МПа. Значения RQD большинства образцов находятся в диапазоне  $60-80\%$ , что свидетельствует о хорошем качестве породы. Расстояние между трещинами и их ориентация способны повлиять на механическое поведение и устойчивость породного массива.



$$\begin{aligned} \text{RMR}_{89st} &= \text{RMR}_{89} + Fst, & \text{RMR}_{14st} &= \text{RMR}_{14} + Fst, \\ \text{RMR}_{89}^* &= \text{RMR}_{89} + Fst, & \text{RMR}_{14}^* &= \text{RMR}_{14} + Fst. \end{aligned}$$

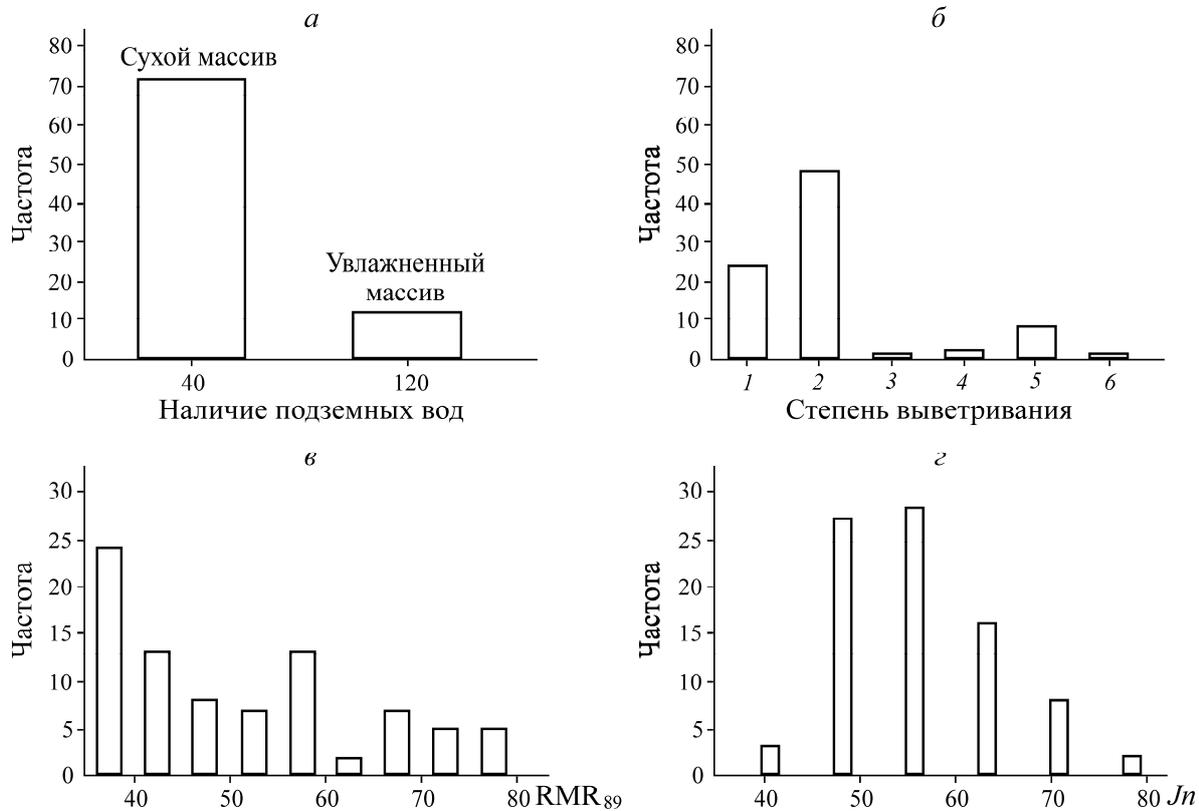


Рис. 3. Статистические данные распределения: а — наличия подземных вод; б — степени выветривания (1 — умеренная, 2 — слегка выветренная, 3 — крайне выветренная, 4 — незначительно выветренная, 5 — свежая порода, б — свежая, слегка выветренная порода); в —  $\text{RMR}_{89}$ ; з — количества трещин

*Корректировка напряжений в  $Q$ -рейтинге.* Разработанный в 1974 г.  $Q$ -рейтинг представляет собой эмпирическую классификацию породных массивов по данным строительства тоннелей [4]. Позднее она была модифицирована [20, 21]. Показатель качества  $Q$  в данной системе может изменяться от 0.001 до 1000 и рассчитывается следующим образом:

$$Q = \frac{\text{RQD}}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{\text{SRF}}, \quad (5)$$

где  $J_r$  — шероховатость трещины;  $J_w$  — водный фактор;  $J_a$  — показатель сцепления по поверхности трещины. Прочность нетронутого массива пород на сжатие ( $\sigma_c$ ) крайне важна, поэтому показатель  $Q$  модифицирован [20]:

$$Q_c = \frac{\text{RQD}}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{\text{SRF}} \cdot \frac{\sigma_c}{100}, \quad (6)$$

здесь отношение  $\text{RQD}$  к  $J_n$  отражает размер структурного блока. Показатель  $\text{RQD}$  можно определить по визуализации буровых кернов скважин.

Обратные значения  $Q^*1$  и  $Q^*2$  установлены согласно диаграмме крепи  $Q$ -рейтинга по толщине торкрет-бетона, расстоянию между анкерами и длиной пролета выработки. Обратное значение  $Q$  ( $Q_b$ ) определяется как среднее между  $Q^*1$  и  $Q^*2$  [11]. Получаем формулу для вычисления коэффициента снижения напряжения  $Q$ -рейтинга ( $\text{SRF}_Q$ ) и нормализованного  $\text{SRF}_Q$

$$SRF_Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{Q}, \quad (7)$$

$$\text{Normalized } SRF_Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{\sigma_c}{100} \quad (8)$$

Модифицированные уравнения учитывают факторы, которые могут увеличить требуемую несущую способность, что потенциально отражает более консервативный и безопасный подход к проектированию. Рекомендации по усилению крепи обусловлены более подробными данными о состоянии массива горных пород и дополнительными сведениями о нагрузке. Выполнение таких рекомендаций повышает общую стабильность и безопасность подземных сооружений, но вместе с тем влияет на стоимость и сроки строительства. В этой связи при выборе систем крепи, основанных на модифицированных уравнениях, важно соблюдать баланс между безопасностью и практическими соображениями.

*Сравнение обратных значений SRF с их значениями из литературных источников.* В [22] предложен метод расчета SRF для горных выработок месторождений Южной Африки:

$$SRF = 0.244 K^{0.346} \left( \frac{H}{\sigma_c} \right)^{1.322} + 0.176 \left( \frac{\sigma_c}{H} \right)^{1.413},$$

где  $H$  — глубина горных работ.

Для условий шахт Австралии при расчете SRF предложено соотношение по  $\sigma_c$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  [23], а для условий Гималаев в [24] — эмпирическая корреляция соответственно:

$$SRF = 31 \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)^{0.3} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_1} \right)^{-1.2}, \quad SRF = 5.84 \left( \frac{\sigma_c}{H} \right)^{0.001} \left( \frac{J_r^3}{J_n} \right) + 2.58.$$

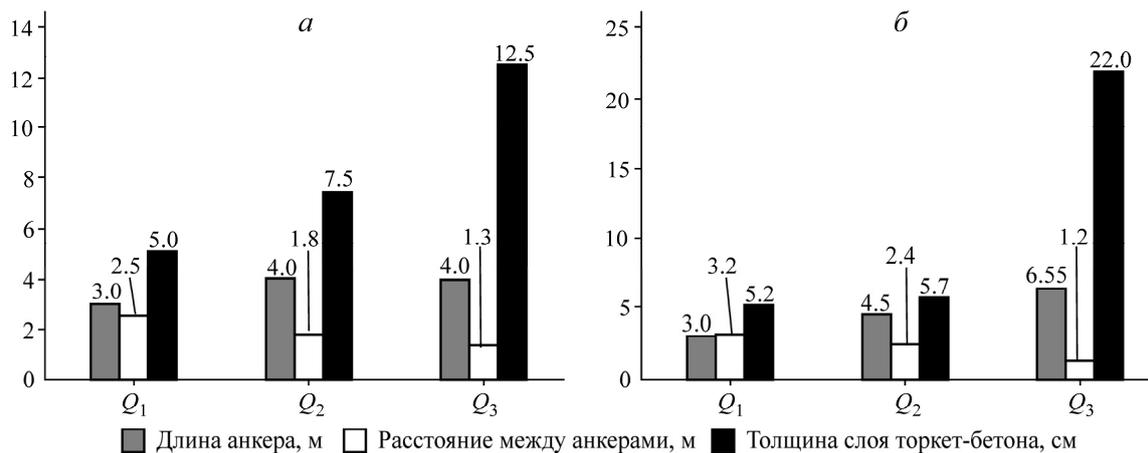
Значения SRF, рассчитанные по данным уравнениям для условий плотины Диамер – Бхаша, отличаются друг от друга: 2.0966 [22], 11.45 [24], 0.433 [23].

*Предлагаемая система крепи.* Данные полевых измерений сгруппированы по различным диапазонам  $Q$  и RMR (табл. 3). Предложенная ранее система крепи, основанная на RMR, ограничивалась длиной пролета 10 м [2]. В ряде работ исследователи стремились повысить точность RMR для различных значений длины пролета [25–27]. Позднее предложено рассматривать толщину слоя торкрет-бетона как функцию длины пролета.

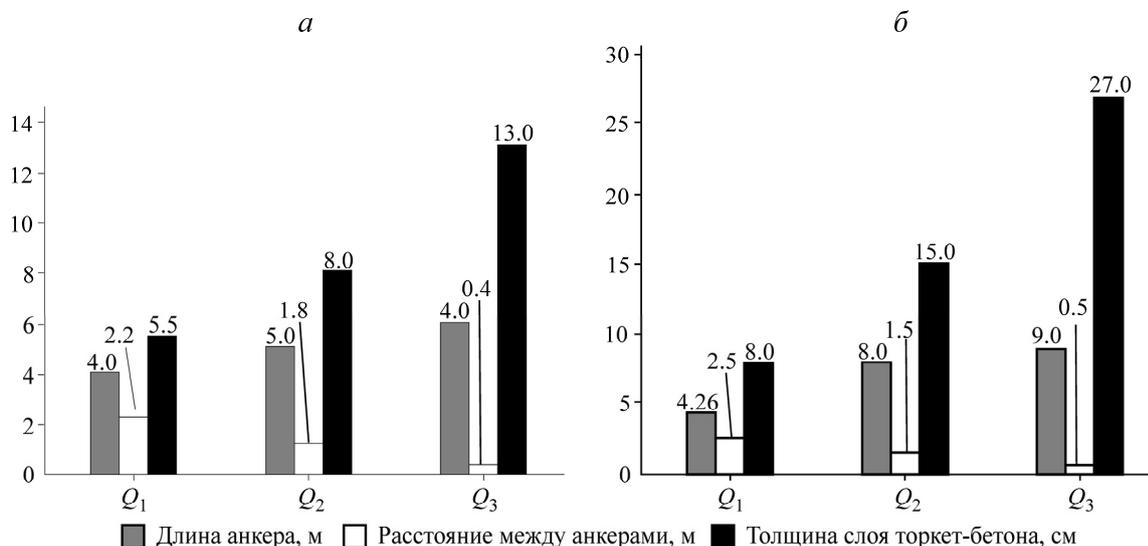
ТАБЛИЦА 3. Значения показателей RMR и  $Q$  [11]

Группа	$Q$ -класс	RMR <sub>89</sub>	RMR* <sub>89</sub>	RMR <sub>14</sub>	RMR* <sub>14</sub>
1	$Q_1, Q_2 > 10$	70–80	50–70	80–90	70–80
2	$Q_3$ 4–10	55–70	40–50	65–80	50–70
3	$Q_4$ 1–4	40–55	30–40	50–65	30–50

В настоящей работе системы крепи спроектированы на основе RMR<sub>89</sub> [2] и RMR<sub>14</sub> [7] (рис. 4а). Согласно RMR<sub>89</sub> и в зависимости от  $Q$ -рейтинга толщина слоя торкрет-бетона находится в диапазоне 5–12.5 см; расстояние между анкерами 3.2–1.3 м; длина анкера 3–4 м. По RMR<sub>14</sub> толщина слоя торкрет-бетона изменяется в диапазоне 5–22 см; расстояние между анкерами 3.2–1.2 м; длина анкера 3.0–6.5 м.

Рис. 4. Параметры крепи по RMR<sub>89</sub> (а), RMR<sub>14</sub> (б)

После модификации RMR<sub>89</sub> и RMR<sub>14</sub> система крепи становится более надежной, что связано с наличием в расчете коэффициента напряжения, который отражает локальные геологические условия Гималаев. Полученный результат подчеркивает необходимость принятия во внимание на стадии проектирования параметров, связанных с напряжениями. Более мощные и устойчивые системы крепи необходимы для обеспечения структурной устойчивости и безопасности тоннелей в сложных геологических условиях. Таким образом, включение коэффициента напряжения позволяет спроектировать традиционные и безопасные системы крепи, которые необходимы в регионах с непредсказуемым поведением породного массива, таких как Гималаи.

Рис. 5. Параметры крепи по модифицированному значению RMR<sub>89</sub> (а), RMR<sub>14</sub> (б)

Влияние коэффициента напряжения на RMR<sub>89</sub> и RMR<sub>14</sub> также рассмотрено в [11], где по модифицированному значению RMR<sub>89</sub> параметры крепи в зависимости от  $Q$ -рейтинга составили: толщина торкрет-бетона 5–13 см; длина анкера 4–6 м; расстояние между анкерами 2.2–0.4 м. По модифицированному значению RMR<sub>14</sub> параметры крепи в зависимости от  $Q$ -рейтинга следующие: толщина торкрет-бетона 8–27 см; длина анкера 4–9 м; расстояние между анкерами 3.0–1.2 м.

Частота разности между  $RMR^*$ ,  $RMR_{89}$  и  $RMR_{14}$  приведена на рис. 6. Относительно  $RMR_{14}$  разность положительная ( $RMR^*_{14}$  меньше, чем  $RMR_{14}$ ), а в случае  $RMR_{89}$  — как отрицательная, так и положительная.

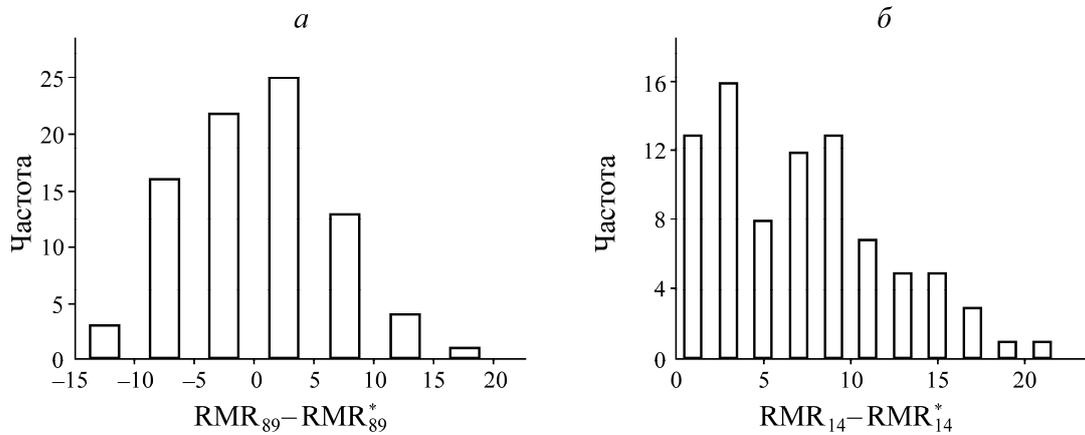


Рис. 6. Частота разности: *a* —  $RMR_{89} - RMR^*_{89}$ ; *б* —  $RMR_{14} - RMR^*_{14}$

*Обратный расчет SRF.* Для обратного расчета  $Q$  использована диаграмма крепи, приведенная в [28]. Нормализованное значение  $SRF_Q$  можно вычислить по формуле

$$\text{Normalized } SRF_Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{Q^*} \cdot \frac{\sigma_c}{100}. \quad (9)$$

Обратный расчет  $Q_1$  выполнен по расстоянию между анкерами, а обратный расчет  $Q_2$  по толщине слоя, укрепленного волокнами торкрет-бетона, и длине пролета [28]. Среднее значение  $Q$  рассматривается как обратно рассчитанное  $Q^*$ .

Стоит отметить, что предложенные методы определения SRF дают разные результаты. Это обусловлено тем фактом, что геологические и горнотехнические условия Гималайской горной системы отличаются в зависимости от района. Для решения этого вопроса рекомендуется использовать следующее уравнение [11]:

$$SRF_Q = 2 \exp\left(0.21 \cdot \frac{RQD}{J_n}\right) + 12 \cdot \exp\left(-\alpha \frac{\sigma_c}{\sigma_1}\right). \quad (10)$$

На рис. 7 приведена частота значений  $SRF_Q$  для условий плотины Диамер–Бхаша. Здесь  $SRF_Q > 4$  при  $\sigma_c = 150$  МПа;  $SRF_Q > 2$  при  $\sigma_c = 100$  МПа;  $SRF_Q < 1$  при  $\sigma_c = 50$  МПа. Выполнена оценка влияния степени трещиноватости породы, влажности и прочности на сжатие на SRF. Воздействие этих факторов можно эмпирически оценить по (9)–(10).

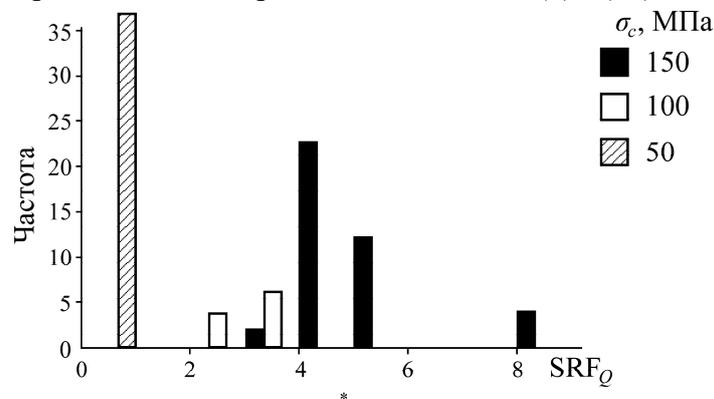


Рис. 7. Частота значений нормализованного коэффициента снижения напряжения  $SRF_Q$

**ВЫВОДЫ**

Рассмотрено включение коэффициента напряжения в классификации рейтингов  $Q$  и RMR. Выполнена оценка существующих типов крепи в тоннелях Гималайской системы по рейтингу горных пород RMR. Для этих условий предложен метод определения коэффициента снижения напряжения SRF в  $Q$ -рейтинге. Отмечена важность принятия во внимание параметров, связанных с напряженно-деформированным состоянием и трещиноватостью массива пород на стадии проектирования.

Получены следующие параметры модифицированной системы крепи при типовых условиях: длина анкера 4.2 м; расстояние между ними 2.5 м; толщина слоя торкрет-бетона 8 см. При неблагоприятных геологических и геомеханических условиях длина анкера увеличивается до 9 м; расстояние между ними снижается до 0.5 м; толщина слоя торкрет-бетона может достигать 27 см.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Bieniawski Z.** Engineering classification of jointed rock masses, *Trans. S. Afr. Instn. Civ. Engrs*, 1973, Vol. 12. — P. 335–344.
2. **Bieniawski Z. T.** Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering, Canada, John Wiley & Sons, 1989. — 272 p.
3. **Romana M.** 2014 RMR New guidelines for tunnels, 13<sup>th</sup> ISRM Int. Congress of Rock Mech., Montreal, Quebec, Canada, 2015.
4. **Barton N., Lien R., and Lunde J.** Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mech.*, 1974, Vol. 6, No. 4. — P. 189–236.
5. **Palmström 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, Vol. 11, No. 2. — P. 175–188.
6. **Hoek E.** Strength of rock and rock masse, *ISRM News Journal*, 1994, Vol. 2, No. 2. — 4–16.
7. **Celada B., Tardaguila I., Bieniawski Z. T., Rodríguez A., Varona P.** Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system, *Proc. World Tunnel Congress*, 2014.
8. **Hoek E., Marinos P., and Benissi M.** Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses, The case of the Athens Schist Formation, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 1998, Vol. 57, No. 2. — P. 151–160.
9. **Sonmez H. and Ulusay R.** Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1999, Vol. 36, No. 6. — P. 743–760.
10. **Sonmez H. and Ulusay R.** A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies, *Yerbilimleri*, 2002, Vol. 26, No. 1. — P. 77–99.
11. **Rehman H., Naji A., Kim J.-J., Yoo H.** Extension of tunneling quality index and rock mass rating systems for tunnel support design through back calculations in highly stressed jointed rock mass: An empirical approach based on tunneling data from Himalaya, *Tunnelling and Underground Space Technol.*, 2019, Vol. 85. — P. 29–42.
12. **Anand A. K. and Pradhan S. P.** Assessment of active tectonics from geomorphic indices and morphometric parameters in part of Ganga basin, *J. Mountain Sci.*, 2019, Vol. 16, No. 8. — P. 1943–1961.
13. **Karki S., Chhushyabaga B., and Khadka S. S.** An overview of design and construction practices of Himalayan Hydropower tunnels, *J. of Phys.: Conf. Ser.*, 2020.
14. **Karki S., Karki B., Chhushyabaga B., Khadka S. S.** Design and analysis of squeezing ground hydro-power tunnel in the Himalaya through a case study, *Lowland Technol. Int.*, 2020, Vol. 21. — P. 268–278.

15. **Khadka S. S.** Tunnel closure analysis of hydropower tunnels in lesser himalayan region of nepal through case studies, Diss., 2019. — 131 p.
16. **Panthi K. K. and Nilsen B.** Predicted versus actual rock mass conditions: A review of four tunnel projects in Nepal Himalaya, Tunnelling and Underground Space Technol., 2007, Vol. 22, No. 2. — P. 173–184.
17. **Siddique T., Mondal M. E. A., Pradhan S. P., Salman M., Sohel M.** Geotechnical assessment of cut slopes in the landslide-prone Himalayas: rock mass characterization and simulation approach, Natural Hazards, 2020, Vol. 104, No. 1. — P. 413–435.
18. **Qureshi J. A., Khan M., Sikandar S., Khan G., Abbas N., Khan A., Alam M., Karim R., and Halvorson S. J.** Inventory and quantitative valuation of geological and geomorphological sites from Gilgit–Baltistan, Northern Pakistan, Geoheritage, 2021. Vol. 13. — P. 1–15.
19. **Lowson A. and Bieniawski Z.** Critical assessment of RMR based tunnel design practices: a practical engineer’s approach. in Proceedings of the SME, Rapid excavation and tunnelling conference, Washington, DC, USA. 2013.
20. **Barton N.** Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2002, Vol. 39, No. 2. — P. 185–216.
21. **Grimstad E.** Updating the Q-system for NMT, Proc. Int. Symp. Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagemes, Oslo, Norwegian Concrete Association, 1993. — P. 46–66.
22. **Kirsten H.** Case histories of groundmass characterization for excavatability, Rock classification systems for engineering purposes, 1988.
23. **Peck W.** Determining the stress reduction factor in highly stressed jointed rock, Aust. Geomech, 2000, Vol. 35. — P. 57–60.
24. **Kumar N., Samadhiya N., and Anbalagan R.** Application of rock mass classification systems for tunneling in Himalaya, India, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2004.
25. **Basarir H., Ozsan A., and Karakus M.** Analysis of support requirements for a shallow diversion tunnel at Guledar dam site, Turkey, Eng. Geology, 2005, Vol. 81, No. 2. — P. 131–145.
26. **Rahimi B., Shahriar K., and Sharifzadeh M.** Evaluation of rock mass engineering geological properties using statistical analysis and selecting proper tunnel design approach in Qazvin–Rasht railway tunnel, Tunnelling and underground space technology, 2014, Vol. 41. — P. 206–222.
27. **Sari D. and Pasamehmetoglu A.** Proposed support design, Kaletepe tunnel, Turkey. Eng. Geology, 2004, Vol. 72, No. 3–4. — P. 201–216.
28. **NGI, Using The Q-System, Rock mass classification and support design.** 2015. — 55 p.

*Поступила в редакцию 12/1 2023*

*После доработки 15/1 2025*

*Принята к публикации 16/1 2025*